

Chulalongkorn University

## Chula Digital Collections

---

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

---

2022

การประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรมของการนำแอนไอออนิกแอซัลต์อิมัลชัน  
และน้ำยางพาราเป็นส่วนผสมในแอซัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น

ไม้โท เกษสุวรรณ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Civil Engineering Commons](#), and the [Construction Engineering and Management Commons](#)

---

### Recommended Citation

เกษสุวรรณ, ไม้โท, "การประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรมของการนำแอนไอออนิกแอซัลต์อิมัลชันและน้ำยางพาราเป็นส่วนผสมในแอซัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6529. <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6529>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact [ChulaDC@car.chula.ac.th](mailto:ChulaDC@car.chula.ac.th).

การประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรมของการนำแอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันและน้ำยางพารา  
เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

An Engineering Evaluation of using Anionic asphalt emulsion and Natural rubber in  
Cold-mixed asphalt concrete



Mr. Mightthai Ketsuwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรมของการนำแอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันและน้ำยางพาราเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น
โดย	นายไมไท เกษสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ดร.พงษ์สันต์ บัณฑิตสกุลชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตรเสียม)

ไมไท เกษสุวรรณ : การประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรมของการนำแอนไอออนิก  
แอสฟัลต์อิมัลชันและน้ำยางพาราเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น. ( An  
Engineering Evaluation of using Anionic asphalt emulsion and Natural  
rubber in Cold-mixed asphalt concrete) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.บุญชัย แสง  
เพชรงาม

ในการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์อิมัลชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดได้แก่ ชนิดประจุไฟฟ้า  
เป็นบวก (Cationic Asphalt Emulsion) และ ชนิดประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Anionic Asphalt  
Emulsion) โดยประจุไฟฟ้าของแอสฟัลต์อิมัลชันสามารถส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างมวลรวมชนิด  
ต่างๆ เนื่องด้วยมวลรวมแต่ละชนิดก็มีประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันไป ในการออกแบบถนนนั้นความชื้น  
ก็เป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงเนื่องจากความชื้นจะทำให้ถนนมีความแข็งแรงที่ลดลง ซึ่งเป็น  
ผลกระทบหลักที่จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น เนื่องจากความชื้นจะทำลายการยึดเกาะระหว่างผิว  
ของวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุมวลรวมจากผิวทางแอสฟัลต์  
คอนกรีต และเพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดลอกของผิวถนนซึ่งอาจก่อให้เกิดผิวทางชำรุดก่อนเวลาอันควร  
งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและประเมินคุณสมบัติด้านความต้านทานการหลุดลอก และ  
คุณสมบัติด้านความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้น โดยใช้การทดสอบ Rolling Bottle  
Test และ Indirect Tensile strength test ซึ่งจะนำแอสฟัลต์อิมัลชันทั้งชนิดประจุบวกและประจุ  
ลบ รวมไปถึงการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นส่วนผสม และใช้มวลรวมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ หินปูนชลบุรี  
หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ โดยในการทดสอบพบว่า แอสฟัลต์อิมัลชันต่างชนิดกันมีผล  
ต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และการเติมน้ำ  
ยางธรรมชาติที่ 10% นั้นสามารถเพิ่มค่าความต้านทานการหลุดลอกของหินปูนทั้ง 2 ชนิดได้แต่จะ  
มีค่าลดลงในการเติม 20% และสำหรับในหินบะซอลต์นั้นมีค่าลดลงทั้ง 10% และ 20% ของการ  
เติมน้ำยางพารา และ จากผลการทดสอบ ITS พบว่าสำหรับหินทั้งสามชนิด เมื่อนำไปใช้งานกับ  
แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกมีค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นสูงกว่า  
แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแคทไอออนิก และสำหรับการเติมน้ำยางพาราที่ 10% ทำให้ค่าความ  
ต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นลดลงเมื่อเทียบกับการที่ไม่เติม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270222921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Anionic Asphalt Emulsion, Cationic Asphalt Emulsion, Asphalt Emulsion, Moisture Damage, Stripping Resistance

Mightthai Ketsuwan : An Engineering Evaluation of using Anionic asphalt emulsion and Natural rubber in Cold-mixed asphalt concrete. Advisor: Assoc. Prof. BOONCHAI SANGPETNGAM, Ph.D.

Asphalt emulsion can be divided into 2 types positively charged (Cationic Asphalt Emulsion) and negatively charged (Anionic Asphalt Emulsion). The electric charge of asphalt emulsion can affect the adhesion between different aggregates. Because each type of aggregate has a different electric charge. In road design moisture is an important factor to consider because Moisture can destroy the adhesion between the aggregate surface and the asphalt. Therefore, this research aims to study and evaluate the properties of stripping resistance and moisture damage resistance properties. Using the Rolling Bottle Test and the Indirect Tensile strength test by using Cationic and Anionic asphalt emulsions and using natural rubber latex (NRL) mixed with three types of aggregates were used. Chonburi limestone, Saraburi limestone, and Buriram basalt. The result was found that Different types of asphalt emulsion had significantly different effects on the stripping resistance of each type of aggregate. The addition of NRL at 10% increased the stripping resistance of both types of limestone but decreased by 20% but in basalt it decreased by 10%. and 20% of the addition of NRL. The ITS test results found that for the three types of rocks mixed with anionic it has higher resistance to moisture damage than cationic type. For the addition of 10% of NRL the resistance to moisture damage is decreased.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม อย่างสูง ที่เมตตาเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ดูแลการทำงานวิจัย ให้คำแนะนำ คำปรึกษาข้อคิดเห็นต่างๆในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งชี้แนะแนวทาง แรงกระตุ้นในการทำงาน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำงานพร้อมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่อย่างดีจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และขอขอบพระคุณต่อคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้แก่ อ.ดร. พงษ์สันต์ บัณฑิตสกุลชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพโรจน์ จิตเสียม กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ซึ่งกรรมการทุกท่านได้ให้คำแนะนำและแง่คิดต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และยังช่วยสนับสนุนสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่สำหรับงานวิจัย

ในการเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ สำหรับการทำวิจัยเพื่อจัดทำวิทยานิพนธ์นั้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ คุณกนกศักดิ์ เพียรธัญกรณ์ จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริษัท สองฝั่งการเกษตร จำกัด รวมถึง คุณเดชา กิตติสุขลักษณ์ จากบริษัท บางกอกไทร์ รีไฟเนอรี จำกัด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยมีความสำนึกในพระคุณของคณาจารย์ทุกท่าน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ นางสาวสุธิดา สว่างผุย นายสมพงษ์ ขำแจ้ง นางสาวรัชดาวรรณ จันทร์เพ็ญแข บิดามารดา ครอบครัว และ เพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและได้สนับสนุนเอาใจใส่ดูแลและให้ความอนุเคราะห์แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษาลุล่วงไปด้วยดี

ไม่ว่า เกษสุวรรณ

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 .....	6
การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 ผลการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	18
2.2.1 แอสฟัลต์ (Asphalt) .....	18
2.2.2 ประเภทของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง .....	19
2.2.2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) .....	19



2.2.2.2	คัทแบคแอสฟัลต์ (Cut back Asphalt) .....	20
2.2.2.3	แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion).....	21
2.2.3	คุณลักษณะแอสฟัลต์กับการใช้งาน .....	25
2.2.3.1	ความเหนียว หรือความแข็ง ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ .....	25
2.2.3.2	การแข็งเปราะตามอายุ (Age hardening).....	25
2.2.3.2	ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature susceptibility) .....	25
2.2.4	องค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต .....	26
2.2.4.1	ความหนาแน่น (Density) .....	26
2.2.4.2	ช่องว่างอากาศ (Air Voids : AV) .....	26
2.2.4.3	ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate: VMA) .....	27
2.2.4.3	ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt Content).....	27
2.2.5	คุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต .....	28
2.2.5.1	เสถียรภาพ และ การไหล (Stability and Flow).....	28
2.2.5.2	ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance).....	29
2.2.5.3	ความสามารถในการแอ่นตัว (Flexibility) .....	29
2.2.5.4	ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance).....	30
2.2.5.5	ความคงทน (Durability).....	30
2.2.5.6	ความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ (Impermeability).....	31
2.2.5	ปัญหาที่เกิดขึ้นบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต .....	31
2.2.5.1	ผิวทางเยิ้ม (Bleeding).....	32
2.2.5.2	ผิวทางเกิดการยุบตัวถาวร (Permanent deformation).....	32
2.2.5.3	การเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Aging) .....	33
2.2.5.4	ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) .....	33

2.2.5.5 การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น (Moisture damage) .....	34
2.2.6 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....	34
2.2.6.1 น้ำยางสด .....	34
2.2.6.2 น้ำยางข้น (Concentrated Latex).....	35
2.2.6.3 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet: RSS) .....	36
2.2.6.4 ยางแท่ง (Standard Thai Rubber: STR).....	37
2.2.6.5 ยางคอมพาวด์ (Compounded Rubber) .....	37
2.2.7 มวลรวม (Aggregates).....	38
2.2.8 พาราสเลอรี่ซีล (Para Slurry Seal) .....	38
2.3 การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต .....	39
2.3.1 การหาค่าคุณสมบัติเชิงปริมาตรของแอสฟัลต์ผสมร้อน .....	39
2.3.2 การทดสอบและการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall Test).....	43
2.3.3 การทดสอบวัสดุโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test).....	50
2.3.4 Point of Zero Charge .....	59
2.4 การยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ .....	61
2.5 วิธีการออกแบบส่วนผสมสำหรับ Cold Mixed (Asphalt Institute).....	62
2.5.1 มวลรวมสำหรับ Cold mixed .....	62
2.5.2 แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับ Cold mixed .....	63
2.5.3 หาปริมาณแอสฟัลต์สำหรับ Cold mixed .....	63
2.5.4 ขั้นตอนการผสมสำหรับ Cold mixed .....	64
2.5.5 ขั้นตอนการบดอัดก้อนตัวอย่างสำหรับ Cold mixed .....	64
บทที่ 3 .....	66
วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	66

3.1 วัสดุต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย .....	66
3.1.1 วัสดุผสมรวม (Aggregate).....	66
3.1.2 แอสฟัลต์ (Asphalt) .....	66
3.1.3 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....	67
3.2 ขั้นตอนและวิธีในการทดสอบ .....	68
3.2.1 ทดสอบค่าความต้านทานการหลุดลอก (Stripping Resistance) .....	68
3.2.1.1 การทดสอบ Rolling Bottle Test (RBT).....	69
3.2.1.2 ทดสอบ X-ray Diffractometer (XRD) .....	72
3.2.1.3 การทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติ Statistical hypothesis testing .....	74
3.2.2 การทดสอบ Indirect Tensile Strength Test (ITS) .....	74
3.2.2.1 การเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้น .....	74
3.2.2.2 การทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้น.....	80
3.3 แนวทางในการดำเนินงานวิจัย .....	83
3.3.1 แผนผังสำหรับการดำเนินงานวิจัย.....	83
3.3.2 จำนวนก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ .....	83
3.3.1.1 จำนวนตัวอย่าง Rolling Bottle Test (RBT) .....	83
3.3.1.2 จำนวนตัวอย่าง Indirect Tensile Strength Test (ITS) .....	85
3.3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ .....	88
3.3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับ RBT .....	88
3.3.3.2 การเตรียมก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบ ITS.....	93
บทที่ 4 .....	102
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ .....	102
4.1.1 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนชลบุรี.....	102
4.1.2 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนสระบุรี.....	103

4.1.3 ผลการทดสอบ XRD ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์ .....	103
4.2 ทดสอบและวิเคราะห์ประจุไฟฟ้าของหินด้วยค่า pH .....	104
4.3 วิเคราะห์และประเมินผลสำหรับการทดสอบ Rolling Bottle Test (RBT).....	105
4.3.1 ประเมินผลสำหรับการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ RBT .....	105
4.3.2 ผลการทดสอบ RBT หินปูนชลบุรี .....	107
4.3.3 ผลการทดสอบ RBT หินปูนสระบุรี .....	110
4.3.4 ผลการทดสอบ RBT หินบะซอลต์บุรีรัมย์ .....	113
4.3.5 วิเคราะห์ และ เปรียบเทียบผลการทดสอบ RBT.....	117
4.3.5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบด้วย ANOVA test .....	117
4.3.5.2 วิเคราะห์ผล RBT ด้วย Multiple comparison .....	119
4.3.5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบ RBT ของหินทั้งสามชนิด.....	120
4.4 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength Test (ITS).....	122
4.4.1 ผลการเตรียมก้อนตัวอย่าง ITS .....	123
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ก้อนตัวอย่าง.....	124
4.4.2.1 ขนาดของก้อนตัวอย่าง.....	124
4.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่าง.....	127
4.4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density) .....	130
4.4.2.4 ผลการวิเคราะห์ช่องว่างอากาศ (Air Void).....	134
4.4.2.5 วิเคราะห์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ (Coating) .....	138
4.4.3 ผลการทดสอบ ITS Ratio.....	144
4.5 วิเคราะห์สัมพันธ (Correlation) ของตัวแปรต่างๆของการทดสอบ .....	151
4.6 วิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อความเสียหายเนื่องจากความชื้น .....	153
บทที่ 5 .....	156
บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	156

5.1 สรุปผลการวิจัย .....	157
5.1.1 สรุปผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	157
5.1.2 สรุปผลการทดสอบ .....	159
5.2 ข้อจำกัดในงานวิจัย .....	160
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	161
5.4 แนวทางการปรับปรุงในอนาคต.....	162
ภาคผนวก.....	163
(ผลการทดสอบ XRD Chonburi limestone) .....	163
(ผลการทดสอบ XRD Saraburi limestone).....	164
(ผลการทดสอบ XRD Basalt Buriram) .....	165
(ขนาดก้อนตัวอย่าง สำหรับการทดสอบ ITS).....	166
(ข้อมูลน้ำหนักก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบ ITS).....	167
(ข้อมูลการหา Bulk Density: Gmb สำหรับก้อนตัวอย่าง ITS) .....	168
(ปริมาณน้ำสำหรับก้อนตัวอย่าง ITS).....	169
(ข้อมูลการทดสอบ ITS).....	170
(ข้อมูลสำหรับการทดสอบค่า pH PZC).....	171
(น้ำหนักหินและขนาดคละสำหรับการทดสอบ Sieve Analysis).....	171
บรรณานุกรม.....	173
ประวัติผู้เขียน .....	177

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 พลังงานบดอัดด้วยวิธีมาร์แชล (จำนวนครั้ง/ด้าน) .....	46
ตารางที่ 2 เกณฑ์มาตรฐานค่าพารามิเตอร์ของมาร์แชล.....	50
ตารางที่ 3 ขนาดผลของวัสดุผสมรวมตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532.....	76
ตารางที่ 4 ขนาดผลของวัสดุผสมรวมตามมาตรฐาน ทล.-ม. 407/2542.....	76
ตารางที่ 5 แสดงถึงจำนวนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ RBT .....	87
ตารางที่ 6 แสดงถึงจำนวนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS .....	88
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนชลบุรี .....	102
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนสระบุรี.....	103
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบ XRD ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์ .....	103
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบวัดค่า pH ของหินชนิดต่างๆในสารละลายที่มี pH ต่างๆ .....	104
ตารางที่ 11 ผลการคำนวณผลต่าง pH (initial) – pH (final) ของหินชนิดต่างๆในน้ำ .....	104
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบ RBT ของหินปูนชลบุรี.....	108
ตารางที่ 13 รูปภาพตัวอย่างผลการทดสอบ RBT หินปูนชลบุรี.....	108
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบ RBT ของหินปูนสระบุรี.....	111
ตารางที่ 15 รูปภาพตัวอย่างผลการทดสอบ RBT หินปูนสระบุรี.....	111
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบ RBT ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์.....	114
ตารางที่ 17 รูปภาพตัวอย่างผลการทดสอบ RBT หินบะซอลต์บุรีรัมย์.....	114
ตารางที่ 18 ตัวแปรต่างๆ ในการทดสอบ ANOVA.....	118
ตารางที่ 19 ผลการทดสอบ ANOVA .....	118
ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ Multiple comparison (LSD) .....	119
ตารางที่ 21 ขนาดของก้อนตัวอย่างของหินปูนชลบุรี.....	124

ตารางที่ 22 ขนาดของก้อนตัวอย่างของหินปูนสระบุรี.....	125
ตารางที่ 23 ขนาดของก้อนตัวอย่างของหินบะซอลต์บุรีรัมย์.....	126
ตารางที่ 24 ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างของหินปูนชลบุรี.....	127
ตารางที่ 25 ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างของหินปูนสระบุรี.....	128
ตารางที่ 26 ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างของหินบะซอลต์บุรีรัมย์.....	129
ตารางที่ 27 ค่า Bulk Density ของก้อนตัวอย่างสำหรับหินปูนชลบุรี.....	131
ตารางที่ 28 ค่า Bulk Density ของก้อนตัวอย่างสำหรับหินปูนสระบุรี.....	132
ตารางที่ 29 ค่า Bulk Density ของก้อนตัวอย่างสำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์.....	133
ตารางที่ 30 ผลการคำนวณค่า Maximum specific gravity (Gmm) ของตัวอย่าง.....	135
ตารางที่ 31 ผลการคำนวณค่า %Air Void ในก้อนตัวอย่างจากหินปูนชลบุรี.....	135
ตารางที่ 32 ผลการคำนวณค่า %Air Void ในก้อนตัวอย่างจากหินปูนสระบุรี.....	136
ตารางที่ 33 ผลการคำนวณค่า %Air Void ในก้อนตัวอย่างจากหินบะซอลต์บุรีรัมย์.....	137
ตารางที่ 34 ผลการประเมินความครอบคลุมของแอสฟัลต์.....	143
ตารางที่ 35 ผลการทดสอบ ITS ของหินปูนชลบุรี.....	145
ตารางที่ 36 ผลการทดสอบ ITS ของหินปูนสระบุรี.....	147
ตารางที่ 37 ผลการทดสอบ ITS ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์.....	149
ตารางที่ 38 ตารางวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ทดสอบ.....	151
ตารางที่ 39 ผลการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ ITS Ratio.....	153

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 กราฟแสดงถึงผลการทดลองการคืนตัว (Elastic recovery).....	10
รูปที่ 2 สมบัติทางกายภาพของกากแอสฟัลต์อิมัลชันโดยใช้ความเร็วการผสมต่างกัน .....	15
รูปที่ 3 สมบัติทางกายภาพของกากแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้เวลาผสมต่างกัน .....	16
รูปที่ 4 ศักย์ซีตาของมวลรวมต่างๆที่สารละลาย pH ต่างกัน.....	17
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ซีตาที่ค่า pH ต่างๆ สำหรับแอสฟัลต์ Penetration grade 70/100 .....	17
รูปที่ 6 แสดงถึงประจุระหว่าง Cationic emulsified asphalt และ มวลรวม .....	22
รูปที่ 7 แสดงถึงประจุระหว่าง Anionic emulsified asphalt และ มวลรวม.....	23
รูปที่ 8 ภาพแสดงกระบวนการจับตัวและระเหยออก (ที่มา:Tipco Asphalt).....	24
รูปที่ 9 แสดงถึงสภาพที่เป็นเม็ดกระจายตัวของ HMA (Rice sample of HMA).....	40
รูปที่ 10 แสดงถึงการใช้ขวด Pycnometer ในการหาค่า Maximum specific gravity ของ HMA	41
รูปที่ 11 ผังขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล.....	44
รูปที่ 12 การหาค่า Stability และ Flow จากกราฟตามนิยาม ASTM D6927-15 .....	48
รูปที่ 13 กราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยวิธีการ ทดสอบแบบ Marshall.....	49
รูปที่ 14 การให้น้ำหนักกระทำของก้อนตัวอย่าง และลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test .....	51
รูปที่ 15 แสดงลักษณะการกระจายของ Tensile Stress และ Compressive Stress ในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test .....	53
รูปที่ 16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Load-Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test .....	55
รูปที่ 17 ลักษณะของ Repeated stress ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต .....	58



รูปที่ 18	ประจุไฟฟ้าสองชั้น (EDL) รอบอนุภาคที่มีประจุลบในสารแขวนลอยในน้ำ.....	61
รูปที่ 19	เกณฑ์กำหนดสำหรับขนาดคะแนน Dense grade สำหรับ Cold mixed .....	62
รูปที่ 20	ภาพประกอบแผนผังสำหรับการผสมแอสฟัลต์อิมัลชันกับน้ำยางพารา .....	68
รูปที่ 21	แนวทางและวัสดุในการทดสอบ Rolling bottle test .....	70
รูปที่ 22	Rolling Bottle Machine .....	71
รูปที่ 23	ตัวอย่างหลังจากทำการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง .....	71
รูปที่ 24	ตัวอย่างเกณฑ์ในการประเมินค่าความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวมวลรวม .....	72
รูปที่ 25	ขนาดก้อนตัวอย่าง และ IDT Strength-Loading Fixture (ASTM D6931-12) .....	75
รูปที่ 26	แสดงขนาดคะแนนและสัดส่วนของมวลรวมในส่วนผสม .....	77
รูปที่ 27	กราฟขนาดคะแนนของมวลรวมตามเกณฑ์ของกรมทางหลวงกำหนด .....	77
รูปที่ 28	ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะแห้ง .....	79
รูปที่ 29	ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะเปียก .....	79
รูปที่ 30	Loading Strip สำหรับทดสอบ ITS .....	80
รูปที่ 31	เครื่องในการทดสอบ ITS และ ลักษณะการทดสอบก้อนตัวอย่าง .....	81
รูปที่ 32	แนวทางในการดำเนินงานวิจัย .....	83
รูปที่ 33	แบ่งมวลรวมอย่างน้อย 600 g .....	89
รูปที่ 34	การเติมอิมัลชันลงในส่วนผสม .....	89
รูปที่ 35	แอสฟัลต์ครอบคลุมมวลรวมทั้งหมด .....	90
รูปที่ 36	ตัวอย่างทิ้งไว้ระหว่างช่วงเวลา 12 ถึง 64 ชั่วโมง .....	91
รูปที่ 37	แบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 ส่วน .....	91
รูปที่ 38	ตัวอย่างในขวดก่อนทำการเข้าเครื่องทดสอบ .....	92
รูปที่ 39	เครื่องกลิ้งขวดสำหรับการทดสอบ RBT .....	92
รูปที่ 40	ตัวอย่างหลังจากทำการทดสอบที่ 6 ชั่วโมง .....	93
รูปที่ 41	ตัวอย่างหลังจากทำการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง .....	93

รูปที่ 42 แสดงขนาดคละและสัดส่วนของมวลรวมในส่วนผสม .....	94
รูปที่ 43 กราฟขนาดคละของมวลรวมตามเกณฑ์ของกรมทางหลวงกำหนด .....	94
รูปที่ 44 การทดสอบหาปริมาณกากที่เหลือจากการระเหย .....	95
รูปที่ 45 การผสมน้ำยางพาราลงในแอสฟัลต์อิมัลชัน .....	96
รูปที่ 46 ตัวอย่างที่ผสมก่อนทำการบดอัด .....	97
รูปที่ 47 เตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส .....	98
รูปที่ 48 ก่อนตัวอย่างหลังจากอบอัด .....	98
รูปที่ 49 นำก้อนตัวอย่างออกจากโม่หลังจากอบ 2 วัน .....	99
รูปที่ 50 ก่อนตัวอย่างสำหรับนำไปทดสอบ ITS .....	99
รูปที่ 51 ก่อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะแห้ง .....	100
รูปที่ 52 ก่อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะเปียก .....	100
รูปที่ 53 กราฟ Point of zero charge (PZC) ของหินทั้ง 3 ชนิด .....	105
รูปที่ 54 ผสมแคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันกับยางพาราที่ 10% .....	106
รูปที่ 55 ผสมแคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันกับยางพาราที่ 10% .....	106
รูปที่ 56 การเปรียบเทียบระหว่างหินสามชนิด ของการนำแคทไอออนิกผสมกับน้ำยางพาราที่ 10% โดยที่งานด้านบนคือหินสระบุรี ด้านซ้ายคือหินชลบุรี ด้านขวาคือหินบุรีรัมย์ .....	107
รูปที่ 57 ผลการทดสอบ RBT ที่เวลา 6 ชม. และ 24 ชม. ของหินปูนชลบุรี .....	110
รูปที่ 58 ผลการทดสอบ RBT ที่เวลา 6 ชม. และ 24 ชม. ของหินปูนสระบุรี .....	113
รูปที่ 59 ผลการทดสอบ RBT ที่เวลา 6 ชม. และ 24 ชม. ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์ .....	116
รูปที่ 60 เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนชลบุรี .....	120
รูปที่ 61 เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนสระบุรี .....	121
รูปที่ 62 เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินบะซอลต์บุรีรัมย์ .....	121
รูปที่ 63 ตัวอย่างการผสมหินปูนชลบุรีที่มีการเติมน้ำยางพาราในแคทไอออนิก .....	123
รูปที่ 64 ก่อนตัวอย่างที่สถานะเปียกในกรณี (L2 CAT 0%NR) .....	123

รูปที่ 65 ความสูงเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม .....	126
รูปที่ 66 กราฟแสดงค่า Water content ที่เหลืออยู่ในก้อนตัวอย่าง .....	130
รูปที่ 67 กราฟแสดงค่า Bulk Density เฉลี่ยของก้อนตัวอย่างสำหรับหินแต่ละประเภท .....	134
รูปที่ 68 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Gmm ของแต่ละส่วนผสม.....	138
รูปที่ 69 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ในก้อนตัวอย่างของหินปูนชลบุรี .....	139
รูปที่ 70 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ในก้อนตัวอย่างของหินปูนสระบุรี.....	139
รูปที่ 71 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ในก้อนตัวอย่างของหินปะชอลต์บุรีรัมย์ .....	140
รูปที่ 72 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ของตัวอย่าง Loose sample ของหินปูนชลบุรี.....	141
รูปที่ 73 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ของตัวอย่าง Loose sample ของหินปูนสระบุรี .....	141
รูปที่ 74 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ของตัวอย่าง Loose sample ของหินปะชอลต์บุรีรัมย์ .....	142
รูปที่ 75 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ในส่วนผสมต่างๆ .....	144
รูปที่ 76 กราฟแสดงค่า ITS เฉลี่ยของแต่ละส่วนผสมสำหรับหินปูนชลบุรี .....	146
รูปที่ 77 กราฟแสดงค่า ITS เฉลี่ยของแต่ละส่วนผสมสำหรับหินปูนสระบุรี .....	148
รูปที่ 78 กราฟแสดงค่า ITS เฉลี่ยของแต่ละส่วนผสมสำหรับหินปะชอลต์บุรีรัมย์ .....	150
รูปที่ 79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Coating กับ ITS .....	152
รูปที่ 80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % Bitumen coverage กับ ITS .....	153
รูปที่ 81 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นของแต่ละส่วนผสม .....	154

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบการขนส่งถือเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะการขนส่งทางถนน ซึ่งเป็นการขนส่งที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากที่สุดในประเทศไทย โดยที่ถนนในประเทศไทยส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ถนนคอนกรีต และ ถนนลาดยางหรือเรียกว่าถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งในประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมก่อสร้างเป็นถนนประเภทแอสฟัลต์คอนกรีต ในการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นการผสมกันระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์เพื่อมาใช้ในการทำผิวทาง ส่วนใหญ่แล้วจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่การผสมร้อน และการผสมเย็น โดยการผสมร้อนนั้นจำเป็นต้องมีการใช้ความร้อนสูงในการใช้งาน ซึ่งจะใช้เครื่องมือเยอะและมีความยุ่งยากในการทำงานมากกว่าการใช้วิธีผสมแบบเย็น ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนในการใช้งาน รวมถึงยังสามารถทำงานได้ภายใต้สภาพอากาศที่มีฝนตกได้ โดยยางมะตอยที่ใช้ในการผสมแบบเย็นจะใช้เป็นรูปแบบยางน้ำ หรือ แอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งแอสฟัลต์อิมัลชันนั้นจะแบ่งออกเป็นสองประเภท 2 ได้แก่ แคทไอออนิก (Cationic) โดยจะเป็นประจุบวก และ แอนไอออนิก (Anionic) โดยจะเป็นประจุลบ ในประเทศไทยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมใช้เป็นแอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวก ซึ่งแอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกนั้นยังไม่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและยังไม่มีมาตรฐานมารองรับมากนักในประเทศไทย จึงควรมีการนำแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกมาศึกษาเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำมาใช้งานสำหรับประเทศไทย

น้ำยางธรรมชาติ Natural Rubber Latex (NRL) เป็นผลิตผลที่ได้จากท่อน้ำเลี้ยงอาหารในส่วนเปลือกของต้นยางพารา สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์ยางชนิดต่างๆ สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ตั้งแต่อุตสาหกรรมหนัก เช่น การผลิตยางรถยนต์ ไปจนถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในครัวเรือน น้ำยางที่ได้จากต้นยางพารามีคุณสมบัติบางอย่างที่ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) ไม่สามารถทำให้เหมือนได้ สำหรับในงานทางแล้วการนำยางธรรมชาติมาใช้เป็นส่วนผสมนั้นได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้นทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย โดยเมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านวิศวกรรมในหลายๆด้าน เช่น ค่าการยุบตัวถาวร, ความต้านทานการเกิดร่องล้อ, ความต้านทานการแตกร้าว เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงนำยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยางข้น (Concentrated Latex) มาใช้เป็นส่วนผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันเพื่อดูถึงความเหมาะสม และ ประเมินคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของการนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้งานกับ

แอสฟัลต์อิมัลชันทั้ง 2 ชนิด รวมถึงการนำมาผสมแอสฟัลต์อิมัลชันกับน้ำยางพาราจะทำให้แอสฟัลต์อิมัลชันมีประจุที่เปลี่ยนแปลงไป จึงต้องมีการนำมาพิจารณาคุณสมบัติทางวิศวกรรมในการนำน้ำยางพารามาใช้งานด้วย สำหรับน้ำยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่หาง่ายในประเทศไทย และยังเป็นการส่งเสริมให้มีการนำยางพารามาใช้งานภายในประเทศมากขึ้น

เนื่องจากมวลรวมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของหิน และเนื่องด้วยมวลรวมแต่ละแหล่งหรือแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติและองค์ประกอบที่แตกต่างกันไปทำให้ในการนำมาใช้งานกับแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมไม่เหมือนกัน โดยที่มวลรวมนั้นจะมีประจุไฟฟ้าบนผิวที่แตกต่างกันไป ทำให้ส่งผลต่อค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่มีทั้งประจุไฟฟ้าบวกและลบซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของการนำมาใช้งานเป็นวัสดุในงานทาง โดยหินที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย หินปูนจากจังหวัดชลบุรี หินปูนจากจังหวัดสระบุรี และ หินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์ เนื่องจากหินประเภทเหล่านี้เป็นหินที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุในงานทางของประเทศไทย และสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย โดยการใช้หินปูนที่แตกต่างกันของสองแหล่งนั้นเนื่องจากถึงแม้ว่าจะเป็นหินปูนเหมือนกันแต่จะมีคุณสมบัติและองค์ประกอบที่แตกต่างกันส่งผลให้การนำหินปูนจากแต่ละแหล่งมาใช้งานอาจจะทำให้มีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของถนนแตกต่างกันได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้หินปูนที่แตกต่างกันจากสองแหล่งที่มา เพื่อนำมาประเมินคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของการนำมาใช้งานด้วย

ส่วนใหญ่แล้วในประเทศไทย แอสฟัลต์อิมัลชันจะไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งานในการทำผิวถนน เนื่องจากสามารถรับแรงกระทำได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับยางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแอสฟัลต์อิมัลชันนั้นจะมีความเหมาะสมกว่าเมื่อนำมาใช้งานในส่วนของการบะซอมผิวทางหรืองานที่ไม่ได้ต้องรับน้ำหนักมากนัก เช่น ลาดจอดรถ หรือ ผิวทางที่มีการจราจรที่น้อย งานวิจัยนี้จึงไม่มุ่งเน้นที่จะศึกษาในด้านกำลังรับแรงของวัสดุ แต่จะไปมุ่งเน้นในเรื่องของคุณสมบัติด้านการยึดเกาะระหว่างหินกับแอสฟัลต์ และคุณสมบัติด้านความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้น และโดยปกติแล้วในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่จะใช้งานแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นชนิดแคทไอออนิกซึ่งจะมีความยุ่งยากในการนำมาใช้งานกับหินชนิดต่างๆในประเทศไทย เนื่องจากแคทไอออนิกนั้นจะมีความเหมาะสมกับหินบางแหล่งเท่านั้น โดยสำหรับการนำไปใช้งานจริงนั้นจำเป็นต้องใช้แหล่งหินเดิมที่เคยนำมาผสมกับแคทไอออนิก สำหรับนำมาใช้งานซึ่งเมื่อมีการต้องใช้งานในสถานที่ที่ไกลจากแหล่งหินเดิมจะมีความยากลำบากมากขึ้นในการนำไปใช้งาน โดยที่แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกนั้นอาจจะมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานกับหินในแหล่งต่างๆที่มากกว่าแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแคทไอออนิก

จากที่กล่าวมาข้างต้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำแอสฟัลต์อิมัลชันมาประเมินความเหมาะสมและประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมของการนำแอสฟัลต์อิมัลชันทั้ง 2 ชนิด มาใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยจะใช้แอสฟัลต์อิมัลชันกับมวลรวมทั้ง 3 ชนิดได้แก่ หินปูนจากจังหวัดชลบุรี หินปูนจากจังหวัดสระบุรี และ หินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์ รวมถึงการนำยางน้ำพารามาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์อิมัลชันด้วย โดยในการวิจัยนั้นจะทำการทดสอบ Rolling Bottle Test (RBT) เพื่อประเมินค่าความต้านทานการหลุดลอกระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน และ ใช้การทดสอบ Indirect Tensile Strength (ITS) เพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้น เนื่องจากในการออกแบบถนนนั้นความชื้นก็เป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงเนื่องจากความชื้นจะทำให้ถนนมีความแข็งแรงที่ลดลง โดยการทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้นนั้นไม่ใช่ความเสียหายของถนน แต่เป็นผลกระทบหลักที่จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น เพราะความชื้นจะทำลายการยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุมวลรวมจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมมีผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพของถนนแอสฟัลต์ และเพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดลอกของผิวถนนซึ่งอาจก่อให้เกิดผิวทางชำรุดก่อนเวลาอันควร จึงควรมีการประเมินคุณสมบัติเหล่านี้เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับนำไปใช้งานจริงกับถนนแอสฟัลต์ของประเทศไทย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินความเข้ากันได้ของวัสดุมวลรวมชนิดต่าง ๆ กับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก
2. เพื่อประเมินคุณสมบัติด้านการยึดเกาะของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกกับแคทไอออนิก และใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นส่วนผสม
3. เพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นของการใช้แอนไอออนิกกับแคทไอออนิกและใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นส่วนผสม

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 วัสดุแอสฟัลต์ที่นำมาศึกษาเป็นวัสดุแอสฟัลต์อิมัลชันประเภท แอนไอออนิก (Anionic asphalt emulsion) และ แคทไอออนิก (Cationic asphalt emulsion)

1.3.2 หินที่นำมาใช้ในการศึกษานี้เป็นตัวแทนของมวลรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างทางโดยทั่วไปในประเทศไทย โดยประกอบด้วย หินปูนจากจังหวัดชลบุรี หินปูนจากจังหวัดสระบุรี และ หินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์

1.3.3 ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ ยางพาราที่อยู่ในรูปของน้ำยางข้น (Concentrated Latex) ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งเท่ากับ 60% ตามมาตรฐาน มอก.980-2533

1.3.4 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมออกแบบตามมาตรฐาน ทล. -ม. 407/2542 และ ทล. -ม. 408/2532

1.3.5 การทดสอบเพื่อประเมินการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม จะใช้การทดสอบ ขวดกลิ้ง (Rolling Bottle Test) ตามมาตรฐาน EN 12697-11 (2012) Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen.

1.3.6 การทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อความชื้น (Moisture Damage) จะใช้การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM D6931 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures และ ตามมาตรฐาน ASTM D4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixture

1.3.7 วิธีการทดลองเตรียมก้อนตัวอย่างในการทดสอบความต้านทานต่อความชื้นจะเตรียมด้วยวิธีมาร์แชลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D6926 Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall

1.3.8 การทดสอบเพื่อคุณสมบัติและองค์ประกอบของหินของหิน จะใช้การทดสอบ X-ray Diffractometer (XRD) และ การวัดค่า pH สำหรับสร้างกราฟ Point of zero charge (PZC) เพื่อประเมินประจุบนพื้นผิวของหิน.

1.3.9 การวิเคราะห์ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS เนื่องจาก ความหนาแน่น ขนาด ปริมาณน้ำภายในก้อนตัวอย่าง และ %Air void จะส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆของก้อนตัวอย่าง จึงควรมีการประเมินในส่วนนี้สำหรับการทดสอบ ITS

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รับองค์ความรู้ในเรื่องของการนำแอสฟัลต์อิมัลชันมาใช้งานกับมวลรวมในประเทศไทย และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อให้เหมาะสมในการนำมาใช้งานในงานทางของประเทศไทย

1.4.2 เกิดการวิจัยและพัฒนาอันเป็นองค์ความรู้ในการศึกษาการใช้วัสดุท้องถิ่นและวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ ในประเทศมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มแก่อสฟัลต์เพื่อใช้ในงานทางจริง และเป็นพื้นฐานในการค้นคว้าหาวัสดุอื่นๆมาพัฒนาในแนวทางเดียวกันต่อไป

1.4.3 ช่วยให้ทราบถึงการผสมยางธรรมชาติกับวัสดุแอสฟัลต์อิมัลชันนั้น จะทำให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นหรือไม่อย่างไร เพื่อนำไปใช้ในงานซ่อมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตให้ดีขึ้นในอนาคต





## บทที่ 2

### การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการรวบรวมองค์ความรู้ต่างๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย โดยจะมุ่งเน้นในการศึกษาเกี่ยวกับการนำยางธรรมชาติมาทำการผสมเข้ากับแอสฟัลต์เพื่อนำมาใช้ในงานทาง

#### 2.1 ผลการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาและรวบรวมเกี่ยวกับงานวิจัยต่างๆ ในอดีตที่มีส่วนเกี่ยวข้อง โดยเป็นการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางที่มีการนำยางธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ มาทำการผสมกับแอสฟัลต์เพื่อนำมาใช้ในงานทาง ทั้งในส่วนของการที่ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการและในส่วนของการนำไปใช้งานจริงในสนาม ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Unsiwilai & Sangpetngam (2018) ได้ทำการศึกษาศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการยุบตัวถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดความเสียหายแบบยุบตัวในแนวร่องล้อที่เป็นรูปแบบความเสียหายหลักของถนนในประเทศไทย โดยการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์มาผสมเข้ากับยางบด (Crumb Rubber) เรียกว่า Crumb Rubber Modified Binder (CRMB) โดยใช้วิธีการผสมแบบแห้ง (Dry process mix) ซึ่งการผสมระหว่างยางบดกับแอสฟัลต์ซีเมนต์มีข้อจำกัดคือความยุ่งยากในขั้นตอนการผสมยางบดเข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางในการผสม โดยงานวิจัยนี้จะใช้เศษยางบดที่มีขนาดอยู่ในระดับเดียวกับหินย่อยมาผสมและแทนที่หินย่อยที่อยู่ในมวลรวม ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใช้เป็นวิธี Marshall Mix Design โดยเป็นส่วนผสมที่มีขนาดละเอียดแบบแน่น (Dense Graded) และแบบช่องว่าง (Gap Graded) ตามข้อกำหนดสำหรับการก่อสร้างชั้นผิวทางส่วนผสมแต่ละรูปแบบขนาดละเอียดสนใจปัจจัยด้านขนาดยางบด 3 ขนาด คือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 16 เบอร์ 30 และผ่านตะแกรงเบอร์ 30 โดยแต่ละขนาดจะใช้ปริมาณแทนที่หินย่อยในสัดส่วน 1% และ 2% ของปริมาตรมวลรวมทั้งหมด และพิจารณาประสิทธิภาพความต้านทานการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการทดสอบ Dynamic Creep ด้วยเครื่อง Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) และการทดสอบการยุบตัวด้วยเครื่อง Wheel Tracking โดยผลการทดสอบ Dynamic Creep พบว่าการผสมเศษยางบดในแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 รูปแบบขนาดละเอียดไม่ได้ส่งผลให้มีความแตกต่างของผลการทดสอบ Dynamic Creep อย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่สามารถบ่งบอกการ

เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการต้านทานการยุบตัวได้จากการทดสอบ Dynamic Creep ตามเงื่อนไขที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ และด้านผลของการทดสอบการยุบตัวด้วยเครื่อง Wheel Tracking จากการพิจารณาค่า Wheel Tracking Slope (WTS) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 รูปแบบขนาดคละมีแนวโน้มเดียวกัน คือ ขนาดยางบดที่เล็กลงจะเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการยุบตัวถาวรที่ดีขึ้น โดยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 จะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุด และปริมาณของยางบดที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นเช่นกัน โดยการผสมยางบดในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวมจะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dene Graded ส่วนผสมที่มีเศษยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ปริมาณ 2% โดยปริมาตรมวลรวมมีความต้านทานการยุบตัวดีที่สุด โดยมีค่า WTS เท่ากับ 0.04 มิลลิเมตรต่อ1000 รอบ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าคิดเป็น 2.10 เท่า ของส่วนผสมที่ใช้อ้างอิง(ไม่ผสมยางบด) ที่มีค่า WTS เท่ากับ 0.09 มิลลิเมตรต่อ1000 รอบ และสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded ส่วนผสมที่มีเศษยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ด้วยสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวมมีความต้านทานการยุบตัวได้ดีที่สุด โดยมีค่า WTS เท่ากับ 0.12 มิลลิเมตรต่อ1000 รอบ โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าคิดเป็น 3.95 เท่า ของส่วนผสมที่ไม่ผสมยางบด

H. Silimanotham & B. Sangpetngam (2020) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มเศษยางพาราบดระหว่างขั้นตอนการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยกระบวนการผสมแบบแห้งโดยมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานการเสียรูปถาวรจากการผสมเศษยางพาราบดด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดสอบเริ่มจากการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธีมาร์แชลล์ โดยมีส่วนผสมพื้นฐานประกอบด้วยมวลรวมชนิดหินปูนและแอสฟัลต์เกรด Pen 60/70 ในปริมาณ 5.4% โดยน้ำหนักส่วนผสม หลังจากนั้นผสมยางพาราบดเข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีผสมแบบกระจายตัวและวิธีแทรกชั้นยางพารา ในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวม ส่วนผสมจากแต่ละรูปแบบถูกบดอัดเป็นทรงกระบอกตามข้อกำหนดการทดสอบด้วยเครื่องบดอัดแบบโจราทอรี แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง คือ กำลังรับดึงทางอ้อม โมดูลัสยืดหยุ่น และการต้านทานการไหล ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมเศษยางพาราบดผสมเข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตทุกด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมรรถนะการต้านทานการไหลซึ่งเกี่ยวเนื่องกับอายุการใช้งานของผิวทาง โดยการเติมยางพาราบดแบบกระจายตัวมีประสิทธิภาพมากที่สุด และมีความซับซ้อนต่ำในกระบวนการผลิตส่วนผสมและการก่อสร้างสายทาง โดยมีการใช้ปริมาณยางพาราใน

ส่วนผสมมากกว่าวิธีอื่น ๆ และมีประสิทธิภาพการต้านทานการไหลที่ดีกว่าส่วนผสมรูปแบบปกติ 3 เท่า

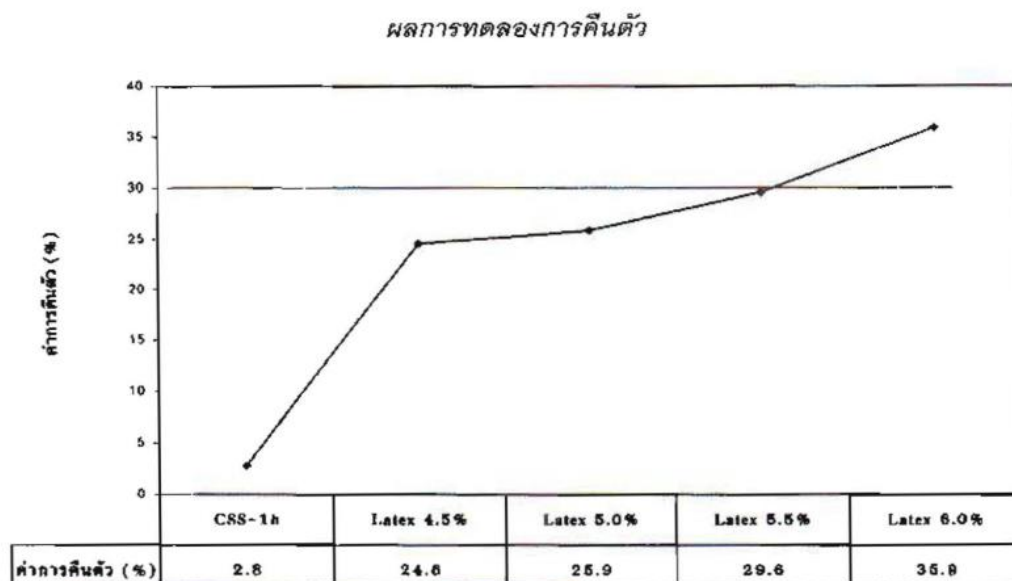
N. Tantiworawit (2003) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางธรรมชาติหรือยางพาราในลักษณะ ของน้ำยางข้นเป็นสารผสมเพิ่ม รวมทั้งศึกษาหาปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมของน้ำยางข้นในการผสม กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ในการศึกษานี้ได้ใช้วัสดุเชื่อมประสาน 3 ชนิด ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาชนิดเกรด 60-70 วัสดุ Natural Rubber Asphalt (NRA) ที่ได้จากการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาชนิดเกรด 60-70 ผสมกับน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia : HA) ในปริมาณ 1-14% โดยน้ำหนักรวม และวัสดุ Polymer Modified Asphalt (PMA) จากนั้นนำวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดไปผสมกับวัสดุมวลรวมประเภทหินปูนเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ รวมทั้งประสิทธิภาพในการใช้งาน เช่น แรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว ความล้าการยุบตัวถาวร และการหลุดลอก จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุ NRA มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา โดยวัสดุ NRA สามารถช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพ ค่าแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิสูง และลดการหลุดลอก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติการต้านทานต่อความล้า และด้านการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ดีขึ้นกว่า 3 เท่าแล้ว ทำให้สรุปได้จากการศึกษานี้ว่าปริมาณน้ำยางข้นที่เหมาะสมในการผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์คือ 9% โดยน้ำหนักรวม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PMA แล้ว วัสดุ PMA ยังคงแสดงคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุ NRA อย่างไรก็ตาม การใช้อย่างธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรภายในประเทศเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในงานทางก็ยังคงมีความเหมาะสมอยู่ เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานนานขึ้นอีกทั้งยังใช้ปริมาณในการผสมแอสฟัลต์ คอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้ช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาผิวทางได้ในระยะยาว

สุขาวรรณ ชูณรงค์ วีระเกษตร สอนผกา และ วชิรินทร์ วิทยกุล (2018) งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย น้ำยางพาราธรรมชาติร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7 และ 10 วันตามลำดับในห้องปฏิบัติการซึ่งทำการทดสอบ มาร์แชลล์ เพื่อหาค่าเสถียรภาพ และการไหลของตัวอย่างยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอน แต่ละ

วิธีการปรับปรุงคุณภาพจากผลการทดสอบพบว่า ยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอน ผสมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของยางมะตอยผสมเย็น สำเร็จรูปที่มีอายุบ่ม 7 และ 10 วันตามลำดับมีค่าเสถียรภาพ (Stability มีค่าเท่ากับ 1821.17 lb. และ 1932.82 lb. ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของยางมะตอยผสมร้อน (Hot Mixed Asphalt; 1800 lb.) และมีค่าการไหลเท่ากับ 4, 4, 6 และ 6 ตามลำดับ และจากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ ค่าความหนาแน่นและค่า Air Void ของยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนไม่แปรผันตามปริมาณน้ำยางพาราและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ค่าเสถียรภาพและค่าการไหลของยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนแปรผันตามปริมาณน้ำยางพาราและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติมีค่า Air Void สูงกว่ายางมะตอยผสมร้อน และยางมะตอยผสมยางพาราธรรมชาติชนิดร้อนตามลำดับ ยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติมีค่าการไหลต่ำกว่ายางมะตอยผสมร้อน และยางมะตอยผสมยางพาราธรรมชาติชนิดร้อนตามลำดับ ยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติที่อายุการบ่ม 7 และ 10 วัน ตามลำดับ มีค่าเสถียรภาพสูงกว่ายางมะตอยผสมร้อน แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่ายางมะตอยผสมยางพาราธรรมชาติชนิดร้อน น้ำยางพาราธรรมชาติมีส่วนช่วยในการเพิ่มการยึดเกาะที่ดี มีแรงต้านทานและความคงทนที่มากขึ้น เนื่องจากน้ำยางพาราธรรมชาติมีส่วนช่วยในการเพิ่มการยึดเกาะที่ดี มีแรงต้านทานและความคงทนที่มากขึ้น ดังนั้นยางมะตอยผสมเย็นสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยน้ำยางพารา ธรรมชาติสามารถนำมาใช้ทดแทนยางมะตอยผสมร้อนได้

#### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นฤตล นวลนิ่ม และ วชิรินทร์ วิทย์กุล (2002) การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันปรับปรุงคุณภาพโดยใช้น้ำยางชั้นธรรมชาติชนิด HA (High ammonia) ตั้งแต่ 4.5% ถึง 6.0% โดยน้ำหนัก 100% ของแอสฟัลต์อิมัลชัน เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h จากการทดสอบพบว่าคุณสมบัติด้านการคืนตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันเพิ่มขึ้นมากกว่า 8 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h และมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณน้ำยางชั้นธรรมชาติที่สูงขึ้น จากการทดสอบการคืนตัว (Elastic recovery) แสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 1 กราฟแสดงถึงผลการทดลองการคืนตัว (Elastic recovery)  
(ที่มา: นฤตล นวลนิม และ วชิรินทร์ วิทยกุล 2002)

จากรูปที่ 1 การปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันโดยใช้น้ำยางข้นธรรมชาติชนิด HA ทำให้คุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นดีขึ้น เห็นได้จากค่าการคืนตัวที่สูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองผสมเป็นส่วนผสมสลอรี่ซีล (Slurry seal) โดยปริมาณน้ำได้จากการทดลองความข้นเหลว (Consistency test) และปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันจากการทดลองหาค่า C.K.E. (The Centrifuge Kerosene Equivalent Method) ที่ขนาดคละของมวลรวมในการวิจัย พบว่าต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน 14% สำหรับหินบะซอลต์ และ 13% สำหรับหินปูน โดยน้ำหนัก 100% ของมวลรวม อีกทั้งยังพบว่าความสามารถในการต้านทานต่อการสึกกร่อนจากการทดลอง Wet track abrasion เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.5-3 เท่า (ที่ปริมาณน้ำยางข้นธรรมชาติ 4.5% - 6.0%) เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมสลอรี่ซีลที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS - 1h สำหรับการทดลองหาคุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันและคุณสมบัติของส่วนผสมสลอรี่ซีล กระทำภายในระยะเวลา 14 วัน นับแต่วันที่ผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันออกมา

H. Paramet et al. (2017) ในการศึกษางานวิจัยนี้ได้ทำการค้นคว้าถึงศักยภาพการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับแต่งโดยผสมแอสฟัลต์ชนิด 60/70 กับน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งเติมแอมโมเนียร้อยละ 0.15 ของน้ำหนักน้ำยาง ในอัตราส่วนผสมต่างกันร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 การทดสอบใน

ห้องปฏิบัติการหลายชนิดรายงานสมบัติทางวิศวกรรมดังต่อไปนี้ การจิ้มด้วยเข็ม จุดอ่อนตัว การหลุดลอก อุณหภูมิจุดวับไฟ ความยืดตัว ค่าเสถียรภาพวิธีมาร์แชลล์ และความต้านทานการลื่นไถล บ่งบอกว่าปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เหมาะสมไม่ใช่แค่ลดการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยลง แต่ยังสามารถให้วิธีการนำไปใช้ง่ายขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมแอสฟัลต์ควบคุม พบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีประสิทธิภาพผสมกับน้ำยางธรรมชาติร้อยละ 10 ได้ให้ค่าจิ้มด้วยเข็ม (49.33) และค่าการหลุดลอก (ร้อยละ 12) ต่ำ ในทางกลับกันค่าสูงนั้นประกอบด้วย ค่าจุดอ่อนตัว (51.5 องศาเซลเซียส) ค่าความยืดตัว (96.83 เซนติเมตร) ค่าอุณหภูมิจุดวับไฟ (309.67 องศาเซลเซียส) ค่าเสถียรภาพวิธีมาร์แชลล์ (2591 ปอนด์) และค่าความต้านทานการลื่นไถล (75.7 บีพีเอ็น)

T. Chaiyalap (2016) งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 และแอสฟัลต์ ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ (Natural Rubber Modified Asphalt, NRMA) โดยใช้ สัดส่วนยางพาราที่แตกต่างกันซึ่งมีการเติมยางพาราร้อยละ 5, ร้อยละ 8 และร้อยละ 10 ซึ่งเป็น แนวทางเพิ่มการใช้ยางพาราตามนโยบายของรัฐบาล จากการศึกษาโดยการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยาง NRMA มีค่าสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม AC 60/70 และมีค่าต้านทานแรงดึงสูงสุดเมื่อเติมยางพาราร้อยละ 8 ค่าโมดูลัสคืนตัวเมื่อใช้ยาง NRMA จะมีค่าสูงกว่ายาง AC 60/70 เนื่องจากมีคุณสมบัติที่กลับคืนสู่สภาพเดิมได้ดีเมื่อถูกแรงกระทำแต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมลดลงเมื่อเติมยางพาราถึงร้อยละ 10 ในด้านความต้านทานการยุบตัวค่าสูงสุดเมื่อเติมยางพาราร้อยละ 8 ค่าความต้านทานการยุบตัวถาวรเมื่อเติมยางพาราร้อยละ 8 ให้ผลที่ดีที่สุด ส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงตัวสูง มีความยืดหยุ่นดี สามารถทนความล้าจากแรงกระทำ แต่จะมีค่าความต้านทานการยุบตัวลดลงเมื่อมีการเติมยางพาราถึงร้อยละ 10 ในส่วนของการผสมแอสฟัลต์โดยวิธีทดลองมาร์แชลล์ มีค่าเสถียรภาพสูงสุดเมื่อใช้ยาง NRMA ที่มีปริมาณยางพาราร้อยละ 10 และมีค่าสูงกว่ายาง AC 60/70 อย่างชัดเจน แสดงว่าการเพิ่มสัดส่วนยางพาราส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรง มีประสิทธิภาพที่ดี สามารถรองรับน้ำหนักการจราจรได้สูง ค่าการไหลแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยาง AC 60/70 มีค่า เทียบเท่ากับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยาง NRMA ร้อยละ 5 มีค่าการไหลน้อยที่สุดเมื่อเติมยางพารา ร้อยละ 8 และร้อยละ 10 ส่งผลให้มีคุณสมบัติในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดี จะเห็นได้ว่าการเติมยางพาราในสัดส่วนที่แตกต่างกันส่งผลทางด้านวิศวกรรมต่อผิวแอสฟัลต์คอนกรีต

S. Malithong (2010) บิทูเมนหรือยางมะตอยเป็นวัสดุที่ใช้เป็นผิวทางของถนน แต่ยางมะตอยมีสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน การเติมพอลิเมอร์เข้าไปในยางมะตอย

สามารถปรับปรุงสมบัติการใช้งานของยางมะตอยได้ โดยผิวทางยางมะตอยที่มีการปรับปรุงด้วย พอลิเมอร์จะมีสมบัติการต้านทานการแตกร้าวและการเกิดร่องล้อที่สูงขึ้น อีกทั้งลดการล้าและสมบัติที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ ปัจจุบันยางมะตอยอิมัลชันหรือยางมะตอยน้ำนั้นนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีกระบวนการใช้งานที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม น้ำยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์หลักของประเทศ และอยู่ในรูปของลาเทกซ์จึงมีความเข้ากันได้สูงกับยางมะตอย อิมัลชัน การผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์บางส่วนยอมทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนที่สูงขึ้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้น้ำยางธรรมชาติคงรูปในการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอย อิมัลชัน โดยตรวจสอบระดับการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของน้ำยางคงรูปด้วยค่าอัตราการบวมตัว และศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ที่มีต่อสมบัติของกากของยางมะตอยอิมัลชันที่ได้ อีกทั้งศึกษาสัญญาณวิทยาของยางกากของยางมะตอยด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากผลการทดลองพบว่าน้ำยางธรรมชาติคงรูปสามารถปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันได้โดยทำให้ค่าจุดอ่อนตัวและค่าการต้านทานการเจาะทะลุของกากของยางมะตอยมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มสารเคมีที่ใช้วัลคาไนซ์ยังช่วยเพิ่มจุดอ่อนตัวอีกด้วย ที่ปริมาณยางธรรมชาติคงรูปต่ำนั้นจะพบว่าการกระจายตัวของยางธรรมชาติในวัฏภาคที่ต่อเนื่องของบิพูเมน และเมื่อปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้นเกิดวัฏภาคที่ต่อเนื่องกันของยางธรรมชาติ สูตรที่ดีที่สุดของน้ำยางธรรมชาติคงรูปถูกเลือกมาใช้ในการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชัน โดยผลิตด้วยเครื่องคอลลอยด์มิลล์ และศึกษาหาความเป็นไปได้ในการใช้ยางมะตอยอิมัลชันที่ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำยางธรรมชาติคงรูปนี้เป็นผิวทางจริง

ชยธินันท์ พรหมศร (1998) ได้ศึกษาการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) และเสนอข้อดีของวิธีการทดสอบดังกล่าว ดังนี้

- วิธีการทดสอบมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- การพังทลายของวัสดุเนื่องจากการทดสอบไม่มีผลต่อสภาพของผิวของวัสดุทดสอบจึงทำให้แน่ใจว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง
- การพังทลายของวัสดุเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่สามารถหาได้จากวิธีการทดสอบนี้ สามารถแบ่งได้เป็นการทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักคงที่ (Static indirect tensile test) ได้ค่าดังนี้

- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Static modulus of elasticity)
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)
- ค่าสัดส่วนปัวซอง (Static Poisson's ratio)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated-Load/Dynamic indirect tensile test) ได้ค่าดังนี้

- ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)
- ค่าความล้า (Fatigue characteristics)
- ค่าสัดส่วนปัวซองแบบคืนตัว (Resilient Poisson's ratio)
- ค่าการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent deformation characteristics)

Jamal A. Almudaiheem and Faisal H. Al-Sugair (1991) ได้ร่วมกันศึกษาผลของระดับการบ่อน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์แตกต่างกัน โดยทดสอบได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4123-82 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension" ในการศึกษาได้ทดสอบตัวอย่างที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 ที่แตกต่างกันอยู่ 3 ระดับ คือ 4% , 4.5% และ 5% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดที่ได้จากการออกแบบ ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลโดยใช้จำนวนรอบการบดอัด 75 ครั้งต่อด้าน ซึ่งในแต่ละแอสฟัลต์เมนต์ได้ใช้ตัวอย่างในทดสอบจำนวน 20 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 10 ตัวอย่างแรกใช้ในการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) ที่สภาพแห้ง (Dry condition) และที่สภาพเปียก (Moisture condition) อย่างละ 5 ตัวอย่าง สำหรับ 10 ตัวอย่างที่เหลือจะใช้ในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) ต่อไป ซึ่งตาม ASTM D4123-82 ได้ให้คำแนะนำไว้ว่าระดับการบ่อน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 10-50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ดังนั้น ในการทดสอบจึงกำหนดค่าระดับการบ่อน้ำหนักไว้ที่ร้อยละ 10-30 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ซึ่งการที่ไม่ใช้ระดับการบ่อน้ำหนักถึงร้อยละ 50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม นั้น ก็เพื่อให้แน่ใจว่าระดับการบ่อน้ำหนักจะไม่เกินค่าระดับความยืดหยุ่น (Elastic range) ของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าโมดูลัสคืนตัว มีค่าลดลง เมื่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น



- ค่าโมดูลัสคืนตัว ที่ได้จากการทดสอบที่สภาพเปียก มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบที่สภาพแห้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจาก Pore pressure และการลดลงของอุณหภูมิเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากตัวอย่าง
- ผลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นว่าระดับการป้อนน้ำหนักที่ใช้มีผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัว กล่าวคือ ที่การป้อนน้ำหนักระดับสูงค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าที่การป้อน น้ำหนักระดับต่ำ นั่นคือยิ่งป้อนน้ำหนักทดสอบมากขึ้นเท่าใด ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้ก็ยิ่งน้อยลงเท่านั้น

จากผลทดสอบดังกล่าว ทำให้มีคำแนะนำว่าในการออกแบบควรป้อนน้ำหนักสำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวให้เข้าใกล้ระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม เพื่อเป็นการออกแบบที่ Conservative design ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการออกแบบแอสฟัลต์ คอนกรีต ในกรณีที่มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่ำ

ทวีศักดิ์ ยศยิ่งธรรมกุล (2003) ยางมะตอยชนิดปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt, PMA) ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยเติมพอลิเมอร์ปริมาณเล็กน้อยลงในยางมะตอยผ่านเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic asphalt emulsion) ด้วยน้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex, NRL) ในรูปแบบน้ำยางข้นเพื่อนำไปใช้ในงานลาดถนน (Road construction) โดยทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อยางมะตอยอิมัลชันคือ ชนิดและปริมาณน้ำยางธรรมชาติได้แก่ น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียมาก (High ammonia NRL) น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia NRL) และน้ำยาพรีวัลคาไนซ์ (Prevulcanized NRL) โดยจะใช้ปริมาณยางที่ปริมาณ 3.5-10.0% DRC (Dry rubber content) ชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ได้แก่ แลคติกเคซีน (Lactic casein) โพแทสเซียมโอเลเอต (Potassium oleate) และวินโซลเรซิน (Vinsol resin) จากการศึกษาพบว่าการใช้ยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบได้ เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมยางธรรมชาติพบว่าความหนืด (Viscosity) เพนิเทรชัน (Penetration) จุดอ่อนตัว (Softening point) และความคืนตัว (Recovery) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ดีเมื่อเพิ่มปริมาณยางมากเกินไป (เช่นมากกว่า 10%DRC) ทำให้สมบัติบางประการ เช่น ความยืดดึง (Ductility) และเสถียรภาพ (Stability) ลดลง เนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาคของยางมะตอยและยางธรรมชาติ ปริมาณยางธรรมชาติที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.0-7.5 %DRC จากการศึกษาผลของชนิดยางธรรมชาติที่ใช้ปรับปรุงพบว่า น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียมากให้ผลใกล้เคียงกับน้ำยางข้นชนิด

แอมโมเนียเล็กน้อย แต่ดีกว่าน้ำยางพรีวัลคาไนซ์การเลือกใช้ระบบอิมัลซิไฟเออร์ผสมระหว่างแลคติกเคซินกับวินโซเรซิน ทำให้ได้ยางมะตอยอิมัลชันที่มีเสถียรภาพดีกว่าการใช้อิมัลซิไฟเออร์อย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว และการใช้ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์มากเกินไปส่งผลต่อสมบัติของยางมะตอยอิมัลชัน

Shaffie E. et al. (2015) ได้กล่าวว่าแอสฟัลต์เป็นวัสดุสำคัญที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปูถนนเพื่อเป็นตัวยึดประสาน มีการศึกษาจำนวนมากที่ดำเนินการเพื่อดัดแปลงแอสฟัลต์สำหรับการเตรียมแอสฟัลต์ผสมร้อน (HMA) จากการศึกษาพบว่ายางมะตอยดัดแปลงโพลิเมอร์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของแอสฟัลต์ได้ อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยน้อยมากที่มุ่งเน้นไปที่การดัดแปลงแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้สำหรับแอสฟัลต์ผสมเย็น (CMA) ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกน้ำยางธรรมชาติเป็นตัวปรับสภาพแอสฟัลต์อิมัลชัน ใช้วิธีผสมภายหลังเพื่อเตรียมแอสฟัลต์อิมัลชันดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์ การเติมน้ำยางธรรมชาติ (NRL) ลงในแอสฟัลต์อิมัลชันทำขึ้นในขวดทรงกระบอกที่ติดตั้งใบพัดซึ่งมีตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ ปริมาณโพลิเมอร์ เวลาในการผสม และความเร็วในการผสม จากผลสรุปได้น้ำยางธรรมชาติสามารถนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติทางรีโอโลยี (Rheological properties) ของกากแอสฟัลต์อิมัลชันดัดแปลง (Modified asphalt emulsion residue) ได้ปริมาณพอลิเมอร์ที่มีประโยชน์สูงสุดที่สามารถเติมลงในแอสฟัลต์อิมัลชันที่เตรียมได้พบว่ายู่ที่ร้อยละ 7 และเวลาผสม 20 นาที เป็นเวลาผสมที่เป็นประโยชน์ที่สุดเมื่อผสม NRL ในแอสฟัลต์อิมัลชัน แสดงดังรูปที่ 2 และ 3

Run ASTM	Blending Velocity (RPM)	% of residue D6997	SP D36	Ductility D113	Penetration D5	PI
1	250	64.6	65	45.6	84	3.5
2	500	64.9	65	55.5	66	2.7
3	750	64.4	65	57.6	76	3.2
4	1,000	64.6	65	57.8	62	2.6
5	1,500	64.2	64	83.9	75	2.9
6	2,000	64.9	64	66.5	73	2.9

Explanation. RPM: Revolution per Minute, SP: Softening Point, PI: Penetration Index

รูปที่ 2 สมบัติทางกายภาพของกากแอสฟัลต์อิมัลชันโดยใช้ความเร็วการผสมต่างกัน  
(ที่มา: M. A. Shafii et al./World Journal of Engineering 10(2) (2013) 159-164)

Run ASTM	Blending Time (minute)	% of residue D6997	SP D36	Ductility D113	Penetration D5	PI
1	5	64.4	65	57.6	76	3.2
2	10	64.9	67	74.8	59	2.8
3	15	64.8	69	61.6	68	3.5
4	20	65.1	70	77.9	69	3.7
5	25	64.9	69	88.4	70	3.6
6	30	64.9	65	92.1	66	2.7

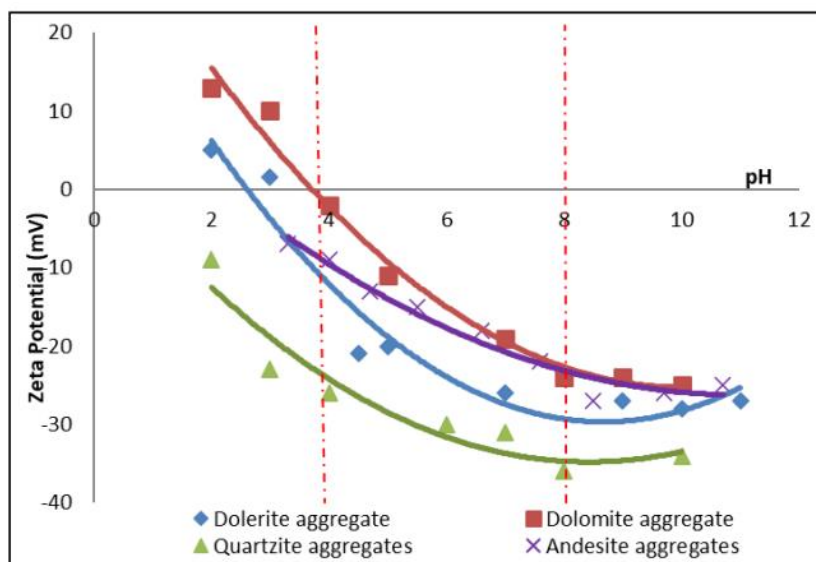
Explanation. SP: Softening Point. PI: Penetration Index

รูปที่ 3 สมบัติทางกายภาพของกากแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้เวลาผสมต่างกัน  
(ที่มา: M. A. Shafii et al./World Journal of Engineering 10(2) (2013) 159-164)

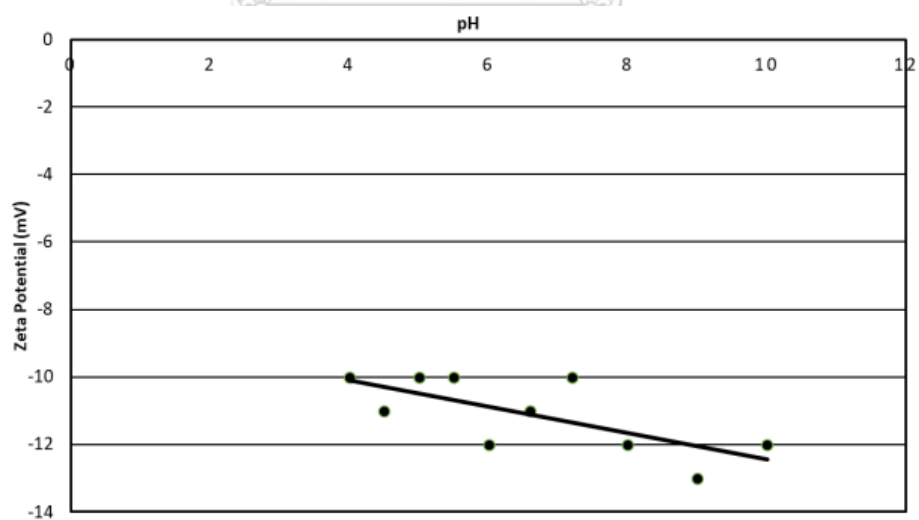
จากผลที่ได้สรุปได้ว่าน้ำยางธรรมชาติ (NRL) สามารถนำมาใช้ในการปรับเปลี่ยนแอสฟัลต์อิมัลชันและปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย ความเหนียว จุดอ่อนตัว การซึมผ่าน และดัชนีการเจาะ (PI) ของกากแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหลือร้อยละ 7 ของ NRL Content เป็นปริมาณที่มีประโยชน์สูงสุดที่สามารถเติมลงในแอสฟัลต์อิมัลชันดัดแปลงที่เตรียมไว้ได้ และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเติม NRL ร้อยละ 7 สามารถเพิ่มค่าจุดอ่อนตัวและค่าดัชนีการซึมผ่าน (PI) และลดความเหนียวและค่าการซึมผ่านได้ คุณสมบัติเหล่านี้บ่งชี้ได้ว่าแอสฟัลต์ผสมเย็นที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันดัดแปลงหรือเติม NRL จะมีความแข็งแรงและความทนทานมากกว่าการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันที่ไม่เติม NRL นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าความเร็วในการผสมไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางรีโอโลยีของแอสฟัลต์อิมัลชันดัดแปลงตกค้าง (Modified asphalt emulsion residue) อย่างไรก็ตาม เวลาในการผสมอาจส่งผลต่อคุณสมบัติรีโอโลยีของกากแอสฟัลต์อิมัลชันดัดแปลง และ NRL สามารถผสมในแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นเวลา 20 นาที จะเป็นเวลาผสมที่เหมาะสมที่สุด

Nomlala, B., et al. (2022) ได้ทำการศึกษาและทดสอบศักย์ซีตา (Zeta potential) กับตัวอย่างมวลรวม และแอสฟัลต์ที่ระดับ pH ต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ซีตาและค่า pH ของมวลรวม แสดงในรูปที่ 4 ในขณะที่ความสัมพันธ์ของแอสฟัลต์กับศักย์ซีตา แสดงไว้ในรูปที่ 5 โดยมวลรวมแสดงแนวโน้มที่ลดลงของค่าศักย์ซีตาโดยมีค่า pH เพิ่มขึ้น โดโลไมต์และโดเลไรต์ยังแสดงการเปลี่ยนแปลงของศักย์ซีตาจากบวกเป็นลบด้วยค่า pH ที่เพิ่มขึ้น ตามที่ (Lee J, 2011) ได้กล่าวไว้ว่าเนื่องจากปริมาณซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) หรือมีความเป็นด่างสูงขึ้น (Higher alkaline oxide) ส่งผลให้มีประจุที่พื้นผิวมากขึ้น และจากการทดสอบแอสฟัลต์มีสภาพเป็นกรดเล็กน้อยโดยวัดผลลัพธ์ค่า pH อยู่ที่ 6-

7 จากการทดสอบสามารถประเมินการยึดเกาะของแอสฟัลต์บนผิวมวลรวมจากแยมไปหาดี ตามลำดับ  
ได้ดังต่อไปนี้ โดโลไมต์>แอนดีไซต์>โดเลอไรต์>ควอตไซต์



รูปที่ 4 ศักย์ซีตาของมวลรวมต่างๆที่สารละลาย pH ต่างกัน  
(ที่มา: Nomlala, B., et al. 2022)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ซีตาที่ค่า pH ต่างๆ สำหรับแอสฟัลต์ Penetration grade 70/100  
(ที่มา: Nomlala, B., et al. 2022)

E. Shaffie, et al (2015) ได้มีการศึกษาและทดลองเพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และ ประสิทธิภาพของการต้านทานการหลุดลอก (Stripping performance) ของส่วนผสม HMA ที่ออกแบบโดยวิธี Superpave แบบ dense grade และการใช้ยางธรรมชาติเป็นส่วนผสม (Natural rubber) โดยมีการแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ประเภทสำหรับการผสมแบบ Superpave HMA Mix ประกอบไปด้วย แอสฟัลต์ที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติ (Unmodified binder asphalt mix : UMB) และแอสฟัลต์ที่มีการเติมยางธรรมชาติ (Natural rubber polymer modified binder asphalt mix : NRMB) โดยยางธรรมชาติจะนำมาผสมที่ 8 % ของส่วนผสม และสำหรับการทดสอบ Stripping performance จะใช้การทดสอบ Modified Lottman และการทดสอบ Boiling Water เพื่อประเมินประสิทธิภาพของส่วนผสมเหล่านี้ ผลการวิจัยพบว่าส่วนผสมทั้งหมดผ่านเกณฑ์คุณสมบัติต่างๆของ Superpave ซึ่งบ่งชี้ว่าส่วนผสมเหล่านี้มีความทนทานและความยืดหยุ่นที่ดี และในส่วนของผลคุณสมบัติการต้านทานการหลุดลอกของ NRMB แสดงให้เห็นถึงความทนทานต่อการหลุดลอกได้ดีกว่าส่วนผสมที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติ UMB โดยการเพิ่มยางธรรมชาติ NR ลงในแอสฟัลต์ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถเพิ่มความทนทานต่อการหลุดลอกของส่วนผสมแอสฟัลต์ ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า NR ที่เหมาะสมคือที่ 8 % โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งมีศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพของแอสฟัลต์ที่มีการเติมยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ายางธรรมชาติ NR เหมาะที่จะนำมาใช้งานกับแอสฟัลต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของสารยึดเกาะและทำให้ประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์ดีขึ้น

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอในส่วนของทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ นิยาม และลักษณะสมบัติ, ข้อกำหนด, เครื่องมือ และลักษณะของการทดสอบต่างๆ เป็นต้น

### 2.2.1 แอสฟัลต์ (Asphalt)

แอสฟัลต์ หรือ บิทูเมน (Bitumen) หรือเรียกกันอีกชื่อว่า “ยางมะตอย” เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มหรือดำ ค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้มีลักษณะที่อ่อนและสามารถไหลได้จึงเรียกคุณสมบัติแบบนี้ว่า Thermoplastic properties บิทูเมนเป็นสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) เป็นองค์ประกอบหลัก และยังมีองค์ประกอบของสารประเภทอื่นอีกโดยรวมเรียกว่า Heteroatom ประกอบด้วย ซัลเฟอร์ ออกซิเจน ไนโตรเจน และ นิกเกิล โดยสัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆนี้จะ

แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำมันดิบ เมื่อนำแอสฟัลต์ที่สถานะของเหลวมาผสมกับหินหรือมวลรวม และปล่อยให้เย็นตัวลงจะมีลักษณะแข็งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน โดยจะสรุปคุณสมบัติต่างๆที่สำคัญของแอสฟัลต์ได้ดังนี้ การยึดและประสาน (Cementing), ป้องกันการไหลซึม (Water proofing), อ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน (Thermoplastic), ยืดหยุ่น (Ductility), เป็นฉนวน (Non-conducting), ทนกรดและด่างอ่อนๆและทนต่อสภาพแวดล้อม ด้วยคุณสมบัติต่างๆนี้จึงนิยมนำแอสฟัลต์มาใช้ในการทาง

## 2.2.2 ประเภทของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง

### 2.2.2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

เป็นยางมะตอยแท้ที่เป็นพื้นฐานของยางมะตอยอีกสองชนิด ผลิตได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ มีลักษณะเป็นสีดำหรือสีน้ำตาลปนดำ มีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งประกอบด้วยบิทูเมนเป็นหลัก สามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งก่อนใช้ต้องผ่านความร้อนประมาณ 140-150 องศาเซลเซียสก่อน เมื่อแห้งจะแข็งทำให้เป็นวัสดุประสาน และยึดเกาะวัสดุต่างๆได้ดี นอกจากนั้นแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 เกรด ได้แก่

1. เกรดเพนิเทรชัน (Penetration grade) สามารถแบ่งตามค่าเพนิเทรชันเป็น 5 เกรด คือ 40-50, 60-70, 80-100, 120-150 และ 200-300 โดยเกรดที่มีค่าตัวเลขมากจะแสดงถึงความอ่อนของยางมะตอยที่มากด้วย ซึ่งเกรด 200-300 จะอ่อนที่สุด โดยที่อุณหภูมิห้องเมื่อนำนิ้วกดเบาๆจะเกิดรอยบุ๋มได้ง่าย ส่วนเกรด 40-50 เป็นเกรดที่แข็งที่สุด ต้องใช้แรงกดเพิ่มขึ้นจึงจะทำให้เกิดรอย ซึ่งจะเลือกใช้เกรดที่เหมาะสมตามลักษณะงานและสภาพดินฟ้าอากาศของแต่ละพื้นที่ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนควรใช้เกรดเพนิเทรชันค่อนข้างต่ำอยู่ที่ AC 60/70 (AC หมายถึงยางมะตอยซีเมนต์ และ 60/70 หมายถึงค่าเพนิเทรชันที่อยู่ในช่วง 60-70 คือเข็มกดลงได้ 6-7 มิลลิเมตร ภายในเวลา 5 วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) แต่สำหรับเมืองที่อยู่ในเขตนหนาวอาจต้องใช้ถึงเกรด 120-150 ทั้งนี้กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทนี้ไว้ใน ทล.-ก 401/2531 ตาม มอก. 851-2542
2. เกรดเป่า (Blown grade) คือ ยางมะตอยที่ได้จากการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปเป่าที่ความร้อน 250-300 องศาเซลเซียส จนยางมะตอยมีปริมาณของ asphaltenes เพิ่มขึ้น ทำให้มีความแข็ง และทนความร้อนได้ดีขึ้น ยางมะตอยเกรด

นี้ ได้แก่ R 85/25, R 85/40, R 115/15, R 138/10 และ R 155/7 เป็นต้น (R หมายถึง คุณสมบัติคล้ายยาง, ตัวเลขด้านหน้า หมายถึง อุณหภูมิของยางมะตอยที่จุดอ่อนตัว และ ตัวเลขด้านหลัง หมายถึง ค่าเพนิเทรชันเฉลี่ยของยางมะตอย)

3. เกรดแข็ง (Hard grade) คือ ยางมะตอยที่ได้จากการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปกลั่นในระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำใหยางมะตอยมีความแข็งมากขึ้น เกรดยางมะตอยชนิดนี้ ได้แก่ H 80/90 (H หมายถึง ยางมะตอยที่มีความแข็งสูง, ตัวเลขด้านหน้า หมายถึง อุณหภูมิของยางมะตอยที่จุดอ่อนตัว และ ตัวเลขด้านหลัง หมายถึง ค่าเพนิเทรชันของยางมะตอย)

#### 2.2.2.2 คัทแบคแอสฟัลต์ (Cut back Asphalt)

คัทแบคแอสฟัลต์ เป็นยางมะตอยที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลาย (Solvents) ซึ่งได้น้ำมันต่างๆ เช่น Diesel oil, Naphtha (Gasoline), Kerosine น้ำมันที่ใช้เป็นสารละลายนี้เรียกรวมกันว่า Diluent หรือ Culter stock โดยจะเติมสารตัวทำละลายนี้เพื่อลดความหนืดซึ่งเหมาะสมและสะดวกต่อการใช้งานโดยไม่ต้องผ่านความร้อน เมื่อตัวทำละลายระเหยไปจะทำให้ยางมะตอยมีเนื้อแข็งขึ้น ทำหน้าที่ประสานวัสดุต่างให้ยึดเกาะกันแน่น กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของคัทแบคแอสฟัลต์ไว้ตามมาตรฐาน ทล.-ก. 402/2531 และ ทล. -ก. 402/2531 โดยยางมะตอยชนิดนี้จะแบ่งออกเป็น 3 เกรด คือ

1. Rapid curing, RC. เป็นยางเหลวที่ผสมยาง AC กับสารตัวทำละลายที่เป็น Naphtha (Gasoline) หรือก็คือน้ำมันเบนซิน เมื่อนำไปใช้งานน้ำมันเบนซินจะระเหยออกไปได้เร็วซึ่งจะทำให้แอสฟัลต์ชนิดนี้แข็งตัวเร็วและเหลือแต่ยางแข็ง AC จับอยู่บนหินผิวทาง ยางชนิดนี้ยังแบ่งออกเป็นเกรดต่างๆตามความหนืดเหนียวของน้ำมัน เช่น RC0, RC1 ถึง RC5 ตัวเลขยิ่งมากความเหนียวหนืดก็ยิ่งมาก จะระเหยได้ช้ากว่า บางทีการแบ่งเกรดใช้ตามระบบการวัดความหนืดเป็น RC1000 หรือ RC2000 ซึ่งก็มีความหมายคล้ายๆ กัน
2. Medium curing, MC. เป็นยางเหลวที่ผสมยาง AC กับสารตัวทำละลายเป็น Kerosine ซึ่งการระเหยตัวของสารทำละลายนี้จะช้ากว่าเบนซิน เหมาะกับงานผิวทางบางชนิดที่ไม่ต้องการให้มันระเหยตัวเร็วเกินไป เช่น งานไพรม์โค้ดที่ต้องการทิ้ง

ระยะเวลาให้น้ำยางซึมลงไปตามร่องช่องว่างของชั้น หินพื้นทางเพื่อเป็นรากยึดเกาะ ผิวทางกับชั้นพื้นทาง มีการแบ่งเกรดต่างๆ เช่นเดียวกับพวก RC

3. Slow curing, SC. เป็นยางเหลวที่ผสมยาง AC กับสารตัวทำละลายพวกน้ำมันดีเซล ซึ่งการระเหยตัวช้าส่วนมากใช้ทำ Road mix หรือใช้ในงานซ่อมผิว (Patching) แต่ไม่นิยมใช้ในประเทศไทย

#### 2.2.2.3 แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion)

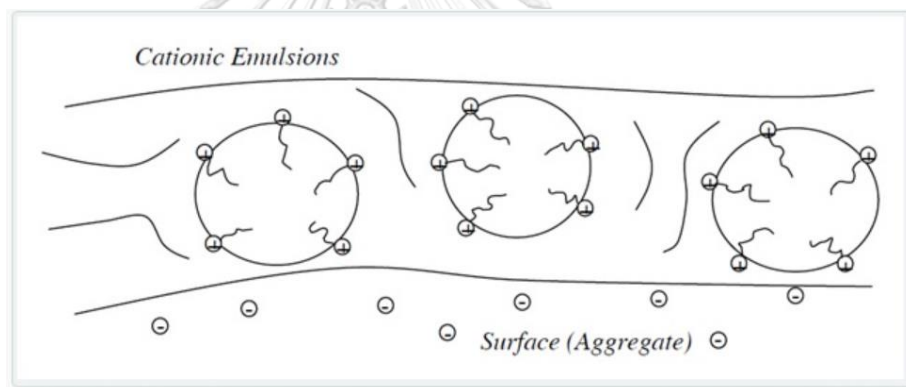
แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion) หรือ อิมัลซิไฟด์แอสฟัลต์ (Emulsified Asphalt) หรือ “ยางน้ำ” เป็นยางมะตอยที่เกิดจากการผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ (Colloidal particles) แขนวลอยอยู่ในน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลว สีน้ำตาลเข้ม ลักษณะชั้นจนวนเหลวที่ อุณหภูมิห้อง ในการผลิตใช้เครื่องจักรปั่นเฉือนให้แอสฟัลต์ซีเมนต์แตกเป็นเม็ดขนาดเล็ก แล้วผสม Emulsifying Agent (หรือที่เรียกอีกชื่อว่า Surfactant) ซึ่งเป็นสารเคมีชนิดที่เป็นกลุ่มโมเลกุลยาว ปลายด้านหนึ่งไม่มีขั้วใช้จับ กับอนุภาคแอสฟัลต์ส่วนปลายอีกด้านมีขั้วจึงเสมือนว่าช่วยเพิ่มประจุให้อนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้สามารถ แขนวลอยอยู่ในน้ำได้ ซึ่งโดยทั่วไปแอสฟัลต์อิมัลชันจะประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ 55-75% สารอิมัลซิไฟด์ 3% และส่วนที่เหลือจะเป็นน้ำ 22-42% แต่ทั้งนี้ อาจมีการเพิ่มสารอื่นๆด้วย เช่น สารเพิ่มความเสถียร สารป้องกันการหลุดลอก สารบำรุงการเคลือบ เป็นต้น ยางมะตอยชนิดนี้เมื่อใช้งานน้ำจะระเหยออกไปและเกิดการรวมตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นของแข็งยึดเกาะวัสดุ โดยยางน้ำเป็นแอสฟัลต์เหลวที่นิยมนำไปใช้ในงานซ่อมแซมผิวถนน งานโพรมีคอตและงานแท็คคोट รวมทั้งงาน แอสฟัลต์ผสมเย็นเช่น Slurry Seal, Bitumen Stabilization

Emulsifier เป็นตัวกำหนดสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันตามชนิดของประจุ คือ ชนิดประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Anionic) และชนิดประจุไฟฟ้าเป็นบวก (Cationic) และชนิดเป็นกลาง (Nonionic) แต่ในการก่อสร้างจะนิยมใช้ประจุไฟฟ้าที่เป็นบวกและประจุไฟฟ้าที่เป็นลบเท่านั้น

Cationic emulsified asphalt มีประจุบวกล้อมรอบอนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะใช้ Emulsifier จำพวก Fatty amines ซึ่งทำให้อนุภาคแอสฟัลต์แสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก อิมัลซิไฟด์แอสฟัลต์ที่มีประจุบวกนี้ สามารถจับตัวกับผิวที่มีประจุลบได้ดีมาก ด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าดึงดูด ทำให้อนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์แตกตัวออกจากน้ำได้

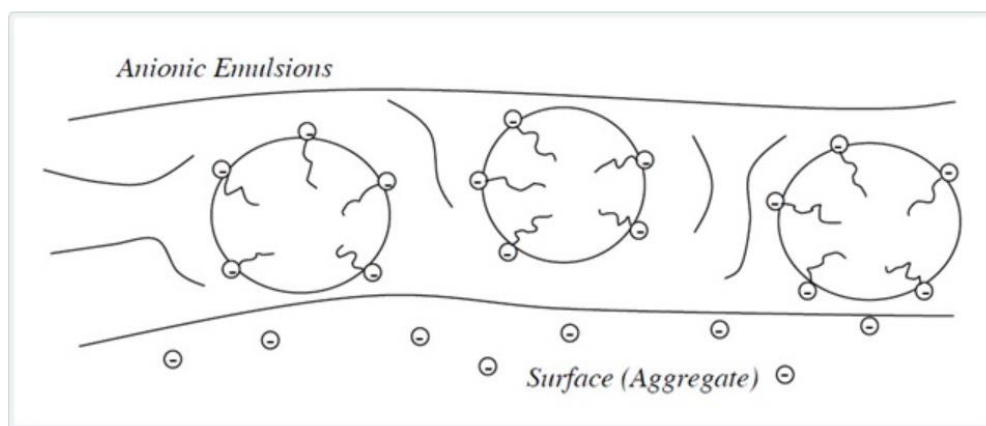


รวดเร็วกว่า Anionic Emulsified Asphalt แม้ว่าผิวของหินต่างๆ ชนิดจะมีประจุไฟฟ้าที่ผิวแตกต่างกันตามชนิดของแร่ประกอบ แต่เมื่อมีความชื้นผิวหินส่วนใหญ่จะมีประจุลบสุทธิ ทำให้จับตัวกับ Cationic Emulsified Asphalt ได้ดี ทว่าอิมัลซิไฟด์แอสฟัลต์ที่มีประจุบวกนี้จะเก็บรักษาคงสภาพ ได้ไม่นาน เนื่องจากประจุไฟฟ้าลบที่แวดล้อมในภาชนะจะส่งผลให้อนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์จับตัวกันและตกตะกอน ดังนั้นแอสฟัลต์ชนิดนี้มักนำไปใช้ในงานประเภท Penetration Macadam, Surface treatment, Prime coat, Tack coat และ Seal coat เป็นต้น เนื่องจากแอสฟัลต์ชนิดนี้ มีน้ำเป็นส่วนผสม จึงสามารถนำไปใช้งานโดย ผสมกับส่วนอื่นที่เป็นน้ำได้และยังสามารถทำงานในขณะที่วัสดุอื่น ๆ ที่สามารถเปียกน้ำได้ กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของ Cationic asphalt emulsion ไว้ในข้อกำหนด ทล.-ก. 404/2531 ตาม มอก. 371-2530



รูปที่ 6 แสดงถึงประจุระหว่าง Cationic emulsified asphalt และ มวลรวม  
(ที่มา: Raha Bitumen Co)

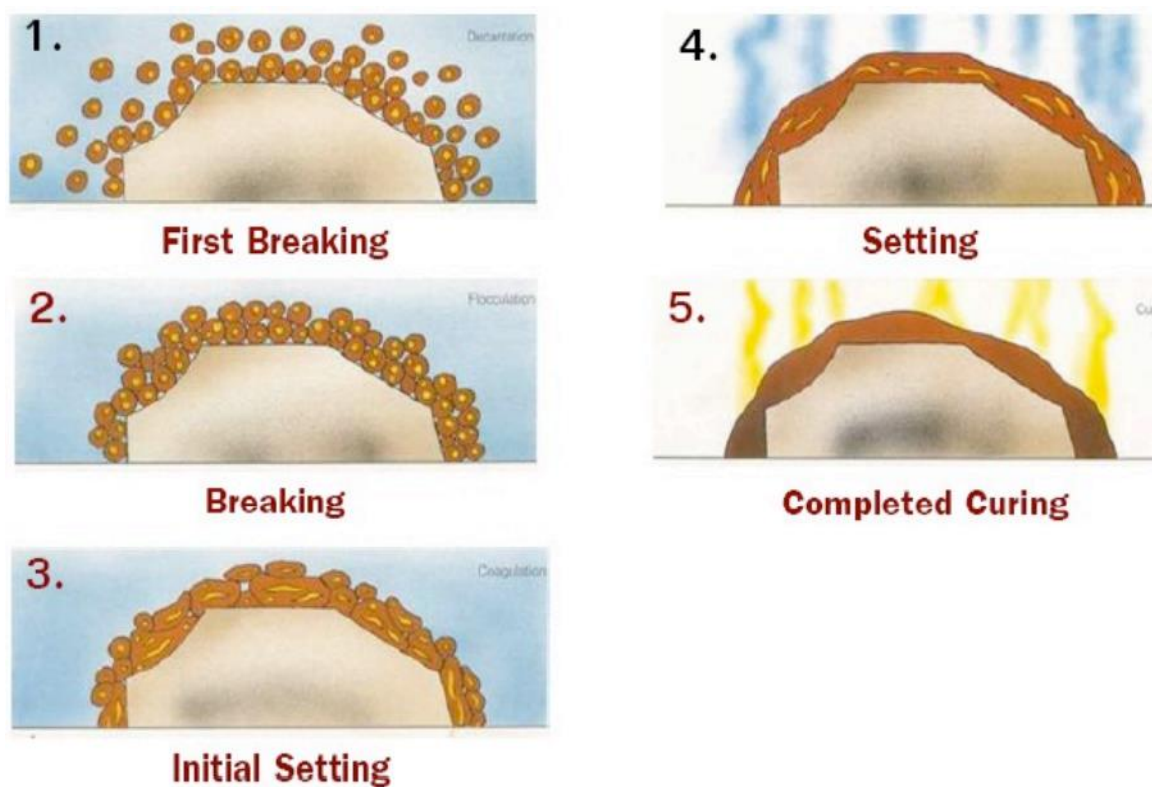
Anionic emulsified asphalt มีประจุลบล้อมรอบอนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะใช้ Emulsifier จำพวก Fatty acid ซึ่งทำให้อนุภาคแอสฟัลต์แสดงประจุไฟฟ้าเป็นลบอิมัลซิไฟด์แอสฟัลต์ที่มีประจุลบนี้สามารถคงสภาพขังน้ำไว้ได้เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากวัตถุทั่วไปใน สภาพแวดล้อม และภาชนะที่บรรจุ ส่วนใหญ่มีประจุสุทธิที่ผิวเป็นลบ อนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีประจุลบจึงไม่จับตัวกันเอง จึงมีเสถียรภาพในการเก็บรักษาที่ดีมาก ซึ่งยังไม่มีมาตรฐาน มอก. มารองรับในส่วนของ Anionic emulsified asphalt ในประเทศไทย



รูปที่ 7 แสดงถึงประจุระหว่าง Anionic emulsified asphalt และ มวลรวม

(ที่มา: Raha Bitumen Co)

กระบวนการจับตัวและระเหยออก (Setting) กระบวนการจับตัวเริ่มด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าดึงให้อนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์เข้าหาผิววัตถุที่มีประจุไฟฟ้า ขั้วตรงกันข้าม (ขั้นตอน Breaking) แรงดึงดูดนี้จะขับโมเลกุลน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างผิววัตถุกับอนุภาคแอสฟัลต์ ซีเมนต์ออกไป อนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์จำนวนมากจะถูกดึงเข้าหาวัตถุที่บดรวมกันจะกลายเป็นฟิล์มแอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบบนผิววัตถุ (ขั้นตอน Setting) นอกจากนี้อุณหภูมิและสภาพอากาศแวดล้อมยังส่งผลให้น้ำระเหยออกไป จนเหลือเพียงแอสฟัลต์ซีเมนต์ สำหรับ Cationic Emulsified Asphalt มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก จึงเข้ากันได้ดีกับหินส่วนใหญ่ ส่วน Anionic Emulsified Asphalt มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อใช้กับหินที่มีประจุสุทธิเป็นลบ เช่นกันก็จะมีแรงดึงดูดดังกล่าวเกิดขึ้น แต่กลับเป็นแรงผลักไม่ให้จับตัวกัน จึงเหลือเพียงกระบวนการระเหยออกของน้ำเท่านั้นที่จะทำให้โมเลกุลน้ำออกไป และเหลือเพียงฟิล์มแอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบบนผิวหิน ในการใช้งานมักจะเลือกเติมสารผสมเพิ่มเพื่อช่วยการจับตัวของอนุภาคแอสฟัลต์ซีเมนต์กับผิวหิน



รูปที่ 8 ภาพแสดงกระบวนการจับตัวและระเหยออก  
(ที่มา: Tipco Asphalt)

โดยทั่วไปสามารถจำแนกแอสฟัลต์อีมีัลชันด้วยอัตราการแข็งตัวหรือการแตกตัวของ Emulsion จะขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของสารที่ใช้ซึ่งมีอยู่ 3 ระดับของทั้ง 2 ชนิดประจุ คือ

Asphalt emulsion ชนิด Cationic

1. เกรดแตกตัวเร็ว (Rapid setting) ได้แก่ CRS-1, CRS-2
2. เกรดแตกตัวเร็วปานกลาง (Medium setting) ได้แก่ CMS-2, CMS-2h
3. เกรดแตกตัวช้า (Slow setting) ได้แก่ CSS-1, CSS-1h

Asphalt emulsion ชนิด Anionic

1. เกรดแตกตัวเร็ว (Rapid setting) ได้แก่ RS-1, RS-2
2. เกรดแตกตัวเร็วปานกลาง (Medium setting) ได้แก่ MS-2
3. เกรดแตกตัวช้า (Slow setting) ได้แก่ SS-1, SS-1h

### 2.2.3 คุณสมบัติของแอสฟัลต์กับการใช้งาน

#### 2.2.3.1 ความเหนียว หรือความแข็ง ของแอสฟัลต์ซีเมนต์

ความเหนียว หรือ ความแข็งของแอสฟัลต์ มีผลโดยตรงต่อกำลังรับหน่วยแรง (ดึง,อัด,เฉือน) และโมดูลัสของแอสฟัลต์ผสมกับมวลรวม ในสภาวะที่อุณหภูมิใช้งานสูง เช่นในเวลากลางวันของฤดูร้อน แอสฟัลต์ที่มีความแข็ง หรือ ความเหนียวมากขึ้น สามารถลดอัตราการเกิดร่องล้อ (Rutting) และการปูดนูน (Shoving) บนผิวลาดยาง ในฤดูหนาวที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกลางวันและกลางคืนมาก ๆ การใช้แอสฟัลต์ที่มีความอ่อนตัวจะช่วย ลดการเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิได้ (Low temperature cracking) เนื่องจากแอสฟัลต์ สามารถยืดตัวได้จึงคลายหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากการหดตัว

#### 2.2.3.2 การแข็งเปราะตามอายุ (Age hardening)

การทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidation) ซึ่งเป็นสาเหตุหลัก และการระเหย (Volatilization) ขององค์ประกอบกลุ่มน้ำมันที่เป็นสาเหตุรอง ของการเสื่อมสภาพตามอายุ ที่ทำให้สัดส่วนปริมาณ Asphaltene เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการใช้งาน ทำให้แอสฟัลต์แข็งมากขึ้นๆ แต่คุณสมบัติการยึดเกาะเชื่อมประสานกลับลดลง จึงส่งผลให้ผิวทางลาดยางเกิดความเสียหายต่างๆเช่น รอยแตกร้าวหนังจระเข้ (Alligator cracks) การหลุดร่อนของผิว (Raveling) กระบวนการ aging ของแอสฟัลต์ซีเมนต์แบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาคือ

1. Short-term aging เกิดขึ้นระหว่างที่อยู่ในโรงผสมร้อน ส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น 2-4 เท่า
2. Long-term aging เกิดขึ้นในช่วงเวลาหลายปีที่ถนนถูกใช้งาน ส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น 10-20 เท่า

#### 2.2.3.2 ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature susceptibility)

คือการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุตามอุณหภูมิ สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเหนียวก็จะลดลงหรืออ่อนตัวลง และเกิดการขยายตัวมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเกิดปัญหาการเยิ้มของยาง

(bleeding) หากมีช่องว่างอากาศภายในไม่เพียงพอ และอาจส่งผลต่อการเสียหายในรูปแบบการเคลื่อนตัวเสียรูปร่างของผิวถนนตามมา ส่วนผลของอุณหภูมิที่ลดต่ำลงทำให้แอสฟัลต์แข็งตัวมากขึ้น และหดตัวลง อาจทำให้แอสฟัลต์แตกร้าวได้ง่ายเนื่องจากเกิดหน่วยแรงดึงในแอสฟัลต์คอนกรีตจากการหดตัวและจากโมดูลัสที่สูงขึ้น ผลของอุณหภูมิที่ลดต่ำลงมากอาจทำให้เกิดการแตกร้าวแบบหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (thermal cracking)

## 2.2.4 องค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

### 2.2.4.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตหมายถึง มวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อผิวของแอสฟัลต์คอนกรีตมีความหนาแน่นมากจะทำให้มีคุณภาพที่ดี มีความแข็งแรง และมีอายุการใช้งานที่นาน โดยทั่วไปการบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตในสนามจะได้ค่าความหนาแน่นที่น้อยกว่าค่าความหนาแน่นที่ออกแบบไว้ซึ่งทำการบดอัดด้วยเครื่องมือภายในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นที่ต้องบดอัดในสนามจึงมีการกำหนดเป็นร้อยละของความหนาแน่นของการบดอัดด้วยเครื่องมือภายในห้องปฏิบัติการ โดยกรมทางหลวงได้กำหนดค่าความหนาแน่นของการบดอัดในสนามอยู่ที่ร้อยละไม่น้อยกว่า 98 ของความหนาแน่นของการบดอัดด้วยเครื่องมือภายในห้องปฏิบัติการ

### 2.2.4.2 ช่องว่างอากาศ (Air Voids : AV)

ผิวทางแอสฟัลต์ที่บดทับแล้วจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องมีปริมาตรช่องว่างอากาศที่เพียงพอ แต่ไม่มากเกินไป ปริมาตร ช่องว่างอากาศมีผลต่อความคงทน (Durability) และการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต กล่าวคือ ปริมาตรช่องว่างอากาศยังน้อยทำให้น้ำและอากาศจะซึมผ่านเข้าไปทำลายแอสฟัลต์และการยึดเกาะระหว่างวัสดุผสมรวมกับแอสฟัลต์ได้ยากขึ้นซึ่งจะทำให้ผิวทางมีอายุการใช้งานยาวนาน แต่อย่างไรก็ตามหากปริมาตรช่องว่างอากาศน้อยเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์ เกิดการทะลักขึ้นมาบนผิวของทางทำให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) นอกจากนี้ช่องว่างอากาศยังเป็นที่รองรับแอสฟัลต์ที่ขยายตัวเมื่ออากาศร้อนด้วย สำหรับผิวทางชั้นบนสุดจะออกแบบให้มีปริมาตรช่องว่างอากาศร้อยละ 3 – 5 ขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรและน้ำหนักของรถที่

เล่นบนผิวทาง ส่วนผิวทางชั้นล่างอาจออกแบบให้มีปริมาตรช่องว่างได้มากกว่า เช่น ร้อยละ 4 – 7

#### 2.2.4.3 ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate: VMA)

ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมหมายถึง ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวมใน แอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว ซึ่งช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids Filled with Bitumen, VFB) ด้วยโดยที่ช่องว่างระหว่าง มวลรวม (VMA) คือ ปริมาตรช่องว่างสำหรับปริมาตรของแอสฟัลต์ ประสิทธิภาพ ซึ่งหมายถึง ปริมาตรแอสฟัลต์ทั้งหมดที่ใส่ลงไปผสมหัก ปริมาตรแอสฟัลต์ส่วนที่ดูดซึมเข้าไปในเม็ดวัสดุมวลรวม สำหรับ ปริมาตรช่องว่างที่เหลือจากการแทนที่ของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ คือ ปริมาตรช่องว่างอากาศดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้น หากออกแบบส่วนผสม ให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาตรช่องว่างเท่ากันแล้ว แอสฟัลต์คอนกรีต ที่มีค่า VMA สูงกว่าจะมีความคงทนต่อการใช้งานนานกว่าแอสฟัลต์ คอนกรีตที่มีค่า VMA ต่ำกว่า อธิบายได้โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า การที่วัสดุมวลรวมมีค่า VMA สูง ย่อมหมายถึง มีปริมาตรช่องว่างสำหรับแอสฟัลต์มากทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มวัสดุมวลรวมหนาซึ่ง ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทนต่ออายุการใช้งานยืนยาว การออกแบบส่วนผสมที่มีค่า VMA น้อยกว่าข้อกำหนดทำให้ใช้แอสฟัลต์ผสมน้อยซึ่งประหยัดแต่ไม่ควรกระทำเพราะจะทำให้ผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีตที่มีความคงทนลดลง

#### 2.2.4.3 ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt Content)

ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใส่ลงไปผสม ในแอสฟัลต์คอนกรีต มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นอย่างมาก ดังนั้นปริมาณแอสฟัลต์ที่จะต้องใช้จะต้องถูกต้องและแน่นอนไม่ว่าจะเป็นการผสมในห้องทดสอบหรือที่โรงผสม (Mixing Plant) ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ (Design Criteria) ซึ่งได้แก่ข้อกำหนดต่างๆเกี่ยวกับคุณภาพ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการ จะเป็นตัวกำหนดถึงปริมาณแอสฟัลต์ ที่ต้องใช้ผสมปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ได้แก่ ขนาดคละ และคุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ วัสดุมวลรวมซึ่งมีขนาดคละ ประกอบด้วยเม็ดขนาดเล็กต้องการแอสฟัลต์สำหรับผสมมากกว่าวัสดุ มวลรวมที่ประกอบด้วยเม็ดขนาดใหญ่กว่า เหตุผลก็คือวัสดุมวลรวม เม็ดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าวัสดุมวลรวมเม็ดใหญ่ (ที่ปริมาตรเท่ากัน) จึง

ต้องใช้แอสฟัลต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวเม็ดวัสดุมวลรวมและวัสดุมวลรวมที่ดุดซิม  
แอสฟัลต์มากทำให้ต้องใช้แอสฟัลต์ผสมมากเพื่อชดเชย ส่วนที่ถูกดุดซิมเช่นกัน

## 2.2.5 คุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

### 2.2.5.1 เสถียรภาพ และการไหล (Stability and Flow)

เสถียรภาพ คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรโดยไม่เกิดร่องล้อเป็นคลื่น  
หรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง(Deformation) ในลักษณะอื่นๆที่ผิดไปจากเดิม เป็นค่า  
ความต้านทานแรงกดสูงสุดโดยทดสอบที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าการไหล  
เป็นการวัดค่าการเคลื่อนที่หรือหน่วยการยุบตัว (Strain) โดยวัดจากระยะทางที่  
แอสฟัลต์คอนกรีตยุบตัวลงขณะที่ไม่มีแรงกระทำกับขณะที่มีแรงกระทำสูงสุดของ  
เสถียรภาพ ความมีเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายใน  
และแรงยึดประสาน (Cohesion) ระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Cohesion) แรงเสียด  
เสียดทานภายในเป็นผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ได้แก่ รูปร่างของเม็ดวัสดุ  
ลักษณะความเรียบ หยาบ หรือ ขรุขระของผิว ส่วนแรงยึดเกาะเป็นผลมาจากคุณสมบัติ  
ของแอสฟัลต์ที่สามารถยึดเม็ดวัสดุมวลรวมให้ติดกันได้ดีเพียงใด ผลรวมของความ  
เสียดทานและแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวม จะช่วยป้องกัน ไม่ให้เม็ดวัสดุเกิด  
การเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันเมื่อมีน้ำหนัทยานพาหนะมากระทำ โดยปกติแล้ววัสดุ  
มวลรวมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบ ขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพสูง ส่วนแรงยึด  
เกาะจะมีมากขึ้นถ้าแอสฟัลต์ที่ใช้มีความหนืดที่สูงหรือขณะที่แอสฟัลต์มีอุณหภูมิต่ำ การ  
เพิ่มปริมาณ แอสฟัลต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณ  
แอสฟัลต์จนถึงจุดหนึ่ง จะทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบเม็ดวัสดุมวลรวมหนาเกินไปเป็นผลให้  
ความเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมลดลง ซึ่งจะทำให้ค่าเสถียรภาพลดลงด้วย  
เช่นกัน ในการออกแบบส่วนผสมจึงจะต้องออกแบบให้ค่าเสถียรภาพสูงพอที่จะรับ  
น้ำหนักการจราจรได้ แต่ควรมีข้อคำนึงถึง คือ ค่าเสถียรภาพที่สูงเกินไปจะทำให้  
แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไป ขาดความยืดหยุ่นซึ่งอาจทำให้ผิวทางเสียหายได้  
โดยเฉพาะ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปูลงบนพื้นทางหรือผิวทางเดิมที่มีการแอ่นตัว  
(Deflection) สูง สาเหตุที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเสถียรภาพต่ำ เนื่องจาก

- ใช้แอสฟัลต์ปริมาณมากเกินไป ทำให้เกิดเป็นคลื่นลูกกระนาบ หรือ เกิดร่องล้อ  
หรือเกิดการเอื่อมที่ผิว

- ใช้ทรายที่เม็ดขนาดกลาง (Medium Size Sand) มากเกินไป ทำให้บดทับได้ยากขณะที่ทำการบดทับหรือแม้แต่บดทับเสร็จใหม่ๆ จะมีลักษณะเคลื่อนตัวได้ง่าย (ไม่อยู่ตัว)
- วัสดุมวลรวมมีลักษณะกลม ผิวเรียบ ทำให้ขยับตัวได้ง่ายส่งผลให้เมื่อน้ำหนักมากกระทำจะทำให้เกิดเป็นร่องล้อได้ง่าย

#### 2.2.5.2 ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance)

คือ ความสามารถในการต้านทานน้ำหนักที่กระทำซ้ำๆ จนกระทั่งวัสดุเกิดการล้าตัว ในการออกแบบปริมาตรช่องว่างอากาศ ปริมาณแอสฟัลต์ ความหนืดของแอสฟัลต์ มีผลต่อความต้านทานการล้าของวัสดุ ในทำนองเดียวกันการใช้แอสฟัลต์ที่เสื่อมสภาพและแข็งตัวได้ง่ายจะทำให้ความต้านทานต่อการล้าลดลง นอกจากนี้ความหนาและความแข็งแรงของชั้นผิวทางตลอดจนความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างที่รองรับผิวทางก็มีผลต่ออายุและความสามารถรับน้ำหนักของผิวทางโดยไม่เกิดรอยแตก กล่าวคือ ผิวทางที่หนา รวมทั้งชั้นโครงสร้างที่รองรับผิวทางแข็งแรงจะทำให้ไม่เกิดการแอ่นตัวมากจึงมีอายุรับน้ำหนักล้อซึ่งกระทำซ้ำได้นานกว่า สาเหตุที่ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความต้านทานต่อการล้าไม่ดีเนื่องจาก

- ปริมาณแอสฟัลต์น้อยเกินไป จะทำให้เกิดรอยแตกได้ง่ายเมื่อน้ำหนักมากกระทำซ้ำๆ
- ในการออกแบบมีช่องว่างอากาศมากเกินไป ทำให้แอสฟัลต์เสื่อมสภาพเร็ว เกิดรอยแตกได้ง่าย
- การบดทับที่ไม่เพียงพอทำให้แอสฟัลต์เสื่อมสภาพเร็ว และทำให้เกิดรอยแตกได้ง่าย
- ความหนาของชั้นผิวทางไม่พอทำให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไป เมื่อน้ำหนักกระทำซ้ำๆ ทำให้เกิดรอยแตกได้ง่าย

#### 2.2.5.3 ความสามารถในการแอ่นตัว (Flexibility)

ในการก่อสร้างถนนการที่ผิวจราจรไม่แตกเป็นสิ่งที่ต้องการในการออกแบบผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตจะเกิดการแอ่นตัว โดยการ



หลุดตัวเนื่องจากน้ำหนักกดทับ หรือ เกิดการโป่งตัวขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของดิน  
ชั้นทางด้านล่างตลอดเวลา

- แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดเรียงตัวขนาดโปร่ง (Open-Graded) จะสามารถแอนตัว  
ได้ดีกว่าชนิดเรียงขนาดแน่น (Dense-Graded)
- แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการแอนตัวได้ดี มักจะมีค่าเสถียรภาพต่ำกว่า  
แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการแอนตัวได้น้อย

#### 2.2.5.4 ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance)

สภาพพื้นผิวถนนที่มีความเสียดทานผิวทาง (Skid Resistance) หรือมีความ  
ฝืด (Friction) ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาฝนตก มักจะส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุบน  
ท้องถนนบ่อยครั้ง ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบค่าความเสียดทานผิวทางอยู่อย่าง  
สม่ำเสมอ ในปัจจุบัน เครื่องมือวัดค่าความเสียดทานของผิวทางมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับ  
วิธีหรือเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างเช่น British Pendulum Tester (BPT)  
มาตรฐานการทดสอบ ASTM E 303 เป็นเครื่องมือทดสอบที่ใช้หลักการวัดแรงเสียด  
ทานด้วยการเหวี่ยงแท่งยางสัมผัสพื้นผิวทดสอบ สามารถใช้ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและ  
ในสนาม ซึ่งเป็นเครื่องมือที่กรมทางหลวงใช้งานในปัจจุบัน โดยผลการทดสอบแสดงเป็น  
ค่า BPN (British Pendulum Number) หรือเป็นการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ  
แบบ Dynamic Friction Tester: DFT มาตรฐานการทดสอบ ASTM E 1911 เป็น  
เครื่องมือทดสอบที่ใช้หลักการวัดแรงเสียดทานด้วยการหมุนแท่งยางเป็นวงกลมบน  
พื้นผิวทดสอบด้วยระดับความเร็วต่างๆ สามารถใช้ได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและใน  
สนาม โดยสาเหตุที่ทำให้ผิวทางเกิดการลื่นเนื่องจาก

- ปริมาณแอสฟัลต์มากเกินไป ทำให้เกิดการเยิ้มของแอสฟัลต์บริเวณผิวทางทำให้  
ผิวทางลื่น
- ขนาดคละและลักษณะผิวของวัสดุผสมรวมไม่เหมาะสม ทำให้ผิวทางมีลักษณะ  
เรียบเกินไปไม่มีโอกาสท่วมเม็ดวัสดุผสมรวมทำให้ลื่น
- เม็ดวัสดุผสมรวมขัดสีสามารถทำให้เกิดการลื่นได้ง่าย

#### 2.5.5.5 ความคงทน (Durability)

หมายถึง ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ปัจจัยที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีต  
เสื่อมสภาพอาจเป็นผลมาจากภูมิอากาศ สภาพการจราจรหรือทั้งสองอย่าง ปัจจัย

เหล่านี้ที่ทำให้แอสฟัลต์ที่ใช้ เสื่อมสภาพเนื่องจากขบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) และออกซิเดชัน (Oxidation) วัสดุผสมรวม เสื่อมสภาพจนเกิดการ แตกตัว (Disintegration) และฟิล์มแอสฟัลต์ที่ เคลือบวัสดุผสมรวมหลุดลอก (Stripping) สาเหตุที่ทำให้ผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตขาดความคงทนเนื่องจาก

- ปริมาณแอสฟัลต์น้อยไป ทำให้ผิวทางมีลักษณะแห้ง หินหลุด
- ช่องว่างอากาศมากไป ซึ่งอาจเนื่องมาจากออกแบบไม่เหมาะสม หรือการบดทับ ไม่เพียงพอทำให้แอสฟัลต์เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เกิดรอยแตก หรืออาจแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ
- คุณสมบัติในการยึดเกาะระหว่างวัสดุผสมรวมกับแอสฟัลต์ภายใต้ สภาวะเปียก น้ำไม่ดีพอทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์หลุดออกจากวัสดุผสมรวมทำให้หินหลุดหรือหิน โผล่

#### 2.5.5.6 ความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ (Impermeability)

ปริมาตรช่องว่าง อากาศเป็นตัวบ่งชี้ถึงความยากง่าย ต่อการซึมผ่านของน้ำและ อากาศ แต่ที่สำคัญยิ่งกว่าปริมาตรช่องว่างก็ คือ ลักษณะช่องว่างได้แก่ ขนาดของ ช่องว่างในแต่ละช่องว่ามีช่องว่างทะลุติดต่อกันหรือไม่ และช่องว่างทะลุถึงผิวนอกของ แอสฟัลต์คอนกรีตหรือไม่ ถึงแม้ว่าความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศจะ เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทน แต่ในความจริงแล้ว แอสฟัลต์ คอนกรีต น้ำและอากาศจะสามารถซึมผ่านได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งหากมีค่าไม่เกินกว่าเกณฑ์ กำหนดแล้วจะถือว่าสามารถใช้ได้ สาเหตุที่ทำให้ น้ำและ อากาศซึมผ่านผิวแอสฟัลต์ คอนกรีตเนื่องจาก

- ปริมาณแอสฟัลต์ที่น้อยไปทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วทำ ให้หินหลุด
- การออกแบบส่วนผสมให้มีปริมาตรช่องว่างอากาศมากเกินไปทำให้น้ำซึม ผ่านได้ง่าย

#### 2.2.5 ปัญหาที่เกิดขึ้นบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในปัจจุบันต้องมีการซ่อมบำรุงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากมีปัจจัย อยู่หลายประการที่ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเสียหาย เช่น น้ำหนักบรรทุกและ

การจราจรที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยเมื่ออุณหภูมิสูงในเวลากลางวันจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนตัว และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงในเวลากลางคืนทำให้ผิวทางมีความเปราะ และยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดปัญหาชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นในการบำรุงรักษา โดยลักษณะของความเสียหายต่างๆ ที่พบมีดังนี้

#### 2.2.5.1 ผิวทางเยิ้ม (Bleeding)

เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุแอสฟัลต์ในผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตไหลขึ้นมารวมกันที่ผิวหน้าเมื่ออุณหภูมิสูงหลังจากได้รับน้ำหนักบรรทุก โดยแอสฟัลต์จะไหลเยิ้ม ทำให้ผิวทางลื่น เกิดจากแอสฟัลต์มีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) และมี ค่าความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) สูงมาก หรือ ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt content) ที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมไม่ถูกต้อง อาจมีปริมาณมากเกินไป นอกจากนี้ อาจมีสาเหตุมาจากวัสดุแอสฟัลต์มีจุดอ่อนตัว (Softening point) ต่ำทำให้แอสฟัลต์อ่อนตัวง่าย ก่อให้เกิดร่องล้อ (Rutting) ที่ผิวทางขึ้นได้

#### 2.2.5.2 ผิวทางเกิดการยุบตัวถาวร (Permanent deformation)

การยุบตัวถาวร เป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นผิวทางหรือชั้นโครงสร้างทางอย่างถาวร โดยทั่วไป มักเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุกที่แล่นผ่านหรือบริเวณที่มีการหยุดรถของรถบรรทุกหนัก การยุบตัวถาวรสามารถเกิดขึ้นเฉพาะที่ชั้นผิวทางหรือเฉพาะที่ชั้นโครงสร้างทางหรือทั้งชั้นผิวทาง และชั้นโครงสร้างทางได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยการที่ชั้นทางนั้นใช้วัสดุในการก่อสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพ ที่ดีพอ ทำให้เกิดการยุบตัวเนื่องจากการทับถมหรือเกิดการไหลตัวของชั้นทางนั้นอย่างถาวร อาจ เกิดหลังจากที่ผิวทางมีการไหลเยิ้ม (Bleeding) ก็ได้ โดยทั่วไป การยุบตัวถาวรจะมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ การยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุกขนานกับทิศทางจราจรที่เรียกว่า ร่องล้อ (Rutting) และการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจากกับแนวทิศทางของจราจรและมักจะเกิดบริเวณที่การจราจรหยุดรถหรือเคลื่อนตัวช้าๆ ที่เรียกว่า Shoving ส่วนมาก ตามถนนในพื้นที่นอกเมืองจะพบการยุบตัวถาวรชนิด Rutting มากกว่าเพราะการจราจรเคลื่อนตัว ด้วยความเร็วสูงกว่า ส่วนพื้นที่ในเมืองนั้น มักพบทั้ง Rutting และ Shoving โดยเฉพาะบริเวณตาม ทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร

ป้ายรถประจำทางหรือบริเวณที่มีการจราจรติดขัดเป็นประจำ ซึ่ง เป็นสาเหตุให้เกิดการหยุดจอดบ่อยครั้งของการจราจรที่มีน้ำหนักบรรทุกมาก ทำให้เกิด Shoving ได้ง่าย ซึ่งคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์นั้นก็มีส่วนสำคัญเช่นกันที่จะส่งผลต่อการยุบตัวอย่างถาวร ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

#### 2.2.5.3 การเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Aging)

การเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่ เพิ่มขึ้นนี้ก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ไม่ได้ก่อความเสียหายโดยตรงแก่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแต่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ในระยะเวลาต่อมา เพราะแอสฟัลต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิด การแข็งเปราะ แม้ว่าการแข็งขึ้นของแอสฟัลต์ดังกล่าวจะเป็นผลดีต่อการต้านทานต่อการยุบ ตัวอย่างถาวร แต่หากเกิดการแข็งตัวมากเกินไปจนเปราะแล้ว จะทำให้เกิดการแตกร้าวและนำไปสู่ การหลุดลอกได้ (Stripping) ภาวะการเกิด Aging นี้อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างขั้นตอนการผสม แอสฟัลต์กับมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และในระหว่างการใช้งานในสนาม

#### 2.2.5.4 ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking)

การแตกร้าวเนื่องจากความล้าจากการรับน้ำหนักบรรทุกบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดจากการที่ผิวทางต้อง

รับน้ำหนักจากการจราจรซ้ำไปซ้ำมาเป็นระยะเวลานานจนเกิดความล้า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักในลักษณะซ้ำซาก ได้แก่

- การออกแบบโครงสร้างขึ้นทาง
- คุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- คุณภาพในสนามของวัสดุชั้นทาง
- อุณหภูมิ
- ปริมาณการจราจร

#### 2.2.5.5 การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น (Moisture damage)

การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้นนั้นไม่ใช่ความเสียหายของถนน แต่เป็นผลกระทบหลักที่จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น เนื่องจากความชื้นจะทำลายการยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุมวลรวมกับวัสดุแอสฟัลต์ ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุมวลรวมจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เรียกว่า Raveling เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อนเนื่องจากวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของวัสดุ แอสฟัลต์ถูกแรงเฉือนจากล้อรถตะกุนหลุดออก ทำให้ผิวทางมีลักษณะหยาบขรุขระ มีลักษณะ เป็นหน้าข้าวตัง มีหินใหญ่โผล่ ความเสียหายดังกล่าวนี้จะทำให้โครงสร้างชั้นทางมีกำลังลดลง นำไปสู่การแตกร้าวหรือการยุบตัวอย่างถาวรในแนวร่องล้อต่อไป

#### 2.2.6 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene ( $C_5H_8$ ) เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติ เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้การเกิดผลึกเนื่องจาก อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิมในขณะที่เกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถูสูง (abrasion resistance) ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่าง และขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเยี่ยมด้านการ เหนียวติดกัน (tack)

##### 2.2.6.1 น้ำยางสด

น้ำยางจากต้นยางพารา ขณะที่ยังสดจะมีสีขาว หรือ สีครีม สามารถไหลได้เองโดยอิสระ มีความหนืดประมาณ 12 - 15 เซนติพอยส์ (centipoises) ความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $g/cm^3$ ) และ ค่าความเป็นกรดต่าง (PH) 6.5 - 7.0 รูปร่างของอนุภาคยางเป็นรูปกลมหรือรูปลูกแพร์ ขนาด 0.05 - 5 ไมโครเมตร น้ำยางสด เป็นสารแขวนลอยของอนุภาคยางในของเหลวที่เรียกว่า ซีรัม

(serum) อนุภาคยางดังกล่าวเป็นสารพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนที่มีชื่อทางเคมีว่า 1, 4 - พอลิไอโซพรีน ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบซิส (cis - 1, 4 - polyisoprene) ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (monomer) ของไอโซพรีน (isoprene) ซึ่งมีคาร์บอน (carbon, C) 5 อะตอม กับ ไฮโดรเจน (hydrogen, H) 8 อะตอม ต่อกันจำนวนมากเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ส่วนประกอบของน้ำยางสด แบ่งได้ 2 ส่วนหลัก คือ

- ส่วนที่เป็นยาง (Dry Rubber Content, DRC) เป็นอนุภาคยางของไอโซพรีนที่เชื่อมต่อกัน ประมาณ 2000 - 5000 หน่วย ต่อ 1 โมเลกุล
- ส่วนที่ไม่ใชยาง (Non Rubber Content) เป็นส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมดที่ไม่ใชยาง มีสารประกอบต่างๆ หลายชนิด เช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เกลือแร่ เอนไซม์ และ สารประกอบไนโตรเจน เป็นต้น

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางสด จะมีส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 33% กับส่วนที่ไม่ใชยาง (non rubber) 3% แต่เมื่อบั่นน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นแล้ว ส่วนที่ไม่ใชยางจะลดลงเหลือประมาณ 1% - 29 ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและการปรับเครื่องปั่น ความแปรปรวนของสารต่างๆ ในน้ำยางขึ้นกับพันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง

#### 2.2.6.2 น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

โดยน้ำยางสดที่ได้มาจากต้นยางพารา มีองค์ประกอบหลักๆ 2 ส่วน คือ ปริมาณเนื้อยางแห้งซึ่งมีประมาณ 25% - 45% และ ส่วนที่เป็นสารของแข็งที่ไม่ใชยางประมาณ 5% ส่วนที่เหลือส่วนใหญ่เป็นน้ำ เมื่อมีการนำน้ำยางสดไปใช้งานในการทำผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ในโรงงานซึ่งค่อนข้างอยู่ไกลจากสวนยางพารา ทำให้เกิดความไม่สะดวกและไม่เป็นการประหยัดในการขนส่งน้ำยางสดไปยังโรงงาน นอกจากนี้สารบางอย่างที่มีอยู่ในน้ำยางอาจมีผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ยางไม่ดี ดังนั้น จึงมีการผลิตน้ำยางสดเป็นน้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยจะมีวิธีการผลิตอยู่ 4 วิธี คือ

- การระเหยน้ำ (evaporation) วิธีนี้ต้องมีการเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัว (stabilizer) เช่น potassium soap ในถึงน้ำยาง แล้วให้ความร้อนรอบๆ ถัง เมื่อน้ำระเหยไปน้ำยางข้นที่ได้จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 75% ปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% caustic potash 1.5% และสารที่ทำให้น้ำยางคงตัวกับโปรตีน

ประมาณ 13.5% วิธีนี้เหมาะกับการขนย้ายน้ำยางไปในระยะทางไกล และเหมาะกับการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องใส่สารเพิ่ม (filler) จำนวนมาก เช่น การผลิตกาว

- การทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีนี้มีการเติมสารทำให้เกิดครีม (creaming agent) เช่น sodium alginate, locust bean gum, dum karaya, gum tragacanth เป็นต้น สารทำให้เกิดครีมจะพอกหรือเคลือบผิวของอนุภาคยาง ทำให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่อขึ้น และลอยมาที่ผิวน้ำยาง น้ำยางชั้นที่ได้มีความบริสุทธิ์และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อผ่านวิธีการทำให้เกิดครีมหลายๆ ครั้ง แต่วิธีนี้มีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา
- การปั่น (centrifuging) วิธีนี้แยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากส่วนที่เป็นน้ำ คือ ชีรัมมันเอง โดยใช้เครื่องปั่นแยก น้ำยางชั้นได้มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางการค้า
- การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (electro decantation) วิธีนี้ใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยแยกส่วนของเนื้อยางจากส่วนของชีรัม โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกลงในน้ำยางที่เติมสารช่วยให้น้ำยางคงตัวไว้แล้ว เนื่องจากอนุภาคยางมีประจุลบหุ้มอยู่ จึงค่อยๆ เคลื่อนไปรวมที่ขั้วบวกและลอยตัวสูงขึ้นสู่ผิวของน้ำยาง แต่วิธีนี้ไม่สะดวก และ ลงทุนสูง

ซึ่งวิธีการปั่นน้ำยางเป็นวิธีที่นิยมและทำการค้ามากที่สุดคิดเป็นปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 ของ การผลิตน้ำยางชั้นทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำยางชั้นที่ผลิตในประเทศไทยจะเป็นน้ำยางชั้นที่ได้จากวิธีการปั่นน้ำยางเพียงอย่างเดียว สารเคมีที่นิยมใช้ในการเก็บรักษาสภาพน้ำยางชั้น คือ แอมโมเนียและแอมโนเมีย ร่วมกับสารช่วยบางชนิด ซึ่งจะมีทั้งชนิดแอมโมเนียมาก (High Ammonia HA) คือ ใช้แอมโมเนีย 0.7% ต่อน้ำหนักยาง และชนิดแอมโมเนียน้อย (Low Ammonia : LA) คือใช้แอมโมเนีย 0.2% ต่อน้ำหนักยางร่วมกับสารช่วยอื่น ๆ

#### 2.2.6.3 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet: RSS)

ยางแผ่นได้จากการนำ น้ำ ยางสดมาใส่ในตะกอนจากนั้นจึงเติมน้ำ เพื่อเจือจางน้ำ ยาง ให้มีปริมาณเนื้อยางแห้ง เหลือเพียงร้อยละ 12-18 ก่อนเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกัน และแยกตัวออกจากน้ำ หลังจากนั้นจึงนำไปรีดให้เป็นแผ่น ด้วยเครื่องรีดยางแผ่น ล้างน้ำ ทำให้แห้ง ซึ่งการทำ ให้แห้งนี้ทำ ได้ 2 วิธีคือ 1) นำ ไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศ ร้อน เพื่อไล่ความชื้น ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air Dried Sheet; ADS) และ 2)

นำไปอบรมควันที่อุณหภูมิ ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3-4 วัน ยางที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet; RSS) ยางแผ่นรมควัน แบ่งออกเป็นชั้นต่างๆ ด้วยสายตา (ตามปริมาณสิ่งสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนในยาง) โดย ชั้นที่ 1 จัดเป็นเกรดที่ดีที่สุด ไปจนถึงชั้นที่ 5 ซึ่งเป็นเกรดที่ต่ำ ที่สุด ภายหลังจากที่แผ่นยางแห้งสนิทจะถูกลำ มาอัดให้ เป็นก้อน ทาทัลคัม (talc) ที่บริเวณพื้นผิวของก้อนยาง เพื่อป้องกันการเกาะติดกันระหว่างการขนส่ง

#### 2.2.6.4 ยางแท่ง (Standard Thai Rubber: STR)

เนื่องด้วยยางแผ่นมีการจัดชั้นด้วยสายตาซึ่งให้ผลที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ในปัจจุบัน จึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์แทน เนื่องจากยางแท่งมีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่น ผ่านการทดสอบเพื่อ จัดชั้นคุณภาพตามหลักวิชาการ โดยพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยาง เป็นสำคัญ นอกจากนี้ก็อาจพิจารณาตัวแปรอื่นร่วมด้วย เช่น ปริมาณเถ้า (ash content) ดัชนีความอ่อนตัว (plasticity retention index; PRI) ฯลฯ ปัจจุบันประเทศไทยมีมาตรฐานยางแท่งที่เรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) (เดิมเรียกว่า Technically Specified Rubber (TSR)) โดยมีการกำหนดให้ยางแท่ง STR ประกอบด้วยชั้นยาง 8 ชั้น ได้แก่ STR 5L, STR 5, STR 10, STR 20, STR XL, STR 5CV, STR 10CV, STR 20CV ยางแท่งสามารถผลิตได้จากทั้งน้ำ ยางและยางแห้ง ขึ้นกับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการ ผลิตยางแท่งเกรด STR XL ซึ่งมี สีจางมาก จำ เป็นต้องใช้ น้ำ ยางเป็นวัตถุดิบ แต่ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเหลืองปนสูงและมีสีเข้มกว่าก็มักจะผลิตจากยางแห้ง

#### 2.2.6.5 ยางคอมพาวด์ (Compounded Rubber)

ยางดิบไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ และลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร สมบัติต่างๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะ ที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การจะใช้ประโยชน์จากยางได้ จำ เป็นต้องมีการผสมสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน เซม่าดำ สารตัวเร่งปฏิกิริยา ฯลฯ เข้าไปในยาง ซึ่งยางที่ได้เรียกว่า ยางคอมพาวด์ (compounded rubber) จากนั้นจึงนำ ยาง คอมพาวด์ไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า การวัลคาไนซ์ (vulcanization) ยางที่



ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะเสถียรคงรูป ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

#### 2.2.7 มวลรวม (Aggregates)

มวลรวม (Aggregates) เป็นวัสดุที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น หิน กรวด และทราย เป็นวัสดุส่วนประกอบหลักใน งานวิศวกรรมโยธาเช่น งานถนน โครงสร้างระบายน้ำ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แอสฟัลต์คอนกรีต(asphalt concrete) หรือ แอสฟัลต์ผสม (asphalt mix) ก็ใช้มวลรวมผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นวัสดุในการปูผิวถนน มวลรวมที่ใช้ในงานแอสฟัลต์ผสมมักใช้วัสดุจากแหล่งตามธรรมชาติมาผ่านกระบวนการแปรรูปทางกลและคัดขนาด เพื่อให้มวลรวมมีคุณสมบัติที่ดีในการรับแรง มวลรวมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมจะต้องมีคุณสมบัติที่ แข็งแรง คงทน และมีรูปร่างขนาดที่เหมาะสม นอกจากนี้ หินแต่ละชนิดมีแรงค์ประกอบของหินที่ส่งผลต่อการยึดเกาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้หินบางชนิดก็ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งาน โดยมวลรวมที่ใช้สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิดคือ

- มวลรวมหยาบ คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4
- มวลรวมละเอียด คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.075 - 4.75 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 เช่น หินฝุ่นหรือทราย
- วัสดุผสมแทรก คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ซึ่งเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเติมส่วนละเอียดให้มากขึ้น ส่วนละเอียดนี้เป็นส่วนสำคัญในการผลิตวัสดุผสมที่แข็งแรงและมีเกรดแน่น (Dense grade) โดยทั่วไป ทรายธรรมชาติจะมีส่วนละเอียดที่ต้องการนี้ในปริมาณน้อย วัสดุผสมแทรกอาจเป็น Stone dust, Portland cement, Silica cement, Hydrated lime และอื่น ๆ โดยมีมาตรฐานตามข้อกำหนด ทล. ท .205/2517 ของกรมทางหลวงได้กำหนดไว้

#### 2.2.8 พาราสเลอรีซีล (Para Slurry Seal)

พาราสเลอรีซีลเป็นวิธีการฉาบผิวทางชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยพาราแอสฟัลต์อิมัลชัน (Para Asphalt Emulsion) มวลรวม (Aggregate) วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler) และสาร

ผสมเพิ่ม (Additive) มีลักษณะ แข็งแรง ช่วยให้ผิวทางมีความคงทนสูง ลักษณะผิวหน้าไม่ลื่นทนต่อการแปรเปลี่ยนของดินฟ้าอากาศและ ป้องกันน้ำซึม ในการก่อสร้างสามารถเปิดการจราจรได้รวดเร็วจึงเหมาะสำหรับพื้นที่ก่อสร้างทั่วไปและย่านชุมชน ใช้สำหรับฉาบเป็นชั้นผิวทาง ผิวไหล่ทาง ด้วยจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของ ส่วนผสมที่นำมาใช้ โดยมีมาตรฐานข้อกำหนดตาม ทล.-ม 415/2546

## 2.3 การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นหลัก โดยจะทำการทดสอบแบบพื้นฐานในการหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆของวัสดุ และเพื่อหาส่วนผสมที่ดีที่สุดของการผสมกันระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชัน กับ น้ำยางธรรมชาติโดยการออกแบบส่วนผสมแบบเย็นในการนำมาใช้เป็นวัสดุผิวทาง และในการทดสอบทางวิศวกรรมนี้จะทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆภายใต้สภาพการจราจรที่ใกล้เคียงการจราจรจริงหลังจากทำการออกแบบส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชันกับน้ำยางธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและรวบรวมการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยไว้ดังนี้

### 2.3.1 การหาค่าคุณสมบัติเชิงปริมาตรของแอสฟัลต์ผสมร้อน

เนื่องจาก %air voids ในแอสฟัลต์ผสมร้อนเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะในการใช้งาน การตรวจวัดและควบคุมค่า %air voids จึงจำเป็นอย่างยิ่งในขั้นตอนการหลังจากบดอัดให้แน่น (หรือระหว่างการบดอัด) ในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือหรือวิธีใดที่สามารถวัด %Air voids ได้โดยตรง วิธีที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบันคือการคำนวณค่า %air voids จากความถ่วงจำเพาะก้อน (bulk specific gravity) และความถ่วงจำเพาะสูงสุด (maximum specific gravity,  $G_{mm}$ ) ของชิ้นงานตัวอย่างแอสฟัลต์ผสมร้อน

$$\%AV = 100 \left( 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ      %AV คือ % Air voids

$G_{mb}$  คือ Bulk specific gravity of mixture

$G_{mm}$  คือ Maximum specific gravity of mixture

การหาค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุด (maximum specific gravity,  $G_{mm}$ ) ความถ่วงจำเพาะสูงสุดของแอสฟัลต์ผสมร้อน (maximum specific gravity of asphalt mixture,  $G_{mm}$ ) คำนวณได้จากการหาค่ามวล และ ปริมาตร ของแอสฟัลต์ผสมร้อนในสถานะที่ไม่มีช่องว่างอากาศ แน่แน่นอนว่าในทางปฏิบัติไม่สามารถบดอัดแอสฟัลต์ผสมร้อนจน  $\% \text{air voids} = 0$  ได้ ทว่าเราสามารถหามวลและปริมาตรของแอสฟัลต์ผสมร้อนที่ไม่บดอัด (Uncompacted HMA) หรือในสภาพที่เป็นเม็ดกระจัดกระจาย (loose sample or rice sample) ได้ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงถึงสภาพที่เป็นเม็ดกระจัดกระจายของ HMA  
(Rice sample of HMA)



รูปที่ 10 แสดงถึงการใช้ขวด Pycnometer ในการหาค่า Maximum specific gravity ของ HMA

การหาค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุดของแอสฟัลต์ผสมร้อน ( $G_{mm}$ ) โดยใช้ Pycnometer สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$G_{mm} = \frac{\text{mass of uncompacted HMA}}{\text{volume of uncompacted HMA}} \frac{1}{\gamma_w}$$

$$G_{mm} = \frac{A}{(B+A-C)} \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- A คือ mass of dry rice sample, g
  - B คือ weight of flask filled with water, g
  - C คือ weight of flask with rice sample and water to calibration mark, g

ข้อมูลการทดสอบหาค่า maximum specific gravity ของแอสฟัลต์ผสมร้อน สามารถนำมา คำนวณหา Effective specific gravity of aggregate ( $G_{se}$ ) และ %asphalt absorption of aggregate ( $P_{ba}$ ) โดยสมการต่อไปนี้

$$G_{se} = \frac{(1-P_b)}{\left(\frac{1}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)} \quad (2.3)$$

$$P_{ba} = \frac{100G_b(G_{se}-G_{sb})}{(G_{sb} \times G_{se})} \quad (2.4)$$

$$P_{ba} = 100G_b \left[ \frac{1}{G_{sb}} - \frac{\frac{1}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}{1-P_b} \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ  $G_{se}$  คือ Effective sp.gr. of Blended aggregate = weight of agg. / (volume of agg. - volume of absorbed binder)

$P_{ba}$  คือ Asphalt absorption ของ Blended aggregate = weight of absorbed binder / weight of aggregate

$G_{sb}$  คือ Bulk Sp.Gr. of Blended aggregate

$P_b$  คือ binder content = weight of binder / total weight of mixture

$G_b$  คือ sp.gr. of binder

โดยปกติแล้ว asphalt absorption และ effective specific gravity of aggregate ของมวลรวมผสมชุดหนึ่งมักมีค่าที่เท่าเดิมแม้ว่าจะเปลี่ยน asphalt content ที่มาผสมกับมวลรวม ดังนั้นในบางสถานการณ์ก็สามารถคำนวณค่า maximum specific gravity of mixture จากค่า  $G_{se}$  ด้วยสมการต่อไปนี้

$$G_{mm} = \frac{1}{\left( \frac{(1-P_b)}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b} \right)} \quad (2.6)$$

การหาค่าความถ่วงจำเพาะก้อน (bulk specific gravity,  $G_{mb}$ ) ความถ่วงจำเพาะก้อน (bulk specific gravity,  $G_{mb}$ ) ของแอสฟัลต์ผสมร้อนคือการหามวล และปริมาตรของแอสฟัลต์ผสมร้อนในสถานะที่บดอัดแน่นแล้วทั้งแอสฟัลต์ มวลรวม และอากาศอยู่ร่วมกัน การหาค่า  $G_{mb}$  สำหรับแอสฟัลต์ผสมร้อนแบบ dense-graded ซึ่ง %air voids ไม่สูงนัก ช่องว่างอากาศไม่เชื่อมต่อกัน สามารถใช้วิธีการชั่งน้ำหนัก 3 สถานะคือในอากาศ ในน้ำ และผิวแห้งชุ่มน้ำ

$$G_{mb} = \frac{W_{dry}}{W_{ssd} - W_{sub}} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $W_{dry}$  คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างแห้งในอากาศ (air dry)

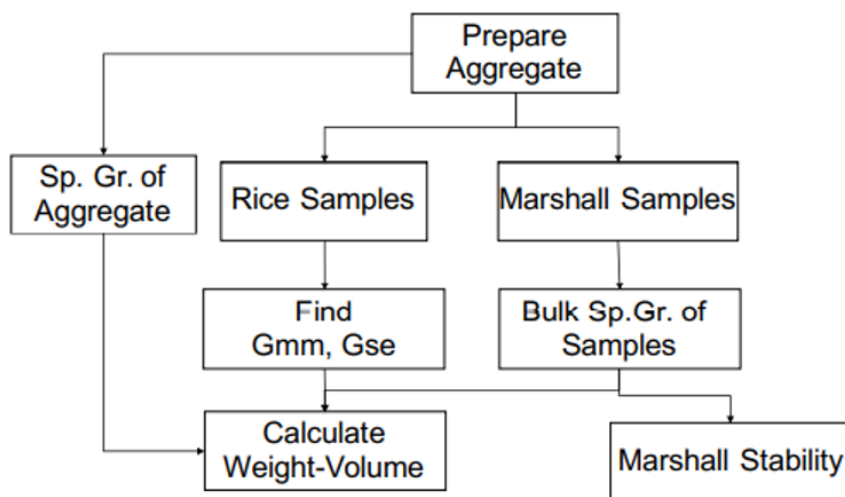
$W_{sub}$  คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างชั่งในน้ำ (submerged)

$W_{ssd}$  คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างชั่งในสภาวะผิวแห้งชุ่มน้ำ (saturated surface-dry)

### 2.3.2 การทดสอบและการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล (Marshall Test)

การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล เป็นการหาค่าของคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่าเสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air void) หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) และค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (VFA) ในส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตกับมวลรวมชนิดต่างๆ โดยมีหลักการในการออกแบบส่วนผสม คือ การทดลองเลือกขนาดคละของมวลรวมแบบ dense-graded แล้วนำไปทดลองผสมกับแอสฟัลต์ที่ % asphalt content ต่างๆกัน 4-6 ระดับ โดยบดอัดส่วนผสมให้เป็นก้อนทรงกระบอกโดยใช้ค้อนกระแทกแนวดิ่งเป็นจำนวนครั้งที่กำหนดตามระดับปริมาณจราจรที่จะนำส่วนผสมไปใช้งานโดยที่จำนวนครั้งการบดอัดที่ 35, 50 และ 75 ครั้ง แสดงถึงระดับปริมาณจราจร เบาบาง, ปานกลาง และ หนาแน่นตามลำดับ ซึ่งการทดลองผสมที่ % asphalt content ต่างๆกันก็เพื่อหา % asphalt content ที่ดีที่สุด (optimum binder content, OBC) ที่ทำให้ก้อนตัวอย่างที่ผ่านการบดอัดแล้วมี %air voids = 4% และมีค่ากำลัง stability and flow รวมทั้ง VMA ผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยใช้เครื่องทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล (Roberts et.al 1996, ASTM D6926)



รูปที่ 11 ผังขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล  
(ที่มา: Roberts et.al 1996)

#### Step A. Asphalt cement evaluation

1. เลือกแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่จะใช้ผสม เช่น Pen.60-70 for Thailand
2. ตรวจสอบว่าคุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นไปตามข้อกำหนด เช่น penetration, ductility, etc.
3. ทดสอบหา specific gravity ของแอสฟัลต์ซีเมนต์
4. หาความสัมพันธ์ระหว่าง temperature-viscosity, เพื่อระบุช่วงอุณหภูมิที่ใช้ผสมและบดอัด

#### Step B. Aggregate Evaluation

1. ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของมวลรวม เช่น LA abrasion, soundness, ฯลฯ ต้องผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด เช่น ทล.ม.408/2532 ของกรมทางหลวง เป็นต้น

2. ทดสอบหา gradation, bulk specific gravity ของมวลหยาบและมวลละเอียด
3. คำนวณหาสัดส่วนผสมของมวลหยาบและมวลละเอียดให้ได้ gradation ที่ผสมแล้วตามที่ต้องการ

#### Step C. Preparation of Marshall Specimens

1. ชั่งน้ำหนัก aggregate แต่ละขนาดให้ได้น้ำหนักรวมเท่ากับ 1200 กรัม ต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ต้องใช้ 3 ตัวอย่าง asphalt content ผสม 6 asphalt contents = 18
2. เพิ่มอีก 2 ตัวอย่าง อย่างละ 1200 กรัม (for Rice specific gravity)
3. เตรียมแอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณให้เพียงพอกับ 6 asphalt contents (4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%) สำหรับ 18 ตย. และอีก 2 ตย. (5.5%) Rice sp.gr.
4. นำตัวอย่างมวลรวมใส่ในภาชนะ, แอสฟัลต์ซีเมนต์ รวมทั้งอุปกรณ์ในการผสม ไปอบให้ได้อุณหภูมิที่ผสม 145 °C (2-3 ชั่วโมง)
5. นำมวลรวมที่อบแล้ววางบนตาชั่ง แล้วเทแอสฟัลต์ให้ได้น้ำหนักตาม asphalt content (%AC) ที่คำนวณไว้

$$\%AC = \frac{\text{asphalt weight}}{\text{total weight of mix}} \quad (2.8)$$

6. ผสมมวลรวมและแอสฟัลต์ให้เข้ากันจนเป็นสีดำทั้งหมด ระหว่างผสมให้ทำบนเตา  
(มาตรฐาน ASTM D6926 ได้กำหนดให้นำส่วนผสมไปบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบดอัด 8-11°C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงเพื่อจำลองระยะเวลาการขนส่งไปยังหน้างาน)
7. ตรวจวัดอุณหภูมิตัวอย่าง ถ้าได้เท่ากับอุณหภูมิสำหรับการบดอัด (°C) ก็เริ่มกรอกตัวอย่างใส่ในแบบหล่อได้ทันที ถ้าสูงกว่า รอให้ลดลงสักครู่ ถ้าต่ำกว่าให้นำไปอบในเตาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิตัวอย่าง



8. วางแผ่นกระดาษกรองวงกลมลงในฐานของแบบหล่อ (Marshall mold) ที่ได้อบไว้จนร้อน แล้วเทตัวอย่างลงในแบบหล่อ วัดอุณหภูมิตัวอย่าง
9. แซะตัวอย่างด้วยเกรียง (spatula) 15 ครั้งรอบ ๆ ขอบแบบหล่อ และ 10 ครั้งภายในตัวอย่าง ให้ตรงกลางสูงกว่าที่ขอบเล็กน้อย
10. ยึดแบบหล่อและขึ้นฐานให้เข้าในแท่นจับ แล้วบดอัดด้วยค้อนมาร์แชลจนครบจำนวน...ครั้ง
11. ถอดแบบหล่อนอกจากขึ้นฐาน แล้ววางกระดาษกรองอีก 1 แผ่นบนตัวอย่าง พลิกแบบหล่อกลับด้านแล้ววางบนขึ้นฐาน นำแบบหล่อและขึ้นฐานเข้ายึดในแท่นแล้วบดอัดด้านที่กลับไว้อีกรอบจนครบจำนวนครั้ง

ตารางที่ 1 พลังงานบดอัดด้วยวิธีมาร์แชล (จำนวนครั้ง/ด้าน)

ระดับปริมาณจราจร	ต่ำ (<10 <sup>4</sup> ESALs)	ปานกลาง (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>6</sup> ESALs)	สูง (>10 <sup>6</sup> ESALs)
ค้อนกระทบ จำนวนครั้ง/ด้าน	35	50	75

12. ลอกกระดาษออกจากตัวอย่าง รอให้ตัวอย่างเย็นตัวแล้วนำตัวอย่างออกจากแบบหล่อด้วยแม่แรง (ระวังอย่าให้ตัวอย่างเสียหาย) เขียนรหัสและ asphalt content. แล้วทิ้งไว้ข้ามคืนให้เย็นตัวจนเท่าอุณหภูมิห้อง
13. ทดสอบหา bulk specific gravity (G<sub>mb</sub>) ของก้อนตัวอย่าง (W<sub>dry</sub>, W<sub>sub</sub>, W<sub>ss</sub>) แล้วหาค่าเฉลี่ยในแต่ละ binder content

$$G_{mb} = \frac{W_{dry}}{W_{ssd} - W_{sub}} \quad (2.9)$$

14. ทดสอบ Maximum Specific Gravity ของ loose sample (Rice Specific Gravity ASTM D2041) และ คำนวณ G<sub>se</sub> และ P<sub>ba</sub>

#### Step D, Density and Voids Analysis

สมมติว่า G<sub>se</sub> และ P<sub>ba</sub> มีค่าคงที่ สำหรับทุกๆ asphalt content , ก็จะสามารถคำนวณหา G<sub>mm</sub> สำหรับทุก ๆ asphalt content ได้โดยใช้สมการที่ (2.5)

หลังจากนั้นคำนวณหา %air voids (AV), voids in mineral aggregate (VMA), voids filled with asphalt (VFA)

%Air voids

$$\%AV = 100 \left( 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (2.10)$$

voids in mineral aggregate,

$$VMA = 100 \left[ 1 - \frac{G_{mb}(1-P_b)}{G_{sb}} \right] \quad (2.11)$$

voids filled with asphalt,

$$VFA = 100 \frac{(VMA - AV)}{VMA} \quad (2.12)$$

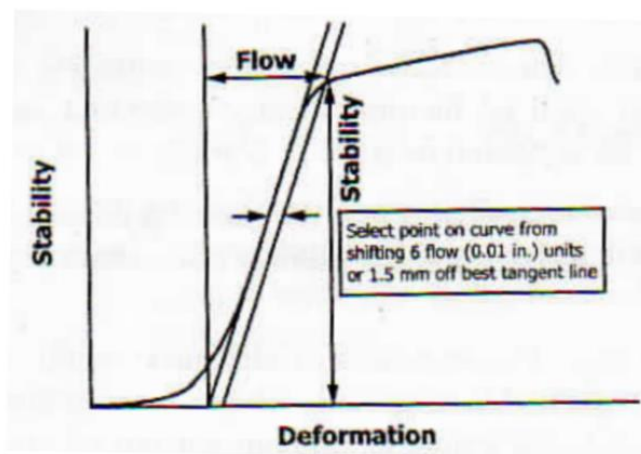
โดยที่  $G_{mm}$ ,  $G_{se}$ ,  $G_{mb}$  แสดงทศนิยม 3 ตำแหน่ง %AV, VMA แสดงทศนิยม 1 ตำแหน่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### Step E. Marshall Stability and Flow Test

1. วัดความสูงก้อนตัวอย่าง เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่าแรงกดสูงสุด
2. วางก้อนตัวอย่างทั้งหมดแชในอ่างน้ำอุ่น 60C เป็นเวลา 30-40 นาที
3. ยกตัวอย่างขึ้นจากอ่างครึ่งละ 1 ก้อน เช็ดด้วยผ้าอย่างรวดเร็วแล้วนำวางก้อนตัวอย่างใส่ในเฟรมกดมาร์แชล
4. แต่งกดมาสัมผัสกับเฟรมกดตัวอย่าง แล้วตั้งค่าเกจวัดให้เริ่มที่ศูนย์
5. กดแท่งบนเฟรมตัวอย่างด้วยอัตรา 2 นิ้ว/นาที จนกระทั่งอ่านได้ค่าแรงกดสูงสุด บันทึกค่าแรงกด และเกจค่าการยุบตัว ให้ได้ความละเอียด 0.01 นิ้ว (0.25 มม) ในระหว่างที่กดจนก้อนตัวอย่างเลยค่าแรงกดสูงสุด
6. นำค่าแรงและการยุบตัวมาพล็อตกราฟแล้วหา ค่าแรงกดสูงสุด (stability) ค่าการยุบตัว (flow) ตามนิยาม ASTM D6927-15

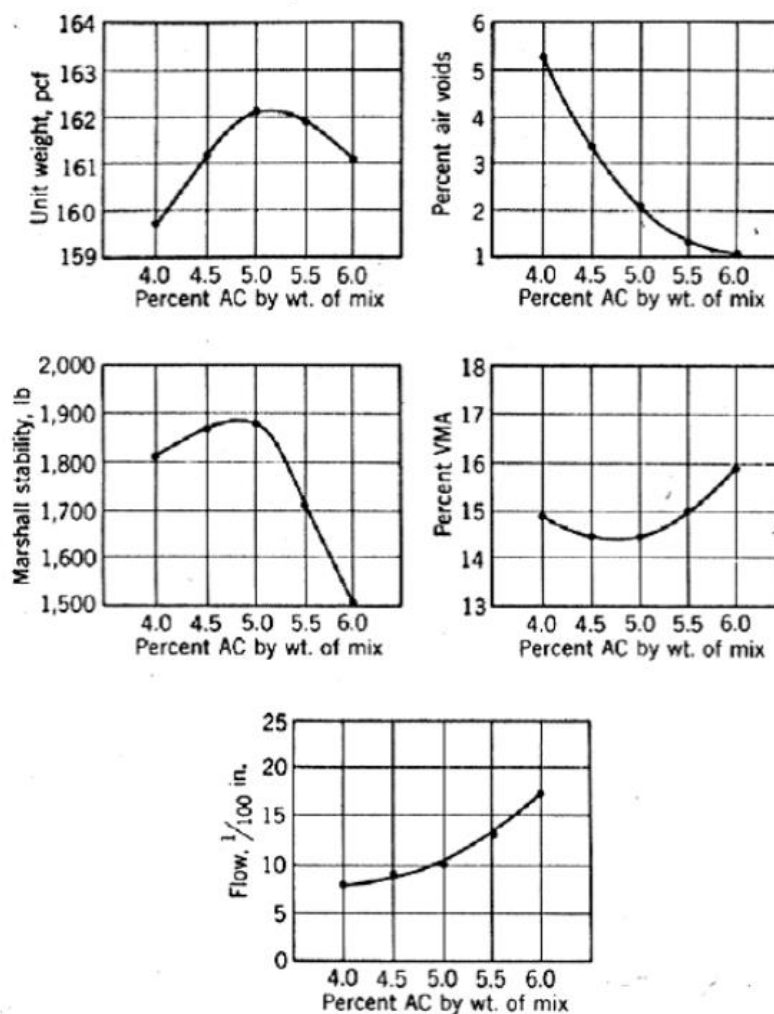
7. เปิดตารางหาค่าปรับแก้ค่า stability เนื่องจากความสูงของก้อนตัวอย่าง
8. คำนวณปรับแก้ค่าแรงกดสูงสุดเป็นค่า stability และคำนวณค่า flow จากค่าการยุบตัวที่จุด stability หารด้วย 0.25 มม.



รูปที่ 12 การหาค่า Stability และ Flow จากกราฟตามนิยาม ASTM D6927-15  
(ที่มา: ASTM D6927-15)

#### Step F. Tabulating and Plotting Test Results

1. ใส่ผลการทดสอบต่างๆในตารางสรุป และคำนวณค่าเฉลี่ยผลการทดสอบของแต่ละ asphalt content
2. นำค่าเฉลี่ยไปพล็อตกราฟต่อไปนี้
  - Asphalt content vs. Air voids
  - Asphalt content vs. density
  - Asphalt content vs. Marshall stability
  - Asphalt content vs. Flow
  - Asphalt content vs. VMA



รูปที่ 13 กราฟลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดย  
วิธีการ ทดสอบแบบ Marshall  
(ที่มา: The Asphalt Institute)

Step G. Determine Optimum Binder Content (OBC) อ้างอิงวิธีของ NAPA  
ในการหา OBC

1. Determine OBC = %AC at 4%AV จากกราฟ
2. ใช้ค่า OBC ที่ได้ ไปเปิดกราฟอีก 3 รูป หาคุณสมบัติต่อไปนี้ที่จุด OBC :
  - Stability
  - Flow
  - VMA

ตารางที่ 2 เกณฑ์มาตรฐานค่าพารามิเตอร์ของมาร์แชล

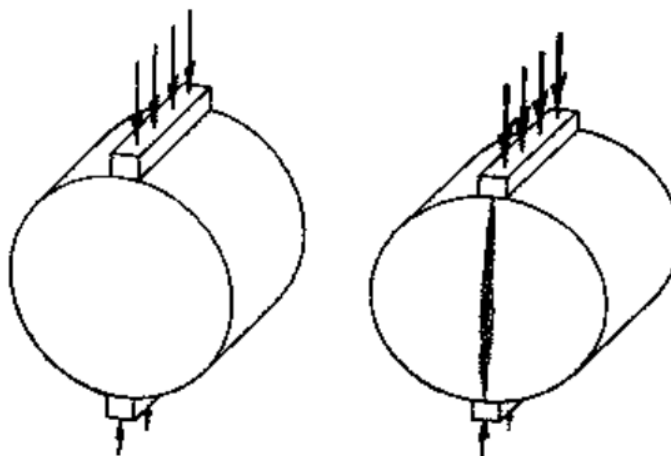
	Light Traffic ESALs < 10 <sup>4</sup>	Medium Traffic 10 <sup>4</sup> < ESALs < 10 <sup>6</sup>	Heavy Traffic ESALs > 10 <sup>6</sup>
Compaction (blows/side)	35	50	75
Stability (N)	3,333	5,333	8,000
Flow (0.25 mm.)	8 to 18	8 to 16	8 to 14
Air void %	3 - 5	3 - 5	3 - 5
Void in Mineral Aggregate, VMA %	Nominal maximum particle size of aggregate		
	Sieve No.	mm.	Minimum VMA%
	1.5 นิ้ว	37.5	12
	1 นิ้ว	25	13
	3/4 นิ้ว	19	14
	1/2 นิ้ว	12.5	15
	3/8 นิ้ว	9.5	16
	#4	4.75	18

### 2.3.3 การทดสอบวัสดุโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)

ในอดีตทางทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทาง วิธีการทดสอบในภาคสนามมักมีความไม่สะดวกในทางปฏิบัติอีกทั้งยังใช้เวลายาวนานในการทดสอบ จึงทำให้มีความพยายามที่จะคิดค้นการทดลองที่เหมาะสมในการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ โดยความพยายามในการพัฒนาวิธีทดสอบได้ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องโดยจะมุ่งเน้นไปที่ความเรียบง่ายและมีประสิทธิภาพในการทดสอบได้อย่างถูกต้องมีความแปรปรวนที่ต่ำและต้องสามารถให้ค่าคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ จนกระทั่งได้วิธีการทดสอบที่เหมาะสม คือการทดสอบแบบ Indirect tensile test ทั้งแบบการให้น้ำหนักแบบคงที่ (Static) และแบบการให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุในงานทางได้อย่างมีประสิทธิภาพในด้านของความ

สะดวกในการทดสอบ และให้ผลการทดสอบที่มีความแปรปรวนที่ต่ำ ทำให้วิธีการทดสอบแบบ Indirect tensile test ได้รับการยอมรับจาก American Society for Testing and Materials (ASTM) และ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับการแนะนำให้นำมาใช้ในการทดสอบวัสดุงานทางในประเทศต่างๆ

การทดสอบแบบ Indirect Tensile Test นั้นกระทำโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression load) ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งแบบอัตราคงที่ (Static) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) ก็ได้แล้วแต่กรณี โดยที่ให้น้ำหนักกระทำในแนวนอนตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ตามที่แสดงในรูปที่ 14

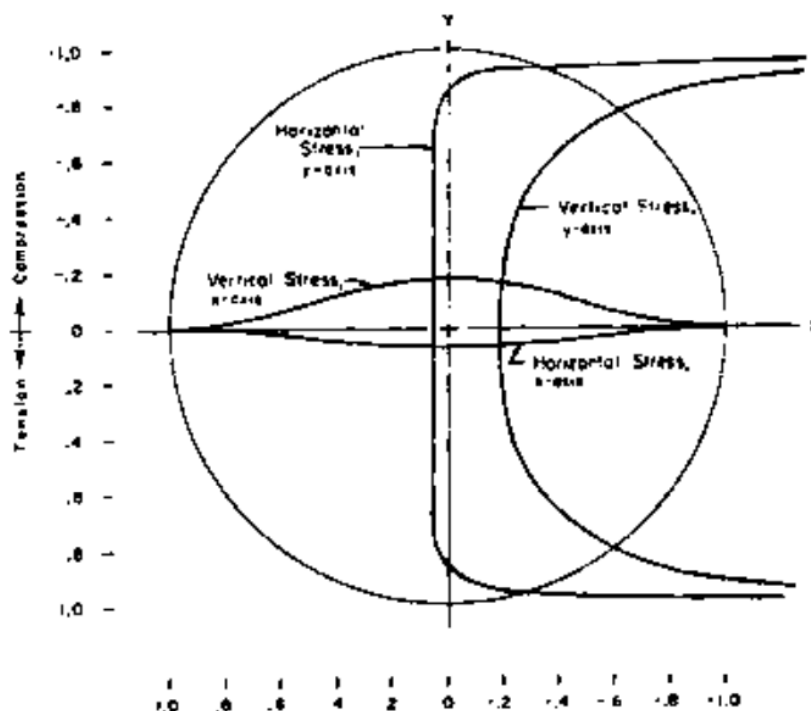


รูปที่ 14 การให้น้ำหนักกระทำของก้อนตัวอย่าง และลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test

(ที่มา: Hudson and Kennedy, 1968)

จากทฤษฎีของการที่ความเค้น (Stress) พัฒนาขึ้นเนื่องจากการให้น้ำหนักกระทำต่อก้อนตัวอย่างทรงกระบอก ซึ่งในทางปฏิบัติการขีดการให้น้ำหนักก้อนตัวอย่างด้วยลักษณะเป็นแนวเส้น (Line load) แล้วจะทำให้จุดแตกร้าวของวัสดุไปเกิดที่ตำแหน่งขอบที่ผิวของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ทำการให้น้ำหนักเนื่องจาก Compression Stress แทนที่จะเกิดการแตก ร้าวที่กึ่งกลางของก้อนตัวอย่างเนื่อง Tensile Stress ซึ่งจะได้ผลที่ไม่ถูกต้องตามคุณสมบัติจริง ของวัสดุตามที่ควรจะเป็น ดังนั้นการให้น้ำหนักต้องกระทำผ่านแท่งกดน้ำหนักที่เป็นสเตนเลสที่มีขนาดแนะนำให้ใช้ดังนี้ สำหรับกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร หรือใช้

แห่งที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร สำหรับกรณีที่ยึดตัวอย่างที่มีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร โดยที่แท่งก้นน้ำหนัkdังกล่าวมีด้านสัมผัสกับผิวของก้อนตัวอย่างทดสอบเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเท่ากับรัศมีของก้อนตัวอย่างทำให้สามารถแนบชิดกันได้พอดีเพื่อประโยชน์ในการกระจายน้ำหนักและในการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำให้คงที่ ซึ่งการในให้น้ำหนักในลักษณะนี้จะทำให้เกิด Tensile Stress ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำต่งฉากกับแนวของการให้น้ำหนักหรือแนวเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวดิ่ง ในที่สุดจะส่งผลให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวขึ้นมาตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางเนื่องจากการให้ Single load หรือ Repeated load ก็ตาม โดยที่ลักษณะการ กระจายของ Stress ที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่างทดสอบทั้งในแนวนราบและแนวดิ่งขณะทำการทดสอบ แสดงไว้ในรูปที่ 2-15 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่บริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง ทดสอบ Compression Stress ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่า ของ Tensile Stress ที่เกิดขึ้นในแนวนราบ ดังนั้นจึงทำให้แน่ใจได้ว่าผลการทดสอบที่ได้รับเป็นคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวิธีการทดสอบแต่อย่างใด



รูปที่ 15 แสดงลักษณะการกระจายของ Tensile Stress และ Compressive Stress ในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test  
(ที่มา: Hudson and Kennedy, 1968)

### 2.3.3.1 การทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Static

รายละเอียดวิธีการทดสอบโดยทั่วไปของการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test นั้น สำหรับการทดสอบแบบ Static ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะได้รับการให้น้ำหนักด้วยอัตรา 50 มิลลิเมตรต่อหน้าที่ยังไรก็ตามอัตราการให้น้ำหนักที่ช้ากว่านี้อาจได้รับการพิจารณาใช้ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่การทดสอบกระทำที่อุณหภูมิต่ำเพื่อพิจารณา ความต้านทานต่อการเกิด Thermal cracking ของวัสดุ นอกจากนี้อัตราการให้น้ำหนักที่ช้าอาจจำเป็นต้อง พิจารณาใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งเปราะ เช่น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นอุณหภูมิห้องที่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการทดสอบที่อุณหภูมิอื่นๆ ก็อาจจะกระทำได้อีกขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทดสอบสำหรับการทดสอบวัสดุจำพวกที่มีคุณลักษณะเฉพาะที่แปรเปลี่ยนคุณสมบัติตามอุณหภูมินั้น การทดสอบควรกระทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 3 ค่า คือที่ 5 องศาเซลเซียส



25 องศาเซลเซียส และ 40 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะแสดงถึงผลกระทบของความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ ขณะทำการให้น้ำหนักในระหว่าง การทดสอบควรตรวจสอบและบันทึก ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด (Deformation) ที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างทั้งในแนวราบและแนวตั้ง อย่างต่อเนื่อง ในการหาค่า Indirect Tensile Stress (ITS) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (2.13)$$

โดยที่  $S_t$  = IDT Strength, kPa

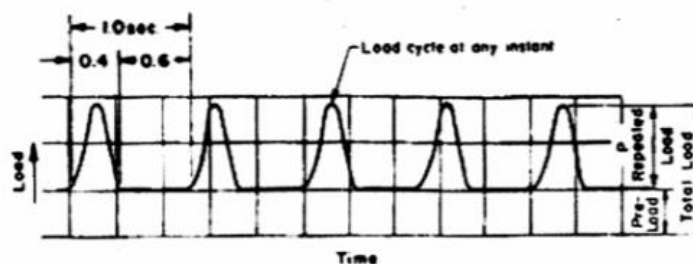
$P$  = แรงกระทำสูงสุด (maximum load), N

$t$  = ความสูงของก้อนตัวอย่าง, mm.

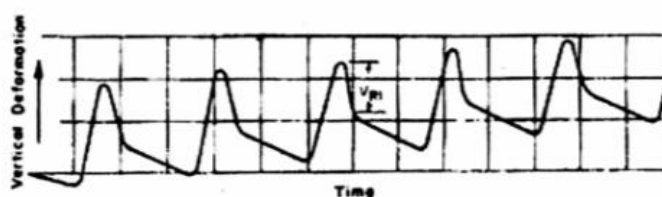
$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง, mm.

### 2.3.3.2 การทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Dynamic

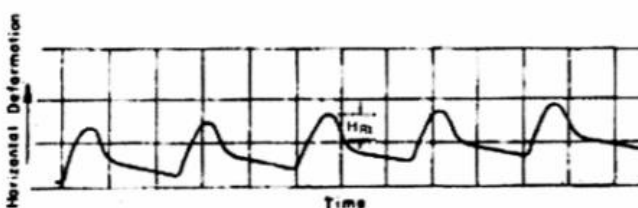
สำหรับการทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Dynamic หรือ Repeated-load หลักการพื้นฐานที่ใช้นั้นไม่แตกต่างกัน แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่วิธีนี้จะให้น้ำหนักทดสอบที่คงที่ค่าหนึ่ง ที่ไม่ถึงกับทำลายก้อนตัวอย่างทดสอบและกระทำการให้น้ำหนักสลับกับการหยุดพักน้ำหนักเข้าไปมาโดยตรวจสอบและบันทึกค่า Deformation ทั้งแนวราบและแนวตั้ง แต่จะให้ความสนใจเฉพาะในส่วน of ค่า Recoverable deformation ซึ่งพิจารณาได้จากสมมติฐานที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง load และ deformation มีลักษณะเป็นเส้นตรงตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 16



(a) Load-Time Pulse.



(b) Vertical Deformation vs. Time.



รูปที่ 16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Load-Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบ

Indirect Tensile Test

(ที่มา: Hudson and Kennedy, 1968)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค่าเหล่านี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า Resilient Modulus of Elasticity นอกจากนี้ การทดสอบแบบนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่า Permanent deformation ที่อาจจะเกิดขึ้น เนื่องจาก Repeated Load ได้อีกด้วย โดยปกติแล้ว Repeated stress ที่กระทำกับก้อน ตัวอย่างทดสอบจะให้ในลักษณะ Haversine โดยจะมีการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อรักษา สภาพในการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งกดน้ำหนักกับผิวของก้อนตัวอย่าง แต่ทั้งนี้ควรเลือก ช่วงเวลาในการให้น้ำหนักที่สั้นๆมาใช้ในการทดสอบ เนื่องจากการที่ ทดสอบด้วยช่วงระยะเวลาการให้ น้ำหนักที่สั้นจะให้ค่า Fatigue Life ที่สูงขึ้นเข้าใจค่าที่เกิด ขึ้นจริงในสนาม เพราะโดยปกติแล้วค่า Fatigue Life ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่เกิดจากสภาพการ ใช้งาน จริงในสนาม สำหรับระยะเวลาในการให้น้ำหนักแบบ Repeated Load ที่มักใช้ทดสอบจะอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.4 วินาที

ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Indirect Tensile Test แบบ Dynamic

ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus : MR)

ค่าโมดูลัสคืนตัวมีความสำคัญอย่างมากในการหาพฤติกรรมของวัสดุงานทาง เนื่องจาก เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความอ่อนไหวในการตอบสนองต่อน้ำหนักที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งจะแสดงออกมาใน รูปของค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ค่าโมดูลัสคืนตัวของ วัสดุที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีแรงดึงทางอ้อม สามารถคำนวณได้จาก สูตรดังนี้

$$MR = \frac{(v+0.27) \times P}{L \times \Delta H} \quad (2.14)$$

เมื่อ	MR	=	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)
	v	=	สัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)
	P	=	ระดับน้ำหนัก (N)
	L	=	ความหนาของก้อนตัวอย่าง (mm.)
	$\Delta H$	=	ค่าการคืนตัวแนวนราบ (Resilient horizontal deformation) (mm.)
	$\Delta H$	=	ค่าการคืนตัวแนวนราบ (Resilient horizontal deformation) (mm.)

สำหรับสัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$v = 3.59 \frac{\Delta H}{\Delta V} - 0.27 \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\nu$  = สัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

$\Delta H$  = ค่าการคืนตัวในแนวนราบ (Resilient horizontal deformation)

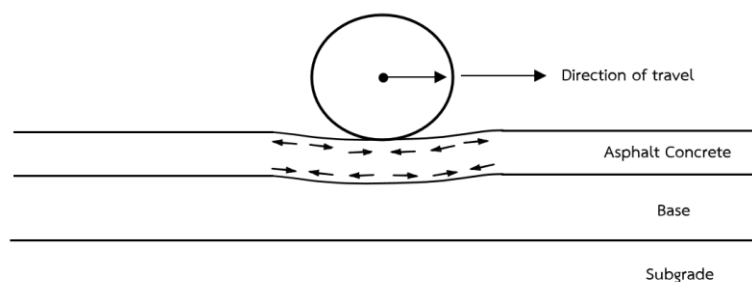
$\Delta V$  = ค่าการคืนตัวในแนวตั้ง (Resilient vertical deformation)

ค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ขึ้นอยู่กับการนิยามค่าการคืนตัวในแนวนราบ (Resilient horizontal deformation) ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

- Instantaneous resilient modulus เป็นค่าโมดูลัสคืนตัวที่คำนวณมาจากค่าการคืนตัวแนวนราบที่เกิดขึ้นในระหว่างช่วงที่มีการป้อนน้ำหนักทดสอบ
- Total resilient modulus เป็นค่าโมดูลัสคืนตัวที่คำนวณมาจากค่าการคืนตัวแนวนราบ ทั้งที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงที่มีการป้อนน้ำหนักทดสอบ และรวมไปถึงการคืนตัวในระหว่างช่วงเวลาพัก (Rest time) จนกระทั่งถึงรอบการป้อนน้ำหนักครั้งต่อไป อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าการคืนตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วง 1 รอบของการทดสอบ

คุณสมบัติด้านการล้า (Fatigue property)

เป็นปรากฏการณ์การแตกร้าวของวัสดุผิวทางที่เกิดขึ้นภายใต้ความเค้นซึ่งพัฒนามาจาก น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) ที่มีระดับน้ำหนักน้อยกว่าค่า Tensile strength ของวัสดุ



รูปที่ 17 ลักษณะของ Repeated stress ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต  
(ที่มา: N. Tantiworawit 2003)

จากรูปที่ 17 แสดงถึงลักษณะของ Repeated stress ที่เกิดขึ้นบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจาก Moving axle load แสดงให้เห็น Compressive stress ที่เกิดขึ้นตรงจุดใต้ล้อบนผิวของแอสฟัลต์คอนกรีต ตรงกันข้ามกับบริเวณข้างเคียงล้อที่จะเกิดเป็น Tensile stress ค่า Maximum compressive strain ที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 4-5 เท่าของ Tensile strain แต่เมื่อพิจารณาที่ผิวด้านใต้ของแอสฟัลต์คอนกรีต ลักษณะที่เกิดขึ้นจะเป็นในทางตรงกันข้าม กล่าวคือค่า Maximum strain ที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นผลมาจาก Tension

ในเรื่องที่เกี่ยวกับคุณสมบัติด้านความล้า (Fatigue property) มีคำศัพท์ 2 คำที่ต้องทราบ คือ Service life และ Fracture life สามารถให้คำนิยามได้ดังนี้

- Service life หรือ Fatigue life คือ จำนวนครั้งของ Repeated load ที่ทำให้ค่า Resilient Modulus (MR) ของแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง 50 % จากค่า MR เริ่มต้นสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ หรือเป็นจำนวนครั้งของ Repeated load ที่ทำให้มีการ เริ่มต้นของรอยแตกร้าว (Crack) เกิดขึ้นในแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการทดสอบใน สนาม
- Fracture life คือ จำนวนครั้งของ Repeated load ที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ (Completely fracture) ในแอสฟัลต์คอนกรีต

Service life และ Fracture life สามารถหาได้จากการทดสอบโดยการให้ น้ำหนักในลักษณะต่างๆ (Load condition) ถ้าการป้อนน้ำหนักตลอดการทดสอบนั้นมีระดับที่ คงที่

ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ จะเรียกว่าการป้อนน้ำหนักแบบ Simple loading แต่ถ้าลักษณะการป้อนน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการทดสอบ จะเรียกว่าการป้อนน้ำหนักแบบ Compound loading การให้น้ำหนักในลักษณะนี้ไม่เพียงแต่มีการเปลี่ยนแปลงระดับ ' Stress เท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในระหว่างการทดสอบด้วย

สำหรับการทดสอบ Fatigue ในห้องปฏิบัติการมีการควบคุมการป้อนน้ำหนักอยู่ 2 วิธี คือ

- Control stress กระทำโดยการป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำในปริมาณคงที่ โดยปกติ การทดสอบแบบนี้เหมาะสำหรับการใช้ทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะนำไปใช้ ก่อสร้างถนนที่มีความหนามาก (มากกว่า 150 มิลลิเมตร)
- Control strain กระทำโดยการป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำในปริมาณที่ทำให้เกิด Repeated deformation หรือ Strain แก่ก่อนวัสดุทดสอบอย่างคงที่ โดยปกติการทดสอบ แบบนี้เหมาะสำหรับการใช้ทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะนำไปใช้ก่อสร้างถนนที่มีความหนาน้อย (น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร)

#### 2.3.4 Point of Zero Charge

(Yang et al., 2004) กล่าวว่า ว่า Points of zero charge (pHpzc) คือ pH ที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ โดย เมื่อ  $pH < pH_{pzc}$  ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า  $pH > pH_{pzc}$  ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ โดยคำจำกัดความของ Point of zero charge คือ pH ที่ประจุพื้นผิวสุทธิของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับศูนย์ แนวคิดนี้ได้รับการนำมาใช้โดยการเพิ่มความสนใจในค่า pH ของสารละลายระหว่างการดูดซับ สาเหตุที่ pH ได้รับความสนใจอย่างมากก็คือการดูดซับของสารบางชนิดขึ้นอยู่กับ pH เป็นอย่างมาก ค่า pzc ถูกกำหนดโดยลักษณะของตัวดูดซับ ตัวอย่างเช่นประจุพื้นผิวของตัวดูดซับอธิบายโดยไอออนที่อยู่บนพื้นผิวของโครงสร้างอนุภาค (ตัวดูดซับ) เช่น รูปภาพที่ 2-18 pH ต่ำ ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จะถูกดูดซับมากกว่าไอออนบวกอื่น ๆ (ตัวดูดซับ) ดังนั้นไอออนบวกอื่น ๆ จะถูกดูดซับน้อยลงในกรณีของอนุภาคที่มีประจุลบ ในทางกลับกันหากพื้นผิวมีประจุบวกและ pH เพิ่มขึ้นแอนไอออนจะถูกดูดซับน้อยลงเมื่อไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เพิ่มขึ้น จากมุมมองของตัวดูดซับหาก pH ต่ำกว่าค่า pzc ประจุพื้นผิวของตัวดูด

ซั้จะเป็นบวกเพื่อให้แอนไอออนสามารถดูดซั้ได้ ในทางกลับกันถ้า pH สูงกว่าค่า pzc ประจุที่พื้นผิวจะเป็นลบเพื่อให้สามารถดูดซั้ไอออนบวกได้

ในอิเล็กโทรเคมี พื้นผิวของอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์มักจะมีประจุ หากอิเล็กโทรดสามารถเปลี่ยนแปลงทให้ปริมาณประจุบนพื้นผิวของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไปจะขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดตามคำนิยามของ IUPAC (สมาคมเคมีสากล) ศักย์ไฟฟ้าที่จุดศูนย์ประจุถือเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรด (เทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิงที่กำหนด) ที่หนึ่งในปริมาณประจุที่กำหนดมีค่าเป็นศูนย์ โดยศักย์ไฟฟ้าที่จุดศูนย์ประจุถูกใช้ในการกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบสัมพัทธ์ในสารละลายที่กำหนดไว้ IUPAC จึงได้กำหนดค่า PZC หรือ Point of zero charge ดังสมการที่ 2.16

$$E_{pzc} = E - E\sigma \quad (2.16)$$

โดยที่:

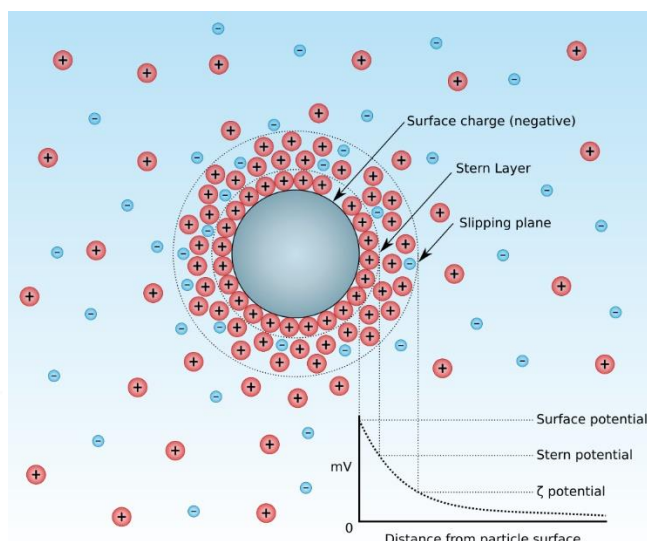
$E_{pzc}$  คือ ความต่างศักย์ของอิเล็กโทรดเทียบกับจุดประจุศูนย์  $E\sigma=0$

$E$  คือ ศักย์ของอิเล็กโทรดเดียวกันกับอิเล็กโทรดอ้างอิงที่กำหนดเป็นโวลต์

$E\sigma=0$  คือ ศักย์ของอิเล็กโทรดเดียวกันเมื่อประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ในกรณีที่ไม่มีการดูดซั้เฉพาะนอกเหนือจากตัวทำละลายเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิงที่ใช้ข้างต้นในหน่วยโวลต์

โครงสร้างของอิเล็กโทรไลต์ที่พื้นผิวอิเล็กโทรดยังสามารถขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวด้วยการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า ตัวอย่าง เช่น บนอิเล็กโทรดแพลตตินั่มมีรายงานว่าโมเลกุลของน้ำถูกเชื่อมด้วยไฮโดรเจนอย่างอ่อนด้วยการวางแนว "ออกซิเจนขึ้น" บนพื้นผิวที่มีประจุลบและถูกเชื่อมด้วยไฮโดรเจนอย่างมากโดยมีการวางแนวราบเกือบที่พื้นผิวที่มีประจุบวก (Osawa Masatoshi et al,2008)

ที่ pzc ระบบคอลลอยด์มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ (นั่นคืออนุภาคยังคงอยู่หนึ่งในสนามไฟฟ้า) ความเสถียรต่ำสุด (แสดงอัตราการแข็งตัวหรือการตกตะกอนสูงสุด) ความสามารถในการละลายสูงสุดของเฟสของแข็งความหนืดสูงสุดของการกระจายและอื่น ๆ ลักษณะเฉพาะ โดยรูปที่ 18 แสดงถึงแผนผังที่แสดงความเข้มข้นไอออนิกและความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากพื้นผิวที่ขั้วของอนุภาคที่แขวนลอยในสารละลาย



รูปที่ 18 ประจุไฟฟ้าสองชั้น (EDL) รอบอนุภาคที่มีประจุลบในสารแขวนลอยในน้ำ  
(ที่มา: Mohammad Reza Andalibi 2019)

## 2.4 การยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์

ในบางครั้งมวลรวมสามารถแบ่งประเภทได้ตามความเป็นกรด (Acidic) และ ความเป็นด่าง (Alkaline) โดยในการแบ่งประเภทของหินสามารถแบ่งได้อย่างง่ายดายโดยการดูที่องค์ประกอบของหินว่าหินนั้นมีแร่ธาตุที่เป็นกรดหรือด่างที่มากกว่า โดยสำหรับค่าการยึดเกาะระหว่างหินกับแอสฟัลต์ นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของหิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหินหินที่มีความเป็นด่างที่มาก (Alkaline aggregate) ซึ่งจะมี  $\text{SiO}_2$  อยู่ในหินปริมาณที่น้อย จะทำให้มีการยึดเกาะกับแอสฟัลต์ที่ดี (Tarrer, A. R., & Wagh, V. 1991) เนื่องจากแอสฟัลต์นั้นจะประกอบไปด้วยกรดแนฟทานิก Naphthenic acids (Glozman, E. P., & Akhmetova, R. S. 1970) โดย Naphthenic acids จะมี Carboxylic acid,  $\text{COOH}$  และ ส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายกับแอสฟัลต์ ด้วยตัวมันเอง ทำให้ส่วนของ Carboxylic acid นั้นจะดูดซับเข้ากับพื้นผิวของมวลรวมและจะหันส่วนโครงสร้างที่เป็นไฮโดรคาร์บอนออกด้านนอก ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้มวลรวมมีพื้นผิวที่สามารถจับเข้ากับส่วนของแอสฟัลต์ที่เหลือได้แม้ว่าจะมีน้ำอยู่ก็ตาม ซึ่งโดยปกติแล้วมวลรวมที่มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  มาก (Siliceous aggregates) ซึ่งจะมีความเป็นกรด จะไม่ส่งผลกับกรดแนฟทานิก Naphthenic



acids ของแอสฟัลต์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วกรดจะมีการต่อต้านซึ่งกันและกันจึงยากที่จะมีพันธะที่ดีระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมที่เป็น Siliceous aggregate แต่บางครั้งในแอสฟัลต์จะมีการเติมสารที่เป็นต่างแต่ว่าส่วนใหญ่จะเป็นต่างที่อ่อนซึ่งจะไม่ค่อยยึดเกาะกับ SiO<sub>2</sub> ได้ (Gzemski, G. F., McGlashan, W. D., & Dolch, L. W. 1968)

## 2.5 วิธีการออกแบบส่วนผสมสำหรับ Cold Mixed (Asphalt Institute)

ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบส่วนผสมของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันด้วยวิธีผสมเย็นแบบ Dense grade โดยวิธีการนั้นจะใช้วิธีตามที่ Asphalt Institute แนะนำไว้ใน A Basic Asphalt Emulsion Manual (2004) วิธีการออกแบบนี้ใช้สำหรับแอสฟัลต์อิมัลชันผสมเย็นที่มีความหนาแน่นแบบ Dense grade ที่มีขนาดหินโตสุด 25 มม. (1 นิ้ว) หรือน้อยกว่า และจะใช้กับแอสฟัลต์ที่มีการเซตตัวปานกลางและช้าสำหรับแอสฟัลต์อิมัลชัน วิธีการออกแบบนี้ใช้ได้กับสารผสมที่เกิดจากการผสมที่หน้างานจริง หรือ ผสมที่โรงงานที่อุณหภูมิแวดล้อมและเก็บไว้ในโรงเก็บที่สำหรับนำไปใช้งานต่อไป

### 2.5.1 มวลรวมสำหรับ Cold mixed

สำหรับมวลรวมที่นำมาใช้นั้นต้องผ่านข้อกำหนดดังแสดงในรูปที่ 19 โดยจะเป็นการใช้ขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานกับส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยจะเป็นแบบ Dense grade สำหรับ Cold mixed และสำหรับส่วนผสมนั้นควรมีการทำให้แห้งก่อนนำไปบดอัด

Sieve Size	Semi-Processed Crusher, Pit or Bank Run	Processed Dense-Graded Asphalt Mixtures, Percent Passing by Weight				
50 mm (2 in.)	—	100	—	—	—	—
37.5 mm (1-1/2 in.)	100	90-100	100	—	—	—
25.0 mm (1 in.)	80-90	—	90-100	100	—	—
19.0 mm (3/4 in.)	—	60-80	—	90-100	100	—
12.5 mm (1/2 in.)	—	—	60-80	—	90-100	100
9.5 mm (3/8 in.)	—	—	—	60-80	—	90-100
4.75 mm (No. 4)	25-85	20-55	25-60	35-65	45-70	60-80
2.36 mm (No. 8)	—	10-40	15-45	20-50	25-55	35-65
1.18 mm (No. 16)	—	—	—	—	—	—
600 µm (No. 30)	—	—	—	—	—	—
300 µm (No. 50)	—	2-16	3-18	3-20	5-20	6-25
150 µm (No. 100)	—	—	—	—	—	—
75 µm (No. 200)	3-15	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10
Sand Equivalent, Percent	—	35 min.	35 min.	35 min.	35 min.	35 min.
Los Angeles Abrasion @ 500 Revolutions	—	40 max.	40 max.	40 max.	40 max.	40 max.
Percent Crushed Faces	—	65 min.	65 min.	65 min.	65 min.	65 min.

รูปที่ 19 เกณฑ์กำหนดสำหรับขนาดคละแบบ Dense grade สำหรับ Cold mixed

### 2.5.2 แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับ Cold mixed

แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับการนำมาใช้สำหรับส่วนผสมแบบ Dense grade จะสามารถใช้ได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันอยู่สองประเภทได้แก่ ชนิดที่เซตตัวช้า (SS) และชนิดที่เซตตัวปานกลาง (MS) โดยที่ชนิดเซตตัวปานกลางนั้นจะนำมาใช้งานกับมวลรวมที่มีการผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ในปริมาณที่น้อย และสำหรับชนิดเซตตัวช้าจะนำมาใช้งานกับมวลรวมที่มีการผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ในปริมาณที่มากซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นส่วนผสมที่มีความหนาแน่นของมวลรวมที่สูง

### 2.5.3 หาปริมาณแอสฟัลต์สำหรับ Cold mixed

สำหรับการหาปริมาณแอสฟัลต์นั้นเป็นการประมาณค่าซึ่งอาจจะนำค่านี้ไปใช้เป็นแนวทางในการนำไปใช้ออกแบบปริมาณแอสฟัลต์ที่ดีที่สุด สำหรับการหาปริมาณแอสฟัลต์นี้จำเป็นต้องมีการทดสอบ ปริมาณเนื้อยางของแอสฟัลต์อิมัลชันโดยจะใช้วิธีตาม ASTM D 244, “Residue and Oil Distillate by Distillation” และสมการในการคำนวณนั้นจำเป็นต้องทราบค่า %Passing 4.75 mm (No. 4) sieve ของมวลรวม สำหรับสมการจะแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 ประเภท แสดงดังสมการที่ 2.17 และ 2.18

สำหรับ Surface Mixtures

$$\%Emulsion = \frac{(0.06 \times B) + (0.01 \times C)}{A} \quad (2.17)$$

สำหรับ Surface Mixtures

$$\%Emulsion = \frac{(0.07 \times B) + (0.03 \times C)}{A} \quad (2.18)$$

โดยที่

$\%Emulsion$  = Estimated initial percent asphalt emulsion by weight of aggregate

$A$  = Percent residue of emulsion by distillation

$B$  = Percent of dry aggregate passing 4.75 mm. (No.4) sieve

$$C = 100 - B = \text{Dry aggregate retained on 4.75 mm. (No.4) sieve}$$

#### 2.5.4 ขั้นตอนการผสมสำหรับ Cold mixed

ชั่งน้ำหนักของมวลรวมเปียกในชามผสมที่เหมาะสม และชั่งน้ำหนักมวลรวมแห้งสำหรับการบดอัดความสูงของชั้นงานอยู่ที่  $63.5 \pm 6$  มม. ( $2-5 \pm 0.25$  นิ้ว) สำหรับแต่ละชุด ปริมาณมวลรวมที่การตามปกติคือประมาณ 1200 กรัมของมวลรวมแห้ง ต้องมีความระมัดระวังเนื่องจากผลการทดสอบของงานส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับมวลรวมในชั้นตอนนี้ด้วยซึ่งจำเป็นต้องนำมวลรวมมาทำให้แห้ง แบ่งเป็นขนาดต่างๆ แล้วผสมใหม่เป็นขนาดแบทช์แต่ละขนาด หากทำเช่นนี้ จะต้องเติมน้ำที่เท่ากับปริมาณที่ความต้องการลงในแต่ละชุด และปิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงก่อนที่จะผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน

หากจำเป็นต้องผสมน้ำ ให้ชั่งมวลรวมในปริมาณที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เติมน้ำในมวลรวมและผสมด้วยมือเป็นเวลา 10 วินาทีหรือจนกว่าความชื้นจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ต้องทำให้เสร็จทันทีก่อนที่จะเติมส่วนผสมที่เป็นแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยชั่งน้ำหนักอิมัลชันในปริมาณที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และเทลงบนมวลรวมที่มีความชื้นโดยรอบ และกวนหรือผสมเป็นเวลา 60 วินาที หรือจนกว่าจะมีการกระจายตัวของอิมัลชันเพียงพอในส่วนผสม

#### 2.5.5 ขั้นตอนการบดอัดก้อนตัวอย่างสำหรับ Cold mixed

จำเป็นต้องมีการตากให้แห้งอากาศหรือการทำให้แห้งของส่วนผสมที่เป็น Dense grade ก่อนทำการทดสอบการบดอัด โดยปริมาตรของเหลวทั้งหมด (อิมัลชัน + น้ำรวมกัน) มากเกินไปบางครั้งทำให้ (VMA) ไม่สามารถดูดซับไว้ได้ทั้งหมด จึงไม่สามารถทำการบดอัดที่เหมาะสมได้ โดยจะสามารถระบุได้หากค้อนมาร์แชลกระเด็น หรือ มีของเหลวไหลออกมาจากชั้นงานทดสอบ เมื่อเป็นเช่นนั้น ให้วางส่วนผสมลงในภาชนะตื้นๆ และใช้พัดลม และกวนเป็นครั้งคราวเพื่อลดความชื้นเพื่อให้สามารถนำไปบดอัดได้อย่างเหมาะสม โดยจำเป็นจะต้องใช้ตัวอย่างชุดใหม่เสมอเมื่อตัวอย่างเกิดปัญหา

ทำความสะอาดชิ้นส่วน mole ของชั้นงานทดสอบและหน้าค้อนบดอัดอย่างละเอียด วางแผ่นกระดาษที่ด้านล่างของ mole ก่อนที่จะเทส่วนผสมใน mole และใช้ spatula คนส่วนผสมให้ทั่ว 15 ครั้งรอบๆ ขอบด้านบน และ 10 ครั้งรอบๆ ด้านในของ mole ใช้ spatula เกลี่ยส่วนผสมให้เรียบเป็นทรงกลมเล็กน้อย

วางชุด mole บนแท่นบดอัดในที่จับ mole และใช้ค้อนบดอัด 50 ครั้งโดยให้ตกอิสระที่ 457.2 มม. (18.0 นิ้ว) ถอดแผ่นฐานและปลอกออก แล้วกลับชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้ว ประกอบกลับเข้าไปใหม่ ใช้การบดอัด 50 ครั้งบนหน้าของชิ้นงานที่กลับด้าน นำแผ่นฐานและปลอกออก และนำแผ่นกระดาษออก จากนั้นนำ mole ที่มีชิ้นงานเข้าเข้าไปในเตาอบที่อุณหภูมิ 60°C (140°F) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สำหรับของผสมบางอย่าง อาจจำเป็นต้องดันชิ้นงานทดสอบลงไปตามด้านล่างของแม่พิมพ์เพื่อให้ชิ้นวางเตาอบรองรับระหว่างการบ่ม

นำ mole ที่มีชิ้นงาน ออกจากเตาอบและขณะที่ยังคงอุณหภูมิที่ 60°C (140° F) นำออกจาก mole โดยโหลดแบบคงที่ 178 kN. (40,000 lbs.) โดยวิธีลูกสูบคู่โดยวางลูกสูบแบบติดตั้งอิสระไว้ที่ทั้งสอง ด้านล่างและด้านบนของชิ้นงานในแม่พิมพ์ ใช้โหลดในอัตราประมาณ 1.3 มม./นาที่ (0-05 นิ้ว/นาที่) ของการบีบอัดและรักษาโหลดเต็มเป็นเวลาหนึ่งนาที่แล้วจึงปล่อยให้ชิ้นงานที่อัดแล้วเย็นลงเป็นเวลาอย่างน้อยหนึ่งชั่วโมงก่อนที่นำชิ้นงานมาทดสอบ



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากการกำหนดวัตถุประสงค์และงานวิจัยที่สนับสนุนในงานวิจัยฉบับนี้ในส่วนขอของบทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการในการดำเนินงานของงานวิจัย โดยจะมีการแบ่งขั้นตอนต่างๆออกเป็นส่วนๆ ในแต่ละส่วนจะอธิบายถึงวิธีการในการดำเนินงาน ได้แก่ วัสดุต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย, การทดสอบและขั้นตอนในการทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้จะมีการทดสอบหลักๆทั้งหมด 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบ Rolling Bottle Test และ การทดสอบ Indirect tensile test

#### 3.1 วัสดุต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุมวลรวม (Aggregate)

ในการเตรียมวัสดุมวลรวมในงานวิจัยนี้จะใช้มวลรวมทั้งหมด 3 ชนิด โดยจะประกอบด้วย

- 1) หินปูนชนิดที่ 1 (Limestone1) โดยจะเป็นหินปูนที่มาจากแหล่งของจังหวัด ชลบุรี ในประเทศไทย เนื่องจากหินปูนเป็นหินที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเป็นที่นิยมนำมาใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างรวมถึงการนำมาใช้เป็นมวลรวมในการสร้างถนนด้วย ผู้วิจัยจึงเลือกหินปูนมาใช้เป็นวัสดุในการทดสอบ
- 2) หินปูนชนิดที่ 2 (Limestone2) โดยจะเป็นหินปูนที่มาจากแหล่งของจังหวัด สระบุรี ในประเทศไทย โดยผู้วิจัยเลือกหินปูนอีกชนิดหนึ่งมาใช้ในการงานวิจัยนี้ เนื่องจากหินปูนในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยนั้นมีส่วนประกอบต่างๆที่แตกต่างกันทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างออกไปด้วย เพื่อประเมินความเหมาะสมของการนำหินปูนมาใช้งานทางผู้วิจัยจึงนำหินปูนทั้งสองชนิดมาทดสอบ
- 3) หินบะซอลต์ (Basalt) โดยจะเป็นหินบะซอลต์ที่มาจากแหล่งของจังหวัด บุรีรัมย์ ในประเทศไทย เนื่องจากหินบะซอลต์สามารถหาได้ในประเทศไทยและ หินบะซอลต์นั้นจะมีความแข็งแรงค่อนข้างสูงจึงถูกนิยมนำมาใช้งานเป็นวัสดุในการก่อสร้างถนนในประเทศไทย

##### 3.1.2 แอสฟัลต์ (Asphalt)

ในส่วนขอของแอสฟัลต์ที่จะมาใช้งานในทางวิจัยนี้จะใช้เป็นแอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion) โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) แอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชัน Anionic Asphalt Emulsion แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดนี้มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ โดยจะใช้ Emulsifier จำพวก Fatty acid ซึ่งทำให้อนุภาคแอสฟัลต์

แสดงประจุไฟฟ้าเป็นลบ และมีเนื้อยางของแอสฟัลต์อยู่ที่ 60% ของแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน (AASHTO M140) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของกาก (Residue) ในแอสฟัลต์อิมัลชันนี้ด้วยวิธีการกลั่น

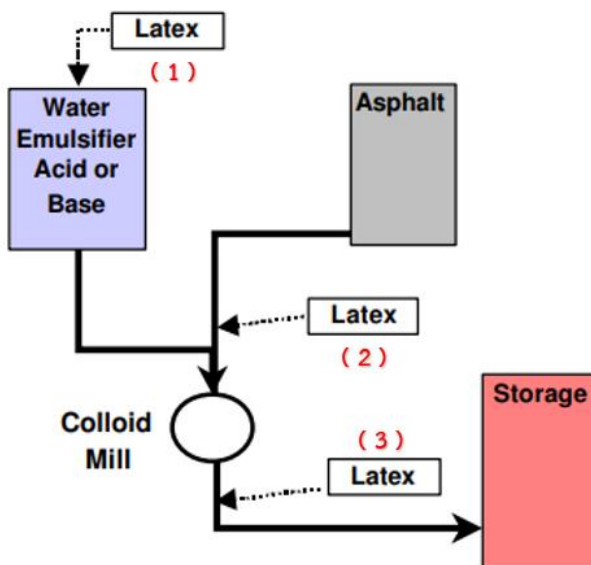
- 2) แคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชัน Cationic Asphalt Emulsion แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดนี้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก โดยจะใช้ Emulsifier จำพวก Fatty amines ซึ่งทำให้อนุภาคแอสฟัลต์แสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก และมีเนื้อยางของแอสฟัลต์อยู่ที่ 60% ของแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน (AASHTO M140) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของกาก (Residue) ในแอสฟัลต์อิมัลชันนี้ด้วยวิธีการกลั่น

### 3.1.3 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเป็นยางธรรมชาติชนิดน้ำ หรือน้ำยางพารา Natural rubber latex ซึ่งเป็นยางพาราที่อยู่ในรูปของน้ำยางข้น (Pre-vulcanized Latex) ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งเท่ากับ 60% ตามมาตรฐาน มอก.980-2533 ด้วยเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราเท่ากับเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแอสฟัลต์ในแอสฟัลต์อิมัลชันอยู่ที่ 60% จึงสามารถนำน้ำยางพารากับแอสฟัลต์อิมัลชันมาผสมรวมกันได้ง่ายในอัตราส่วนต่างๆ

เนื่องจากในการผสมน้ำยางธรรมชาติกับน้ำยางมะตอยอิมัลชันมีวิธีการในการผสมอยู่หลายวิธี (K. Takamura 2002) ได้กล่าวไว้ว่า ในการผสมแอสฟัลต์อิมัลชันกับน้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) สามารถผสมได้ 3 วิธีดังนี้ (แสดงดังรูปที่ 20)

- (1) การเติมน้ำในสารละลายอิมัลซิไฟเออร์ที่เป็นน้ำก่อนที่จะเข้าเครื่องผสม Colloid Mill
- (2) ทำโดยการเติมน้ำเข้าโดยตรงกับยางมะตอยก่อนที่จะเข้าเครื่องผสม Colloid Mill
- (3) คือการเติมน้ำเข้าไปหลังจากกระบวนการทำให้เป็นน้ำยางแอสฟัลต์อิมัลชันแล้ว



รูปที่ 20 ภาพประกอบแผนผังสำหรับการผสมแอสฟัลต์อิมัลชันกับน้ำยางพารา  
(ที่มา: K. Takamura 2002)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการผสมแบบที่ 3 คือการผสมหลังจากได้น้ำยางอิมัลชันมาแล้ว เนื่องจากเป็นวิธีในการผสมที่มีความยุ่งยากค่อนข้างน้อย ซึ่งสามารถเรียกวิธีการผสมแบบนี้ว่า Post-blending โดย (M. Amin Shafii et al. ,2011) กล่าวว่า Post-blending เป็นการผสม Polymer Modified หลังจากสิ้นสุดการผลิตน้ำยางอิมัลชันมาแล้ว ซึ่งจะสามารถผสมที่ Plant หรือ Field ก็ได้ ในบางครั้งโพลิเมอร์จำพวก SBR Latex หรือ Natural Rubber Latex มีข้อได้เปรียบในการนำมาผสมกับน้ำยางมะตอยอิมัลชันเนื่องจากรูปแบบทางกายภาพที่มีความคล้ายคลึงกัน จึงสามารถผสมได้ง่ายและสามารถผสมได้หลายวิธีรวมถึงการผสมแบบ Post-blending งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การผสม NRL กับ แอสฟัลต์อิมัลชันด้วยวิธีนี้ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมเวลาในการผสมให้เท่ากันที่ประมาณ 10 นาที เนื่องจากเวลาในการผสมนั้นมีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่เติม NRL

### 3.2 ขั้นตอนและวิธีในการทดสอบ

#### 3.2.1 ทดสอบค่าความต้านทานการหลุดลอก (Stripping Resistance)

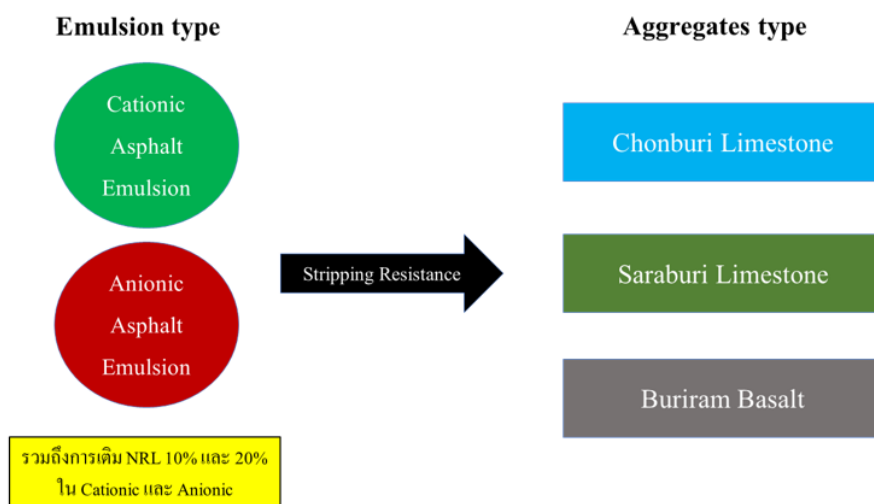
การทดสอบค่าความต้านทานการหลุดลอกระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ คือค่าที่แสดงถึงการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ โดยที่เมื่อค่าความต้านทานการหลุดลอกมี

ค่าที่สูง แสดงว่ามีการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ที่ดี ในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบ Rolling Bottle Test (RBT) ตามมาตรฐาน EN 12697-11 (2012) ซึ่งจะเป็นการทดสอบเพื่อประเมินค่าความต้านทานการหลุดลอกระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ โดยจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวม (Bitumen Coverage) หลังจากการทดสอบมาเป็นตัวประเมินค่าความต้านทานการหลุดลอก โดยเมื่อมีค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมมากแสดงว่ามีค่าความต้านทานการหลุดลอกที่สูง ในทางกลับกัน เมื่อมีค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมน้อยแสดงว่ามีค่าความต้านทานการหลุดลอกที่ต่ำ

### 3.2.1.1 การทดสอบ Rolling Bottle Test (RBT)

การทดสอบขวดกลิ้ง (RBT) ตามมาตรฐาน EN 12697-11 (2012) มาตรฐานยุโรปนี้เป็นการทดสอบสำหรับการพิจารณาค่ายึดเกาะระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ และอิทธิพลต่อความต้านทานต่อการหลุดลอก โดยการทดสอบนี้เป็นการวัดทางอ้อมของวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่างๆ กับมวลรวม เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวม โดยที่ส่วนผสมที่มีความครอบคลุมของแอสฟัลต์ที่สูงแสดงถึงมีความต้านทานต่อการหลุดลอกที่สูงหรือมีค่าแรงยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ที่สูง สำหรับในการทดสอบนี้จะใช้มวลรวมทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ หินปูนจากจังหวัดชลบุรี หินปูนจากจังหวัดสระบุรี และ หินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์ มาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันทั้งหมด 2 ชนิดได้แก่ แอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชัน และ แคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและบวก ตามลำดับ รวมถึงการนำน้ำยางธรรมชาติ (NRL) มาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันทั้ง Anionic และ Cationic เนื่องจากการผสม NRL เข้าไปนั้นทำให้ประจุไฟฟ้าของแอสฟัลต์อิมัลชันเปลี่ยนแปลงไปซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความต้านทานการหลุดลอกระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ โดยการทดสอบจะใช้วัสดุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 21





รูปที่ 21 แนวทางและวัสดุในการทดสอบ Rolling bottle test

ขั้นตอนในการทดสอบ Rolling bottle test นี้เริ่มต้นจากการแบ่งมวลรวมอย่างน้อย 600 g. โดยมวลรวมที่แบ่งนี้จะต้องผ่านตะแกรงทดสอบ 10 มม. และค้ำที่ตะแกรงทดสอบขนาด 6.3 มม. ตามมาตรฐาน EN 12697-2 นำมวลรวมที่เตรียมไว้ใส่ในเตาอบที่มีการระบายอากาศและที่อุณหภูมิ  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  โดยจะอบในเตาอบให้แห้งจนมีมวลคงที่ โดยการชั่งน้ำหนักสามครั้งเวลาห่างกันประมาณ 1 นาที มีน้ำหนักห่างกันไม่เกิน 1% โดยกระบวนการนี้เป็นการกำจัดน้ำและความชื้นที่อยู่ในมวลรวมออกจนหมด ทำให้มวลรวมสามารถดูดซับแอสฟัลต์อิมัลชันได้เต็มที่ จากนั้นแบ่งมวลรวม  $510 \pm 2$  g. ผสมกับแอสฟัลต์  $17 \pm 0.2$  g. และผสมจนกว่าแอสฟัลต์จะครอบคลุมมวลรวมทั้งหมดตามมาตรฐาน EN 12697-35 ขั้นตอนต่อไปนำตัวอย่างที่ผสมแล้ววางทิ้งไว้ระหว่างช่วงเวลา 12 ถึง 64 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแวดล้อม  $20 \pm 5 ^\circ\text{C}$  และหลีกเลี่ยงการสัมผัสแสงแดดโดยตรงและการปนเปื้อนของฝุ่นละออง หลังจากนั้นแยกตัวอย่างออกเป็นสามส่วน  $150 \pm 2$  กรัม และบรรจุลงในขวดสามขวดโดย โดยก่อนใส่ตัวอย่างลงในขวดให้เติมน้ำกลั่นประมาณ 50% ของปริมาตรขวดที่อุณหภูมิประมาณ  $5 \pm 2 ^\circ\text{C}$  เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นที่ต่ำจะป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์จับตัวเป็นก้อนก่อนที่จะเริ่มการ

ทดสอบ จากนั้นจะหมุนขวดด้วยเครื่องกลิ้งขวดโดยอัตโนมัติด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที ตามมาตรฐาน EN 12697-11 โดยในการหมุนที่รอบเท่านี้ นั้นเนื่องจากตัวอย่างในการทดสอบจะมีการเติม NRL ซึ่งจัดอยู่ในกรณี Modified Binder ซึ่งในมาตรฐานได้กำหนดให้ใช้ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เครื่องกลิ้งขวดที่ใช้ทดสอบสามารถปรับความเร็วรอบการหมุนได้ดังแสดงใน รูปที่ 22



รูปที่ 22 Rolling Bottle Machine

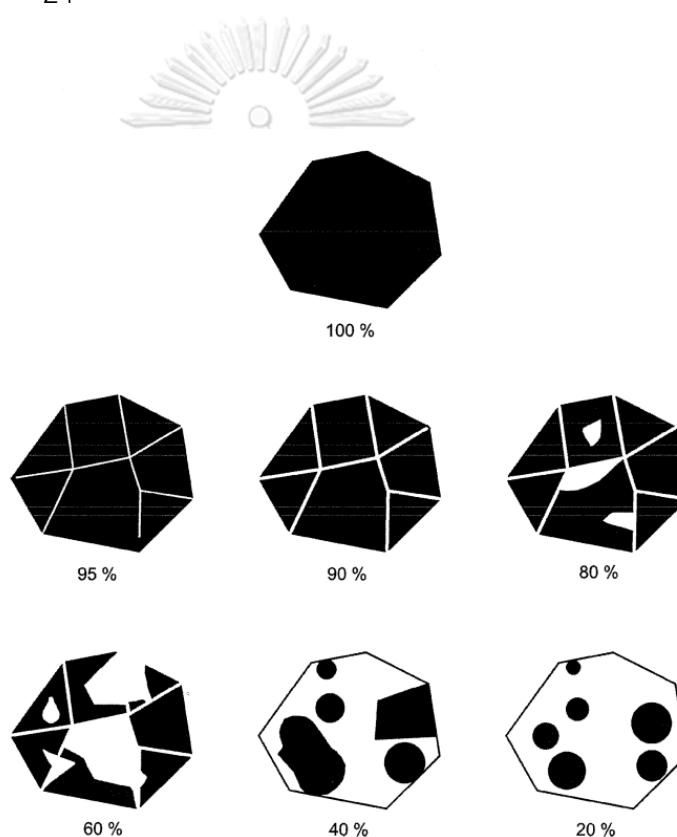
หลังจากทดสอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมงและหลังจาก 24 ชั่วโมง มวลรวมที่ เคลือบด้วยแอสฟัลต์จะถูกนำไปใส่ในชามสำหรับการประเมิน ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 ตัวอย่างหลังจากทำการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง

ในการประเมินความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมจะเป็นการสังเกตด้วยสายตาและบันทึกเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของแอสฟัลต์ที่ครอบคลุมมวลรวมในแต่ละอนุภาค ในการประเมินด้วยสายตาจะมีความละเอียดอยู่ที่ 5% สามารถใช้หลอดไฟเพื่ออำนวยความสะดวกในการสังเกตและประมาณค่าได้ สำหรับการประเมินพื้นที่โปรงแสงบางๆมีการเคลือบของแอสฟัลต์จะถือว่าได้รับการเคลือบอย่างเต็มที่ โดยเกณฑ์สำหรับใช้อ้างอิงในการประมาณค่าระดับการครอบคลุมของแอสฟัลต์แสดงในรูปที่

24



รูปที่ 24 ตัวอย่างเกณฑ์ในการประเมินค่าความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวมวลรวม

### 3.2.1.2 ทดสอบ X-ray Diffractometer (XRD)

เป็นกระบวนการของการใช้รังสีเอกซ์เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างและศึกษาโครงสร้างโดยละเอียดของโครงสร้างผลึกของตัวอย่างโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) รังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นถูกยิงที่ตัวอย่าง ทำให้รังสี

หักเหในมุมต่างๆ หัวตรวจวัดจะรับข้อมูล และเนื่องจากระดับการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถระบุประเภทของส่วนประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างและสามารถใช้ศึกษารายละเอียดของโครงสร้างผลึกของตัวอย่างได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้รับสามารถใช้กำหนดปริมาณของส่วนประกอบแต่ละประเภทในตัวอย่าง ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความบริสุทธิ์ของส่วนประกอบในตัวอย่าง ตามหลักการที่อธิบายไว้ข้างต้นสามารถนำวิธีทดสอบ XRD มาใช้งานเพื่อระบุประเภทของแร่ธาตุต่างๆ ที่ประกอบกันเป็นหินได้

องค์ประกอบทางเคมีและแร่ธาตุของมวลรวมเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์เกิดการลอกร่อนได้ง่าย องค์ประกอบทางเคมีและแร่ของมวลรวมมีอิทธิพลต่อพลังงานพื้นผิวและปฏิกิริยาทางเคมี นอกจากนี้ยังอธิบายถึงการมีอยู่ของสารเคลือบผิวที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวรวม สำหรับความสัมพันธ์กับน้ำ มวลรวมมักถูกจัดประเภทว่าชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ มวลรวมที่ชอบน้ำจะมีลักษณะเป็นกรดโดยคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆของมวลรวม และโดยทั่วไปมวลรวมชนิดนี้จะมีปริมาณซิลิกาที่สูง ( $\text{SiO}_2$ ) และในทางกลับกัน มวลรวมที่ไม่ชอบน้ำจะมีปริมาณซิลิกาที่ต่ำ ( $\text{SiO}_2$ ) โดยการที่หินชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำนั้นอาจส่งผลต่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับแอสฟัลต์ประเภทอิมัลชันซึ่งมีน้ำผสมอยู่ เช่น การที่หินชอบน้ำนั้นอาจจะทำให้หินดูดซับน้ำได้ดีแต่ไม่จับตัวกับแอสฟัลต์ได้ส่งผลให้ต้องรองนกว่าน้ำจะเหายออกหมดก่อนแอสฟัลต์จึงจะจับตัวกับหินได้

มวลรวมบางครั้งถูกจัดประเภทเป็น Alkaline กับ Acid ประเภท Alkaline ส่วนใหญ่จะเป็นหินปูนและหินอ่อน และประเภทที่เป็น Acid จะเป็นหินแกรนิตและควอร์ตไซต์ การจำแนกมวลรวมประเภทนี้ค่อนข้างง่ายเนื่องจากมวลรวมทั้งหมดมีส่วนผสมของแร่ธาตุทั้งที่เป็นด่างและกรด ปัจจัยสำคัญต่อคุณสมบัติการยึดเกาะของมวลรวมคือปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) (Tarrer A.R. and Vinay Wagh ,1991)

ในงานวิจัยนี้ XRD สามารถนำไปใช้ในการหาแร่ธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของหินเพื่อช่วยในการประเมินคุณสมบัติการต้านทานการหลุดลอกระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยจะทำการทดสอบหาองค์ประกอบกับหินทั้งสามชนิดได้แก่

1. หินปูนชลบุรี
2. หินปูนสระบุรี
3. หินบะซอลต์บุรีรัมย์

### 3.2.1.3 การทดสอบสมมุติฐานด้วยสถิติ *Statistical hypothesis testing*

ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติของการทดสอบ RBT ด้วยการทดสอบ ANOVA โดยใช้โปรแกรม SPSS โดยการทดสอบนี้ทำขึ้นเพื่อดูว่าแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละประเภทที่ต่างกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละประเภทแตกต่างกันหรือไม่ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 โดยมีสมมุติฐานดังนี้

H0 : สมมุติฐานหลัก คือ แอสฟัลต์อิมัลชันต่างชนิดกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละชนิดไม่แตกต่างกัน

H1 : สมมุติฐานรอง คือ แอสฟัลต์อิมัลชันต่างชนิดกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละชนิดแตกต่างกัน

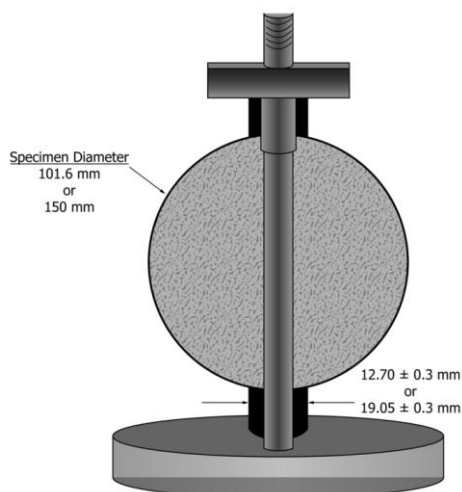
### 3.2.2 การทดสอบ Indirect Tensile Strength Test (ITS)

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อประเมินค่าความเสียหายเนื่องจากความชื้น (Moisture Damage) ของถนนแอสฟัลต์ โดยจะใช้วิธีการทดสอบแรงดึงทางอ้อม ( Indirect Tensile Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM D6931 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures ) ในการทดสอบนี้จะใช้วัสดุในการทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบ RBT คือ จะใช้มวลรวมทั้งหมด 3 ชนิด และใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด Cationic กับ Anionic และ NRL ในการทดสอบนี้จะใช้อยู่ที่ 10% ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีได้แก่ การทดสอบในสภาวะแห้ง และ การทดสอบในสภาวะเปียก เพื่อนำไปใช้ในการหาค่า Indirect tensile strength ratio ระหว่างทั้ง 2 กรณี และนำไปประเมินค่าความเสียหายเนื่องจากความชื้น

#### 3.2.2.1 การเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้น

ในขั้นตอนนี้เป็นการจัดเตรียมก้อนตัวอย่างด้วยวิธีการเตรียมแบบ Marshall เพื่อใช้ทดสอบความไวต่อความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D6926 Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall โดยขนาดของก้อนตัวอย่างจะใช้ความสูงไม่ต่ำกว่า 50.8 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D6931 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures แสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 ขนาดก้อนตัวอย่าง และ IDT Strength-Loading Fixture (ASTM D6931-12)

สำหรับมวลรวมที่ใช้ในการทดสอบจะใช้อยู่ในเกณฑ์สำหรับขนาดคละของมวลรวมแบบ Dense grade ตามมาตรฐาน DS-H 408/2532 (กรมทางหลวง) สำหรับชั้นทาง Wearing Course ที่ความหนา 25-35 มิลลิเมตร แสดงดังตาราง 3 และ สำหรับวัสดุผสมเย็นประเภทงานซ่อมผิว เกรด 3 ตามมาตรฐาน DS-H 407/2542 แสดงดังตาราง 4 และ สัดส่วนและขนาดคละของมวลรวม แสดงดังรูปที่ 26 และ รูปที่ 27

ตารางที่ 3 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532

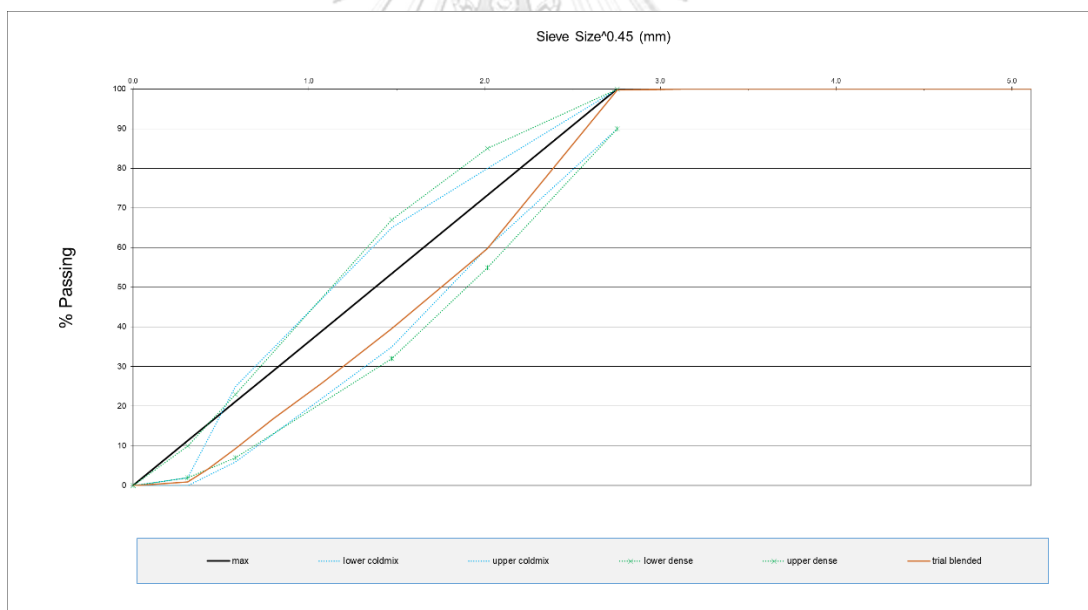
ขนาดที่ใช้เรียก มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19.0 (3/4)	25.0 (1)
สำหรับชั้นทาง	Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา มิลลิเมตร	25-35	40-70	40-80	70-100
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล			
37.5 (1 1/2)				100
25.0 (1)			100	90-100
19.0 (3/4)		100	90-100	-
12.5 (1/2)	100	80-100	-	56-80
9.5 (3/8)	90-100	-	56-80	-
4.75 (เบอร์ 4)	55-85	44-74	35-65	29-59
2.36 (เบอร์ 8)	32-67	28-58	23-49	19-45
1.18 (เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600 (เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300 (เบอร์ 50)	7-23	5-21	5-19	5-17
0.150 (เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075 (เบอร์ 200)	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลท์ ร้อยละโดยมวลของมวลรวม	4.0-8.0	3.0-7.0	3.0-6.5	3.0-6.0

ตารางที่ 4 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมตามมาตรฐาน ทล.-ม. 407/2542

ขนาดตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรงร้อยละโดยน้ำหนัก			
	เกรด 1	เกรด 2	เกรด 3	เกรด 4
25.0 มม. (1")	100			
19.0 มม. (3/4")	90 - 100	100		
12.5 มม. (1/2")	-	90 - 100	100	100
9.5 มม. (3/8")	60 - 80	-	90 - 100	85 - 100
4.75 มม. (เบอร์ 4)	35 - 65	45 - 70	60 - 80	-
2.36 มม. (เบอร์ 8)	20 - 50	25 - 50	35 - 65	0 - 10
300 ไมครอน (เบอร์ 50)	3 - 20	5 - 20	6 - 25	0 - 5
75 ไมครอน (เบอร์ 200)	0 - 2	0 - 2	0 - 2	0 - 2

Sieve	size, d (mm)	d <sup>0.45</sup>	P max	DH-S 407/2542		%passing				
						Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	trial
				lower	upper	10 mm	Dust	-	-	blended
1.5 in	37.5	5.109	100.0			100.0	100.0			100.0
1 in	25	4.257	100.0			100.0	100.0			100.0
3/4 in	19	3.762	100.0			100.0	100.0			100.0
1/2 in	12.5	3.116	100.0	100	100	100.0	100.0			100.0
3/8 in	9.5	2.754	100.0	90	100	99.4	100.0			99.7
# 4	4.75	2.016	73.2	60	80	14.3	97.1			59.8
# 8	2.36	1.472	53.4	35	65	1.9	70.4			39.6
# 16	1.18	1.077	39.1			1.7	45.8			25.9
# 30	0.6	0.795	28.9			1.6	29.1			16.7
# 50	0.3	0.582	21.1	6	25	1.6	15.7			9.4
# 100	0.15	0.426	15.5			1.4	6.5			4.2
# 200	0.075	0.312	11.3	0	2	1.3	0.7			0.9
Pan		0	0.0	0	0	0.0	0.0			0.0
Blend Portion						45	55	0	0	100.0
Aggregate wt per specimen (g)						450	550	0	0	1000

รูปที่ 26 แสดงขนาดคละและสัดส่วนของมวลรวมในส่วนผสม



รูปที่ 27 กราฟขนาดคละของมวลรวมตามเกณฑ์ของกรมทางหลวงกำหนด

สำหรับปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้จะใช้ตามที่ Asphalt institute แนะนำใน A Basic Asphalt Emulsion Manual (2004) โดยจะมีสมการในการคำนวณปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ในส่วนผสมตาม สมการที่ 3.1



$$\%Emulsion = \frac{(0.07 \times B) + (0.03 \times C)}{A} \quad (3.1)$$

โดยที่

%Emulsion = Estimated initial percent asphalt emulsion by weight of aggregate

A = Percent residue of emulsion by distillation

B = Percent of dry aggregate passing 4.75 mm. (No.4) sieve

C = 100-B = Dry aggregate retained on 4.75 mm. (No.4) sieve

จากสมการที่ 3.1 สามารถคำนวณ %Emulsion ได้เท่ากับ 6.196% โดยที่ A = 60%, B = 59.8, C = 40.2 โดยในการเตรียมก้อนตัวอย่างในการทดสอบนี้จะใช้ปริมาณแอสฟัลต์ร้อยละ 6.196 โดยน้ำหนักหิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้น จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะเปียก และ สภาวะแห้ง ในการทดสอบ ITS จะใช้ก้อนตัวอย่าง สภาวะละ 3 ก้อนตัวอย่าง ในแต่ละส่วนผสม แสดงดังรูปที่ 28 และ รูปที่ 29 โดยจะบดอัดที่ 75 ครั้ง สำหรับแต่ละด้านของก้อนตัวอย่าง และใช้แบบหล่อ (Mold) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือ 101.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 28 ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะแห้ง



รูปที่ 29 ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะเปียก

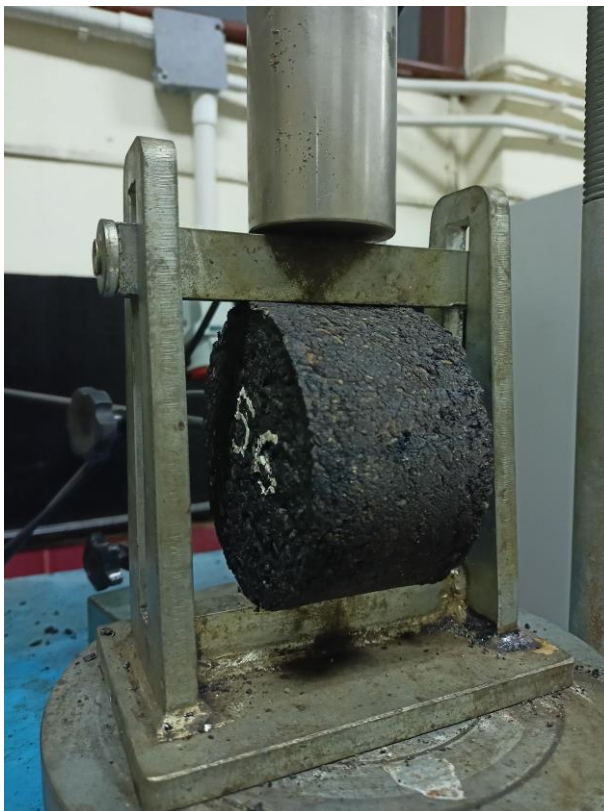
สำหรับสถานะเปียกทำการจัดตัวอย่างให้อิ่มตัวด้วยน้ำในช่วง 55 ถึง 80% หลังจากนั้นจะนำก้อนตัวอย่างแช่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิอุณหภูมิที่  $60 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้มีอุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับ ก่อนทำการทดสอบ และสำหรับสถานะแห้งทำการควบคุมก้อนตัวอย่าง ให้มีอุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ก่อนทำการทดสอบ

### 3.2.2.2 การทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้น

ในการทดสอบนี้ จะใช้การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM D6931 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures ) กำหนดให้ Loading Strip มีขนาดความกว้าง  $12.70 \pm 0.3$  มิลลิเมตร สำหรับก้อนตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 25 และความยาวของ Loading Strip ต้องมีความยาวมากกว่าความหนาของก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 30 และ รูปที่ 31



รูปที่ 30 Loading Strip สำหรับทดสอบ ITS



รูปที่ 31 เครื่องในการทดสอบ ITS และ ลักษณะการทดสอบก้อนตัวอย่าง

การทดสอบแรงดิ่งทางอ้อมเป็นการให้แรงกระทำเป็นในลักษณะแรงอัด (Compaction Load) โดยสามารถให้แรงกระทำได้ 2 แบบ ได้แก่ การให้แรงกระแบบทำซ้ำ (Dynamic Load) และการให้แรงกระทำแบบคงที่ (Static Load) โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การให้แรงกระทำแบบคงที่ ด้วยอัตรา 50 มม/นาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศา เซลเซียส ในการทดสอบ โดยค่ากำลังรับแรงดิ่งทางอ้อม สามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (3.2)$$

โดยที่  $S_t$  = IDT Strength, kPa

$P$  = แรงกระทำสูงสุด (maximum load), N

$t$  = ความสูงของก้อนตัวอย่าง, mm.

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง, mm.

ในการพิจารณาแรงดึงทางอ้อมเฉลี่ยในสภาวะเปียกต่อสภาวะแห้งหรือค่า Tensile Strength Ratio (TSR) ตามมาตรฐาน ASTM D4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixture โดยค่า TSR ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 80% โดยจะคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างแรงดึงทางอ้อม (TSR) จากสมการที่

$$TSR = \frac{S_{tm}}{S_{td}} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่  $TSR$  = Tensile stress Ratio, %

$S_{tm}$  = ค่าเฉลี่ยของ Tensile stress ในสภาวะเปียก, KPa

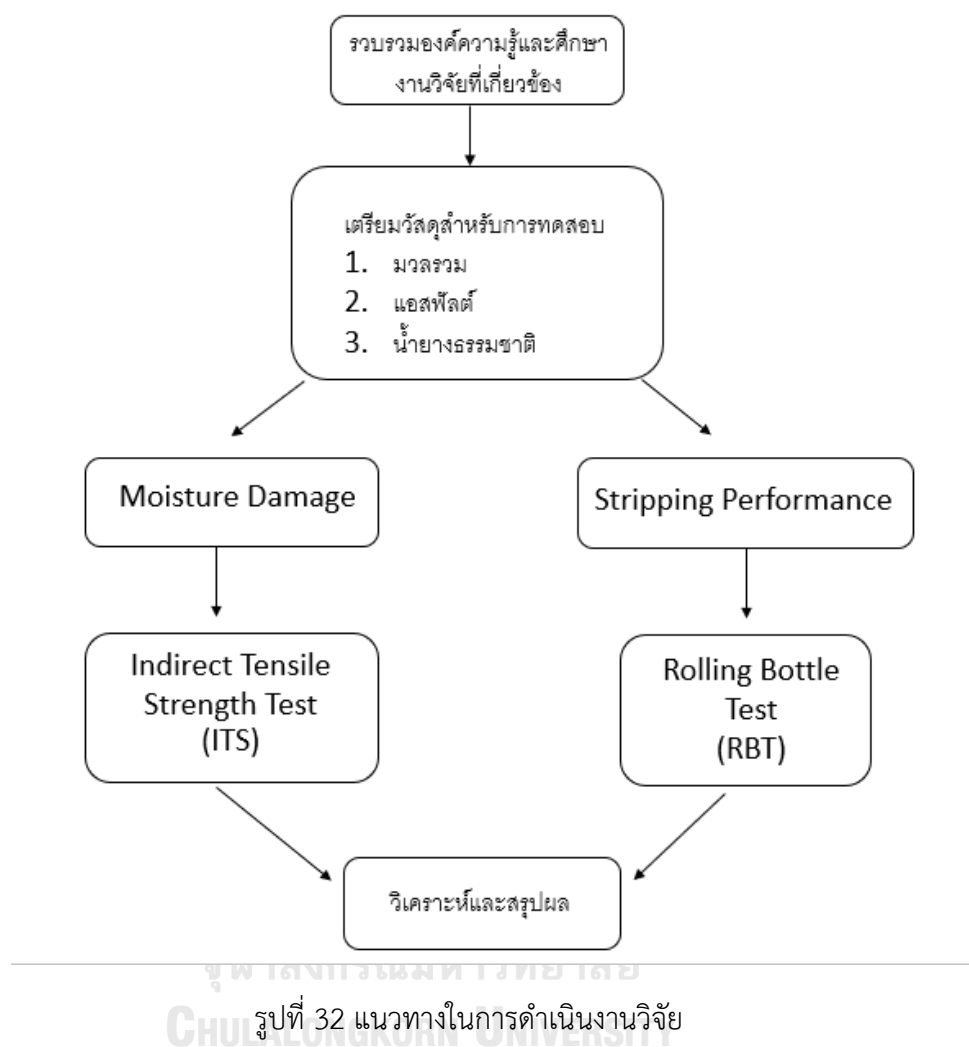
$S_{td}$  = ค่าเฉลี่ยของ Tensile stress ในสภาวะแห้ง, KPa

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในการวิเคราะห์ความเสียหายเนื่องจากความชื้น (Moisture Damage) จะพิจารณาค่า TSR โดยส่วนผสมใดมีค่า %TSR สูงกว่า แสดงว่าส่วนผสมนั้นมีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้ต่ำกว่า ในทำนองเดียวกันถ้าส่วนผสมใดมีค่า %TSR ที่ต่ำ แสดงว่าส่วนผสมนั้นมีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้สูงกว่า

### 3.3 แนวทางในการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 แผนผังสำหรับการดำเนินงานวิจัย



#### 3.3.2 จำนวนก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

##### 3.3.1.1 จำนวนตัวอย่าง Rolling Bottle Test (RBT)

สำหรับการทดสอบ RBT นั้นจะมีเคสสำหรับการทดสอบดังนี้

##### 1. หินปูนชลบุรี (L1)

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 20%NRL (3 ตัวอย่าง)

- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 20%NRL (3 ตัวอย่าง)

รวมเป็น 18 ตัวอย่าง

## 2. หินปูนสระบุรี (L2)

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 20%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 20%NRL (3 ตัวอย่าง)

รวมเป็น 18 ตัวอย่าง

## 3. หินบะซอลต์บุรีรัมย์ (L3)

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 20%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 20%NRL (3 ตัวอย่าง)

รวมเป็น 18 ตัวอย่าง

ในการทดสอบ RBT จะใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 54 ตัวอย่าง

### 3.3.1.2 จำนวนตัวอย่าง Indirect Tensile Strength Test (ITS)

สำหรับการทดสอบ ITS นั้นจะมีเคสสำหรับการทดสอบดังนี้

#### 1. หินปูนชลบุรี (L1)

Dry conditions

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Maximum specific gravity (1 ตัวอย่าง)

Wet conditions

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Maximum specific gravity (1 ตัวอย่าง)

รวมเป็น 26 ตัวอย่าง

#### 2. หินปูนสระบุรี (L2)

Dry conditions

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)



- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Maximum specific gravity (1 ตัวอย่าง)

Wet conditions

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Maximum specific gravity (1 ตัวอย่าง)

รวมเป็น 26 ตัวอย่าง

### 3. หินบะซอลต์บุรีรัมย์ (L3)

Dry conditions

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)

- Maximum specific gravity (1 ตัวอย่าง)

Wet conditions

- Anionic (3 ตัวอย่าง)
- Anionic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)
- Cationic (3 ตัวอย่าง)
- Cationic + 10%NRL (3 ตัวอย่าง)

- Maximum specific gravity (1 ตัวอย่าง)

รวมเป็น 26 ตัวอย่าง

ในการทดสอบ ITS จะใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 78 ตัวอย่าง

จำนวนตัวอย่างทั้งหมดในการทดสอบสามารถนำมาแจกแจงได้ดังแสดงในตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 โดยที่ AN หมายถึง Anionic asphalt emulsion, CAT หมายถึง Cationic asphalt emulsion, NR หมายถึง Natural rubber latex โดยจะแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ เช่น 10%NR หมายถึง มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน, L1 หมายถึง หินปูนชลบุรี, L2 หมายถึง หินปูนสระบุรี และ L3 หมายถึง หินบะซอลต์บุรีรัมย์

ตารางที่ 5 แสดงถึงจำนวนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ RBT

จำนวนตัวอย่างสำหรับทดสอบ RBT		
Agg. Types	Emulsion types	จำนวนตัวอย่าง
Limestone Chonburi (L1)	AN	3
	AN10%NR	3
	AN20%NR	3
	CAT	3
	CAT10%NR	3
	CAT20%NR	3
Limestone Saraburi (L2)	AN	3
	AN10%NR	3
	AN20%NR	3
	CAT	3
	CAT10%NR	3
	CAT20%NR	3
Basalt Buriram (L3)	AN	3
	AN10%NR	3
	AN20%NR	3
	CAT	3
	CAT10%NR	3
	CAT20%NR	3
รวมทั้งหมด = 54 ตัวอย่าง		

ตารางที่ 6 แสดงถึงจำนวนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS

จำนวนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS				
Agg. Types	Emulsion types	Dry condition	Wet condition	Maximum specific gravity
Limestone Chonburi (L1)	AN	3	3	1
	AN10%NR	3	3	-
	CAT	3	3	1
	CAT10%NR	3	3	-
Limestone Saraburi (L2)	AN	3	3	1
	AN10%NR	3	3	-
	CAT	3	3	1
	CAT10%NR	3	3	-
Basalt Buriram (L3)	AN	3	3	1
	AN10%NR	3	3	-
	CAT	3	3	1
	CAT10%NR	3	3	-
รวมทั้งหมด = 78 ตัวอย่าง				

### 3.3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

#### 3.3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับ RBT

ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Rolling bottle test นี้ เริ่มต้นจากการแบ่งมวลรวมอย่างน้อย 600 g. แสดงดังรูปที่ 33 โดยมวลรวมที่แบ่งนี้ จะต้องผ่านตะแกรงทดสอบ 10 มม. และค้ำที่ตะแกรงทดสอบขนาด 6.3 มม. ตามมาตรฐาน EN 12697-2 นำมวลรวมที่เตรียมไว้ใส่ในเตาอบที่มีการระบายอากาศ และที่อุณหภูมิ  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$



รูปที่ 33 แบ่งมวลรวมอย่างน้อย 600 g.

จากนั้นแบ่งมวลรวม  $510 \pm 2$  g. ผสมกับแอสฟัลต์  $17 \pm 0.2$  กรัม โดยในอิมัลชันจะมีเนื้อแอสฟัลต์อยู่ที่ 60% ดังนั้นจะทำการเติมอิมัลชันประมาณ 28.3 กรัม เพื่อให้ได้แอสฟัลต์ที่ 17 กรัม แสดงดังรูปที่ 34 และผสมจนกว่าแอสฟัลต์จะครอบคลุมมวลรวมทั้งหมดตามมาตรฐาน EN 12697-35 แสดงดังรูปที่ 35



รูปที่ 34 การเติมอิมัลชันลงในส่วนผสม



รูปที่ 35 แอสฟัลต์ครอบคลุมมวลรวมทั้งหมด

ขั้นตอนต่อไปนำตัวอย่างที่ผสมแล้ววางทิ้งไว้ระหว่างช่วงเวลา 12 ถึง 64 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแวดล้อม  $20 \pm 5$  °C และหลีกเลี่ยงการสัมผัสแสงแดดโดยตรงและการปนเปื้อนของฝุ่นละออง โดยในการนำตัวอย่างทิ้งไว้นั้นจะใช้กระดาษซิลิโคนรองไว้เพื่อไม่ให้ตัวอย่างติดภาชนะและกระจายตัวอย่างไม่ให้ติดกัน แสดงดังรูปที่ 36 หลังจากนั้นแยกตัวอย่างออกเป็นสามส่วน  $150 \pm 2$  กรัม แสดงดังรูปที่ 37



รูปที่ 36 ตัวอย่างทิ้งไว้ระหว่างช่วงเวลา 12 ถึง 64 ชั่วโมง



รูปที่ 37 แบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 ส่วน

และบรรจุลงในขวดสามขวดโดย โดยก่อนใส่ตัวอย่างลงในขวดให้เติมน้ำ  
กลั่นประมาณ 50% ของปริมาตรขวดที่อุณหภูมิประมาณ  $5 \pm 2^\circ\text{C}$  แสดงดังรูปที่



38 เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นที่ต่ำจะป้องกันไม่ให้อุณหภูมิรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์จับตัวเป็นก้อนก่อนที่จะเริ่มการทดสอบ



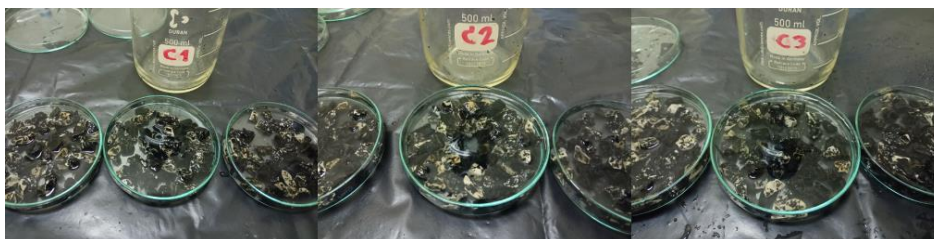
รูปที่ 38 ตัวอย่างในขวดก่อนทำการเข้าเครื่องทดสอบ

จากนั้นจะหมุนขวดด้วยเครื่องกลิ้งขวดโดยอัตโนมัติด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที ตามมาตรฐาน EN 12697-11 โดยในการหมุนที่รอบเท่านี้เนื่องจากตัวอย่างในการทดสอบจะมีการเติม NRL ซึ่งจัดอยู่ในกรณี Modified Binder ซึ่งในมาตรฐานได้กำหนดในใช้ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เครื่องกลิ้งขวดที่ใช้ทดสอบสามารถปรับความเร็วรอบการหมุนได้ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 39 เครื่องกลิ้งขวดสำหรับการทดสอบ RBT

หลังจากทดสอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมงและหลังจาก 24 ชั่วโมง มวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์จะถูกล้างในชามสำหรับการประเมิน ดังแสดงในรูปที่ 40 และรูปที่ 41



รูปที่ 40 ตัวอย่างหลังจากทำการทดสอบที่ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 41 ตัวอย่างหลังจากทำการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง

ในการประเมินความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมจะเป็นการสังเกตด้วยสายตาและบันทึกเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของแอสฟัลต์ที่ครอบคลุมมวลรวมในแต่ละอนุภาค ในการประเมินด้วยสายตาจะมีความละเอียดอยู่ที่ 5% โดยจะใช้หลอดไฟเพื่ออำนวยความสะดวกในการสังเกตและประมาณค่า

### 3.3.3.2 การเตรียมก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบ ITS

- มวลรวม

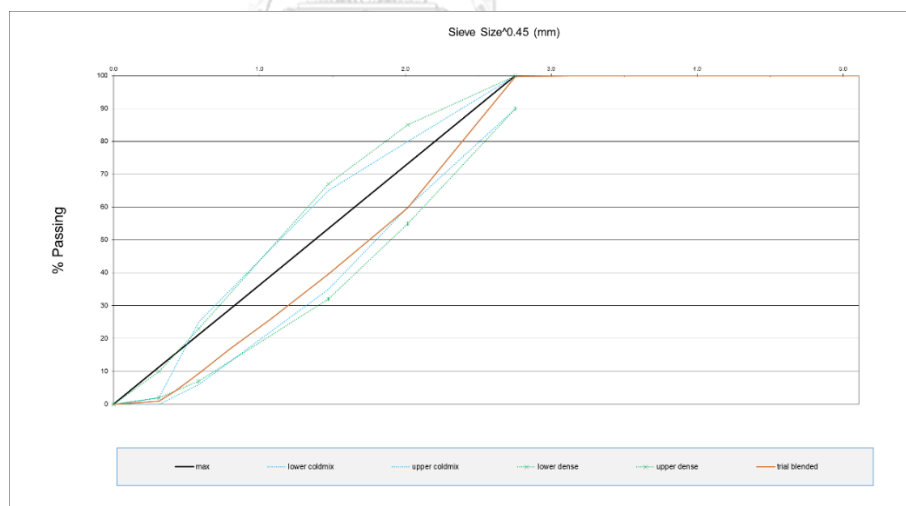
ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้มวลรวมทั้งหมด 3 ชนิดคือ หินปูนชลบุรี หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ โดยจะใช้มวลรวมทั้งหมด 1000 กรัม สำหรับ 1 ก้อนตัวอย่าง เนื่องจากในการบดอัดจะทำให้ความสูงของก้อนตัวอย่างไม่สูงจนเกินไปและสามารถนำความชื้นออกจากก้อนตัวอย่างได้ง่ายและใช้เวลาน้อยกว่า



ก้อนตัวอย่างที่มีความสูงที่มาก เนื่องจากการทดสอบค่า ITS ในสถานะแห้ง โดยขนาดคละของมวลรวม แสดงดังรูปที่ 42 และ รูปที่ 43 โดยในการทดสอบมวลรวมทั้งสามชนิดจะใช้ขนาดคละในลักษณะเดียวกันทั้งหมด

Sieve	size, d (mm)	d <sup>4</sup> 0.45	P max	DH-S 407/2542		%passing				
						Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	trial
				lower	upper	10 mm	Dust	-	-	blended
1.5 in	37.5	5.109	100.0			100.0	100.0			100.0
1 in	25	4.257	100.0			100.0	100.0			100.0
3/4 in	19	3.762	100.0			100.0	100.0			100.0
1/2 in	12.5	3.116	100.0	100	100	100.0	100.0			100.0
3/8 in	9.5	2.754	100.0	90	100	99.4	100.0			99.7
# 4	4.75	2.016	73.2	60	80	14.3	97.1			59.8
# 8	2.36	1.472	53.4	35	65	1.9	70.4			39.6
# 16	1.18	1.077	39.1			1.7	45.8			25.9
# 30	0.6	0.795	28.9			1.6	29.1			16.7
# 50	0.3	0.582	21.1	6	25	1.6	15.7			9.4
# 100	0.15	0.426	15.5			1.4	6.5			4.2
# 200	0.075	0.312	11.3	0	2	1.3	0.7			0.9
Pan		0	0.0	0	0	0.0	0.0			0.0
Blend Portion						45	55	0	0	100.0
Aggregate wt per specimen (g)						450	550	0	0	1000

รูปที่ 42 แสดงขนาดคละและสัดส่วนของมวลรวมในส่วนผสม



รูปที่ 43 กราฟขนาดคละของมวลรวมตามเกณฑ์ของกรมทางหลวงกำหนด

### - วัสดุเชื่อมประสาน

สำหรับวัสดุเชื่อมประสานจะใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก ซึ่งมีปริมาณเนื้อแอสฟัลต์อยู่ที่ 60% โดยการใช้ทดสอบ การวิเคราะห์หาปริมาณกากที่เหลือจากการระเหย ตามมาตรฐาน มอก. 1498-2541 แสดงดังรูป 44 และจะใช้น้ำยางพารามาทำการผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่ 10% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน โดยในการผสมน้ำยางพารากับแอสฟัลต์อิมัลชันจะทำการผสมด้วยการผสมด้วยมือ และจะทำการผสมแอสฟัลต์กับน้ำยางพาราก่อนที่จะนำไปใช้ในการผสมกับมวลรวม แสดงดังรูปที่ 45 โดยที่จะควบคุมเวลาในการผสมอยู่ที่ประมาณ 10 นาที สำหรับปริมาณแอสฟัลต์จะใช้ที่ 6.2% ของน้ำหนักหิน ตามที่ได้คำนวณไว้ในสมการที่ 3.1



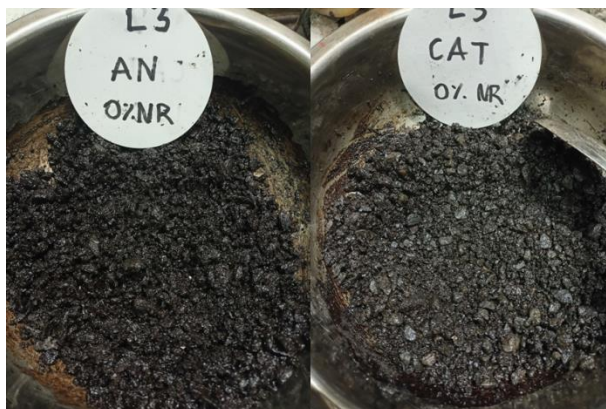
รูปที่ 44 การทดสอบหาปริมาณกากที่เหลือจากการระเหย



รูปที่ 45 การผสมน้ำยางพาราลงในแอสฟัลต์อิมัลชัน

- ผสมวัสดุเชื่อมประสานกับมวลรวม

ในการผสมจะใช้การผสมแบบผสมเย็น Cold mix โดยในการผสมนั้นจะต้องเติมน้ำ เนื่องจากเมื่อผสมแบบไม่เติมน้ำแอสฟัลต์ไม่สามารถครอบคลุมมวลรวมได้ทั้งหมด โดยในการเติมจะทำการเติมลงไปในส่วนผสมของอิมัลชันก่อนแล้วจึงนำไปผสมเข้ากับมวลรวม สำหรับปริมาณน้ำจะใช้เพิ่มเติมที่ 5% ของน้ำหนักวัสดุประสาน สำหรับหินปูนชลบุรี ใช้ 2% สำหรับหินปูนสระบุรี และใช้ 2% สำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์ ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้แอสฟัลต์สามารถครอบคลุมมวลรวมได้ดีที่สุด โดยจะผสมแอสฟัลต์อิมัลชันที่ได้เตรียมไว้กับมวลรวมและคลุกให้เข้ากันจนแอสฟัลต์เคลือบผิวของมวลรวมทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 46



รูปที่ 46 ตัวอย่างที่ผสมก่อนกำการบดอัด

#### - การบดอัดก้อนตัวอย่าง

ในการเตรียมก้อนตัวอย่างจะทำการบดอัดด้วยเครื่องบดอัดก้อนตัวอย่าง Marshall โดยจะทำการบดอัดที่ 75 ครั้ง ทั้งสองด้าน และนำออกจากโมลหลังจากทำการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 47 และรูปที่ 48 เป็นเวลา 2 วัน เพื่อให้น้ำในตัวอย่างมีการระเหยออกบางส่วนทำให้ก้อนตัวอย่างสามารถคงรูปไว้ได้หลังจากนำออกจากโมล แสดงดัง รูปที่ 49 หลังจากนั้นจะนำก้อนตัวอย่างไปอบต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพื่อให้น้ำออกจากก้อนตัวอย่างทั้งหมด เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นจะนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและใช้พัดลมเป่าก่อนนำไปทดสอบ ซึ่งจะมีการวัดน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง 3 ครั้ง ห่างกันเป็นระยะเวลา 2-3 ชั่วโมง โดยที่น้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลงไม่เกิน 1% แสดงว่าก้อนตัวอย่างไม่มีการระเหยของน้ำแล้วจึงจะนำไปชั่งน้ำหนักและวัดขนาดก้อนตัวอย่าง แล้วจึงนำไปทดสอบ ITS แสดงดังรูปที่ 50



รูปที่ 47 เตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 48 ก่อนตัวอย่างหลังจากอบอัด





รูปที่ 49 นำก้อนตัวอย่างออกจากโมลหลังจากอบ 2 วัน



รูปที่ 50 ก้อนตัวอย่างสำหรับนำไปทดสอบ ITS

- เตรียมก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบ ITS

ในส่วนนี้จะแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 กรณีการทดสอบ ประกอบด้วย กรณีที่สถานะแห้ง (Dry conditions หรือ DC) และที่สถานะเปียก (Wet condition หรือ WC) แสดงดังรูปที่ 51 และ รูปที่ 52



รูปที่ 51 ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะแห้ง



รูปที่ 52 ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสถานะเปียก

สำหรับสภาวะเปียกทำโดยการจัดตัวอย่างให้อิ่มตัวด้วยน้ำในช่วง 55 ถึง 80% หลังจากนั้นจะนำก้อนตัวอย่างแช่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิอุณหภูมิที่  $60 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้มี อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับ ก่อนทำการทดสอบ และ สำหรับสภาวะแห้งทำการควบคุมก้อนตัวอย่าง ให้อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ก่อนทำการทดสอบ ITS





## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

ในบทนี้เป็นการรวบรวมผลการศึกษา และวิเคราะห์ผลการศึกษาจากการทดสอบ Rolling Bottle test เพื่อประเมินค่าความต้านทานการหลุดลอกระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ และการทดสอบ Indirect Tensile Strength เพื่อประเมินความต้านทานต่อความเสียหายเนื่องจากความชื้น โดยในการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบ XRD ของหินในการทดสอบ

##### 4.1.1 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนชลบุรี

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนชลบุรี

Chonburi Limestone		
% minerals	Name of Component	Component
41.79	Quartz, low	SiO <sub>2</sub>
40.96	Calcite	CaCO <sub>3</sub>
1.99	Phlogopite-1M	KMg <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> F <sub>2</sub>
4.45	Cesium Bromide Thiourea	C <sub>4</sub> H <sub>16</sub> BrCsN <sub>8</sub> S <sub>4</sub>
10.80	Microcline, intermediate	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>

ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนชลบุรี ดังที่แสดงในตารางที่ 7 แสดงถึงองค์ประกอบต่างๆที่มีในหิน โดยในการทดสอบพบว่าหินปูนประเภทนี้ประกอบด้วยแคลไซต์และควอตซ์เป็นส่วนใหญ่ แคลไซต์คิดเป็น 40.96% และควอตซ์คิดเป็น 41.79% โดยที่ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ในหินที่มีปริมาณที่สูงจัดว่าหินปูนชนิดนี้อยู่ในประเภทที่ชอบน้ำ หรือ Hydrophilic ซึ่งจะมีสภาพเป็นกรด (Acidic) โดยทั่วไปแล้วจะมีประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวของหินเป็นประจุลบ (Electronegatively charged Surfaces) อย่างไรก็ตาม ในประเภทหินที่มีควอตซ์ไซด์หรือซิลิกาที่สูงได้มีการพิสูจน์แล้วว่ามีความต้านทานต่อการหลุดลอกที่น้อยกว่ามวลรวมพื้นฐานส่วนใหญ่ (Majidzadeh, K., & Brovold, F. N. (1968))

#### 4.1.2 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนสระบุรี

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนสระบุรี

Saraburi Limestone		
% minerals	Name of Component	Component
69.55	Calcite	$\text{CaCO}_3$
21.43	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
9.02	Quartz	$\text{SiO}_2$

ผลการทดสอบ XRD ของหินปูนสระบุรี ดังที่แสดงในตารางที่ 8 พบว่าหินปูนประเภทนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแคลไซต์คิดเป็น 69.55% โดโลไมต์คิดเป็น 21.43% และควอตซ์คิดเป็น 9.02% โดยที่ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในหินที่มีปริมาณที่ต่ำจัดว่าหินปูนชนิดนี้อยู่ในประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยทั่วไปแล้วจะมีประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวของหินเป็นประจุบวก (Electropositively charged surfaces) ซึ่งมวลรวมประเภทนี้จะมีความต้านทานต่อการลอกของฟิล์มแอสฟัลต์ได้สูงกว่า (Majidzadeh, K., & Brovold, F. N. (1968)) นอกจากนี้ ยังมีการสังเกตการหลุดลอกในส่วนผสมแอสฟัลต์ที่มีหินปูนประเภทนี้ โดยส่วนใหญ่จะมีความต้านทานต่อการหลุดลอกที่ดี (Maupin Jr, G. W. (1982))

#### 4.1.3 ผลการทดสอบ XRD ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบ XRD ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

Buriram Basalt		
% minerals	Name of Component	Component
84.76	Andesine	$(\text{Na}_{0.622}\text{Ca}_{0.368})(\text{Al}_{1.29}\text{Si}_{2.71}\text{O}_8)$
11.95	Augite, aluminum	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}_{+3}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$
3.29	Chlorite	$\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

ผลการทดสอบ XRD ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์ ดังที่แสดงในตารางที่ 9 พบว่าหินปูนประเภทนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย Andesine คิดเป็น 84.76%, Augite และอะลูมิเนียม คิด

เป็น 11.95% และ Chlorite คิดเป็น 3.29% โดยที่หินบะซอลต์บุรีรัมย์นั้นไม่ได้มีส่วนประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งเป็นไปได้ว่าหินชนิดนี้จะมีประจุไฟฟ้าที่ผิวเป็นประจุบวกที่สูงกว่าหินปูนสระบุรี

#### 4.2 ทดสอบและวิเคราะห์ประจุไฟฟ้าของหินด้วยค่า pH

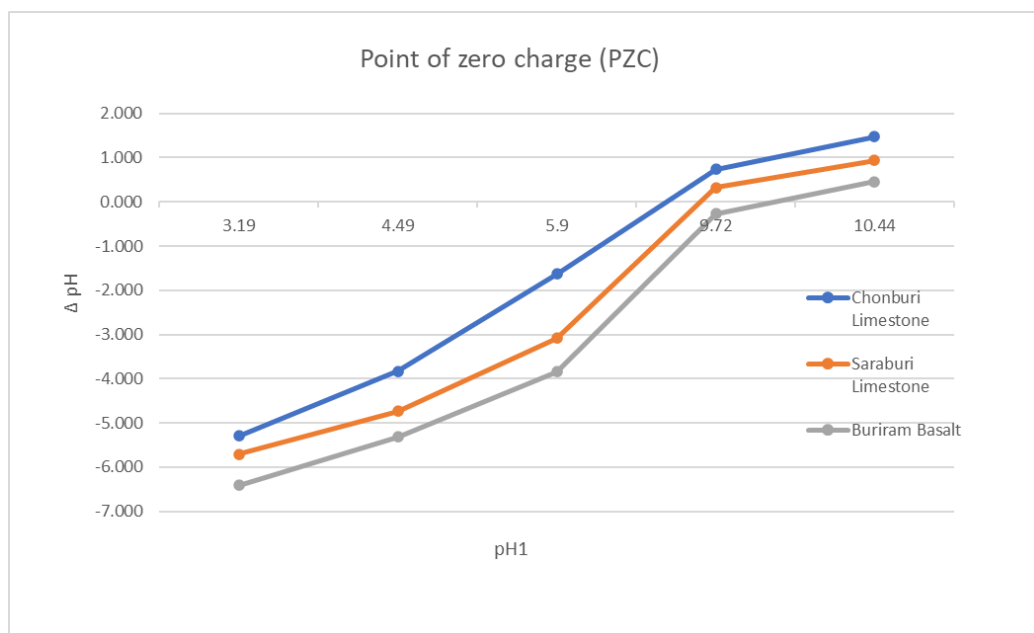
ในการทดสอบนี้จะนำมาใช้เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์การทดสอบ RBT และ ITS ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาความเป็นกรด (Acidic) และ ความเป็นด่าง (Alkaline) ของหินในน้ำเพื่อให้ทราบถึงประจุบนพื้นผิวของหินในงานวิจัยนี้ โดยในการทดสอบจะใช้การวัดค่า pH ของหินในน้ำและทำการเติมกรดและด่างลงไปเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของหิน โดยค่า pH ที่น้อยแสดงถึงความเป็นกรดซึ่งจะมี Hydrogen ion ( $\text{H}^+$ ) อยู่จำนวนมากทำให้มีความเป็นประจุบวกที่มาก ในทางกลับกัน ค่า pH ที่มากจะมีความเป็นด่างซึ่งแสดงว่ามี Hydroxide ion ( $\text{OH}^-$ ) อยู่จำนวนมากทำให้มีความเป็นประจุลบ โดยในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 10 ตารางที่ 11 และรูปที่ 53 และเมื่อค่า  $\text{pH} < \text{pH}(\text{PZC})$  แสดงถึงค่าประจุไฟฟ้าบนผิวรวมเป็นบวก ในทางกลับกัน เมื่อค่า  $\text{pH} > \text{pH}(\text{PZC})$  แสดงถึงค่าประจุไฟฟ้าบนผิวรวมเป็นลบ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบวัดค่า pH ของหินชนิดต่างๆในสารละลายที่มี pH ต่างๆ

Agg. Type		pH				
	pH1	3.19	4.49	5.9	9.72	10.44
Limestone Chonburi	1	8.487	8.327	7.530	8.983	8.963
Limestone Saraburi	2	8.903	9.227	8.980	9.393	9.507
Basalt Buriram	3	<u>9.607</u>	9.807	9.743	9.990	9.987

ตารางที่ 11 ผลการคำนวณผลต่าง pH (initial) – pH (final) ของหินชนิดต่างๆในน้ำ

Agg. Type		$\Delta \text{pH}$				
Limestone Chonburi	1	-5.297	-3.837	-1.630	0.737	1.477
Limestone Saraburi	2	-5.713	-4.737	-3.080	0.327	0.933
Basalt Buriram	3	-6.417	-5.317	-3.843	-0.270	0.453



รูปที่ 53 กราฟ Point of zero charge (PZC) ของหินทั้ง 3 ชนิด

จากรูปที่ 53 หินทั้งสามชนิดมีประจุเป็นบวกเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีสภาวะเป็นกรด ( $\text{pH} < 7$ ) และมีแนวโน้มเป็นประจุลบมากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นด่างมากขึ้นหรือมีค่า pH ที่เพิ่มขึ้น โดยที่จะสังเกตได้ว่าหินบะซอลต์บุรีรัมย์จะมีประจุบวกที่มากที่สุด ลำดับต่อมาคือหินปูนสระบุรี และ ลำดับสุดท้ายคือ หินปูนชลบุรี (Buriram > Saraburi > Chonburi)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University

#### 4.3 วิเคราะห์และประเมินผลสำหรับการทดสอบ Rolling Bottle Test (RBT)

##### 4.3.1 ประเมินผลสำหรับการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ RBT

ในการผสมแอสฟัลต์อิมัลชันสามารถกับหินชนิดต่างๆ แอสฟัลต์สามารถครอบคลุมผิวของหินได้ทุกประเภททั้งแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก รวมถึงการเติมน้ำยางพาราที่ 10% และ 20% ของน้ำหนักวัสดุประสาน แต่ในการผสมน้ำยางพารา 10% และ 20% ในแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแคทไอออนิก ไม่สามารถครอบคลุมพื้นผิวของหินปูนจากจังหวัดชลบุรีได้ แสดงดังรูปที่ 54, รูปที่ 55 และ รูปที่ 56 ทำให้ในการทดสอบ RBT ได้ตัดกรณีการทดสอบที่ใช้น้ำยางพาราสวมในแคทไอออนิกแอสฟัลต์เพื่อทดสอบกับหินปูนชลบุรีออกไป เนื่องจากไม่สามารถนำมาใช้ประเมินค่าความต้านทานการหลุดลอกได้



รูปที่ 54 ผสมแคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันกับยางพาราที่ 10%



รูปที่ 55 ผสมแคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันกับยางพาราที่ 10%



รูปที่ 56 การเปรียบเทียบระหว่างหินสามชนิด ของการนำแคทไอออนิกผสมกับน้ำยางพาราที่ 10% โดยที่งานด้านบนคือหินสระบุรี ด้านซ้ายคือหินชลบุรี ด้านขวาคือหินบุรีรัมย์

จากรูปที่ 54, รูปที่ 55, และ รูปที่ 56 พบว่าการเติมน้ำยางพาราในแคทไอออนิกสำหรับหินปูนชลบุรีทำให้แอสฟัลต์ไม่จับตัวกับหินปูนชลบุรี โดยจะมีการจับตัวกันของแอสฟัลต์เองมากกว่าการเคลือบผิวของมวลรวม อาจเนื่องมาจากปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่อยู่ในหินชนิดนี้ในปริมาณที่มากกว่าหินชนิดอื่นทำให้การยึดเกาะของหินชนิดนี้มีค่าที่น้อยกว่า และเมื่อมีการเติมน้ำยางพาราให้ส่วนผสมอาจทำให้มีการยึดเกาะที่น้อยลงสำหรับหินชนิดนี้ และในอีกสาเหตุที่เป็นไปได้คือฝุ่นบนมวลรวมที่มากอาจทำให้การยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์นั้นไม่ดี แอสฟัลต์ที่มีการผสมยางพารานั้นอาจมีการยึดเกาะกันกับฝุ่นได้ดีกว่าการยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมจึงทำให้แอสฟัลต์นั้นไปจับกันเองเป็นก้อนและไม่เคลือบผิวของมวลรวม

#### 4.3.2 ผลการทดสอบ RBT หินปูนชลบุรี





ผลการทดสอบ RBT ของหินปูนชลบุรีกับแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละประเภท โดยในการทดสอบจะสังเกตผลที่ช่วงเวลา 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง โดยจะประเมินค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ที่ครอบคลุมบนผิวของหิน (Percent Bitumen Coverage) แสดงไว้ดัง ตารางที่ 12, ตารางที่ 13 และแสดงดังรูปที่ 14 โดยในการทดสอบจะใช้ผู้ทดสอบเพียงคนเดียวในการประเมินและบันทึกผลการทดสอบ


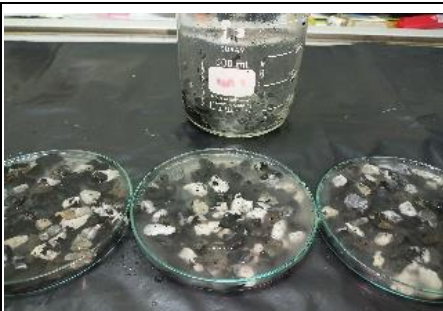
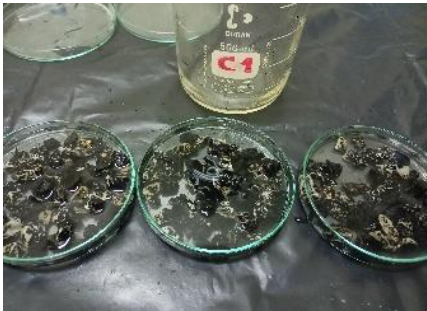





ตารางที่ 12 ผลการทดสอบ RBT ของหินปูนชลบุรี

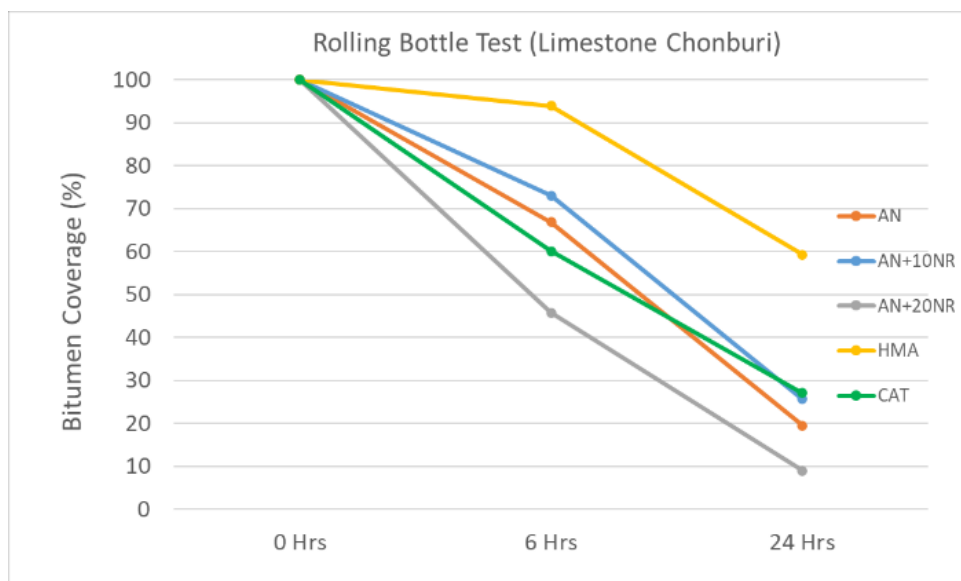
Limestone Chonburi		
Asphalt Emulsion type	Bitumen Coverage (%)	
	6 Hours	24 Hours
AN	66.85	19.51
AN + 10%NR	72.99	25.67
AN + 20%NR	45.69	8.98
HMA	93.85	59.25
CAT	60.1	27.09
CAT + 10%NR	-	-
CAT + 20%NR	-	-

ตารางที่ 13 รูปภาพตัวอย่างผลการทดสอบ RBT หินปูนชลบุรี

Limestone Chonburi (L1) Test Result		
Emulsion type	6 hr.	24 hr.
AN		
AN10%NR		

AN20%NR		
CAT		
CAT10%NR	-	-
CAT20%NR	-	-
HMA		





รูปที่ 57 ผลการทดสอบ RBT ที่เวลา 6 ชม. และ 24 ชม. ของหินปูนชลบุรี

จากผลการทดสอบของหินปูนชลบุรี ดังที่แสดงในรูปที่ 57 และตารางที่ 13 พบว่าในกรณีไม่เติม NRL ณ เวลาทดสอบที่ 6 ชั่วโมง Anionic Asphalt Emulsion มีเปอร์เซ็นต์ Bitumen Coverage อยู่ที่ 66.85% ซึ่งสูงกว่าค่า Cationic ที่ 60.10% อย่างไรก็ตาม ที่ 24 ชั่วโมง Anionic มีเปอร์เซ็นต์การครอบคลุมของ Bitumen เท่ากับ 19.51% ซึ่งต่ำกว่าค่า Cationic ที่ 27.09% เมื่อเติม NRL 10% ลงใน Anionic พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การครอบคลุมของ Bitumen เพิ่มขึ้นระหว่างการทดสอบทั้ง 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง โดยมีค่า 72.99% และ 25.67% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าเปอร์เซ็นต์การครอบคลุมของ Bitumen จะลดลงเมื่อเพิ่ม NRL 20% โดยมีค่า 45.69% และ 8.98% สำหรับการทดสอบ 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงตามลำดับ และเนื่องด้วยไม่สามารถผสม NRL กับ Cationic Asphalt Emulsion โดยในระหว่างขั้นตอนการผสม Cationic Asphalt Emulsion ที่มีการเติม NRL กับ หินปูนชลบุรี อนุภาคแอสฟัลต์ไม่สามารถเกาะติดหรือเคลือบมวลรวมได้ ทำให้ไม่สามารถใช้ในการทดสอบต่อไปได้ในกรณีนี้

#### 4.3.3 ผลการทดสอบ RBT หินปูนสระบุรี


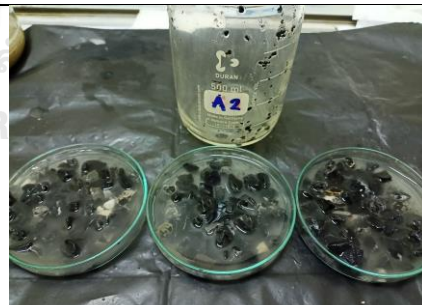
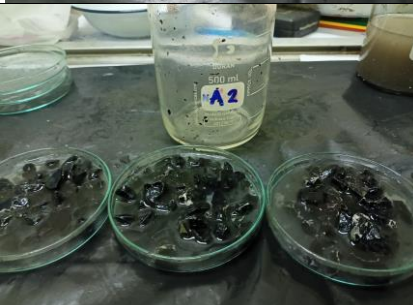
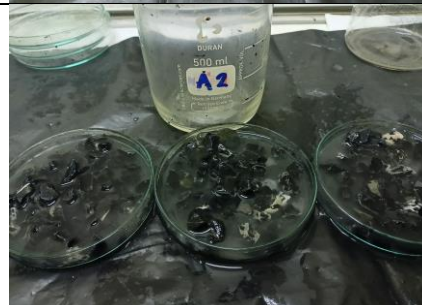
ผลการทดสอบ RBT ของหินปูนสระบุรีกับแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละประเภท โดยในการทดสอบจะสังเกตผลที่ช่วงเวลา 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง โดยจะประเมินค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ที่ครอบคลุมบนผิวของหิน (Percent Bitumen Coverage)


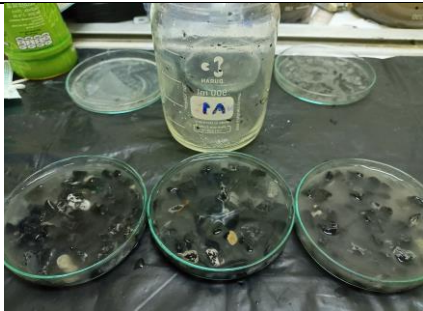


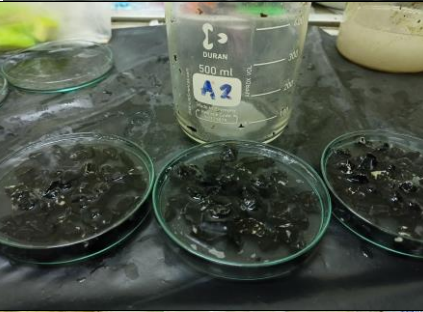




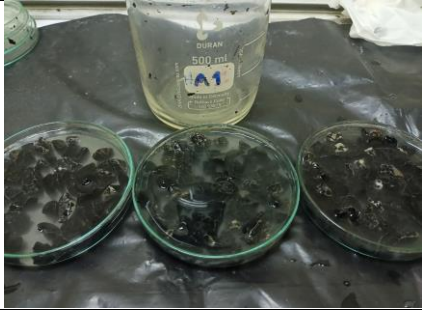
แสดงดังตารางที่ 14, ตารางที่ 15 และแสดงดังรูปที่ 58 โดยในการทดสอบจะใช้ผู้ทดสอบเพียงคนเดียวในการประเมินและบันทึกผลการทดสอบ

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบ RBT ของหินปูนสระบุรี

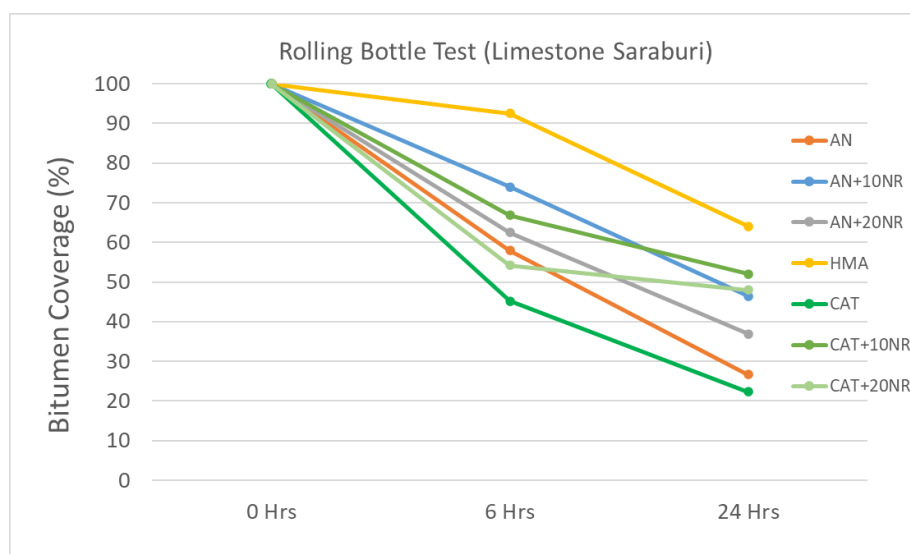
Limestone Saraburi		
Asphalt Emulsion type	Bitumen Coverage (%)	
	6 Hours	24 Hours
AN	57.97	26.7
AN + 10%NR	73.99	46.48
AN + 20%NR	62.46	36.89
HMA	92.47	64.01
CAT	45.18	22.32
CAT + 10%NR	66.88	52.02
CAT + 20%NR	54.15	47.95

ตารางที่ 15 รูปภาพตัวอย่างผลการทดสอบ RBT หินปูนสระบุรี

Limestone Saraburi (L2) Test Result		
Emulsion type	6 hr.	24 hr.
AN		
AN10%NR		

AN20%NR		
CAT		
CAT10%NR		
CAT20%NR		
HMA		





รูปที่ 58 ผลการทดสอบ RBT ที่เวลา 6 ชม. และ 24 ชม. ของหินปูนสระบุรี

จากผลการทดสอบของหินปูนสระบุรีดังที่แสดงในรูปที่ 58 และตารางที่ 15 พบว่า ในกรณีไม่ได้เติมน้ำยางพารา (Natural Rubber Latex หรือ NRL) ณ เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง Anionic Asphalt Emulsion มีค่าเปอร์เซ็นต์ Bitumen Coverage เท่ากับ 57.97% และ 26.70% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า Cationic ที่มีค่า 45.18% และ 22.32% ตามลำดับ ในกรณีที่เติมน้ำยางพารา 10% ลงใน Anionic เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของ Bitumen จะเพิ่มขึ้นสำหรับการทดสอบทั้ง 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง โดยมีค่า 73.99% และ 46.48% ตามลำดับ และในกรณีเมื่อเติมน้ำยางพารา 20% ลงใน Anionic เปอร์เซ็นต์จะลดลง แต่ไม่ต่ำกว่าค่าที่ไม่มี NRL โดยมีค่า 62.46% และ 36.89% สำหรับการทดสอบ 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้น เมื่อเติมน้ำยางพารา 10% ลงใน Cationic เปอร์เซ็นต์การครอบคลุมของ Bitumen จะเพิ่มขึ้นสำหรับการทดสอบทั้ง 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง โดยมีค่า 66.88% และ 52.02% ตามลำดับ เมื่อเติมน้ำยางพารา 20% เปอร์เซ็นต์ Bitumen Coverage ลดลง แต่ก็ยังสูงกว่าค่าที่ไม่มี NRL โดยมีค่า 54.15% และ 47.95% สำหรับการทดสอบ 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงตามลำดับ

#### 4.3.4 ผลการทดสอบ RBT หินบะซอลต์บุรีรัมย์

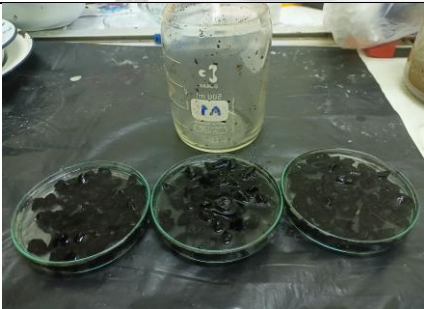
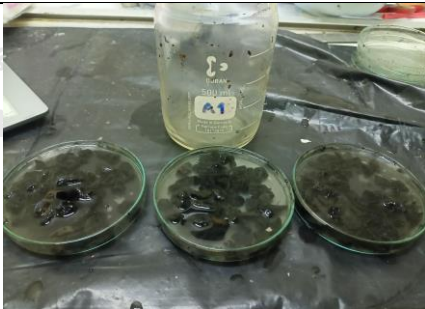


ผลการทดสอบ RBT ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์กับแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละประเภท โดยในการทดสอบจะสังเกตผลที่ช่วงเวลา 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง โดยจะประเมินค่า เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ที่ครอบคลุมบนผิวของหิน (Percent Bitumen

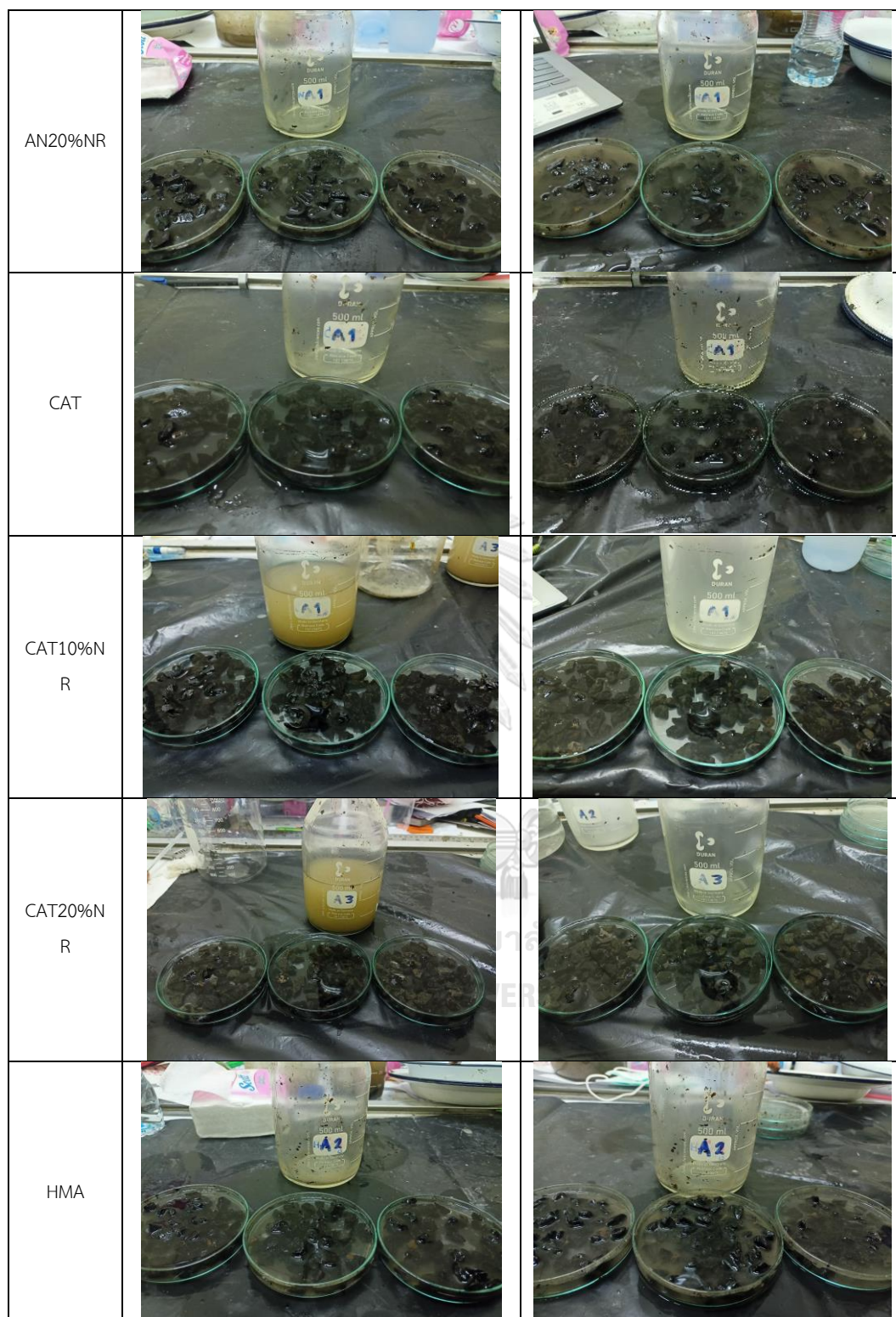
Coverage) แสดงดังตารางที่ 16, ตารางที่ 17 และแสดงดังรูปที่ 18 โดยในการทดสอบจะใช้ผู้ทดสอบเพียงคนเดียวในการประเมินและบันทึกผลการทดสอบ

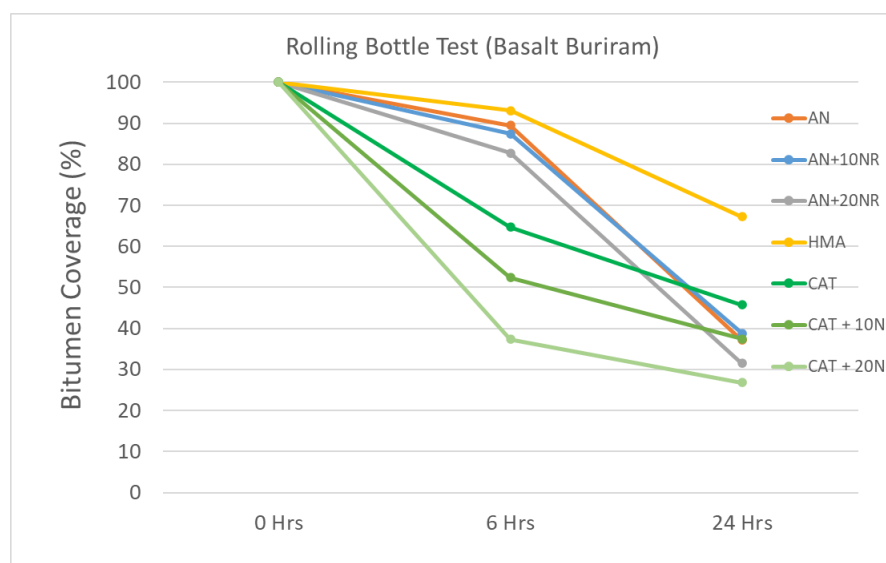
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบ RBT ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

Basalt Buriram		
Asphalt Emulsion type	Bitumen Coverage (%)	
	6 Hours	24 Hours
AN	89.49	37.11
AN + 10%NR	87.39	38.82
AN + 20%NR	82.74	31.46
HMA	93.09	67.17
CAT	64.68	45.73
CAT + 10%NR	52.34	37.41
CAT + 20%NR	37.34	26.85

ตารางที่ 17 รูปภาพตัวอย่างผลการทดสอบ RBT หินบะซอลต์บุรีรัมย์

Basalt Buriram (L3) Test Result		
Emulsion type	6 hr.	24 hr.
AN		
AN10%NR		





รูปที่ 59 ผลการทดสอบ RBT ที่เวลา 6 ชม. และ 24 ชม. ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

จากผลการทดสอบของหินบะซอลต์บุรีรัมย์ ดังที่แสดงในรูปที่ 59 และตารางที่ 17 พบว่า ณ เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง Anionic Asphalt Emulsion มีเปอร์เซ็นต์ Bitumen Coverage อยู่ที่ 89.49% ซึ่งสูงกว่า Cationic ที่มีค่า 64.68% ณ เวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง Cationic มี Bitumen Coverage เปอร์เซ็นต์ 45.73% ซึ่งสูงกว่า Anionic ที่มีค่า 37.11% เมื่อเติม NRL 10% ลงใน Anionic พบว่าเปอร์เซ็นต์การครอบคลุมของ Bitumen ใกล้เคียงกับที่ไม่เติม NRL ทั้งในเวลาทดสอบ 6 ชั่วโมงและเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยมีค่า 87.39% และ 38.82% ตามลำดับ เมื่อเติม NRL 20% ลงใน Anionic ค่าจะลดลงทั้งในเวลาทดสอบ 6 ชั่วโมงและเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยมีค่า 82.74% และ 31.46% ตามลำดับ การเติม NRL 10% ลงใน Cationic ทำให้เปอร์เซ็นต์การครอบคลุมของ Bitumen ลดลงในการทดสอบทั้งในเวลาทดสอบ 6 ชั่วโมงและเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยมีค่า 52.34% และ 37.41% ตามลำดับ เมื่อเติม NRL 20% ลงใน Cationic เปอร์เซ็นต์การครอบคลุมของ Bitumen จะลดลงในการทดสอบทั้งในเวลาทดสอบ 6 ชั่วโมงและเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยมีค่า 37.34% และ 26.85% ตามลำดับ



#### 4.3.5 วิเคราะห์ และ เปรียบเทียบผลการทดสอบ RBT

##### 4.3.5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบด้วย ANOVA test

ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติของการทดสอบขวดกึ่งด้วยการทดสอบ ANOVA นั้นจะใช้โปรแกรม SPSS เป็นเครื่องมือในการทดสอบทางสถิติ การทดสอบนี้ทำขึ้นเพื่อหาว่าแอสฟัลต์อิมัลชันที่ประเภทต่างกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละประเภทแตกต่างกันอย่างไร ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 โดยมีสมมติฐานมีดังนี้

H0: สมมติฐานหลัก คือ แอสฟัลต์อิมัลชันต่างชนิดกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละชนิดไม่แตกต่างกัน

H1: สมมติฐานรอง คือ แอสฟัลต์อิมัลชันต่างชนิดกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ในการทดสอบจะกำหนดตัวแปรอิสระเป็นชนิดของหิน โดยแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ (1)หินปูนชลบุรี (2)หินปูนสระบุรี (3)หินบะซอลต์บุรีรัมย์ และกำหนดตัวแปรตามเป็น ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก ที่เวลาในการทดสอบ 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 18 โดยที่ผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 19



ตารางที่ 18 ตัวแปรต่างๆ ในการทดสอบ ANOVA

Factor				Dependent
Anionic		Cationic		Aggregate
mean	SD	mean	SD	type
18.393	9.196	26.357	16.096	1
21.714	8.202	27.317	16.400	1
18.428	7.263	27.584	15.776	1
28.951	13.818	24.139	18.768	2
24.232	12.660	21.735	19.344	2
26.908	12.595	21.078	22.314	2
38.65	18.570	45.934	19.638	3
34.833	19.368	43.957	20.402	3
37.86	18.512	47.307	20.667	3

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบ ANOVA

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	P-value
AN	Between Groups	470.002	2	235.001	53.012	0.000154
	Within Groups	26.598	6	4.433		
	Total	496.600	8			
CAT	Between Groups	918.701	2	459.351	235.587	0.000002
	Within Groups	11.699	6	1.950		
	Total	930.400	8			

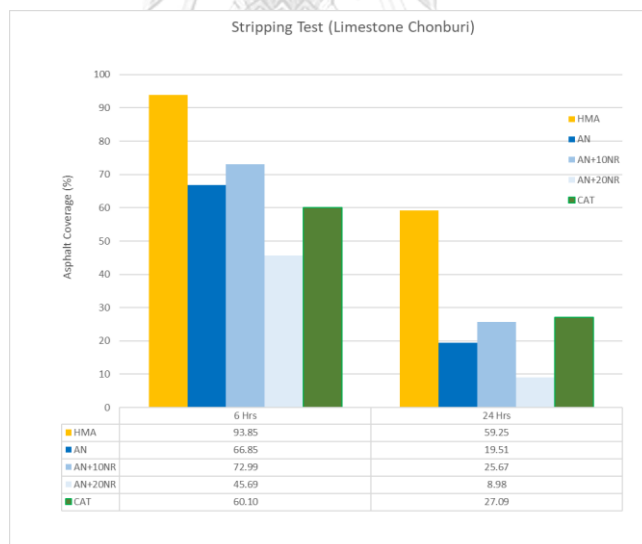
จากตารางที่ 19 พบว่าทั้งแอนไอออนิกและแคทไอออนิกมีค่า P-value = 0.000154 และ 0.000002 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก หรือ



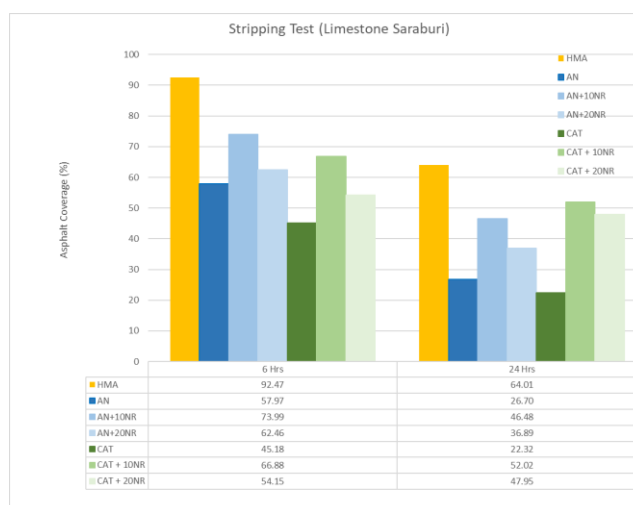
จากตารางที่ 20 ทุกคู่ในการทดสอบมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 ทั้งหมด แอสฟัลต์อิมัลชันต่างชนิดกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละชนิดแตกต่างกันในทุกคู่ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์เฉลี่ยของแต่ละคู่ขึ้นพบว่า ในหินบะซอลต์บุรีรัมย์ มีค่าสูงที่สุด ลำดับต่อมาคือ หินปูนสระบุรี และลำดับสุดท้ายคือหินปูนชลบุรี สำหรับแอนไอออนิก (หินบะซอลต์บุรีรัมย์ > หินปูนสระบุรี > หินปูนชลบุรี) และ สำหรับแคทไอออนิกพบว่า ในหินบะซอลต์บุรีรัมย์ มีค่าสูงที่สุด ลำดับต่อมาคือ หินปูนชลบุรี และลำดับสุดท้ายคือ หินปูนสระบุรี (หินบะซอลต์บุรีรัมย์ > หินปูนชลบุรี > หินปูนสระบุรี)

#### 4.3.5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบ RBT ของหินทั้งสามชนิด

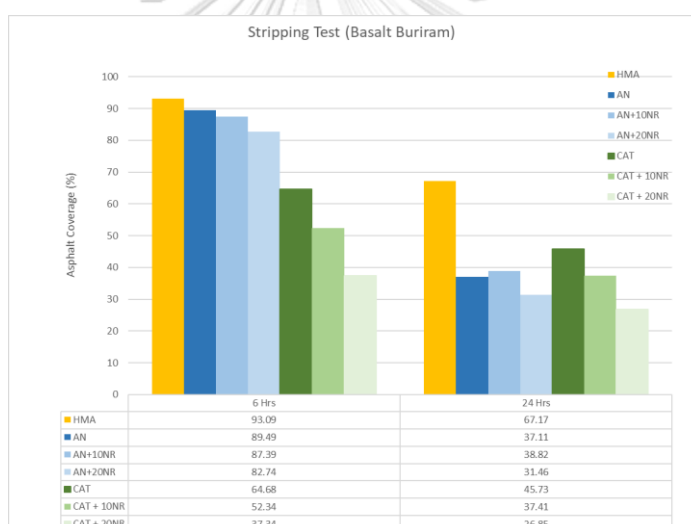
สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 60, รูปที่ 61, และรูปที่ 62 โดยจะวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟแท่ง ของค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวมวลรวม ของหินทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 60 เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนชลบุรี



รูปที่ 61 เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนสระบุรี



รูปที่ 62 เปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินบะซอลต์บุรีรัมย์

จาก รูปที่ 60 และ รูปที่ 61 พบว่าการเติมน้ำยารพาราที่ 10% ของน้ำหนักรวสตุเชื่อมประสาน สามารถเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนทั้ง 2 ชนิด คือ หินปูนชลบุรี และ หินปูนสระบุรี ไม่ว่าจะเป็นแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกหรือแคทไอออนิกก็ตาม แต่เมื่อมีการเติมน้ำยารพาราที่ 20% ของน้ำหนักรวสตุเชื่อมประสาน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนนั้นลดลง จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำยารพาราที่ 10% ของน้ำหนักรวสตุเชื่อม

ประสานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมประเภทหินปูนได้แต่ไม่สามารถนำน้ำยางพารามาผสมกับแคทไอออนิกเพื่อนำมาใช้กับหินปูนชลบุรีได้

จาก รูปที่ 62 พบว่าการเติมน้ำยางพาราที่ 10% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวของหินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์นั้นมีค่าลดลง ไม่ว่าจะเป็นแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกหรือแคทไอออนิกก็ตาม และเมื่อมีการเติมน้ำยางพาราที่ 20% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์นั้นลดลงมากขึ้น ของทั้งแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำยางพาราทั้ง 10% และ 20% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ในแอสฟัลต์อิมัลชันทั้งชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิกไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมประเภทหินบะซอลต์ได้

จากรูปที่ 60 รูปที่ 61 รูปที่ 62 เมื่อนำค่าความต้านทานการหลุดลอกของหินทั้งสามชนิดระหว่างการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน กับการใช้ Hot mix asphalt หรือ HMA พบว่า ในแอสฟัลต์อิมัลชันทุกส่วนผสมมีค่าความต้านทานการหลุดลอกที่น้อยกว่าในส่วนผสมที่ใช้ HMA แต่สำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์นั้นเมื่อนำมาผสมกับแอนไอออนิกแอสฟัลต์จะมีค่าความต้านทานการหลุดลอกที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่ใช้ HMA อยู่เล็กน้อย สำหรับการทดสอบที่ 6 ชั่วโมง นั้นแสดงว่าสำหรับหินบะซอลต์ที่ผสมกับแอนไอออนิกเมื่อนำไปใช้งานจริงจะมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะได้ใกล้เคียงกับ HMA ในช่วงแรกของการใช้งานแต่เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะลดลงเมื่อเทียบกับ HMA

#### 4.4 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength Test (ITS)

ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบค่า ITS Ratio ระหว่างตัวอย่างในสภาวะแห้งและสภาวะเปียก ซึ่งเป็นการจำลองค่าความต้านทานต่อความเสียหายเนื่องจากความชื้นของถนนที่ใช้งานอยู่จริง โดยส่วนนี้จะเป็นการแสดงถึงผลการทดสอบต่างๆ ของการทดสอบ ITS

#### 4.4.1 ผลการเตรียมก้อนตัวอย่าง ITS

ในการผสมพบว่าในหินปูนชลบุรีไม่สามารถผสมกับแคทไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราได้ เนื่องจากอนุภาคของแอสฟัลต์ไม่จับกับมวลรวมเช่นเดียวกับการทดสอบ RBT แสดงดังรูปที่ 63



รูปที่ 63 ตัวอย่างการผสมหินปูนชลบุรีที่มีการเติมน้ำยางพาราในแคทไอออนิก

ในส่วนของการเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบในสภาวะเปียก ในกรณีของแคทไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพาราของหินปูนสระบุรี (L2 CAT 0%NR) เกิดการแตกของก้อนตัวอย่างหลังจากทำการแช่ในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 64 ก้อนตัวอย่างที่สภาวะเปียกในกรณี (L2 CAT 0%NR)

#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์ก้อนตัวอย่าง

##### 4.4.2.1 ขนาดของก้อนตัวอย่าง

ก่อนการทดสอบ ITS จำเป็นต้องทราบถึงความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณค่า ITS จากสมการที่ 3.2 โดยในการวัดค่าจะทำการวัด 3 ครั้งและนำมาเฉลี่ย โดยขนาดของก้อนตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 21, ตารางที่ 22 และ ตารางที่ 23

ตารางที่ 21 ขนาดของก้อนตัวอย่างของหินปูนชลบุรี

Chonburi Limestone (L1)											
No.	Agg.	Emulsion	Test Condition	High (mm.)				Diameter (mm.)			
				1	2	3	t avg.	1	2	3	D avg.
1	L1	AN 0% NR	Dry	64.15	63.55	64.20	63.97	101.05	100.60	101.40	101.02
2	L1	AN 0% NR	Dry	63.90	63.35	64.10	63.78	101.60	101.35	101.15	101.37
3	L1	AN 0% NR	Dry	63.55	63.65	63.00	63.40	101.25	101.50	101.10	101.28
4	L1	AN 0% NR	Wet	62.80	64.30	63.60	63.57	101.25	101.10	101.30	101.22
5	L1	AN 0% NR	Wet	63.95	64.00	64.50	64.15	101.00	101.00	101.15	101.05
6	L1	AN 0% NR	Wet	63.90	63.20	63.50	63.53	101.20	101.45	100.85	101.17
7	L1	CAT 0% NR	Dry	61.20	61.20	60.75	61.05	101.50	101.55	101.40	101.48
8	L1	CAT 0% NR	Dry	61.40	61.60	61.40	61.47	101.40	101.25	101.55	101.40
9	L1	CAT 0% NR	Dry	61.30	61.30	61.55	61.38	101.25	101.40	101.45	101.37
10	L1	CAT 0% NR	Wet	62.10	62.00	61.65	61.92	101.60	101.35	101.60	101.52
11	L1	CAT 0% NR	Wet	62.30	62.95	62.70	62.65	101.65	101.50	101.35	101.50
12	L1	CAT 0% NR	Wet	61.25	61.10	61.45	61.27	101.30	101.50	101.60	101.47
13	L1	AN 10% NR	Dry	63.10	62.75	63.00	62.95	101.75	101.75	101.80	101.77
14	L1	AN 10% NR	Dry	63.40	63.10	63.00	63.17	101.65	101.65	101.55	101.62
15	L1	AN 10% NR	Dry	63.25	63.00	63.20	63.15	101.35	101.50	101.75	101.53
16	L1	AN 10% NR	Wet	63.70	64.40	64.00	64.03	101.10	101.40	101.50	101.33
17	L1	AN 10% NR	Wet	63.80	64.10	63.90	63.93	100.90	101.10	101.30	101.10
18	L1	AN 10% NR	Wet	63.45	63.10	63.00	63.18	101.10	101.45	101.55	101.37

ตารางที่ 22 ขนาดของก้อนตัวอย่างของหินปูนสระบุรี

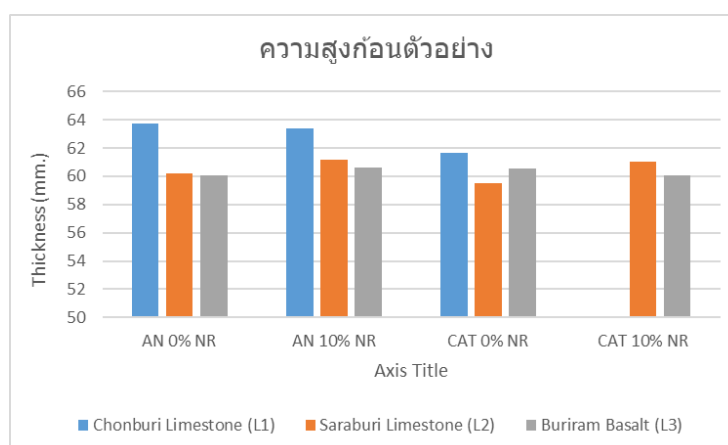
Saraburi Limestone (L2)											
No.	Agg.	Emulsion	Test Condition	High (mm.)				Diameter (mm.)			
				1	2	3	t avg.	1	2	3	D avg.
19	L2	AN 0% NR	Dry	60.05	59.95	60.15	60.05	101.50	101.50	101.50	101.50
20	L2	AN 0% NR	Dry	60.40	60.45	59.85	60.23	101.75	101.75	101.55	101.68
21	L2	AN 0% NR	Dry	60.45	60.40	60.80	60.55	101.55	101.55	101.45	101.52
22	L2	AN 0% NR	Wet	60.50	60.10	59.85	60.15	101.65	101.65	102.00	101.77
23	L2	AN 0% NR	Wet	60.25	60.10	60.35	60.23	101.60	101.60	101.70	101.63
24	L2	AN 0% NR	Wet	60.10	59.75	59.95	59.93	101.40	101.25	101.40	101.35
25	L2	CAT 0% NR	Dry	59.25	59.05	59.00	59.10	101.45	101.35	101.35	101.38
26	L2	CAT 0% NR	Dry	59.20	59.35	59.10	59.22	101.55	101.45	101.35	101.45
27	L2	CAT 0% NR	Dry	58.50	58.35	58.50	58.45	101.10	101.00	101.30	101.13
28	L2	CAT 0% NR	Wet	59.40	59.05	59.50	59.32	101.45	101.50	101.45	101.47
29	L2	CAT 0% NR	Wet	60.05	60.75	61.00	60.60	101.30	101.20	101.35	101.28
30	L2	CAT 0% NR	Wet	60.00	60.75	60.45	60.40	101.30	101.30	101.45	101.35
31	L2	AN 10% NR	Dry	60.70	60.65	60.75	60.70	101.55	101.80	101.80	101.72
32	L2	AN 10% NR	Dry	61.00	60.90	61.10	61.00	101.50	101.60	101.50	101.53
33	L2	AN 10% NR	Dry	61.20	60.95	60.85	61.00	101.35	101.55	101.50	101.47
34	L2	AN 10% NR	Wet	61.25	61.60	61.75	61.53	101.50	101.45	101.60	101.52
35	L2	AN 10% NR	Wet	61.20	61.00	60.90	61.03	101.60	101.45	101.50	101.52
36	L2	AN 10% NR	Wet	61.90	61.45	62.00	61.78	101.70	101.65	101.55	101.63
37	L2	CAT 10% NR	Dry	61.25	60.15	60.60	60.67	101.50	101.40	101.45	101.45
38	L2	CAT 10% NR	Dry	60.90	61.00	61.10	61.00	101.45	101.50	101.50	101.48
39	L2	CAT 10% NR	Dry	60.80	60.80	60.50	60.70	101.60	101.55	101.65	101.60
40	L2	CAT 10% NR	Wet	61.70	61.55	61.65	61.63	101.50	101.35	101.55	101.47
41	L2	CAT 10% NR	Wet	61.45	61.35	61.35	61.38	101.45	101.50	101.60	101.52
42	L2	CAT 10% NR	Wet	61.00	60.95	60.95	60.97	101.70	101.55	101.45	101.57



ตารางที่ 23 ขนาดของก้อนตัวอย่างของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

No.	Agg.	Emulsion	Test Condition	Buriram Basalt (L3)							
				High (mm.)				Diameter (mm.)			
				1	2	3	t avg.	1	2	3	D avg.
43	L3	AN 0% NR	Dry	60.05	60.25	60.45	60.25	101.75	101.60	101.75	101.70
44	L3	AN 0% NR	Dry	59.90	60.20	60.10	60.07	101.70	101.45	101.60	101.58
45	L3	AN 0% NR	Dry	60.35	60.00	59.95	60.10	101.60	101.65	101.75	101.67
46	L3	AN 0% NR	Wet	59.95	60.35	59.75	60.02	101.60	101.70	101.65	101.65
47	L3	AN 0% NR	Wet	59.95	59.65	59.90	59.83	101.60	101.70	101.75	101.68
48	L3	AN 0% NR	Wet	60.30	60.30	60.30	60.30	101.45	101.65	101.50	101.53
49	L3	CAT 0% NR	Dry	59.55	58.55	58.90	59.00	101.60	101.55	101.55	101.57
50	L3	CAT 0% NR	Dry	58.75	59.25	58.65	58.88	101.70	101.35	101.65	101.57
51	L3	CAT 0% NR	Dry	91.10	58.90	59.30	69.77	101.65	101.65	101.80	101.70
52	L3	CAT 0% NR	Wet	58.50	58.50	58.30	58.43	101.60	101.50	101.75	101.62
53	L3	CAT 0% NR	Wet	57.95	57.95	58.00	57.97	101.40	101.50	101.55	101.48
54	L3	CAT 0% NR	Wet	59.10	59.15	59.30	59.18	101.50	101.50	101.35	101.45
55	L3	AN 10% NR	Dry	60.80	60.80	60.70	60.77	101.70	101.65	101.65	101.67
56	L3	AN 10% NR	Dry	60.90	60.65	60.90	60.82	101.55	101.60	101.55	101.57
57	L3	AN 10% NR	Dry	60.50	59.95	60.30	60.25	101.60	101.70	101.75	101.68
58	L3	AN 10% NR	Wet	61.00	61.20	61.10	61.10	101.70	101.60	101.60	101.63
59	L3	AN 10% NR	Wet	60.40	60.40	60.30	60.37	101.60	101.65	101.60	101.62
60	L3	AN 10% NR	Wet	60.75	60.40	60.50	60.55	101.75	101.45	101.70	101.63
61	L3	CAT 10% NR	Dry	60.00	60.70	60.25	60.32	101.50	101.50	101.60	101.53
62	L3	CAT 10% NR	Dry	60.00	59.80	59.40	59.73	101.00	101.50	101.60	101.37
63	L3	CAT 10% NR	Dry	59.85	59.95	59.80	59.87	101.60	101.70	101.90	101.73
64	L3	CAT 10% NR	Wet	59.60	59.80	59.65	59.70	101.85	101.60	101.60	101.68
65	L3	CAT 10% NR	Wet	60.25	60.55	60.10	60.30	101.85	101.65	101.65	101.72
66	L3	CAT 10% NR	Wet	60.00	60.30	60.50	60.27	101.60	101.45	101.50	101.52

สำหรับขนาดของก้อนตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม จากตารางที่ 21, ตารางที่ 22 และ ตารางที่ 23 สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 65 โดยจะเห็นได้ว่าก้อนตัวอย่างจากหินปูนชลบุรีมีความสูงหรือความหนาของก้อนตัวอย่างที่มากกว่าหินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ และในส่วนผสมของหินปูนสระบุรีพบว่าเมื่อมีการเติมน้ำยาพาราจะทำให้ความสูงก้อนตัวอย่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 65 ความสูงเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม

#### 4.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่าง

ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างจะประกอบด้วย น้ำจากอิมัลชันที่มีอยู่ 40% และ น้ำจากการเพิ่มลงไประหว่างการผสมแอสฟัลต์อิมัลชันกับมวลรวม โดยส่วนนี้ จะสามารถหาปริมาณน้ำที่คงเหลือในก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบ ITS ได้แสดงดัง ตารางที่ 24, ตารางที่ 25 และ ตารางที่ 26

ตารางที่ 24 ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างของหินปูนชลบุรี

Chonburi Limestone (L1)									
No.	Emulsion type	water add (g.)	water in emulsion (g.)	water all	นน. ตย. หลังบด	นน. ตย. ก่อน	น้ำที่ออก	น้ำที่เหลือ	% water content
			40% of Emulsion	(g.)	อัด (g.)	ทดสอบ (g.)	(g.)	(g.)	Remaining
1	AN 0% NR	51.10	41.28	92.38	1121.20	1033.50	87.70	4.68	0.45
2	AN 0% NR	50.40	41.32	91.72	1106.70	1023.90	82.80	8.92	0.88
3	AN 0% NR	50.50	41.32	91.82	1112.70	1027.60	85.10	6.72	0.66
4	AN 0% NR	50.10	41.36	91.46	1115.40	1036.10	79.30	12.16	1.19
5	AN 0% NR	50.00	41.32	91.32	1118.90	1031.20	87.70	3.62	0.35
6	AN 0% NR	50.30	41.40	91.70	1117.40	1034.60	82.80	8.90	0.87
7	CAT 0% NR	50.00	41.32	91.32	1102.30	1016.10	86.20	5.12	0.51
8	CAT 0% NR	50.00	41.28	91.28	1100.50	1037.70	62.80	28.48	2.82
9	CAT 0% NR	50.30	41.32	91.62	1097.10	1035.30	61.80	29.82	2.97
10	CAT 0% NR	50.60	41.32	91.92	1107.60	1045.10	62.50	29.42	2.90
11	CAT 0% NR	50.20	41.32	91.52	1114.30	1043.40	70.90	20.62	2.02
12	CAT 0% NR	50.00	41.36	91.36	1094.70	1028.90	65.80	25.56	2.55
13	AN 10% NR	50.20	41.32	91.52	1119.20	1052.80	66.40	25.12	2.44
14	AN 10% NR	50.00	41.36	91.36	1119.00	1052.20	66.80	24.56	2.39
15	AN 10% NR	50.00	41.32	91.32	1120.00	1053.40	66.60	24.72	2.40
16	AN 10% NR	50.20	41.32	91.52	1122.60	1049.50	73.10	18.42	1.79
17	AN 10% NR	50.30	41.40	91.70	1121.40	1049.70	71.70	20.00	1.94
18	AN 10% NR	50.00	41.32	91.32	1121.60	1058.90	62.70	28.62	2.78

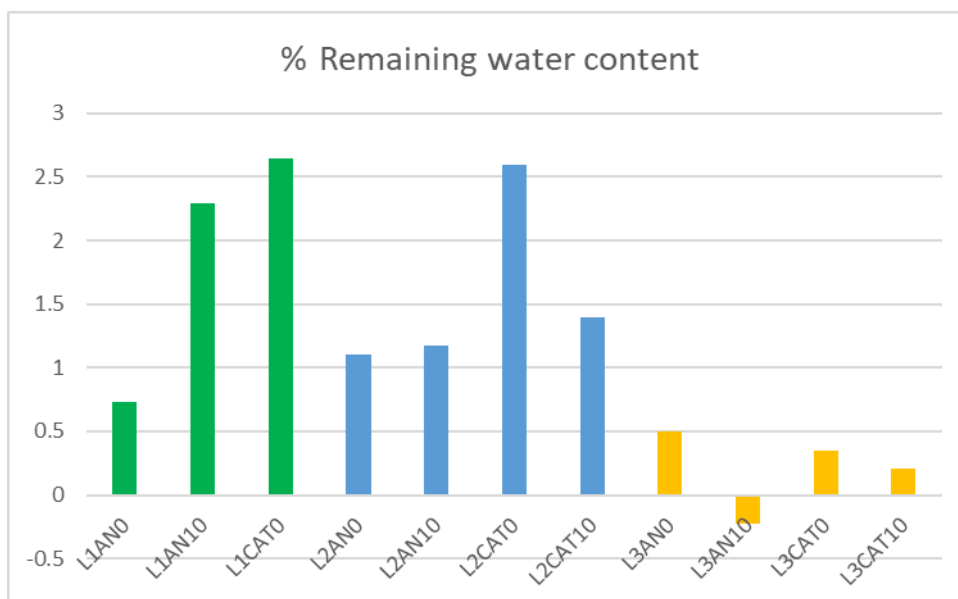
ตารางที่ 25 ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างของหินปูนสระบุรี

Saraburi Limestone (L2)									
No.	Emulsion type	water add (g.)	water in emulsion (g.)	water all	นน. ตย. หลังบด	นน. ตย. ก่อน	น้ำที่ออก	น้ำที่เหลือ	% water content
			40% of Emulsion	(g.)	อัด (g.)	ทดสอบ (g.)	(g.)	(g.)	Remaining
19	AN 0% NR	20.00	41.24	61.24	1097.20	1046.70	50.50	10.74	1.04
20	AN 0% NR	20.70	41.28	61.98	1100.80	1041.20	59.60	2.38	0.23
21	AN 0% NR	20.30	41.24	61.54	1098.10	1046.70	51.40	10.14	0.98
22	AN 0% NR	20.10	41.32	61.42	1096.30	1048.90	47.40	14.02	1.35
23	AN 0% NR	20.00	41.32	61.32	1095.20	1048.60	46.60	14.72	1.42
24	AN 0% NR	20.00	41.32	61.32	1082.40	1037.30	45.10	16.22	1.59
25	CAT 0% NR	20.30	41.36	61.66	1069.70	1032.80	36.90	24.76	2.46
26	CAT 0% NR	20.10	41.32	61.42	1078.30	1047.50	30.80	30.62	3.01
27	CAT 0% NR	20.10	41.32	61.42	1071.40	1037.10	34.30	27.12	2.69
28	CAT 0% NR	20.30	41.36	61.66	1077.80	1042.10	35.70	25.96	2.55
29	CAT 0% NR	20.00	41.40	61.40	1083.00	1047.30	35.70	25.70	2.52
30	CAT 0% NR	20.00	41.32	61.32	1082.30	1044.70	37.60	23.72	2.32
31	AN 10% NR	20.30	41.32	61.62	1102.00	1056.30	45.70	15.92	1.53
32	AN 10% NR	20.00	41.32	61.32	1113.10	1061.90	51.20	10.12	0.96
33	AN 10% NR	20.00	41.36	61.36	1104.90	1055.80	49.10	12.26	1.17
34	AN 10% NR	20.10	41.36	61.46	1115.10	1065.00	50.10	11.36	1.08
35	AN 10% NR	20.30	41.36	61.66	1111.10	1061.70	49.40	12.26	1.17
36	AN 10% NR	20.40	41.40	61.80	1111.50	1061.40	50.10	11.70	1.11
37	CAT 10% NR	20.00	41.36	61.36	1077.10	1030.20	46.90	14.46	1.42
38	CAT 10% NR	20.00	41.32	61.32	1095.70	1048.20	47.50	13.82	1.34
39	CAT 10% NR	20.30	41.32	61.62	1095.40	1048.30	47.10	14.52	1.40
40	CAT 10% NR	20.70	41.28	61.98	1101.70	1053.60	48.10	13.88	1.33
41	CAT 10% NR	20.50	41.32	61.82	1097.00	1048.90	48.10	13.72	1.33
42	CAT 10% NR	20.40	41.32	61.72	1097.70	1052.10	45.60	16.12	1.56

ตารางที่ 26 ปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

Buriram Basalt (L3)									
No.	Emulsion type	water add (g.)	water in emulsion (g.)	water all	นน. ตย. หลังบด	นน. ตย. ก่อน	น้ำที่ออก	น้ำที่เหลือ	% water content
			40% of Emulsion	(g.)	อัด (g.)	ทดสอบ (g.)	(g.)	(g.)	Remaining
43	AN 0% NR	20.00	41.32	61.32	1102.90	1046.40	56.50	4.82	0.46
44	AN 0% NR	20.10	41.32	61.42	1096.60	1042.80	53.80	7.62	0.74
45	AN 0% NR	20.10	41.36	61.46	1103.70	1051.80	51.90	9.56	0.92
46	AN 0% NR	19.90	41.32	61.22	1102.50	1044.70	57.80	3.42	0.33
47	AN 0% NR	20.10	41.32	61.42	1107.90	1049.30	58.60	2.82	0.27
48	AN 0% NR	20.30	41.36	61.66	1116.20	1057.40	58.80	2.86	0.27
49	CAT 0% NR	20.00	41.32	61.32	1097.90	1036.80	61.10	0.22	0.02
50	CAT 0% NR	20.00	41.32	61.32	1090.10	1032.90	57.20	4.12	0.40
51	CAT 0% NR	19.90	41.32	61.22	1106.80	1051.80	55.00	6.22	0.59
52	CAT 0% NR	20.40	41.36	61.76	1086.00	1027.70	58.30	3.46	0.34
53	CAT 0% NR	20.40	41.32	61.72	1079.90	1024.30	55.60	6.12	0.60
54	CAT 0% NR	20.30	41.32	61.62	1100.10	1040.00	60.10	1.52	0.15
55	AN 10% NR	20.20	41.36	61.56	1115.60	1048.40	67.20	-5.64	-0.54
56	AN 10% NR	20.00	41.32	61.32	1110.00	1044.50	65.50	-4.18	-0.40
57	AN 10% NR	20.00	41.32	61.32	1116.30	1054.30	62.00	-0.68	-0.06
58	AN 10% NR	20.40	41.32	61.72	1118.10	1052.80	65.30	-3.58	-0.34
59	AN 10% NR	20.50	41.32	61.82	1113.60	1051.80	61.80	0.02	0.00
60	AN 10% NR	20.00	41.32	61.32	1114.30	1052.50	61.80	-0.48	-0.05
61	CAT 10% NR	20.00	41.32	61.32	1103.80	1043.70	60.10	1.22	0.12
62	CAT 10% NR	20.00	41.36	61.36	1101.80	1039.80	62.00	-0.64	-0.06
63	CAT 10% NR	20.10	41.32	61.42	1103.80	1041.90	61.90	-0.48	-0.05
64	CAT 10% NR	20.30	41.32	61.62	1103.60	1041.40	62.20	-0.58	-0.06
65	CAT 10% NR	20.10	41.32	61.42	1104.00	1041.50	62.50	-1.08	-0.10
66	CAT 10% NR	20.00	41.32	61.32	1088.90	1041.80	47.10	14.22	1.38

จากตารางที่ 24, ตารางที่ 25 และ ตารางที่ 26 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ Water content remaining มีค่าสูงในบางกรณีแสดงดังรูปที่ 66 อาจเนื่องมาจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ของช่วงเวลาในขั้นตอนการทิ้งก้อนตัวอย่างให้แห้งในอากาศ ทำให้น้ำระเหยออกได้น้อย



รูปที่ 66 กราฟแสดงค่า Water content ที่เหลืออยู่ในก้อนตัวอย่าง

จากรูปที่ 66 แสดงถึงค่า Water content ที่ยังคงเหลืออยู่ในก้อนตัวอย่าง ก่อนทำการทดสอบ ITS สำหรับส่วนผสมหินปูนชลบุรี (แทนด้วย L1) หินปูนสระบุรี (แทนด้วย L2) และหินบะซอลต์บุรีรัมย์ (แทนด้วย L3) พบว่าในกรณีของหินชลบุรี แอนไอออนิกที่มีการเติมน้ำอย่างพารา L1AN10 และ แคทไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำอย่างพารา L1CAT0 มีปริมาณน้ำคงเหลืออยู่สูงกว่าค่าทั่วไปซึ่งอาจส่งผลให้การทดสอบ ITS มีค่าที่ต่ำลง และในกรณีของหินปูนสระบุรีพบว่าที่แคทไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำอย่างพารามีปริมาณน้ำที่สูงกว่าค่าทั่วไป ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการที่ก้อนตัวอย่างพังทลายในสภาวะเปียกก่อนทำการทดสอบ ITS

#### 4.4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density)

การหาความหนาแน่นของจะหาได้จากสมการที่ 2.7 โดยจะทำการชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างในอากาศ (Oven dry) ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างในน้ำ (Submerge) และ ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Dry Surface หรือ SSD) ซึ่งในการทดสอบนี้จะสามารถทดสอบได้แค่ก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในสภาวะเปียกเท่านั้นเนื่องจากต้องมีการแช่น้ำและทำให้อิ่มตัวในน้ำ เมื่อใช้ก้อนตัวอย่างในสภาวะแห้งมาทดสอบอาจทำให้มีความชื้นเหลืออยู่ในก้อนตัวอย่าง

และอาจส่งผลต่อการทดสอบ ITS จึงจะใช้ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจากสภาวะเปียกในการวิเคราะห์แทน ในส่วนของความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจะแสดงในตารางที่ 27 สำหรับหินปูนชลบุรี ตารางที่ 28 สำหรับหินปูนสระบุรี และตารางที่ 29 สำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์

ตารางที่ 27 ค่า Bulk Density ของก้อนตัวอย่างสำหรับหินปูนชลบุรี

Chonburi Limestone (L1)							
Emulsion	Test Condition	No.	Density				
			W (Oven Dry)	W (Submerge)	W (SSD air)	Bulk Volume	Bulk Density (Gmb)
AN 0% NR	Dry	1	1033.5				
	Dry	2	1023.9				
	Dry	3	1027.6				
	Wet	4	1036.1	542	1038.7	496.7	2.085967385
	Wet	5	1031.2	537.7	1033.8	496.1	2.078613183
	Wet	6	1034.6	540.2	1037.1	496.9	2.082109076
CAT 0% NR	Dry	7	1016.1				
	Dry	8	1037.7				
	Dry	9	1035.3				
	Wet	10	1045.1	556.1	1046.1	490	2.132857143
	Wet	11	1043.4	547.2	1044.3	497.1	2.098974049
	Wet	12	1028.9	545.6	1029.8	484.2	2.124948368
AN 10% NR	Dry	13	1052.8				
	Dry	14	1052.2				
	Dry	15	1053.4				
	Wet	16	1049.5	546.8	1050.5	503.7	2.083581497
	Wet	17	1049.7	546	1051	505	2.078613861
	Wet	18	1058.9	556.6	1059.9	503.3	2.103914167

จากตารางที่ 4-21 พบว่าในก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนชลบุรี ในกรณีแอนไฮไดรต์ที่เติมน้ำอย่างพารามีความหนาแน่นใกล้เคียงกันกับการที่ไม่เติมน้ำอย่างพารา และก้อนตัวอย่างของแอนไฮไดรต์กับแคทไอออนิกมีความหนาแน่นต่างกันโดยที่แคทไอออนิกจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่า

ตารางที่ 28 ค่า Bulk Density ของก้อนตัวอย่างสำหรับหินปูนสระบุรี

Saraburi Limestone (L2)							
Emulsion	Test Condition	No.	Density				
			W (Oven Dry)	W (Submerge)	W (SSD air)	Bulk Volume	Bulk Density (Gmb)
AN 0% NR	Dry	19	1046.7				
	Dry	20	1041.2				
	Dry	21	1046.7				
	Wet	22	1048.9	579	1051.1	472.1	2.221775048
	Wet	23	1048.6	578.7	1051.4	472.7	2.218320288
	Wet	24	1037.3	574.4	1039.8	465.4	2.22883541
CAT 0% NR	Dry	25	1032.8				
	Dry	26	1047.5				
	Dry	27	1037.1				
	Wet	28	1042.1	585.2	1047.5	462.3	2.254163963
	Wet	29	1047.3	581.5	1053.5	472	2.218855932
	Wet	30	1044.7	581.1	1051.4	470.3	2.221348076
AN 10% NR	Dry	31	1056.3				
	Dry	32	1061.9				
	Dry	33	1055.8				
	Wet	34	1065	585.7	1069.1	483.4	2.203144394
	Wet	35	1061.7	585.6	1066	480.4	2.210033306
	Wet	36	1061.4	582.1	1065.9	483.8	2.193881769
CAT 10% NR	Dry	37	1030.2				
	Dry	38	1048.2				
	Dry	39	1048.3				
	Wet	40	1053.6	582.5	1063.5	481	2.19043659
	Wet	41	1048.9	585	1066.8	481.8	2.177044417
	Wet	42	1052.1	584	1063.3	479.3	2.195076153

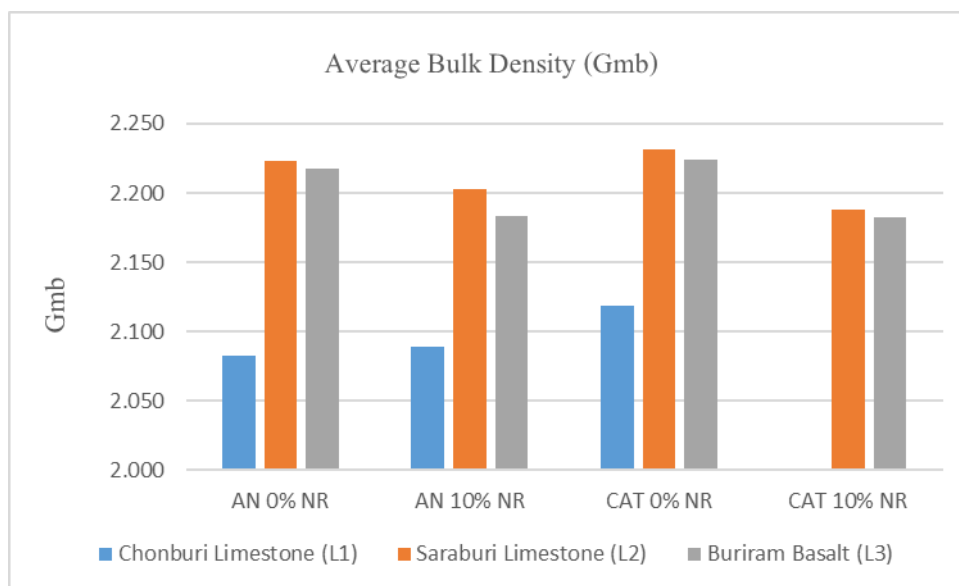
จากตารางที่ 28 พบว่าในก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนสระบุรี ในกรณีแอนไฮไดรต์และแคทไฮไดรต์ที่มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10% มีความหนาแน่นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมน้ำยางพารา แสดงดังรูป 67 กล่าวคือการเติมน้ำยางพาราในหินปูนสระบุรีจะทำให้ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างลดลง

ตารางที่ 29 ค่า Bulk Density ของก้อนตัวอย่างสำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์

Buriram Basalt (L3)							
Emulsion	Test Condition	No.	Density				
			W (Oven Dry)	W (Submerge)	W (SSD air)	Bulk Volume	Bulk Density (Gmb)
AN 0% NR	Dry	43	1046.4				
	Dry	44	1042.8				
	Dry	45	1051.8				
	Wet	46	1044.7	577.3	1047.6	470.3	2.221348076
	Wet	47	1049.3	577.9	1051.9	474	2.21371308
	Wet	48	1057.4	577.6	1054.7	477.1	2.216306854
CAT 0% NR	Dry	49	1036.8				
	Dry	50	1032.9				
	Dry	51	1051.8				
	Wet	52	1027.7	568.7	1030.4	461.7	2.225904267
	Wet	53	1024.3	568.1	1026.8	458.7	2.233049924
	Wet	54	1040	572.7	1042.5	469.8	2.213707961
AN 10% NR	Dry	55	1048.4				
	Dry	56	1044.5				
	Dry	57	1054.3				
	Wet	58	1052.8	574.4	1059.2	484.8	2.171617162
	Wet	59	1051.8	576.3	1056.4	480.1	2.190793585
	Wet	60	1052.5	576.7	1057.8	481.1	2.187694866
CAT 10% NR	Dry	61	1043.7				
	Dry	62	1039.8				
	Dry	63	1041.9				
	Wet	64	1041.4	570.7	1045.7	475	2.192421053
	Wet	65	1041.5	567.8	1047.5	479.7	2.171148635
	Wet	66	1041.8	569	1046.1	477.1	2.183609306

จากตารางที่ 29 พบว่าในก้อนตัวอย่างที่ใช้หินบะซอลต์บุรีรัมย์ ในกรณีแวนไอออนิกและแคทไอออนิกที่ไม่เติมน้ำยางพารามีความหนาแน่นสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่เติมน้ำยางพาราแสดงดังรูปที่ 67 กล่าวคือการเติมน้ำยางพาราในหินบะซอลต์บุรีรัมย์จะทำให้ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างลดลง





รูปที่ 67 กราฟแสดงค่า Bulk Density เฉลี่ยของก้อนตัวอย่างสำหรับหินแต่ละประเภท

จากที่แสดงดังรูปที่ 67 สามารถสรุปได้ว่า Bulk Density ในหินปูนสระบุรี และหินบะซอลต์จากบุรีรัมย์มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และ หินปูนชลบุรีมีความหนาแน่นที่น้อยกว่าก้อนตัวอย่างของหินปูนสระบุรีและหินบะซอลต์จากบุรีรัมย์ และสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำยางพาราในส่วนผสมของหินปูนสระบุรีและหินบะซอลต์บุรีรัมย์จะทำให้ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างลดลง ด้วยปัจจัยด้านความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างนี้อาจส่งผลต่อค่า ITS ในการทดสอบของหินปูนสระบุรี และหินบะซอลต์บุรีรัมย์ให้มีย่าน้อยลงเมื่อทำการเติมน้ำยางพาราที่ 10%

#### 4.4.2.4 ผลการวิเคราะห์ช่องว่างอากาศ (Air Void)

ช่องว่างอากาศในก้อนตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 โดยในการจะคำนวณนั้นจำเป็นต้องทราบค่า Bulk specific gravity (Gmb) และ Maximum specific gravity (Gmm) โดยที่ Maximum specific gravity สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.2 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 30 ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณค่า Air void ในก้อนตัวอย่างดังแสดงใน ตารางที่ 31, ตารางที่ 32 และ ตารางที่ 33 และรูปที่ 68

ตารางที่ 30 ผลการคำนวณค่า Maximum specific gravity (Gmm) ของตัวอย่าง

Maximum specific gravity (Gmm)						
หน่วย (g.)	L1AN0	L1CAT0	L2AN0	L2CAT0	L3AN0	L3CAT0
W ขวด+กระจก	2095.90	2095.90	2095.90	1990.10	2095.90	1990.10
W ขวด+กระจก+น้ำ	6351.80	6351.80	6351.80	6299.10	6351.80	6299.10
W ขวด+กระจก+ตย	3157.90	3146.10	3135.20	3024.90	3137.90	3011.10
W ขวด+กระจก+ตย+น้ำ	6968.70	6964.70	6970.60	6918.70	6974.40	6914.00
(A)	1062.00	1050.20	1039.30	1034.80	1042.00	1021.00
(B)	6351.80	6351.80	6351.80	6299.10	6351.80	6299.10
(C)	6968.70	6964.70	6970.60	6918.70	6974.40	6914.00
Gmm	2.39	2.40	2.47	2.49	2.48	2.51

ตารางที่ 31 ผลการคำนวณค่า %Air Void ในก้อนตัวอย่างจากหินปูนชลบุรี

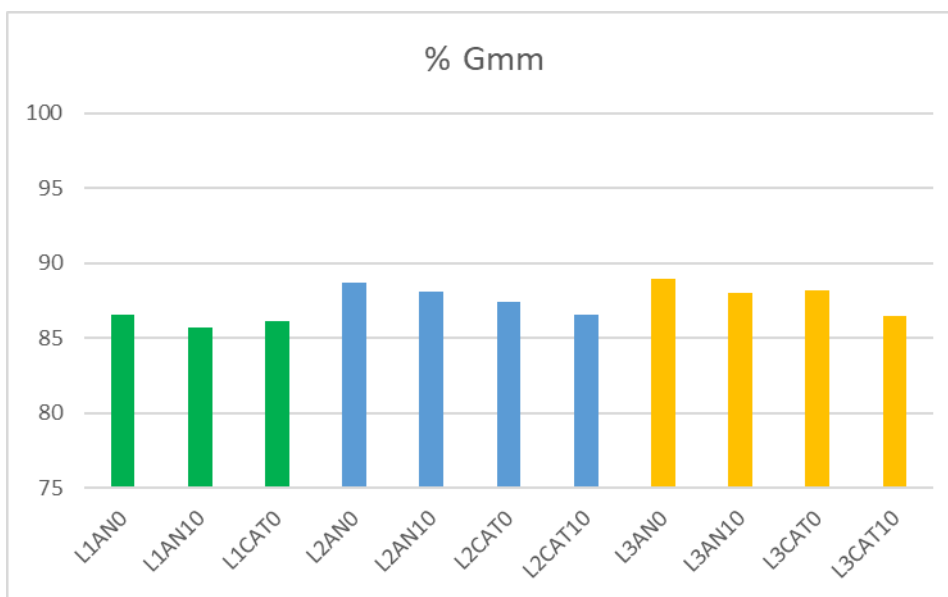
Chonburi Limestone (L1)						
No.	Emulsion type	Test Condition	Gmb (Dry)	Gmm	% Gmm	Air void %
1	AN 0% NR	Dry		2.386		
2						
3						
4		Wet	2.061		86.400	13.600
5			2.071		86.812	13.188
6			2.064		86.514	13.486
7	CAT 0% NR	Dry		2.402		
8						
9						
10		Wet	2.073		86.311	13.689
11			2.057		85.673	14.327
12			2.072		86.284	13.716
13	AN 10% NR	Dry		2.386		
14						
15						
16		Wet	2.047		85.793	14.207
17			2.039		85.458	14.542
18			2.047		85.795	14.205

ตารางที่ 32 ผลการคำนวณค่า %Air Void ในก้อนตัวอย่างจากหินปูนสระบุรี

Saraburi Limestone (L2)						
No.	Emulsion type	Test Condition	Gmb (Dry)	Gmm	% Gmm	Air void %
19	AN 0% NR	Dry		2.472		
20						
21						
22		Wet	2.192		88.691	11.309
23			2.187		88.493	11.507
24			2.194		88.768	11.232
25	CAT 0% NR	Dry		2.492		
26						
27						
28		Wet	2.198		88.192	11.808
29			2.164		86.844	13.156
30			2.171		87.105	12.895
31	AN 10% NR	Dry		2.472		
32						
33						
34		Wet	2.180		88.188	11.812
35			2.185		88.385	11.615
36			2.170		87.786	12.214
37	CAT 10% NR	Dry		2.492		
38						
39						
40		Wet	2.162		86.731	13.269
41			2.149		86.208	13.792
42			2.161		86.725	13.275

ตารางที่ 33 ผลการคำนวณค่า %Air Void ในก้อนตัวอย่างจากหินบะซอลต์บุรีรัมย์

Buriram Basalt (L3)						
No.	Emulsion type	Test Condition	Gmb (Dry)	Gmm	% Gmm	Air void %
43	AN 0% NR	Dry		2.485		
44						
45						
46		Wet	2.214		89.116	10.884
47			2.208		88.861	11.139
48			2.210		88.964	11.036
49	CAT 0% NR	Dry		2.514		
50						
51						
52		Wet	2.218		88.237	11.763
53			2.220		88.288	11.712
54			2.210		87.921	12.079
55	AN 10% NR	Dry		2.485		
56						
57						
58		Wet	2.179		87.704	12.296
59			2.191		88.177	11.823
60			2.189		88.094	11.906
61	CAT 10% NR	Dry		2.514		
62						
63						
64		Wet	2.194		87.252	12.748
65			2.173		86.446	13.554
66			2.154		85.667	14.333



รูปที่ 68 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ Gmm ของแต่ละส่วนผสม

จากรูปที่ 68 พบว่าในทุกกรณี การเติมน้ำยางพาราทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ Gmm ลดลงหรือก็คือมีค่าเปอร์เซ็นต์ Air Void เพิ่มขึ้นในก้อนตัวอย่าง ซึ่งอาจเนื่องมาจากยางพาราไปเพิ่มความหนืดของแอสฟัลต์อิมัลชัน และ มีความยืดหยุ่นมากขึ้นทำให้ในขั้นตอนการบดอัดก้อนตัวอย่างที่เติมน้ำยางพารามีการคืนตัวที่ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมน้ำยางพาราซึ่งทำให้มีเปอร์เซ็นต์ Air Void ที่มากขึ้น

#### 4.4.2.5 วิเคราะห์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ (Coating)

เนื่องจากในการผสมแอสฟัลต์อิมัลชันกับมวลรวมชนิดต่างๆนั้นมีการครอบคลุมของแอสฟัลต์ไม่เท่ากัน จึงต้องนำมาวิเคราะห์ในส่วนนี้ โดยจะแสดงดังรูปที่ 69, รูปที่ 70 และ รูปที่ 71 สำหรับการวิเคราะห์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ในก้อนตัวอย่าง และ ดังรูปที่ 72, รูปที่ 73 และ รูปที่ 74 สำหรับการวิเคราะห์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ในตัวอย่างแบบหลวม Loose sample จากนั้นจะนำมาวิเคราะห์และประเมินการครอบคลุมของแอสฟัลต์เฉลี่ยของแต่ละส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 4-28 โดยจะประเมินในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ในแต่ละส่วนผสม



รูปที่ 69 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ในก้อนตัวอย่างของหินปูนชลบุรี

จากรูปที่ 69 โดยที่รูปด้านซ้ายคือส่วนผสมแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำ  
ยางพารา รูปกลางคือส่วนผสมของแอนไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10%  
และรูปด้านขวาคือแคทไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา



รูปที่ 70 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ในก้อนตัวอย่างของหินปูนสระบุรี

จากรูปที่ 70 รูปด้านซ้ายบนคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา รูปด้านขวาบนคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10% รูปด้านซ้ายล่างคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา รูปด้านขวาล่างคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10%



รูปที่ 71 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ในก้อนตัวอย่างของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University

จากรูปที่ 71 รูปด้านซ้ายบนคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา รูปด้านขวาบนคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10% รูปด้านซ้ายล่างคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา รูปด้านขวาล่างคือส่วนผสมแอสฟัลต์ไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10%





รูปที่ 72 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ของตัวอย่าง Loose sample ของหินปูนชลบุรี

จากรูปที่ 72 รูปด้านซ้ายคือส่วนผสมแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา รูป  
กลางคือส่วนผสมของแอนไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราที่ 10% และรูปด้านขวา  
คือแคทไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา



รูปที่ 73 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ของตัวอย่าง Loose sample ของหินปูนสระบุรี

จากรูปที่ 73 รูปด้านซ้ายบนคือส่วนผสมแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำ  
ยางพารา รูปด้านขวาบนคือรูปส่วนผสมแอนไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพาราที่



10% รูปด้านซ้ายล่างคือส่วนผสมแคทไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยาฟารา รูปด้านขวาล่างคือรูปส่วนผสมแคทไอออนิกที่มีการเติมน้ำยาฟาราที่ 10%



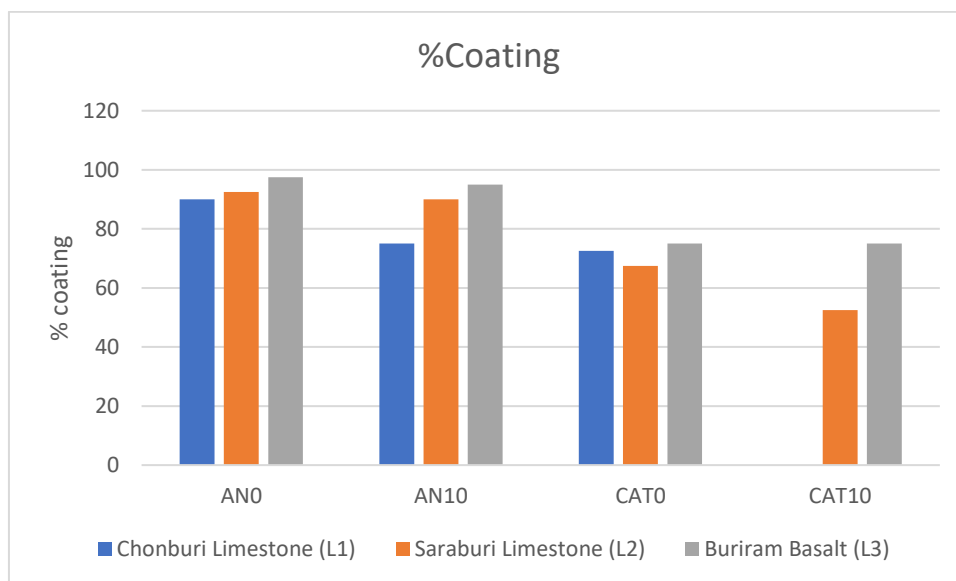
รูปที่ 74 การครอบคลุมของแอสฟัลต์ของตัวอย่าง Loose sample ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

จากรูปที่ 74 รูปด้านซ้ายบนคือส่วนผสมแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยาฟารา รูปด้านขวาบนคือรูปส่วนผสมแอนไอออนิกที่มีการเติมน้ำยาฟาราที่ 10% รูปด้านซ้ายล่างคือส่วนผสมแคทไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยาฟารา รูปด้านขวาล่างคือรูปส่วนผสมแคทไอออนิกที่มีการเติมน้ำยาฟาราที่ 10%

ตารางที่ 34 ผลการประเมินความครอบคลุมของแอสฟัลต์

Type	% Coating		
	ก้อนตัวอย่าง	Loose sample	AVG.
L1AN0	85	95	90
L1AN10	70	80	75
L1CAT0	65	80	72.5
L2AN0	90	95	92.5
L2AN10	85	95	90
L2CAT0	50	85	67.5
L2CAT10	35	70	52.5
L3AN0	95	100	97.5
L3AN10	95	95	95
L3CAT0	65	85	75
L3CAT10	75	75	75

จากตารางที่ 34 สำหรับการ coating ของส่วนผสม Asphalt Institute กำหนดไว้ว่าค่า %coating ของส่วนผสมควรมีค่าให้ใกล้เคียงกับ 100% มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ไม่ควรต่ำกว่า 85% สำหรับงานประเภท Surface course และไม่ควรต่ำกว่า 60% สำหรับงานประเภท Base course โดยสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ในรูปแบบ Surface course จึงไม่ควรมีค่าเกิน 85% โดยกรณีที่มีค่า %Coating ที่สูงกว่าได้แก่ ส่วนผสมของแอสฟัลต์ที่ที่มีการเติมน้ำยางพาราของหินปูนชลบุรี และ แอสฟัลต์ที่มีการเติมน้ำยางพาราและไม่เติมน้ำยางพาราของ หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ โดยจะเห็นได้ว่ามีแค่กรณีของแอสฟัลต์เท่านั้นที่สามารถนำไปใช้งานสำหรับงานประเภท Surface course ได้โดยที่แอสฟัลต์นั้นสามารถนำไปใช้งานในส่วนของ Base course ได้เนื่องจากมีค่า %Coating ที่ไม่ต่ำกว่า 60% ยกเว้นกรณีของหินปูนสระบุรีที่มีการเติมน้ำยางพาราที่มีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้



รูปที่ 75 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ในส่วนผสมต่างๆ

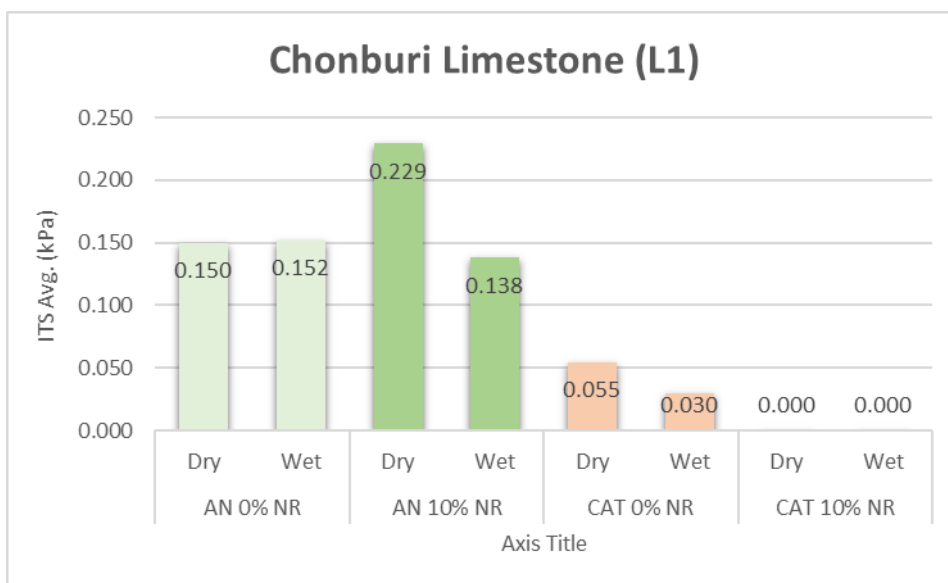
จากตารางที่ 75 พบว่าแอนไอออนิกจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ที่ดีกว่าแคทไอออนิก ทั้งสำหรับหินทั้ง 3 ประเภท และจากการประเมินพบว่าแอนไอออนิกที่ผสมกับหินบุรีรัมย์มีความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมดีที่สุด ลำดับต่อมาคือหินปูนสระบุรี และ สุดท้ายคือหินปูนชลบุรี สำหรับแคทไอออนิกนั้นเมื่อผสมกับหินบุรีรัมย์และหินปูนชลบุรีมีความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมที่ใกล้เคียงกัน และ ดีกว่าหินปูนสระบุรี

#### 4.4.3 ผลการทดสอบ ITS Ratio

สำหรับการทดสอบ ITS Ratio แสดงดังตารางที่ 35 , ตารางที่ 36 และ ตารางที่ 37 โดยในการคำนวณค่า ITS Ratio นั้นจะต้องใช้ขนาดของก้อนตัวอย่าง โดยขนาดก้อนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 21, ตารางที่ 22 และ ตารางที่ 23 และ ค่าแรงกระทำสูงสุดมาคำนวณหาค่า ITS ตามสมการที่ 3.2 และนำค่า ITS ที่ได้ไปทำการคำนวณในสมการที่ 3.3 เพื่อให้ได้ค่า ITS Ratio โดยค่า ITS Ratio ที่สูงหมายถึงการมีคุณสมบัติด้านความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นที่สูง หรือก็คือมีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า ITS Ratio ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 35 ผลการทดสอบ ITS ของหินปูนชลบุรี

Chonburi Limestone (L1)							
No.	Emulsion type	Test Condition	P max (kN)	P max Avg. (kN)	ITS (kPa)	ITS Avg. (kPa)	AVG. ITS Ratio (%)
1	AN 0% NR	Dry	1.640	1.521	0.162	0.150	101.350
2			1.439		0.142		
3			1.484		0.147		
4		Wet	1.556	1.542	0.154	0.152	
5			1.668		0.164		
6			1.400		0.139		
7	CAT 0% NR	Dry	0.603	0.534	0.062	0.055	54.390
8			0.418		0.043		
9			0.580		0.059		
10		Wet	0.307	0.294	0.031	0.030	
11			0.312		0.031		
12			0.262		0.027		
13	AN 10% NR	Dry	2.259	2.310	0.224	0.229	60.186
14			2.075		0.206		
15			2.594		0.257		
16		Wet	1.372	1.398	0.135	0.138	
17			1.322		0.130		
18			1.501		0.149		

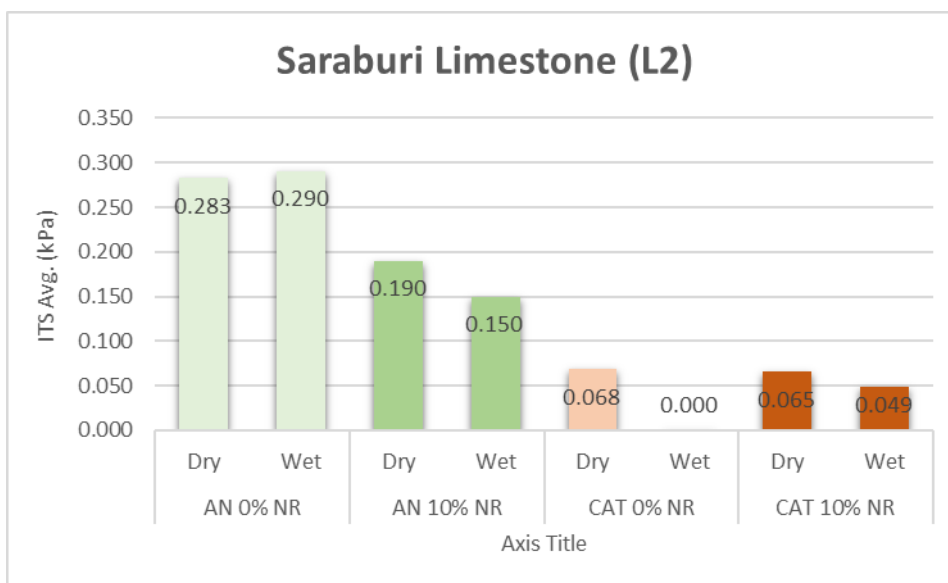


รูปที่ 76 กราฟแสดงค่า ITS เฉลี่ยของแต่ละส่วนผสมสำหรับหินปูนชลบุรี

ผลการทดสอบ ITS ของหินปูนชลบุรีดังที่ได้แสดงในตารางที่ 35 และรูปที่ 76 พบว่า  
 กรณีของแอนไอออนิก มีค่า ITS เฉลี่ยที่สูงกว่าแคทไอออนิกในทุกส่วนผสม และเมื่อเติมน้ำ  
 ยางพาราในแอนไอออนิก (AN 10% NR) นั้นมีค่า ITS เฉลี่ยที่สภาวะแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะมี  
 ค่าลดลงในสภาวะเปียก ในส่วนของค่า ITS Ratio แอนไอออนิก (AN 0% NR) มีค่าสูงกว่า  
 แคทไอออนิก (CAT 0% NR) และเมื่อเติมน้ำยางพาราในแอนไอออนิก (AN 10% NR) จะมี  
 ค่า ITS Ratio น้อยลงเมื่อเทียบกับการที่ไม่ผสมน้ำยางพารา (AN 0% NR) จึงสามารถสรุปได้  
 ว่าการเติมน้ำยางพาราในแอนไอออนิกจะลดคุณสมบัติด้านการต้านทานความเสียหาย  
 เนื่องจากความชื้นลงในหินปูนชลบุรี

ตารางที่ 36 ผลการทดสอบ ITS ของหินปูนสระบุรี

Saraburi Limestone (L2)							
No.	Emulsion type	Test Condition	P max (kN)	P max Avg. (kN)	ITS (kPa)	ITS Avg. (kPa)	AVG. ITS Ratio (%)
19	AN 0% NR	Dry	2.544	2.719	0.266	0.283	102.675
20			2.929		0.304		
21			2.683		0.278		
22		Wet	2.985	2.784	0.310	0.290	
23			2.633		0.274		
24			2.734		0.286		
25	CAT 0% NR	Dry	0.742	0.642	0.079	0.068	-
26			0.736		0.078		
27			0.446		0.048		
28		Wet	-	-	-	-	
29			-		-		
30			-		-		
31	AN 10% NR	Dry	1.668	1.847	0.172	0.190	78.863
32			1.919		0.197		
33			1.953		0.201		
34		Wet	1.423	1.469	0.145	0.150	
35			1.473		0.151		
36			1.512		0.153		
37	CAT 10% NR	Dry	0.664	0.634	0.069	0.065	74.404
38			0.575		0.059		
39			0.664		0.069		
40		Wet	0.435	0.476	0.044	0.049	
41			0.524		0.054		
42			0.469		0.048		



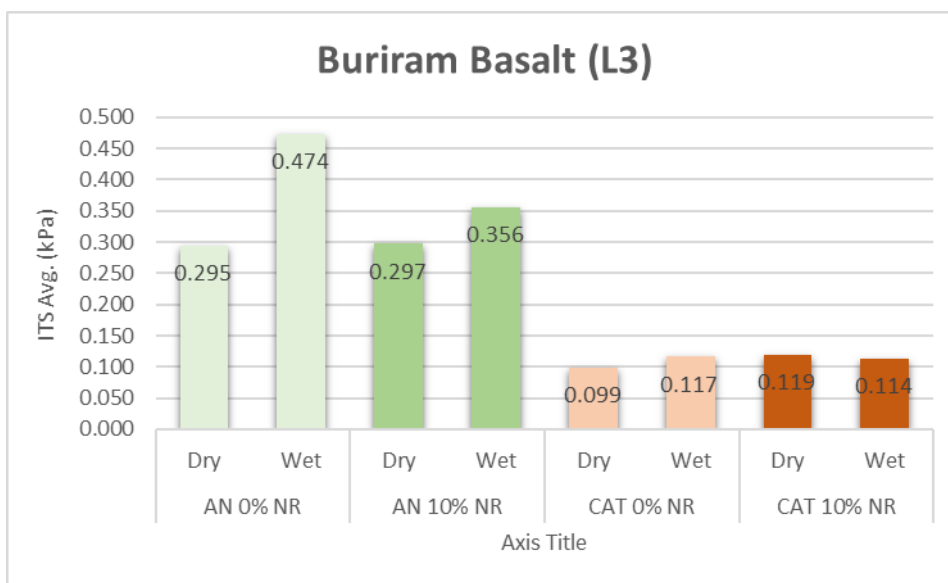
รูปที่ 77 กราฟแสดงค่า ITS เฉลี่ยของแต่ละส่วนผสมสำหรับหินปูนสระบุรี

ผลการทดสอบ ITS ของหินปูนสระบุรีดังที่ได้แสดงในตารางที่ 36 และ รูปที่ 77 พบว่ากรณีของแอนไอออนิก มีค่า ITS เฉลี่ยที่สูงกว่าแคลไอออนิกในทุกส่วนผสม เมื่อเปรียบเทียบค่า ITS ระหว่างแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยาพารา (AN 0% NR) และที่มีการเติมน้ำยาพารา (AN 10% NR) พบว่าการที่ไม่เติมน้ำยาพารา ให้ค่า ITS เฉลี่ยได้สูงกว่าทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะเปียก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแคลไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยาพารา (CAT 0% NR) และที่มีการเติมน้ำยาพารา (CAT 10% NR) พบว่ามีค่า ITS เฉลี่ยใกล้เคียงกันในสภาวะแห้ง แต่สำหรับก้อนตัวอย่างของแคลไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยาพาราในสภาวะเปียกมีการพังทลายระหว่างขั้นตอนการเตรียมก้อนตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถนำมาทดสอบค่า ITS ในสภาวะเปียกได้ และในส่วนของการที่ค่า ITS Ratio การที่ไม่เติมน้ำยาพาราในแอนไอออนิกมีค่า ITS Ratio สูงกว่าการที่เติมน้ำยาพารา จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำยาพาราในแอนไอออนิกจะลดคุณสมบัติด้านการต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นลงในหินปูนสระบุรี

ตารางที่ 37 ผลการทดสอบ ITS ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์

Buriram Basalt (L3)							
No.	Emulsion type	Test Condition	P max (kN)	P max Avg. (kN)	ITS (kPa)	ITS Avg. (kPa)	AVG. ITS Ratio (%)
43	AN 0% NR	Dry	3.074	2.834	0.319	0.295	160.611
44		Dry	2.756		0.287		
45		Dry	2.672		0.278		
46		Wet	4.720	4.543	0.492	0.474	
47		Wet	4.603		0.481		
48		Wet	4.307		0.448		
49	CAT 0% NR	Dry	0.948	0.982	0.101	0.099	117.645
50		Dry	1.038		0.110		
51		Dry	0.960		0.086		
52		Wet	1.021	1.088	0.109	0.117	
53		Wet	1.149		0.124		
54		Wet	1.093		0.116		
55	AN 10% NR	Dry	3.007	2.879	0.310	0.297	119.635
56		Dry	2.895		0.298		
57		Dry	2.734		0.284		
58		Wet	3.258	3.446	0.334	0.356	
59		Wet	3.504		0.363		
60		Wet	3.576		0.370		
61	CAT 10% NR	Dry	1.222	1.140	0.127	0.119	95.370
62		Dry	1.188		0.125		
63		Dry	1.010		0.106		
64		Wet	1.222	1.090	0.128	0.114	
65		Wet	0.904		0.094		
66		Wet	1.144		0.119		





รูปที่ 78 กราฟแสดงค่า ITS เฉลี่ยของแต่ละส่วนผสมสำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์

ผลการทดสอบ ITS ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 37 และรูปที่ 76 พบว่ากรณีของแอนไอออนิก มีค่า ITS เฉลี่ยที่สูงกว่าแคลไออนิกในทุกส่วนผสม ส่วนเมื่อเปรียบเทียบค่า ITS ระหว่างแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา (AN 0% NR) และที่มีการเติมน้ำยางพารา (AN 10% NR) พบว่าการที่ไม่เติมน้ำยางพาราได้ค่า ITS เฉลี่ยใกล้เคียงกับการที่เติมน้ำยางพารา ในสภาวะแห้ง แต่จะมีค่าลดลงในสภาวะเปียก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า ITS ระหว่างแคลไออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา (CAT 0% NR) และที่มีการเติมน้ำยางพารา (CAT 10% NR) พบว่ามีค่า ITS มีค่าเพิ่มขึ้นที่สภาวะแห้ง และ มีค่าใกล้เคียงกันที่สภาวะเปียก และในส่วนของค่า ITS Ratio ในกรณีของแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารามีค่า ITS Ratio สูงกว่าแอนไอออนิกที่มีการเติมน้ำยางพารา และ กรณีแคลไออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา ITS Ratio สูงกว่าแคลไออนิกที่มีการเติมน้ำยางพารา จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำยางพาราทั้งในแอนไอออนิกและแคลไออนิกนั้นจะลดคุณสมบัติด้านการต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นลงสำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์

จากตารางที่ 37 พบว่าค่า ITS ของหินบะซอลต์บุรีรัมย์ในสภาวะเปียกนั้นมีความสูงกว่าค่า ITS ในสภาวะแห้ง ทำให้ค่า ITS Ratio มีค่าที่เกินกว่า 100% โดยจะสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- ความอึดตัวและการประสานกันที่เพิ่มขึ้น (Saturation and increased interlocking): เมื่อมวลรวมของหินบะซอลต์อยู่ในสภาพเปียกชื้น การมีความชื้นสามารถเพิ่มการประสานระหว่างอนุภาคมวลรวมได้ น้ำสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาค ทำให้โครงสร้างแน่นขึ้นและเหนียวแน่นขึ้น การประสานที่ดีขึ้นนี้สามารถนำไปสู่ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมที่สูงขึ้นในสภาพเปียกชื้น Yilmaz, A. (2016).

- การบวมและการแข็งตัว (Swelling and consolidation): ในบางกรณี มวลรวมของหินบะซอลต์อาจมีลักษณะการพองตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ การบวมนี้อาจนำไปสู่การรวมตัวภายในโครงสร้างทาง ส่งผลให้ความแข็งแรงและความมั่นคงเพิ่มขึ้น (R. D. Holtz. 1960)

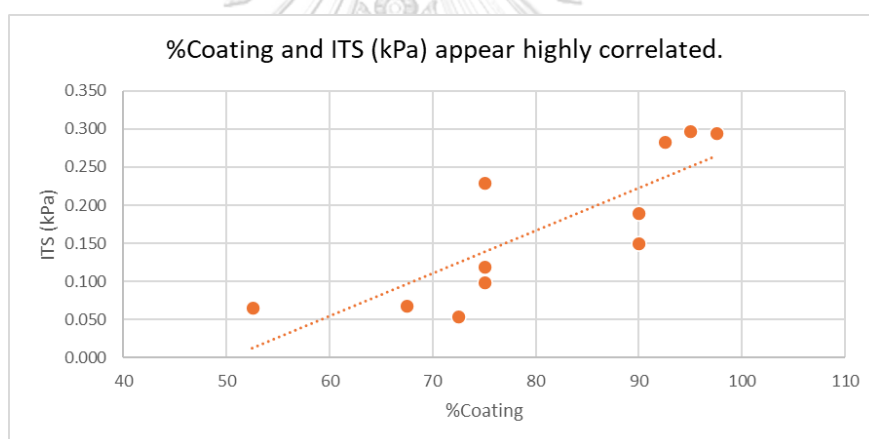
#### 4.5 วิเคราะห์สัมพันธ (Correlation) ของตัวแปรต่างๆของผลการทดสอบ

สำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบในงานวิจัยจะใช้การทดสอบแบบ Pearson correlation coefficient ด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งจะเป็นความวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้ทดสอบ ประกอบไปด้วยค่า %Coating, ITS (Dry Condition), RBT %Bitumen Coverage 6 hr., %ITS Ratio โดยผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้แสดงดังตารางที่ 38 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

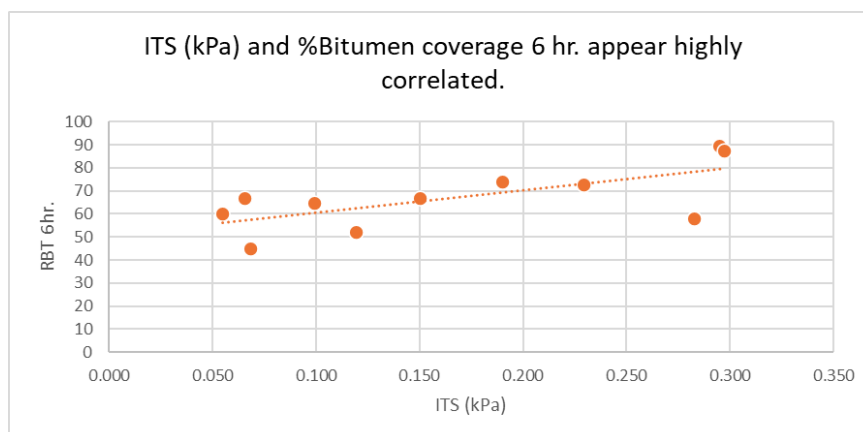
ตารางที่ 38 ตารางวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ทดสอบ

Correlations					
		%Coating	ITS (kPa)	%Bitumen coverage 6 hr.	%ITS Ratio
%Coating	Pearson Correlation	1	.817**	0.552	0.609
	Sig. (2-tailed)		0.002	0.079	0.062
	N	11	11	11	10
ITS (kPa)	Pearson Correlation	.817**	1	.684*	0.549
	Sig. (2-tailed)	0.002		0.020	0.100
	N	11	11	11	10
%Bitumen coverage 6 hr.	Pearson Correlation	0.552	.684*	1	0.517
	Sig. (2-tailed)	0.079	0.020		0.126
	N	11	11	11	10
%ITS Ratio	Pearson Correlation	0.609	0.549	0.517	1
	Sig. (2-tailed)	0.062	0.100	0.126	
	N	10	10	10	10
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).					
*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).					

จากตารางที่ 38 พบว่าค่า เปอร์เซ็นต์ Coating กับ ITS มีค่า p-value เท่ากับ 0.002 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึง Significant กล่าวคือตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรง โดยที่ค่า r เท่ากับ 0.817 จึงสรุปได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ Coating กับ ITS มีความสัมพันธ์ในรูปแบบ High positive correlation หมายความว่า เปอร์เซ็นต์ Coating ของแอสฟัลต์กับมวลรวมที่สูงจะทำให้มีค่า ITS ที่สูงเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 79 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ Bitumen coverage กับ ITS มีค่า p-value เท่ากับ 0.02 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึง Significant กล่าวคือตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรง โดยที่ค่า r เท่ากับ 0.684 จึงสรุปได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ Bitumen coverage กับ ITS มีความสัมพันธ์ในรูปแบบ High positive correlation หมายความว่า เปอร์เซ็นต์ Bitumen coverage ของแอสฟัลต์กับมวลรวมที่สูงจะทำให้มีค่า ITS ที่สูงเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 80



รูปที่ 79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Coating กับ ITS



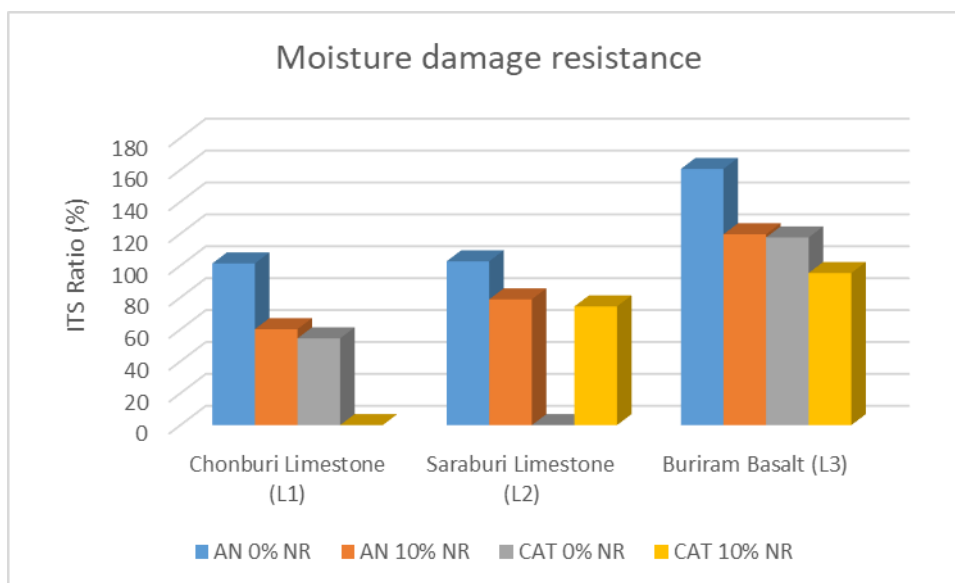
รูปที่ 80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % Bitumen coverage กับ ITS

#### 4.6 วิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อความเสียหายเนื่องจากความชื้น

จากการทดสอบ ITS จะใช้ค่า % ITS Ratio ในการประเมินค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นโดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 39 และรูปที่ 81

ตารางที่ 39 ผลการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ ITS Ratio

% ITS Ratio			
Emulsion types	Chonburi Limestone (L1)	Saraburi Limestone (L2)	Buriram Basalt (L3)
AN 0% NR	101.350	102.675	160.611
AN 10% NR	60.186	78.863	119.635
CAT 0% NR	54.390	-	117.645
CAT 10% NR	-	74.404	95.370



รูปที่ 81 กราฟเปรียบเทียบความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นของแต่ละส่วนผสม

จากรูปที่ 81 พบว่าในกรณี หินปูนชลบุรี หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ เมื่อนำไปใช้งานกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารา มีค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้สูงที่สุด และเมื่อเติมน้ำยางพาราจะทำให้ค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นมีค่าที่ลดลง แต่สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นเมื่อดูเฉพาะในหินบะซอลต์บุรีรัมย์พบว่ามีค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีต และเมื่อมีการเติมน้ำยางพาราจะทำให้ค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นมีค่าที่ลดลง แต่สำหรับในกรณีของแอสฟัลต์คอนกรีต หินปูนชลบุรีที่มีการเติมน้ำยางพาราในแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นไม่สามารถผสมให้เข้ากันได้ และหินปูนสระบุรีมีก้อนตัวอย่างที่พังทลายของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าการเติมน้ำยางพาราในแอสฟัลต์คอนกรีตจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้หรือไม่ในหินปูนชลบุรี และ หินปูนสระบุรี เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixture โดยมีการกำหนดว่าค่าเปอร์เซ็นต์ Indirect tensile stress ratio หรือ %ITS ratio ไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 80% โดยจากผลการทดสอบพบว่า ในหินบะซอลต์บุรีรัมย์กรณีแอสฟัลต์คอนกรีตและแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าที่สูงกว่า 80% ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D4867 และเมื่อมีการเติมน้ำยางพาราแอสฟัลต์คอนกรีตและแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีค่าลดลงแต่ยังผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM

D4867 กำหนดไว้ และสำหรับกรณีของหินปูนชลบุรีและหินปูนสระบุรีนั้นมิเพียงการผสมที่ใช้แอนไฮไดรต์ที่ไม่เติมน้ำยงพาราเทนนีที่ผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D4867 กำหนดไว้



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก มาใช้งานกับหินชนิดต่างๆ ประกอบด้วย หินปูนชลบุรี หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ รวมถึงการนำน้ำยางพารามาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันประเภทแอนไอออนิกและแคทไอออนิก โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบหลักคือ การทดสอบ Rolling bottle test (RBT) และการทดสอบ Indirect tensile strength test (ITS) สำหรับการทดสอบ RBT จะทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความต้านทานการหลุดลอกระหว่างหินและแอสฟัลต์ โดยจะประเมินจากค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของหินในแต่ละอนุภาค หลังจากทำการทดสอบแล้วที่เวลา 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมของแอสฟัลต์บนผิวของหินมีค่าสูงหมายความว่ามีความยึดเกาะหรือค่าความต้านทานการหลุดลอกระหว่างหินกับแอสฟัลต์ที่สูงด้วย และในการทดสอบ ITS จะเป็นการทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้น โดยจะประเมินจากค่าเปอร์เซ็นต์ ITS Ratio ระหว่างก้อนตัวอย่างที่สภาวะเปียกและ สภาวะแห้ง สำหรับการทดสอบ ITS จะเตรียมก้อนตัวอย่างด้วยวิธี Marshall ในการวิเคราะห์ความเสียหายเนื่องจากความชื้น จะพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ ITS Ratio โดยส่วนผสมใดมีค่าเปอร์เซ็นต์ ITS Ratio สูงกว่า แสดงว่าส่วนผสมนั้นมีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้ต่ำกว่า ในทำนองเดียวกันถ้าส่วนผสมใดมีค่าเปอร์เซ็นต์ ITS Ratio ที่ต่ำ แสดงว่าส่วนผสมนั้นมีโอกาสเกิดความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้สูงกว่า

สำหรับหินที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยหินปูนชลบุรี หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ โดยหินแต่ละประเภทยานั้นจะมีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป โดยจะใช้การทดสอบ X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบของหินแต่ละชนิด โดยส่วนใหญ่ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  จะสามารถบ่งบอกถึงความเป็นกรดและด่างของหิน และจะใช้การวัดค่า pH ของหินในน้ำที่มีความเป็นกรดและด่างที่แตกต่างกันเพื่อให้ทราบถึงประจุไฟฟ้าบนผิวของหินด้วยกราฟ Point of zero charge (PZC) โดยที่เมื่อวัดค่า pH ได้น้อยกว่าค่า pH(PZC) แสดงว่าประจุบนผิวของหินชนิดนั้นเป็นบวก ในทางกลับกันเมื่อวัดค่า pH ได้มากกว่าค่า pH(PZC) แสดงว่าประจุบนผิวของหินชนิดนั้นเป็นลบ โดยประจุบนผิวของหินนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปในสารละลายที่มีความเป็นกรดและด่าง

ที่แตกต่างกัน สำหรับการทดสอบ XRD และ pH(PZC) นั้นจะนำมาเป็นส่วนช่วยในการประเมินคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่างๆของงานวิจัยนี้

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

### 5.1.1 สรุปผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับหินทั้งสามชนิดประกอบด้วย หินปูนชลบุรี หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานได้ทั้งกับแอสฟัลต์และแคทไอออนิก แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบในด้านต่างๆ เช่น ความครอบคลุมของแอสฟัลต์ระหว่างผสม, ค่ากำลังรับแรงสูงสุด หรือ ค่า Indirect tensile strength และ ค่าความต้านทานต่อความชื้น แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอสฟัลต์ไอออนิกมีความเหมาะสมที่มากกว่าแคทไอออนิกสำหรับการนำมาใช้กับหินทั้ง 3 ชนิดนี้ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหินทั้งสามชนิด หินบะซอลต์บุรีรัมย์ จะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานกับแอสฟัลต์อิมัลชันมากที่สุด โดยลำดับต่อมาคือ หินปูนสระบุรี และลำดับสุดท้ายคือหินปูนชลบุรี จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าแอสฟัลต์ไอออนิกนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานกับหินในแต่ละชนิดได้ดีกว่าแคทไอออนิก เมื่อนำไปใช้งานสำหรับงานทางจริงจะทำให้มีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าเนื่องจากสามารถหาแหล่งหินที่เหมาะสมได้ง่ายกว่าในแต่ละแหล่งเมื่อเทียบกับแคทไอออนิก และ เมื่อประเมินจากการ Coating ของส่วนผสมพบว่าแอสฟัลต์ไอออนิกนั้นมีค่า %Coating ที่สูงกว่าแคทไอออนิกและเมื่อนำไปเปรียบเทียบข้อกำหนดสำหรับการนำไปใช้งานของ Asphalt Institute พบว่าแอสฟัลต์ไอออนิกนั้นเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานกับงานประเภท Surface Course มากกว่า ส่วนแคทไอออนิกนั้นมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานประเภท Base Course แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้สำหรับงาน Surface course ได้เนื่องจากมีค่า %Coating น้อยกว่าที่ได้กำหนดไว้

2. สำหรับการทดสอบ RBT ที่ 6 ชั่วโมงสามารถสรุปได้ว่า แอสฟัลต์ไอออนิกมีค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้ดีกว่าแคทไอออนิก ของการนำไปใช้งานกับหินทั้งสามชนิด โดยจะมีค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ที่ดีที่สุดในหินบะซอลต์บุรีรัมย์ และเมื่อนำน้ำยางพารามาผสมทำให้มีค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ที่ดีขึ้นของหินปูนชลบุรี และ หินปูนสระบุรี แต่ไม่สามารถนำน้ำยางพารามาผสมกับแคทไอออนิกเพื่อนำมาใช้กับหินปูนชลบุรีได้ และสำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์การเติมน้ำยางพาราทำให้ค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์มีค่าที่ลดลง และสำหรับการทดสอบ RBT ที่ 24 ชั่วโมงสามารถสรุปได้ว่า แคทไอออนิกมีค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ที่สูงกว่าแอสฟัลต์



ออนิก และเมื่อเติมน้ำยางพาราพบว่าสามารถเพิ่มค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับ แอสฟัลต์ได้ แต่จะมีค่าลดลงเมื่อนำไปใช้งานกับหินบะซอลต์บุรีรัมย์ และเมื่อนำค่าความต้านทานการหลุดลอกของหินทั้งสามชนิดระหว่างการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน กับการใช้ Hot mix asphalt หรือ HMA พบว่า ในแอสฟัลต์อิมัลชันทุกส่วนผสมมีค่าความต้านทานการหลุดลอกที่น้อยกว่าในส่วนผสมที่ใช้ HMA แต่ว่าสำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์นั้นเมื่อนำมาผสมกับ แอนไอออนิกแอสฟัลต์จะมีค่าความต้านทานการหลุดลอกที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่ใช้ HMA อยู่เล็กน้อย สำหรับการทดสอบที่ 6 ชั่วโมง นั้นแสดงว่าสำหรับหินบะซอลต์ที่ผสมกับแอนไอออนิกเมื่อนำไปใช้งานจริงจะมีประสิทธิภาพในด้านการยึดเกาะได้ใกล้เคียงกับ HMA ในช่วงแรกของการใช้งานแต่เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในด้านการยึดเกาะลดลง เมื่อเทียบกับ HMA

3. หินปูนชลบุรี หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ เมื่อนำไปใช้งานกับแอนไอออนิกที่ไม่มีการเติมน้ำยางพารามีค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้สูงที่สุด และเมื่อเติมน้ำยางพาราจะทำให้ค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นมีค่าที่ลดลง แต่สำหรับแคทไอออนิกนั้นเมื่อดูเฉพาะในหินบะซอลต์บุรีรัมย์พบว่ามีค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นน้อยกว่าแอนไอออนิก และเมื่อมีการเติมน้ำยางพาราจะทำให้ค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นมีค่าที่ลดลง แต่สำหรับในกรณีของแคทไอออนิก หินปูนชลบุรีที่มีการเติมน้ำยางพาราในแคทไอออนิกนั้นไม่สามารถผสมให้เข้ากันได้ และหินปูนสระบุรีมีก้อนตัวอย่างที่พังทลายของส่วนผสมแคทไอออนิกจึงทำให้ไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าการเติมน้ำยางพาราในแคทไอออนิกจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้หรือไม่ในหินปูนชลบุรี และ หินปูนบุรีรัมย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำยางพาราที่ 10 % ในแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกจะทำให้ค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นลดลง กล่าวคือจะมีโอกาสที่จะเสียหายเนื่องจากความชื้นมากกว่าการที่ไม่ได้เติมน้ำยางพารา เมื่อนำเปรียบเทียบกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM โดยมีการกำหนดว่าค่าเปอร์เซ็นต์ Indirect tensile stress ratio หรือ %ITS ratio ไม่ควรมีค่าเกินกว่า 80% โดยจากผลการทดสอบพบว่า ในหินบะซอลต์บุรีรัมย์กรณีแอนไอออนิกและแคทไอออนิกมีค่าที่สูงกว่า 80% ซึ่งผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D4867 และเมื่อมีการเติมน้ำยางพาราแอนไอออนิกและแคทไอออนิกจะมีค่าลดลงแต่ยังผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D4867 กำหนดไว้

และสำหรับกรณีของหินปูนชลบุรีและหินปูนสระบุรีนั้นมีเพียงการผสมที่ใช้แอนไอออนิกที่ไม่เติมน้ำยาฟาราเท่านั้นที่ผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D4867 กำหนดไว้

### 5.1.2 สรุปผลการทดสอบ

1. ในการทดสอบความต้านทานต่อการหลุดลอกหรือค่าการยอเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ การเติมน้ำยาฟาราที่ 10% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสานสามารถเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนทั้ง 2 ชนิด คือ หินปูนชลบุรี และ หินปูนสระบุรี ไม่ว่าจะเป็นแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกหรือแคทไอออนิกก็ตาม แต่เมื่อมีการเติมน้ำยาฟาราที่ 20% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินปูนนั้นลดลง สำหรับหินบะซอลต์บุรีรัมย์ พบว่าการเติมน้ำยาฟาราที่ 10% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวของหินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์นั้นมีค่าลดลง ไม่ว่าจะเป็นแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกหรือแคทไอออนิกก็ตาม และเมื่อมีการเติมน้ำยาฟาราที่ 20% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความครอบคลุมแอสฟัลต์บนผิวหินบะซอลต์จากจังหวัดบุรีรัมย์นั้นลดลงมากขึ้น ของทั้งแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำยาฟาราที่ 10% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้ในหินปูนชลบุรี และ หินปูนสระบุรี แต่จะลดลงประสิทธิภาพลงเมื่อนำไปใช้กับหินบะซอลต์บุรีรัมย์

2. สำหรับการเติมน้ำยาฟาราในแคทไอออนิกนั้นเมื่อนำไปใช้งานกับหินปูนชลบุรีพบว่าแอสฟัลต์ไม่สามารถเคลือบผิวของหินได้

3. แอสฟัลต์อิมัลชันต่างชนิดกันมีผลต่อความต้านทานการหลุดลอกของมวลรวมแต่ละชนิดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4. จากผลการทดสอบ XRD สามารถเรียงลำดับปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่น้อยที่สุดไปหามากที่สุดจากหินทั้ง 3 ชนิดได้ดังนี้ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ หินปูนสระบุรี และ หินปูนชลบุรี จากที่ (Majidzadeh, K., & Brovold, F. N. 1968) ได้กล่าวไว้ว่าปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่ต่ำจะทำให้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ซึ่งมีความสอดคล้องกับ กราฟ Point of zero charge ที่แสดงดังรูปที่ 4-1 โดยจะสามารถสรุปได้ว่า หินบะซอลต์บุรีรัมย์จะมีประจุบวกที่มากที่สุด ลำดับต่อมาคือ หินปูนสระบุรี และ ลำดับสุดท้ายคือหินปูนชลบุรี ส่งผลให้ในการทดสอบ RBT และ ITS แอนไอออนิกจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อนำไปใช้งานกับหินบะซอลต์บุรีรัมย์ เนื่องจากแอนไอออนิกมีประจุเป็นลบและหินบะซอลต์บุรีรัมย์นั้นจะมีความเป็นประจุบวกมากที่สุดเมื่อ

เปรียบเทียบกับหินชนิดอื่นๆ ทำให้จับตัวกับแอนไอออนิกที่เป็นประจุลบได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับหินปูนชลบุรี และ หินปูนสระบุรี

5. จากผลการทดสอบ ITS ของหินทั้งสามชนิดพบว่า แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกมีค่า ITS ที่สูงกว่า แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแคทไอออนิก จึงสรุปได้ว่าแอนไอออนิกนั้นมีความสามารถในการรับ Tensile strength ได้สูงกว่าแคทไอออนิกจึงทำให้แอนไอออนิกมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานที่ต้องรับแรงกระทำที่สูงได้ดีกว่าสำหรับการนำไปใช้งานกับหินที่มีคุณสมบัติและองค์ประกอบใกล้เคียงกับหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้

6. จากผลการทดสอบ ITS Ratio สามารถสรุปได้ว่าสำหรับหินทั้งสามชนิดที่ใช้ในงานวิจัย เมื่อนำไปใช้งานกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแอนไอออนิกมีค่าความต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นได้สูงกว่าแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดแคทไอออนิก

7. การเติมยางพาราที่ 10% ของน้ำหนักวัสดุประสาน ในส่วนผสมนั้นจะทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ Air Void ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำยางพาราทำให้แอสฟัลต์อิมัลชันมีความหนืดที่มากขึ้นและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่งผลให้การบดอัดนั้นมีความยากขึ้น

8. ในการผสมมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับหินปูนชลบุรี หินปูนสระบุรี และ หินบะซอลต์บุรีรัมย์ จำเป็นต้องใช้น้ำเพื่อให้แอสฟัลต์สามารถครอบคลุมบนผิวของมวลรวมได้ดีขึ้น โดยในการผสมน้ำกับแอสฟัลต์อิมัลชันก่อนนั้นจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการที่ผสมน้ำกับมวลรวมก่อนทำการผสม

## 5.2 ข้อจำกัดในงานวิจัย

1. แอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันไม่ค่อยเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในประเทศไทย จึงทำให้มีผู้ผลิตน้อยรายและจัดหาเพื่อนำมาใช้งานได้ยากกว่าแคทไอออนิก

2. เนื่องจากมวลแต่ละแหล่งมีขนาดคละที่แตกต่างกันทำให้มีความลำบากในการควบคุมขนาดคละของมวลรวมให้มีความใกล้เคียงกัน

3. ในการผสมแอสฟัลต์อิมัลชันไม่สามารถทราบได้แน่ชัดว่าจะต้องเติมน้ำปริมาณเท่าไรจึงจะเหมาะสมกับมวลรวมแต่ละประเภทจึงทำให้ปริมาณน้ำอาจไม่เหมาะสมสำหรับการผสมตัวอย่าง

4. แอสฟัลต์อิมัลชันจะมีการจับตัวและแยกชั้นกันในถังเก็บหรือถังบรรจุ ก่อนที่จะนำมาใช้งานจำเป็นต้องมีการคนให้เข้ากันก่อนนำมาใช้ และเมื่อเก็บไว้ในถังบรรจุที่มีขนาดใหญ่ทำให้การคนให้เข้ากันมีความลำบากมากขึ้น

5. ในการבודัดก่อนตัวอย่างสำหรับแอสฟัลต์อิมัลชันนั้น ในระหว่างבודัดจะที่ทำให้มีน้ำกระจายออกมา จึงต้องมีการปล่อยไว้ให้แห้งก่อนทำการבודัด และเนื่องด้วยปริมาณน้ำที่ไม่เท่ากันทำให้เวลาสำหรับทิ้งไว้ให้แห้งเพียงพอที่จะבודัดไม่เท่ากัน

6. เนื่องจากการทดสอบ RBT จะเป็นการทดสอบที่กินเวลานานทำให้เวลาสำหรับการทดสอบไม่ตรงกับเวลาของการทำงาน ทำให้จำเป็นต้องปรับเวลาในการทำงานให้มีความเหมาะสมกับการทดสอบ

7. เนื่องจากเครื่อง RBT จะทำการทดสอบตลอด 24 ชั่วโมง ทำให้อาจเกิดอุปสรรคได้ง่ายเช่น ไฟฟ้าดับ หรือ เครื่องมือชำรุดเสียหาย ทำให้เครื่องกลิ้งขุดหยุดทำงานก่อนจะถึงเวลาหยุดเครื่อง ทำให้จำเป็นต้องเริ่มทดสอบใหม่ตั้งแต่ต้น

8. ในการทดสอบ ANOVA อาจยังไม่มีเหมาะสมสำหรับการทดสอบนี้เนื่องจากมีจำนวนตัวอย่างในการศึกษานี้น้อยจึงไม่เหมาะที่จะใช้ Central limit theorem ควรเลือกใช้ non-parametric test เช่น Kruskal-Wallis Test แทน

9. เนื่องจากการทดสอบ ITS เป็นช่วงเวลาทดสอบในฤดูฝนทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีความเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันไม่เท่ากันทำให้เมื่อทิ้งก้อนตัวอย่างให้แห้งในอากาศน้ำในก้อนตัวอย่างจะระเหยออกไม่เท่ากันโดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงทำให้น้ำระเหยออกจากก้อนตัวอย่างได้ยากขึ้น

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้งานกับแอสฟัลต์อิมัลชันควรใช้งานในปริมาณที่เหมาะสมเนื่องจากหากใช้งานในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้ลดประสิทธิภาพของแอสฟัลต์ลงได้ และสำหรับมวลรวมที่ใช้งานกับแอสฟัลต์อิมัลชันนั้นควรเป็นมวลรวมที่มีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่จะใช้งาน เนื่องจากมวลรวมที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละแหล่งอาจส่งผลต่อความเข้ากันได้ระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันและอาจจะส่งผลต่อคุณสมบัติของถนน ทำให้ถนนเกิดความเสียหายก่อนเวลาที่ควรได้ สำหรับการออกแบบผิวทางในพื้นที่ที่มีความชื้นสูง ความต้านทานต่อการหลุดลอก และ ความต้านทานความเสียหายจากความชื้น เป็นค่าที่ควรคำนึงหรือให้ความสำคัญด้วย ทั้งนี้แนวทางในการวิจัยสำหรับการนำยางพาราเป็นส่วนผสมนั้นยังมีประเด็นที่สามารถนำไปศึกษาเพิ่มเติมในหลายๆประเด็น เช่น การนำส่วนผสมยางพารากับแอสฟัลต์อิมัลชันไปใช้งานกับถนนจริง และทำการประเมินเปรียบเทียบคุณสมบัติหลังจากมีการใช้งานจริงในสนาม หรือควรมีการศึกษา

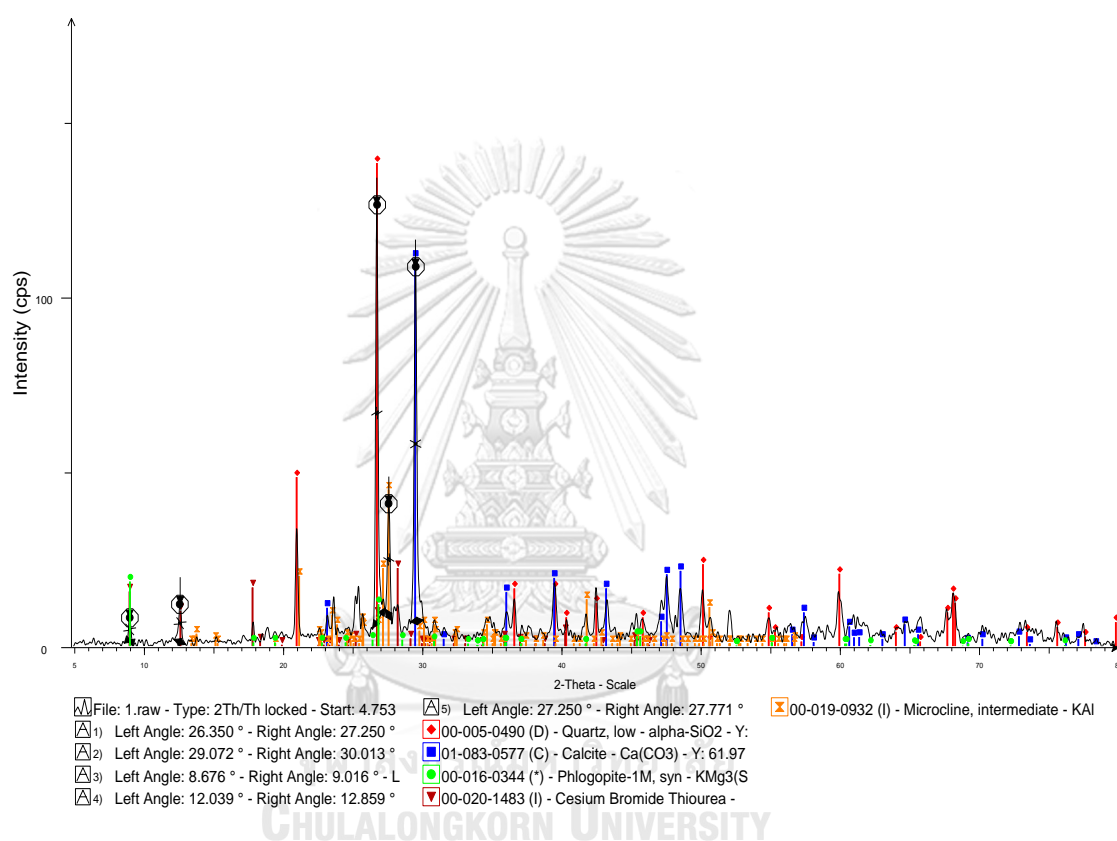
เพิ่มเติมทางด้านเศรษฐศาสตร์ถึงความเหมาะสมในการนำน้ำยางพารามาใช้งานกับแอสฟัลต์สำหรับการนำมาใช้ในงานทาง สำหรับการนำไปใช้งานจริงนั้นแคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันสามารถนำไปใช้งานกับหินแต่ละชนิดได้อย่างจำกัด ซึ่งแอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันนั้นสามารถนำไปใช้งานกับหินได้หลายชนิดมากกว่าแคทไอออนิก จึงควรมีการนำแอนไอออนิกมาทดสอบและศึกษามากขึ้นสำหรับการนำมาใช้งานในประเทศไทย เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในประเทศไทย

#### 5.4 แนวทางการปรับปรุงในอนาคต

สำหรับแนวทางการปรับปรุงงานวิจัยในอนาคต อาจมีการศึกษาในส่วนของค่า Setting time ของแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยที่เวลาในการเซตตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันก็เป็นส่วนสำคัญสำหรับการนำไปใช้งานจริงของถนน หรือ ศึกษาเพิ่มเติมของส่วนผสมของแอสฟัลต์ที่เหมาะสมของหินแต่ละประเภทสำหรับการนำมาใช้งานกับแอสฟัลต์อิมัลชัน และสำหรับก้อนตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบความเสียหายเนื่องจากความชื้นในสภาวะเปียกควรมีการวัดค่าของ %Air void ในก้อนตัวอย่างหลังจากนำไปแช่น้ำจนอิ่มตัวแล้วเนื่องจาก น้ำจะมีการเข้าไปแทนที่อากาศอาจทำให้ก้อนตัวอย่างมีความหนาแน่นมากขึ้นจึงควรมีการศึกษาในส่วนนี้เพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยในอนาคต

## ภาคผนวก

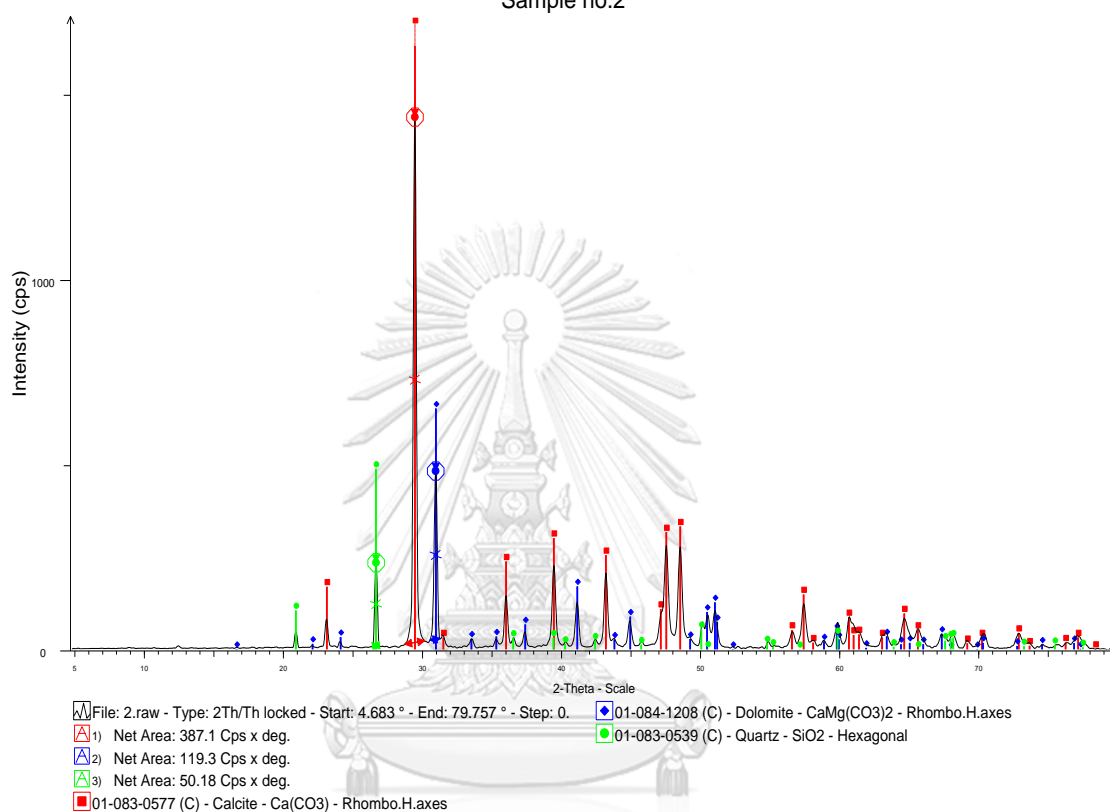
(ผลการทดสอบ XRD Chonburi limestone)



Left Angle	Right Angle	Net Height	Raw Area	Net Area	% minerals	
2-Theta °	2-Theta °	Cps	Cps x 2-Theta °	Cps x 2-Theta °		
28.686	30.108	1424	414.5	387.10	69.55	Calcite CaCO <sub>3</sub>
30.488	31.229	456	139.9	119.30	21.43	Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
26.364	26.844	225	55.26	50.18	9.02	Quartz SiO <sub>2</sub>

(ผลการทดสอบ XRD Saraburi limestone)

Sample no.2

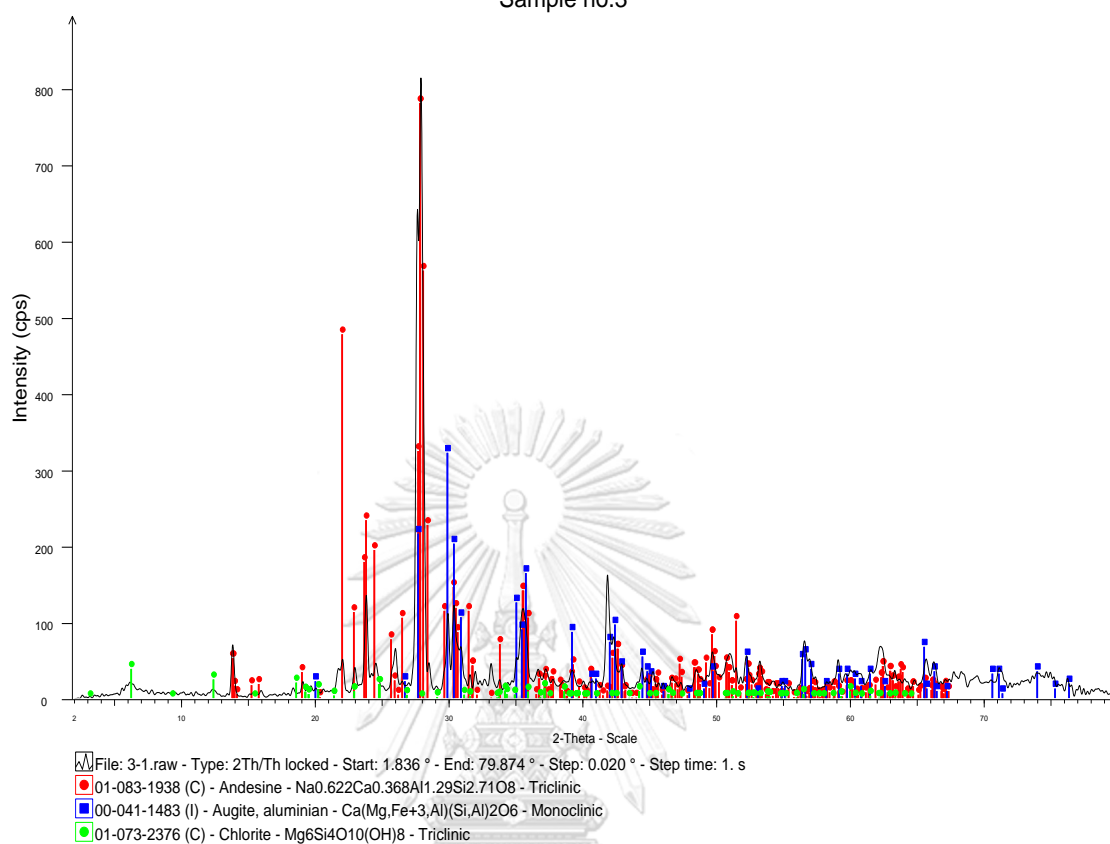


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Left Angle	Right Angle	Net Height	Raw Area	Net Area	% minerals	
2-Theta °	2-Theta °	Cps	Cps x 2-Theta °	Cps x 2-Theta °		
28.686	30.108	1424	414.5	387.10	69.55	Calcite
30.488	31.229	456	139.9	119.30	21.43	Dolomite
26.364	26.844	225	55.26	50.18	9.02	Quartz

(ผลการทดสอบ XRD Basalt Buriram)

Sample no.3



Left Angle	Right Angle	Net Height	Raw Area	Net Area	% minerals	
2-Theta °	2-Theta °	Cps	Cps x 2-Theta	Cps x 2-Theta °		
27.268	28.389	769	446.7	400.8	84.76	Andesine $(\text{Na}_{0.622}\text{Ca}_{0.368})(\text{Al}_{1.29}\text{Si}_{2.71}\text{O}_8)$
34.832	36.032	90.8	88.05	56.52	11.95	Augite, aluminian $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}_{+3}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$
5.317	7.478	14.4	28.16	15.55	3.29	Chlorite $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$



## (ขนาดก้อนตัวอย่าง สำหรับการทดสอบ ITS)

No.	Agg.	Emulsion	Test Condition	High (mm.)				Diameter (mm.)			
				1	2	3	t avg.	1	2	3	D avg.
1	L1	AN 0% NR	Dry	64.15	63.55	64.2	63.9667	101.05	100.6	101.4	101.017
2	L1	AN 0% NR	Dry	63.9	63.35	64.1	63.7833	101.6	101.35	101.15	101.367
3	L1	AN 0% NR	Dry	63.55	63.65	63	63.4	101.25	101.5	101.1	101.283
4	L1	AN 0% NR	Wet	62.8	64.3	63.6	63.5667	101.25	101.1	101.3	101.217
5	L1	AN 0% NR	Wet	63.95	64	64.5	64.15	101	101	101.15	101.05
6	L1	AN 0% NR	Wet	63.9	63.2	63.5	63.5333	101.2	101.45	100.85	101.167
7	L1	CAT 0% NR	Dry	61.2	61.2	60.75	61.05	101.5	101.55	101.4	101.483
8	L1	CAT 0% NR	Dry	61.4	61.6	61.4	61.4667	101.4	101.25	101.55	101.4
9	L1	CAT 0% NR	Dry	61.3	61.3	61.55	61.3833	101.25	101.4	101.45	101.367
10	L1	CAT 0% NR	Wet	62.1	62	61.65	61.9167	101.6	101.35	101.6	101.517
11	L1	CAT 0% NR	Wet	62.3	62.95	62.7	62.65	101.65	101.5	101.35	101.5
12	L1	CAT 0% NR	Wet	61.25	61.1	61.45	61.2667	101.3	101.5	101.6	101.467
13	L1	AN 10% NR	Dry	63.1	62.75	63	62.95	101.75	101.75	101.8	101.767
14	L1	AN 10% NR	Dry	63.4	63.1	63	63.1667	101.65	101.65	101.55	101.617
15	L1	AN 10% NR	Dry	63.25	63	63.2	63.15	101.35	101.5	101.75	101.533
16	L1	AN 10% NR	Wet	63.7	64.4	64	64.0333	101.1	101.4	101.5	101.333
17	L1	AN 10% NR	Wet	63.8	64.1	63.9	63.9333	100.9	101.1	101.3	101.1
18	L1	AN 10% NR	Wet	63.45	63.1	63	63.1833	101.1	101.45	101.55	101.367
19	L2	AN 0% NR	Dry	60.05	59.95	60.15	60.05	101.5	101.5	101.5	101.5
20	L2	AN 0% NR	Dry	60.4	60.45	59.85	60.2333	101.75	101.75	101.55	101.683
21	L2	AN 0% NR	Dry	60.45	60.4	60.8	60.55	101.55	101.55	101.45	101.517
22	L2	AN 0% NR	Wet	60.5	60.1	59.85	60.15	101.65	101.65	102	101.767
23	L2	AN 0% NR	Wet	60.25	60.1	60.35	60.2333	101.6	101.6	101.7	101.633
24	L2	AN 0% NR	Wet	60.1	59.75	59.95	59.9333	101.4	101.25	101.4	101.35
25	L2	CAT 0% NR	Dry	59.25	59.05	59	59.1	101.45	101.35	101.35	101.383
26	L2	CAT 0% NR	Dry	59.2	59.35	59.1	59.2167	101.55	101.45	101.35	101.45
27	L2	CAT 0% NR	Dry	58.5	58.35	58.5	58.45	101.1	101	101.3	101.133
28	L2	CAT 0% NR	Wet	59.4	59.05	59.5	59.3167	101.45	101.5	101.45	101.467
29	L2	CAT 0% NR	Wet	60.05	60.75	61	60.6	101.3	101.2	101.35	101.283
30	L2	CAT 0% NR	Wet	60	60.75	60.45	60.4	101.3	101.3	101.45	101.35
31	L2	AN 10% NR	Dry	60.7	60.65	60.75	60.7	101.55	101.8	101.8	101.717
32	L2	AN 10% NR	Dry	61	60.9	61.1	61	101.5	101.6	101.5	101.533
33	L2	AN 10% NR	Dry	61.2	60.95	60.85	61	101.35	101.55	101.5	101.467
34	L2	AN 10% NR	Wet	61.25	61.6	61.75	61.5333	101.5	101.45	101.6	101.517
35	L2	AN 10% NR	Wet	61.2	61	60.9	61.0333	101.6	101.45	101.5	101.517
36	L2	AN 10% NR	Wet	61.9	61.45	62	61.7833	101.7	101.65	101.55	101.633
37	L2	CAT 10% NR	Dry	61.25	60.15	60.6	60.6667	101.5	101.4	101.45	101.45
38	L2	CAT 10% NR	Dry	60.9	61	61.1	61	101.45	101.5	101.5	101.483
39	L2	CAT 10% NR	Dry	60.8	60.8	60.5	60.7	101.6	101.55	101.65	101.6
40	L2	CAT 10% NR	Wet	61.7	61.55	61.65	61.6333	101.5	101.35	101.55	101.467
41	L2	CAT 10% NR	Wet	61.45	61.35	61.35	61.3833	101.45	101.5	101.6	101.517
42	L2	CAT 10% NR	Wet	61	60.95	60.95	60.9667	101.7	101.55	101.45	101.567
43	L3	AN 0% NR	Dry	60.05	60.25	60.45	60.25	101.75	101.6	101.75	101.7
44	L3	AN 0% NR	Dry	59.9	60.2	60.1	60.0667	101.7	101.45	101.6	101.583
45	L3	AN 0% NR	Dry	60.35	60	59.95	60.1	101.6	101.65	101.75	101.667
46	L3	AN 0% NR	Wet	59.95	60.35	59.75	60.0167	101.6	101.7	101.65	101.65
47	L3	AN 0% NR	Wet	59.95	59.65	59.9	59.8333	101.6	101.7	101.75	101.683
48	L3	AN 0% NR	Wet	60.3	60.3	60.3	60.3	101.45	101.65	101.5	101.533
49	L3	CAT 0% NR	Dry	59.55	58.55	58.9	59	101.6	101.55	101.55	101.567
50	L3	CAT 0% NR	Dry	58.75	59.25	58.65	58.8833	101.7	101.35	101.65	101.567
51	L3	CAT 0% NR	Dry	91.1	58.9	59.3	69.7667	101.65	101.65	101.8	101.7
52	L3	CAT 0% NR	Wet	58.5	58.5	58.3	58.4333	101.6	101.5	101.75	101.617
53	L3	CAT 0% NR	Wet	57.95	57.95	58	57.9667	101.4	101.5	101.55	101.483
54	L3	CAT 0% NR	Wet	59.1	59.15	59.3	59.1833	101.5	101.5	101.35	101.45
55	L3	AN 10% NR	Dry	60.8	60.8	60.7	60.7667	101.7	101.65	101.65	101.667
56	L3	AN 10% NR	Dry	60.9	60.65	60.9	60.8167	101.55	101.6	101.55	101.567
57	L3	AN 10% NR	Dry	60.5	59.95	60.3	60.25	101.6	101.7	101.75	101.683
58	L3	AN 10% NR	Wet	61	61.2	61.1	61.1	101.7	101.6	101.6	101.633
59	L3	AN 10% NR	Wet	60.4	60.4	60.3	60.3667	101.6	101.65	101.6	101.617
60	L3	AN 10% NR	Wet	60.75	60.4	60.5	60.55	101.75	101.45	101.7	101.633
61	L3	CAT 10% NR	Dry	60	60.7	60.25	60.3167	101.5	101.5	101.6	101.533
62	L3	CAT 10% NR	Dry	60	59.8	59.4	59.7333	101	101.5	101.6	101.367
63	L3	CAT 10% NR	Dry	59.85	59.95	59.8	59.8667	101.6	101.7	101.9	101.733
64	L3	CAT 10% NR	Wet	59.6	59.8	59.65	59.7	101.85	101.6	101.6	101.683
65	L3	CAT 10% NR	Wet	60.25	60.55	60.1	60.3	101.85	101.65	101.65	101.717
66	L3	CAT 10% NR	Wet	60	60.3	60.5	60.2667	101.6	101.45	101.5	101.517

## (ข้อมูลน้ำหนักก่อนตัวอย่างสำหรับทดสอบ ITS)

6.2% AC		40% of Emulsion								
W emulsion	W water add	W water in emulsion	W water all	W mole	W mole+sp	W sp	W mole + sp (หลังอบ)	W sp (หลังอบ)	W water (หลังอบ)	% water ที่หายไป (หลังอบ)
103.2	51.1	41.28	92.38	1342.3	2463.5	1121.2	2381	1038.7	82.5	89.305
103.3	50.4	41.32	91.72	1337.7	2444.4	1106.7	2365.6	1027.9	78.8	85.914
103.3	50.5	41.32	91.82	1290.2	2402.9	1112.7	2324	1033.8	78.9	85.929
103.4	50.1	41.36	91.46	1346.6	2462	1115.4	2385	1038.4	77	84.190
103.3	50	41.32	91.32	1335.7	2454.6	1118.9	2374.8	1039.1	79.8	87.385
103.5	50.3	41.4	91.7	1297.4	2414.8	1117.4	2336.9	1039.5	77.9	84.951
103.3	50	41.32	91.32	1346.4	2448.7	1102.3	2390.9	1044.5	57.8	63.294
103.2	50	41.28	91.28	1298	2398.5	1100.5	2340.2	1042.2	58.3	63.869
103.3	50.3	41.32	91.62	1342.1	2439.2	1097.1	2381.2	1039.1	58	63.305
103.3	50.6	41.32	91.92	1290.7	2398.3	1107.6	2340.9	1050.2	57.4	62.446
103.3	50.2	41.32	91.52	1336.4	2450.7	1114.3	2384.6	1048.2	66.1	72.225
103.4	50	41.36	91.36	1338.6	2433.3	1094.7	2372.4	1033.8	60.9	66.659
103.3	50.2	41.32	91.52	1345.5	2464.7	1119.2	2401.2	1055.7	63.5	69.384
103.4	50	41.36	91.36	1297.3	2416.3	1119	2352.1	1054.8	64.2	70.271
103.3	50	41.32	91.32	1341.5	2461.5	1120	2398.8	1057.3	62.7	68.660
103.3	50.2	41.32	91.52	1337.5	2460.1	1122.6	2389.3	1051.8	70.8	77.360
103.5	50.3	41.4	91.7	1335.4	2456.8	1121.4	2388	1052.6	68.8	75.027
103.3	50	41.32	91.32	1289.5	2411.1	1121.6	2353.3	1063.8	57.8	63.294
103.1	20	41.24	61.24	1345.2	2442.4	1097.2	2393.5	1048.3	48.9	79.850
103.2	20.7	41.28	61.98	1289.1	2389.9	1100.8	2349.4	1060.3	40.5	65.344
103.1	20.3	41.24	61.54	1341.2	2439.3	1098.1	2390	1048.8	49.3	80.110
103.3	20.1	41.32	61.42	1337.2	2433.5	1096.3	2389.1	1051.9	44.4	72.289
103.3	20	41.32	61.32	1296.5	2391.7	1095.2	2348.4	1051.9	43.3	70.613
103.3	20	41.32	61.32	1334.9	2417.3	1082.4	2375.4	1040.5	41.9	68.330
103.4	20.3	41.36	61.66	1340.5	2410.2	1069.7	2378.7	1038.2	31.5	51.087
103.3	20.1	41.32	61.42	1288.5	2366.8	1078.3	2340.3	1051.8	26.5	43.146
103.3	20.1	41.32	61.42	1344.9	2416.3	1071.4	2387.1	1042.2	29.2	47.542
103.4	20.3	41.36	61.66	1336.4	2414.2	1077.8	2385.5	1049.1	28.7	46.546
103.5	20	41.4	61.4	1334.3	2417.3	1083	2387.3	1053	30	48.860
103.3	20	41.32	61.32	1296	2378.3	1082.3	2346.6	1050.6	31.7	51.696
103.3	20.3	41.32	61.62	1288.1	2390.1	1102	2360.7	1072.6	29.4	47.712
103.3	20	41.32	61.32	1334.2	2447.3	1113.1	2411.9	1077.7	35.4	57.730
103.4	20	41.36	61.36	1340.5	2445.4	1104.9	2413.1	1072.6	32.3	52.640
103.4	20.1	41.36	61.46	1336.2	2451.3	1115.1	2418.1	1081.9	33.2	54.019
103.4	20.3	41.36	61.66	1344.8	2455.9	1111.1	2422.8	1078	33.1	53.681
103.5	20.4	41.4	61.8	1296	2407.5	1111.5	2374.5	1078.5	33	53.398
103.4	20	41.36	61.36	1344.6	2421.7	1077.1	2382.5	1037.9	39.2	63.885
103.3	20	41.32	61.32	1333.9	2429.6	1095.7	2389.8	1055.9	39.8	64.905
103.3	20.3	41.32	61.62	1295.6	2391	1095.4	2353.1	1057.5	37.9	61.506
103.2	20.7	41.28	61.98	1335.9	2437.6	1101.7	2398.3	1062.4	39.3	63.408
103.3	20.5	41.32	61.82	1340.5	2437.5	1097	2398	1057.5	39.5	63.895
103.3	20.4	41.32	61.72	1288.2	2385.9	1097.7	2348.7	1060.5	37.2	60.272
103.3	20	41.32	61.32	1288.1	2391	1102.9	2349.5	1061.4	41.5	67.678
103.3	20.1	41.32	61.42	1333.4	2430	1096.6	2391.6	1058.2	38.4	62.520
103.4	20.1	41.36	61.46	1344.6	2448.3	1103.7	2410.5	1065.9	37.8	61.503
103.3	19.9	41.32	61.22	1340.5	2443	1102.5	2402.4	1061.9	40.6	66.318
103.3	20.1	41.32	61.42	1296.1	2404	1107.9	2362.3	1066.2	41.7	67.893
103.4	20.3	41.36	61.66	1333.8	2450	1116.2	2404.6	1070.8	45.4	73.630
103.3	20	41.32	61.32	1333.1	2431	1097.9	2383.3	1050.2	47.7	77.789
103.3	20	41.32	61.32	1340.2	2430.3	1090.1	2386.4	1046.2	43.9	71.592
103.3	19.9	41.32	61.22	1287.4	2394.2	1106.8	2352.2	1064.8	42	68.605
103.4	20.4	41.36	61.76	1295.7	2381.7	1086	2337.2	1041.5	44.5	72.053
103.3	20.4	41.32	61.72	1335.9	2415.8	1079.9	2372.4	1036.5	43.4	70.318
103.3	20.3	41.32	61.62	1343.6	2443.7	1100.1	2396.2	1052.6	47.5	77.085
103.4	20.2	41.36	61.56	1340.3	2455.9	1115.6	2406.1	1065.8	49.8	80.897
103.3	20	41.32	61.32	1333.1	2443.1	1110	2394.9	1061.8	48.2	78.604
103.3	20	41.32	61.32	1287.6	2403.9	1116.3	2358.8	1071.2	45.1	73.549
103.3	20.4	41.32	61.72	1344.1	2462.2	1118.1	2412.6	1068.5	49.6	80.363
103.3	20.5	41.32	61.82	1335.9	2449.5	1113.6	2404.5	1068.6	45	72.792
103.3	20	41.32	61.32	1295.8	2410.1	1114.3	2364.4	1068.6	45.7	74.527
103.3	20	41.32	61.32	1339.6	2443.4	1103.8	2399.3	1059.7	44.1	71.918
103.4	20	41.36	61.36	1335.4	2437.2	1101.8	2391	1055.6	46.2	75.293
103.3	20.1	41.32	61.42	1287.1	2390.9	1103.8	2345.7	1058.6	45.2	73.592
103.3	20.3	41.32	61.62	1342.9	2446.5	1103.6	2401.5	1058.6	45	73.028
103.3	20.1	41.32	61.42	1295.2	2399.2	1104	2353.2	1058	46	74.894
103.3	20	41.32	61.32	1332.8	2421.7	1088.9	2391.2	1058.4	30.5	49.739

## (ข้อมูลการหา Bulk Density: Gmb สำหรับก้อนตัวอย่าง ITS)

Density				
W (Oven Dry)	W (Submerge)	W (SSD)	Bulk Volume	Bulk Density (Gmb)
1033.5			0	NA
1023.9			0	NA
1027.6			0	NA
1036.1	542	1038.7	496.7	2.0860
1031.2	537.7	1033.8	496.1	2.0786
1034.6	540.2	1037.1	496.9	2.0821
1016.1			0	NA
1037.7			0	NA
1035.3			0	NA
1045.1	556.1	1046.1	490	2.1329
1043.4	547.2	1044.3	497.1	2.0990
1028.9	545.6	1029.8	484.2	2.1249
1052.8			0	NA
1052.2			0	NA
1053.4			0	NA
1049.5	546.8	1050.5	503.7	2.0836
1049.7	546	1051	505	2.0786
1058.9	556.6	1059.9	503.3	2.1039
1046.7			0	NA
1041.2			0	NA
1046.7			0	NA
1048.9	579	1051.1	472.1	2.2218
1048.6	578.7	1051.4	472.7	2.2183
1037.3	574.4	1039.8	465.4	2.2288
1032.8			0	NA
1047.5			0	NA
1037.1			0	NA
1042.1	585.2	1047.5	462.3	2.2542
1047.3	581.5	1053.5	472	2.2189
1044.7	581.1	1051.4	470.3	2.2213
1056.3			0	NA
1061.9			0	NA
1055.8			0	NA
1065	585.7	1069.1	483.4	2.2031
1061.7	585.6	1066	480.4	2.2100
1061.4	582.1	1065.9	483.8	2.1939
1030.2			0	NA
1048.2			0	NA
1048.3			0	NA
1053.6	582.5	1063.5	481	2.1904
1048.9	585	1066.8	481.8	2.1770
1052.1	584	1063.3	479.3	2.1951
1046.4			0	NA
1042.8			0	NA
1051.8			0	NA
1044.7	577.3	1047.6	470.3	2.2213
1049.3	577.9	1051.9	474	2.2137
1057.4	577.6	1054.7	477.1	2.2163
1036.8			0	NA
1032.9			0	NA
1051.8			0	NA
1027.7	568.7	1030.4	461.7	2.2259
1024.3	568.1	1026.8	458.7	2.2330
1040	572.7	1042.5	469.8	2.2137
1048.4			0	NA
1044.5			0	NA
1054.3			0	NA
1052.8	574.4	1059.2	484.8	2.1716
1051.8	576.3	1056.4	480.1	2.1908
1052.5	576.7	1057.8	481.1	2.1877
1043.7			0	NA
1039.8			0	NA
1041.9			0	NA
1041.4	570.7	1045.7	475	2.1924
1041.5	567.8	1047.5	479.7	2.1711
1041.8	569	1046.1	477.1	2.1836

(ปริมาณน้ำรับก้อนตัวอย่าง ITS)

W water (น้ำที่ออก)	W water (น้ำที่เหลือ)	% water (น้ำที่เหลือ) ของน้ำทั้งหมด
87.7	4.68	5.066
82.8	8.92	9.725
85.1	6.72	7.319
79.3	12.16	13.295
87.7	3.62	3.964
82.8	8.9	9.706
86.2	5.12	5.607
62.8	28.48	31.201
61.8	29.82	32.547
62.5	29.42	32.006
70.9	20.62	22.531
65.8	25.56	27.977
66.4	25.12	27.448
66.8	24.56	26.883
66.6	24.72	27.070
73.1	18.42	20.127
71.7	20	21.810
62.7	28.62	31.340
50.5	10.74	17.538
59.6	2.38	3.840
51.4	10.14	16.477
47.4	14.02	22.826
46.6	14.72	24.005
45.1	16.22	26.451
36.9	24.76	40.156
30.8	30.62	49.853
34.3	27.12	44.155
35.7	25.96	42.102
35.7	25.7	41.857
37.6	23.72	38.682
45.7	15.92	25.836
51.2	10.12	16.504
49.1	12.26	19.980
50.1	11.36	18.484
49.4	12.26	19.883
50.1	11.7	18.932
46.9	14.46	23.566
47.5	13.82	22.538
47.1	14.52	23.564
48.1	13.88	22.394
48.1	13.72	22.193
45.6	16.12	26.118
56.5	4.82	7.860
53.8	7.62	12.406
51.9	9.56	15.555
57.8	3.42	5.586
58.6	2.82	4.591
58.8	2.86	4.638
61.1	0.22	0.359
57.2	4.12	6.719
55	6.22	10.160
58.3	3.46	5.602
55.6	6.12	9.916
60.1	1.52	2.467
67.2	-5.64	-9.162
65.5	-4.18	-6.817
62	-0.68	-1.109
65.3	-3.58	-5.800
61.8	0.02	0.032
61.8	-0.48	-0.783
60.1	1.22	1.990
62	-0.64	-1.043
61.9	-0.48	-0.782
62.2	-0.58	-0.941
62.5	-1.08	-1.758
47.1	14.22	23.190



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
KJ SOMBOON UNIVERSITY

## (ข้อมูลการทดสอบ ITS)

P max (kN)	P max avg. (kN)	ITS (kPa)	AVG. ITS (kPa)	ITS Ratio (%)	AVG. ITS Ratio	Gmb (Dry)	Gmm	Air void %	% Gmm Dry	% Remaining water content	Air void %
1.640	1.521	0.1615	0.150	101.350		NA		12.6	NA	0.455	NA
1.439		0.1417				NA		12.9	NA	0.879	NA
1.484		0.1471				NA		12.7	NA	0.658	NA
1.556	1.542	0.1539	0.152	101.350		2.06149		12.6	86.3999	1.188	13.6001
1.668		0.1638				2.07132		12.9	86.8119	0.352	13.1881
1.400		0.1386			101.350	2.0642	2.38598	12.7	86.5136	0.868	13.4864
0.603	0.534	0.0619	0.055	54.390		NA		11.2	NA	0.506	NA
0.418		0.0427				NA		12.6	NA	2.822	NA
0.580		0.0593				NA		11.5	NA	2.966	NA
0.307	0.294	0.0311	0.030	54.390		2.07282		11.2	86.8748	2.897	13.1252
0.312		0.0313				2.05749		12.6	86.2326	2.016	13.7674
0.262		0.0268			54.390	2.07216	2.40155	11.5	86.8473	2.547	13.1527
2.259	2.310	0.2244	0.229	60.186		NA		12.7	NA	2.444	NA
2.075		0.2057				NA		12.9	NA	2.390	NA
2.594		0.2575				NA		11.8	NA	2.403	NA
1.372	1.398	0.1346	0.138	60.186		2.04701		12.7	85.7933	1.786	14.2067
1.322		0.1302				2.03901		12.9	85.4579	1.942	14.5421
1.501		0.1491			60.186	2.04705	2.38598	11.8	85.7949	2.778	14.2051
2.544	2.719	0.2656	0.283	102.675		NA		10.1	NA	1.037	NA
2.929		0.3043				NA		10.2	NA	0.229	NA
2.683		0.2778				NA		9.8	NA	0.978	NA
2.985	2.784	0.3103	0.290	102.675		2.19208		10.1	91.8732	1.355	8.12675
2.633		0.2737				2.18718		10.2	91.668	1.424	8.33203
2.734		0.2864			102.675	2.19398	2.47158	9.8	91.9531	1.589	8.04688
0.742	0.642	0.0788	0.068	#DIV/0!		NA		9.6	NA	2.456	NA
0.736		0.0780				NA		11.0	NA	3.011	NA
0.446		0.0480				NA		10.9	NA	2.685	NA
NA	NA	NA	#DIV/0!	#DIV/0!		2.19801		9.6	92.1219	2.555	7.87813
NA		NA				2.16441		11.0	90.7135	2.516	9.28649
NA		NA				2.17091	2.49229	10.9	90.9862	2.323	9.01384
1.668	1.847	0.1719	0.190	78.863		NA		10.9	NA	1.530	NA
1.919		0.1972				NA		10.6	NA	0.962	NA
1.953		0.2008				NA		11.2	NA	1.175	NA
1.423	1.469	0.1449	0.150	78.863		2.17964		10.9	91.3521	1.078	8.64787
1.473		0.1513				2.18451		10.6	91.5562	1.168	8.44381
1.512		0.1532			78.863	2.1697	2.47158	11.2	90.9353	1.115	9.06472
0.664	0.634	0.0686	0.065	74.404		NA		12.1	NA	1.424	NA
0.575		0.0591				NA		12.6	NA	1.336	NA
0.664		0.0685				NA		11.9	NA	1.405	NA
0.435	0.476	0.0443	0.049	74.404		2.16158		12.1	90.595	1.335	9.40496
0.524		0.0536				2.14857		12.6	90.0497	1.325	9.95032
0.469		0.0482			74.404	2.16144	2.49229	11.9	90.5893	1.556	9.41068
3.074	2.834	0.3192	0.295	160.611		NA		10.6	NA	0.463	NA
2.756		0.2874				NA		10.9	NA	0.736	NA
2.672		0.2783				NA		10.8	NA	0.917	NA
4.720	4.543	0.4923	0.474	160.611		2.21408		10.6	92.7952	0.328	7.20478
4.603		0.4814				2.20776		10.9	92.5307	0.269	7.46934
4.307		0.4477			160.611	2.21031	2.4845	10.8	92.6375	0.271	7.36252
0.948	0.982	0.1007	0.099	117.645		NA		11.5	NA	0.021	NA
1.038		0.1104				NA		11.2	NA	0.400	NA
0.960		0.0861				NA		12.0	NA	0.595	NA
1.021	1.088	0.1094	0.117	117.645		2.21841		11.5	92.9769	0.338	7.02313
1.149		0.1243				2.21971		11.2	93.0313	0.601	6.96874
1.093		0.1159			117.645	2.21047	2.51416	12.0	92.6442	0.146	7.35581
3.007	2.879	0.3097	0.297	119.635		NA		12.6	NA	-0.535	NA
2.895		0.2983				NA		11.8	NA	-0.399	NA
2.734		0.2839				NA		11.9	NA	-0.064	NA
3.258	3.446	0.3339	0.356	119.635		2.179		12.6	91.3252	-0.339	8.6748
3.504		0.3635				2.19075		11.8	91.8177	0.002	8.18233
3.576		0.3698			119.635	2.18869	2.4845	11.9	91.7314	-0.046	8.26864
1.222	1.140	0.1270	0.119	95.370		NA		12.8	NA	0.117	NA
1.188		0.1249				NA		13.6	NA	-0.062	NA
1.010		0.1055				NA		13.1	NA	-0.046	NA
1.222	1.090	0.1281	0.114	95.370		2.19364		12.8	91.9388	-0.056	8.0612
0.904		0.0938				2.1734		13.6	91.0904	-0.104	8.90957
1.144		0.1190			95.370	2.1538	2.51416	13.1	90.2691	1.384	9.73086

## (ข้อมูลสำหรับการทดสอบค่า pH PZC)

	pH1	3.19		4.49		5.9		9.72		10.44	
	จำนวนครั้ง	pH	pH Avg.	pH1	pH1 Avg.	pH1	pH1 Avg.	pH1	pH1 Avg.	pH1	pH1 Avg.
Limestone Chonburi	1	8.57	8.49	8.35	8.33	7.44	7.53	9.00	8.98	9.01	8.96
	2	8.49		8.30		7.56		8.95		8.91	
	3	8.40		8.33		7.59		9.00		8.97	
Limestone Saraburi	1	8.95	8.90	9.19	9.23	9.00	8.98	9.50	9.39	9.53	9.51
	2	8.91		9.22		8.97		9.38		9.54	
	3	8.85		9.27		8.97		9.30		9.45	
Basalt Buriram	1	9.64	9.61	9.86	9.81	9.77	9.74	10.07	9.99	10.01	9.99
	2	9.62		9.76		9.73		9.98		9.98	
	3	9.56		9.80		9.73		9.92		9.97	

## (น้ำหนักหินและขนาดตะกอนสำหรับการทดสอบ Sieve Analysis)

Sieve	Sieve size(mm)	Bin 1						
		Weight of sieve (g)	Sieve+Aggregate (g)	Retained (g)	Cumulative Retained (g)	% Retained	Passing (g)	% Passing
3/4"		520.2	520.2	0.0	0.0	0.0	999.6	100.00
1/2"	12.7	508.1	508.1	0.0	0.0	0.0	999.6	100.00
3/8"	10	445.7	452.0	6.3	6.3	0.6	993.3	99.37
#4	5	445.3	1295.9	850.6	856.9	85.1	142.7	14.28
#8	2.4	408.1	532.1	124.0	980.9	12.4	18.7	1.87
#16	1.2	363.0	365.1	2.1	983.0	0.2	16.6	1.66
#30		320.7	321.1	0.4	983.4	0.0	16.2	1.62
#50		291.1	291.8	0.7	984.1	0.1	15.5	1.55
#100		284.4	285.7	1.3	985.4	0.1	14.2	1.42
#200		292.6	294.3	1.7	987.1	0.2	12.5	1.25
Pan		254.7	267.2	12.5	999.6	1.3	0.0	0.00

Sieve	Sieve size(mm)	Bin 2						
		Weight of sieve (g)	Sieve+Aggregate (g)	Retained (g)	Cumulative Retained (g)	% Retained	Passing (g)	% Passing
3/4"		520.3	520.3	0.0	0.0	0.0	999.9	100.0
1/2"	12.7	508.2	508.2	0.0	0.0	0.0	999.9	100.0
3/8"	10	445.8	445.8	0.0	0.0	0.0	999.9	100.0
#4	5	444.7	466.8	22.1	22.1	2.2	977.8	97.8
#8	2.4	408.2	612.6	204.4	226.5	20.4	773.4	77.3
#16	1.2	363.0	577.3	214.3	440.8	21.4	559.1	55.9
#30		320.6	478.2	157.6	598.4	15.8	401.5	40.2
#50		291.0	430.1	139.1	737.5	13.9	262.4	26.2
#100		284.1	387.3	103.2	840.7	10.3	159.2	15.9
#200		288.1	371.4	83.3	924.0	8.3	75.9	7.6
Pan		254.4	330.3	75.9	999.9	7.6	0.0	0.0



## บรรณานุกรม

- A. Sebaibi, C. Kasbergen, and B. Van der Horst. "Effects of Moisture Content on the Mechanical Properties of Unbound Granular Materials." (2011).
- Almudaiheem, Jamal A, and Faisal H Al-Sugair. "Effect of Loading Magnitude on Measured Resilient Modulus of Asphaltic Concrete Mixes." *Transportation Research Record*, no. 1317 (1991).
- Chaiyalap, Thirdkiat. "A Study of Asphalt Concrete Properties Using Asphalt Cement with Various Proportion of Natural Rubber." Suranaree University, 2016.  
<http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/handle/123456789/7988>.
- Glozman, EP, and RS Akhmetova. "Changes in the Amount and Quality of Bitumen Components as a Function of the Method and Extent of Oxidation. Tr." *Vses. Dorzh. Nauch.-Issed. Inst.* 46 (1970): 101106.
- Gzemski, GF, WD McGlashan, and LW Dolch. "Thermodynamic Aspects of the Stripping Problem." *HR Circular* 78 (1968).
- Holtz., R. D. "The Effect of Moisture Content on the Strength of Aggregates." (1960).
- Homhoul, Paramet. "Impoving Propoties of Asphalt Concrete with Natural Rubber Latex." Prince of Songkhla University, 2017.
- Johnston, John B, and Gayle King. "Using Polymer Modified Asphalt Emulsions in Surface Treatments a Federal Lands Highway Interim Report." *Federal Highway Administration* (2008).
- Lee, Jusang, Todd Shields, and Hyung Jun Ahn. "Performance Evaluation of Seal Coat Materials and Designs." (2011).
- Majidzadeh, Kamran, and Frederick N Brovold. "Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures: State of the Art." 1968.
- Majidzadeh, Kamran, and RR Stander Jr. "Effect of Water on Behavior of Sand-Asphalt Mixtures under Repeated Loading." *Highway Research Record* 273 (1969): 99-109.
- Malithong, Saovaros, and Chanchai Thongpin. "The Modification of Asphalt Emulsion Using Pre-Vulcanized Natural Rubber Latex for Highway Application." *Advanced*



*Materials Research* 93 (2010): 639-42.

Maupin Jr, GW. "The Use of Antistripping Additives in Virginia (with Discussion)." Paper presented at the Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, 1982.

Nomlala, B, Z Mthembu, G Mturi, and A Hefer. "Bitumen-Aggregate Adhesion: A Predictive Study Based on Zeta Potential Analysis Using the Streaming Potential Technique." 2022.

Osawa, Masatoshi, Minoru Tsushima, Hirokazu Mogami, Gabor Samjeské, and Akira Yamakata. "Structure of Water at the Electrified Platinum– Water Interface: A Study by Surface-Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy." *The Journal of Physical Chemistry C* 112, no. 11 (2008): 4248-56.

Shaffie, E, J Ahmad, AK Arshad, D Kamarun, and F Kamaruddin. "Stripping Performance and Volumetric Properties Evaluation of Hot Mix Asphalt (Hma) Mix Design Using Natural Rubber Latex Polymer Modified Binder (Nrmb)." Paper presented at the InCIEC 2014: Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference 2014, 2015.

Shafii, M, J Ahmad, and E Shaffie. "Physical Properties of Asphalt Emulsion Modified with Natural Rubber Latex." *World Journal of Engineering* 10, no. 2 (2013): 159-64.

Silimanotham, Hatthaphone, and Boonchai Sangpetngam. "Effects of Crumbed Para Rubber on Permanent Deformation Resistance of Hot Mix Asphalt." Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.

Takamura, Koichi. "Applications for Asphalt Modification." *Polymer Dispersions and Their Industrial Applications* (2002): 301-27.

Tantiworawit, Nrachai. "Properties of Asphalt Concrete Mixtures with and without Natural Rubber as Additive." Master, Chulalongkorn, 2003.

<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/1443>.

Tarrer, AR, and Vinay Wagh. "The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding." (1991).

Terdkiat, C. "A Study of Asphalt Concrete Properties Using Asphalt Cement with Various Proportion of Natural Rubber." *Suranaree University of Technology* (2016).

Unsiwilai, Siwarak, and Boonchai Sangpetngam. "Influences of Particle Size and Content

- on Deformation Resistance of Crumb Rubber Modified Asphalt Using Dry Process Mix." *Engineering Journal* 22, no. 3 (2018): 181-93.
- Vinet-Cantot, J, Vincent Gaudefroy, F Delfosse, Emmanuel Chailleux, and E Crews. "Stripping at the Bitumen–Aggregate Interface: A Laboratory Method to Assess the Loss of Chemical Adhesion." *Energy & Fuels* 33, no. 4 (2019): 2641-50.
- Yang, Yaning, Yuan Chun, Guangyao Sheng, and Minsheng Huang. "Ph-Dependence of Pesticide Adsorption by Wheat-Residue-Derived Black Carbon." *Langmuir* 20, no. 16 (2004): 6736-41.
- Yilmaz, Altan. *Mechanical Properties of Basalt Aggregates for Use in Unbound Pavement Layers*. (2016).
- ชยธันว์ พรหมศรี, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศิริราชมัย และ วรภัทร เกตุณูติ. "สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) และค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย." รายงานฉบับที่ วพ. 204 กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. (2003).
- ยศยิ่งธรรมกุล, ทวีศักดิ์. "การปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบด้วยน้ำยางธรรมชาติ . สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง/กรุงเทพฯ." 2003.
- วิทยกุล, นฤตล นวลนัม และ วชิรินทร์. " การปรับปรุงคุณสมบัติ ของแอสฟัลต์อิมัลชันโดยใช้น้ำยางชันธรรมชาติ." *Kasetsart Engineering Journal* 45 (2003): 89-96.
- สุชาวรรณ ชูณรงค์, วีระเกษตร สอนผกา และ วชิรินทร์ วิทยกุล. "การปรับปรุงยางมะตอยผสมเย็น สำเร็จรูปชนิดคาร์บอนผสม ยางพาราเพื่อใช้เป็น ผิวทางสำหรับ ปริมาณจราจรสูง." *Kasetsart Engineering Journal* 31, no. 103 (2018): 19-28.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ไม้โท เกษสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	1 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	กทม.
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมต้นจาก โรงเรียนเทพศิรินทร์ นนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้น ปวช. จาก โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ สาขา เตรียมวิศวกรรมโยธา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
ที่อยู่ปัจจุบัน	11/36 หมู่ 4 ซอยวัดพระเงิน ถนนกาญจนาภิเษก ต.ปลายบาง อ.บางกรวย จ.นนทบุรี 11130