

การปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยน้ำยางชั้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2563

**IMPROVED PERFORMANCE OF ASPHALT
CONCRETE BY CONCENTRATED LATEX**

Kongsak Akkharawongwhatthana



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Civil, Transportation and
Geo-Resources Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2020**

การปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยน้ำยางชั้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(Dr. Menglim Hoy)

ประธานกรรมการ



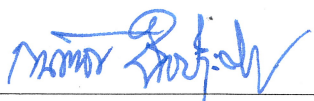
(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



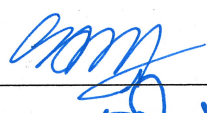

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คงศักดิ์ อัครวงษ์วัฒนา : การปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยน้ำยางข้น
(IMPROVED PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETE BY CONCENTRATED
LATEX) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุภสันต์ หอพิบูลสุข, 86 หน้า

การเพิ่มขึ้นของปริมาณจราจรและน้ำหนักเพลาบรรทุกเป็นสาเหตุทำให้ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความเสียหายก่อนเวลาที่ออกแบบไว้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีสาเหตุสำคัญมาจากการยุบตัวแบบไม่คืนรูปและการแตกร้าว ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติยืดหยุ่นดี ทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติด้านความคงตัวและความยืดหยุ่นของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของชนิดของมวลรวมที่มีในประเทศไทยต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ มวลรวมที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ ยางธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในรูปของน้ำยางพาราชั้น การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย สมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ เสถียรภาพและการไหล ดัชนีความแข็งแรง กำลังดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว ความล้า การยุบตัวถาวร การเกิดร่องล้อ และความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีต ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดมวลรวมต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งชนิดปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมมีความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร และความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม ขณะที่ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีกำลังดึงทางอ้อม และความต้านทานการลื่นไถลมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีโมดูลัสคืนตัวและอายุการล้ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต และหินปูนเป็นมวลรวม การปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมทั้ง 3 ชนิดด้วยน้ำยางพาราชั้นในปริมาณเนื้ออย่างต่อเนื่อง ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 3 ทำให้ค่าเสถียรภาพ ดัชนีความแข็งแรง กำลังดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว อายุการล้า ความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร ความต้านทานการเกิดร่องล้อ และความต้านทานต่อการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของน้ำยางพาราชั้นในการปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมชนิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะเป็ประโยชน์อย่างมากในด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

KONGSAK AKKHARAWONGWHATTHANA : IMPROVED
PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETE BY CONCENTRATED
LATEX. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D.,
86 PP.

ASPHALT CONCRETE/CONCENTRATED LATEX/ LIMESTONE/GRANITE/
BASALT

The increased traffic volume and traffic axle load cause premature failure in the flexible pavement. The premature distress in the asphalt concrete is significantly caused by the development of plastic deformation and crack propagation in the asphalt layer. Natural rubber is one of polymers used in asphalt cement modification. With its inherent chemical property as an elastomer, the natural rubber has the potential to improve the stability and elastic property of asphalt cement. This research aims to study performance of natural rubber modified asphalt concrete with various aggregates in Thailand. Three different types of aggregates, granite, limestone, and basalt were used in this study. The natural rubber used in this study was in a form of concentrated latex (CL). The laboratory tests included properties of asphalt cement, stability and flow, indirect tensile strength, resilient modulus, indirect tensile fatigue, permanent deformation, rutting resistance and skid resistance. The laboratory results indicated that the granite asphalt concrete exhibited lower permanent deformation and rut depth than the basalt and limestone asphalt concretes, whereas the limestone asphalt concrete had greater indirect tensile strength and skid resistance than the granite and basalt asphalt concretes. While the basalt asphalt concrete had greater strength index, indirect tensile resilient modulus, and fatigue life than the granite and limestone asphalt concretes.

The additional 3% of dry rubber of CL by total weight of binder ($R/B = 3\%$) had potential to improve the stability, strength index, indirect tensile strength, resilient modulus, fatigue life, permanent deformation, rutting resistance and skid resistance of all AC mixtures when compared with the conventional asphalt concrete. The use of CL in asphalt concrete can significantly improve the performance of asphalt concrete, which is advantageous in both engineering and economic perspectives.



School of Civil Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้ช่วยเหลือชี้แนะให้คำปรึกษา รวมทั้งให้การช่วยเหลือในการให้ความรู้ การแนะนำสิ่งที่จะต้องงานวิจัยนี้สามารถริเริ่ม และ ลุ่่วงไปได้ด้วยดีเสมอมา ก่อนอื่นผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและอบรม สั่งสอนให้ความรู้ด้วยดีเสมอมา

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ถ่ายทอดวิชาความรู้ เป็นแบบอย่างในการดำเนินชีวิต และให้คำแนะนำปรึกษาเรื่องวิจัย ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้ง ช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง และอาจารย์ ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้าน วิชาการ และประสบการณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. Menglim Hoy ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้ แนวคิด ตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อภิชาติ สุคติพงษ์ ดร.ธีรศักดิ์ เขาวราช และ ดร.อภิรักษ์ บูริตธรรม ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะ และช่วยเหลือจนกระทั่งการทำวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์

และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณไกรฤกษ์ เอี่ยมศรี คุณมัลลิกา มอบกระโทก Mr. Doan Cong Bien

คงศักดิ์ อัครวงษ์วัฒนา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement, AC).....	6
2.1.1 สมบัติที่สำคัญของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	8
2.1.2 สมบัติที่ต้องปรับปรุงของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	9
2.1.3 การปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	11
2.2 ยางธรรมชาติหรือยางพารา (Natural rubber, NR).....	13
2.3 มวลรวม (Aggregate).....	14
2.3.1 สมบัติของมวลรวม.....	15
2.4 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete).....	16
2.4.1 ส่วนประกอบของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	16
2.4.2 สมบัติเชิงปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว.....	17
2.5 สมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต (Engineering performance).....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล (Stability&flow).....	18
2.5.2 การทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index).....	18
2.5.3 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength, ITS).....	19
2.5.4 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M _R).....	19
2.5.5 การทดสอบความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue).....	21
2.5.6 การทดสอบการยวบตัวถาวร (Permanent deformation).....	21
2.5.7 การทดสอบการเกิดร่องล้อ (Wheel Tracking).....	22
2.5.8 การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance).....	23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 บทนำ.....	33
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2.1 มวลรวม.....	36
3.2.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตอร์ชันเกรด 60 ถึง 70 (AC 60/70).....	38
3.2.3 น้ำยางข้น (Concentrated latex, CL).....	38
3.3 การผสมน้ำยางข้นกับแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	39
3.4 การทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	40
3.5 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล.....	42
3.5.1 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	42
3.5.2 การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	42
3.6 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering performance).....	44
3.6.1 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength).....	44
3.6.2 การหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus).....	44
3.6.3 การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue).....	44
3.6.4 การหาค่าการยวบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต (Permanent deformation).....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.5 การทดสอบการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต (Rutting resistance).....	45
3.6.6 การทดสอบหาค่าแรงเสียดทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Skid resistance by British pendulum).....	45
4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	48
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของมวลรวม.....	48
4.2 ผลการทดสอบสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	49
4.3 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	52
4.4 ผลการทดสอบเสถียรภาพและดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	55
4.4.1 ผลการทดสอบเสถียรภาพและการไหล (Stability & flow).....	55
4.4.2 ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength index).....	58
4.5 ผลการทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	59
4.5.1 ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength).....	59
4.5.2 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus).....	63
4.5.3 ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue).....	64
4.5.4 ผลการทดสอบการยุบตัวถาวร (Permanent deformation).....	70
4.5.5 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting resistance).....	71
4.5.6 ผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance).....	74
5 สรุปผล	76
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก ก.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลการทดสอบสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วน ร้อยละ 0 – 10 (ฉพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ, 2544).....27
2.2	เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง AC 60/70, NRMAC และ PMA (ส่วนวิเคราะห์วัสดุทางวิทยาศาสตร์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2555).....28
2.3	สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยยางพาราด้วยปริมาณเนื้อยาง ร้อยละ 531
3.1	ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย.....34
3.2	สมบัติพื้นฐานของมวลรวมทั้ง 3 ชนิด ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556.....37
3.3	ขนาดผลของมวลรวมตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556.....37
3.4	สมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตอร์ชันเกรด 60 ถึง 7038
3.5	สมบัติพื้นฐานของน้ำยางข้น.....39
3.6	ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ.....40
3.7	ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยาง ธรรมชาติ.....43
3.8	สรุปการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....45
4.1	ผลการทดสอบสมบัติของมวลรวมตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556.....49
4.2	สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามมาตรฐาน ทล.-ก. 409/2556.....51
4.3	สมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางข้น.....53

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต.....	16
2.2	การทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล.....	18
2.3	การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม.....	19
2.4	การทดสอบโมดูลัสการกินตัว.....	20
2.5	การทดสอบกำลังต้านทานการล้า.....	21
2.6	การทดสอบการยุบตัวแบบถาวร.....	22
2.7	ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการเกิดร่องล้อ.....	23
2.8	การทดสอบการเกิดร่องล้อ.....	23
2.9	การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล.....	24
3.1	แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.2	ขนาดคณะของมวลรวม.....	36
4.1	เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....	56
4.2	ค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....	58
4.3	ดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....	59
4.4	กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	61
4.5	กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	61
4.6	กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....
62	
4.8	โมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....
64	
4.9	พฤติกรรมความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม.....
65	
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้หน่วยแรงเท่ากับ 250 กิโลพาสกาล.....
66	
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้หน่วยแรงเท่ากับ 300 กิโลพาสกาล.....
66	
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้หน่วยแรงเท่ากับ 350 กิโลพาสกาล.....
67	
4.13	ค่าอายุการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วย น้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้ หน่วยแรงการทดสอบ 250 กิโลพาสกาล.....
68	
4.14	ค่าอายุการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วย น้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้ หน่วยแรงการทดสอบ 300 กิโลพาสกาล.....
69	
4.15	ค่าอายุการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วย น้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้ หน่วยแรงการทดสอบ 350 กิโลพาสกาล.....
69	
4.16	พฤติกรรมการเกิดการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต.....
70	
4.17	ค่ายุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....
71	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18	Creep slope และ Stripping slope.....72
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....73
4.20	อัตราการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....74
4.21	ค่าแรงเสียดทานที่ผิวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น.....75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมภายในประเทศและระหว่างประเทศ ทำให้เกิดการ พัฒนาเสริมสร้างศักยภาพด้านการคมนาคมขนส่งทางถนน ส่งผลให้ถนนทั่วไปในปัจจุบันต้อง รองรับปริมาณการจราจร และน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของความเสียหายบน ถนน ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นถนนที่ใช้ในการคมนาคมค่อนข้างมากเนื่องจากใช้งบประมาณ ก่อสร้างน้อยกว่าถนนคอนกรีต แต่ในขณะเดียวกันอายุการใช้งานของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตก็น้อย กว่าถนนคอนกรีตอีกด้วย ความเสียหายบนถนนแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ 1) การยุบตัวอย่างถาวร (Permanent Deformation) เป็นลักษณะการเปลี่ยนแปลง รูปทรงอย่างถาวรของชั้นผิวทางหรือชั้นโครงสร้างทาง โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่ การ ยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักบรรทุกขนานกับทิศทางการจราจรที่เรียกว่า Rutting และการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางการจราจร ซึ่งมักจะเกิดบริเวณที่ การจราจรหยุดหรือเคลื่อนตัวช้าที่เรียกว่า Shoving 2) การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ (Thermal Cracking) เป็นลักษณะของรอยแตกร้าวตามขวางทิศทางการจราจร มีสาเหตุมา จากแรงเค้นดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เย็นลงอย่างรวดเร็ว เมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำมากและ 3) การแตกร้าวเนื่องจากการล้าจากการรับน้ำหนักบรรทุก (Fatigue Cracking) เกิดจากการรับ น้ำหนักจราจรซ้ำไปมาเป็นเวลานานจนเกิดการล้าและเกิดการแตกร้าวในที่สุด นอกจากนี้ ยังมีอีก 2 ปัจจัยที่เร่งความเสียหายของถนน ได้แก่ การแปรเปลี่ยนสมบัติตามอายุการใช้งาน (Aging) และการ แปรเปลี่ยนคุณภาพเนื่องจากความชื้น (Moisture Damage) (ชยธันวี พรหมสร, 2541) เนื่องจาก แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุประเภทชั้นเหนียว (Viscous Material) สมบัติทางวิศวกรรมจึงแปรผัน โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete Modulus) จะแปรเปลี่ยนค่อนข้างมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิต่ำไปสู่ อุณหภูมิสูง (กฤษณะ จันทรโชติ, 2559) จึงมีแนวคิดที่จะเปลี่ยนรูปแบบการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์ คอนกรีต จากเดิมที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ปกติ ได้มีการลองนำยางธรรมชาติหรือยางพารา (Natural rubber, NR) มาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์แทน (กอบชัย เกิดจันทร์ตรง, 2557)

ความแข็งแรงต้านทานความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นอยู่กับคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานยึดเกาะระหว่างมวลรวมให้แข็งแรงมากขึ้น ดังนั้น การศึกษาค้นคว้าเพื่อพัฒนาสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์จึงมีความสำคัญยิ่ง ซึ่งยางธรรมชาติจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ ซึ่งมีข้อดีเช่น ความคงตัว (Stability) สูง, ความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีและความต้านทานความล้า (Fatigue resistance) สูง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงได้รับความสนใจในการนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเฉพาะความโดดเด่นด้านความต้านทานการเกิดร่องล้อสาเหตุที่ใช้ยางพาราเพราะประเทศไทยสามารถผลิตยางพาราได้ภายในประเทศและเพื่อกระตุ้นการใช้ยางพาราภายในประเทศเพราะแม้ว่าไทยจะเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางพาราอันดับหนึ่งของโลก แต่ไทยก็ไม่สามารถกำหนดราคาเองได้ เนื่องจากยางพาราของไทยเป็นสินค้าที่ผลิตเพื่อส่งออกกว่าร้อยละ 80 และที่สำคัญคือยางพาราเป็นสินค้าโภคภัณฑ์ จึงถูกกำหนดราคาจากอุปสงค์และอุปทานในตลาดโลก ทำให้ไทยต้องอยู่ในฐานะผู้ยอมรับราคา อีกทั้งลักษณะสินค้าของยางพาราที่เป็นการแปรรูปอย่างง่ายและสินค้ามีความแตกต่างกันน้อย ทำให้อุตสาหกรรมยางพาราของไทยเผชิญการแข่งขันสูง นับเป็นปัญหาเชิงโครงสร้างที่ไทยได้เผชิญและต้องยอมรับความผันผวนของราคาซึ่งถูกกำหนดมาจากตลาดโลกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย, 2563) ประกอบกับการศึกษาการวิจัยจากภายในประเทศและอีกหลายประเทศแสดงให้เห็นว่า การนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับยางพาราส่งผลให้ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น (ฉัตรรัตน์ วิชิตชลชัย, 2556)

ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มียางธรรมชาติเป็นส่วนผสม มีการทดลองใช้ครั้งแรกตั้งแต่ปี 2492 โดยประเทศเนเธอร์แลนด์ ผลคือผิวถนนมีอายุการใช้งานนานขึ้น ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาถนน ผิวถนนไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและทนทานต่อการสึกกร่อนจากฝนอีกด้วย สำหรับประเทศไทยได้มีการทดลองใช้ถนนยางพาราในปี 2500 (ชิต ทัศนกุล และคณะ, 2500) โดยใช้ยางพาราร้อยละ 5 พบว่า ถนนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ผิวถนนไม่เยิ้มและเมื่อนำอายุการใช้งานของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางพาราไปเปรียบเทียบกับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตปกติ ในช่วงปี 2500 ถึงปี 2510 พบว่า ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตปกติมีการซ่อมแซม 1 ครั้งในปี 2507 แต่ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางพารา ยังไม่มีการซ่อมแซมเกิดขึ้น และในปี 2543 สถาบันวิจัยยางได้ทำการทดสอบผสมยางพารากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เบนิตเรชันเกรด 60/70 ทดลองทั้งในรูปแบบน้ำยางข้นและยางแห้ง จากนั้นนำไปก่อสร้างถนนในพื้นที่หน่วยงานของกรมวิชาการเกษตร 35 แห่ง คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 160,000 ตารางเมตรและร่วมกับกรมทางหลวงก่อสร้างถนนบางแห่ง ตั้งแต่ปี 2547 จนถึงปัจจุบันถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมทั้งน้ำยางข้นและยางแห้งยังมีสภาพดีอยู่ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2559)

การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่มียางธรรมชาติเป็นส่วนผสมในห้องปฏิบัติการในเชิงวิศวกรรมจากงานวิจัยต่างๆ พบว่า ยางธรรมชาติช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stability), กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength), โมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus), การต้านทานการล้า (Fatigue) และการเกิดร่องล้อ (Rutting) อีกด้วย เช่น การวิจัยอัตราส่วนการผสมยางพาราธรรมชาติในแอสฟัลต์ซีเมนต์ (กอบชัย เกิดจันทร์ตรง, 2557), การทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมยางพาราในปริมาณยางพาราที่ต่างกัน (เทิดเกียรติ ไชยลาภ, 2559), การปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ (ปรเมษฐ หอมหวล, 2560), การศึกษาและพัฒนาวัสดุผิวทางแบบแอสฟัลติกคอนกรีตผสมด้วยยางแผ่นรมควัน (กฤษณ์ เจ็ดวรรณะ และ วีระเทพ ชนินทรเทพ, 2560) เป็นต้น นอกจากนี้ ในปี 2562 ยังมีการศึกษาประเภทและคุณสมบัติของยางธรรมชาติในการนำมาใช้ปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์โดย ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ เพื่อความสะดวกในการผสมยางธรรมชาติกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยเริ่มแรกที่มีการใช้ยางธรรมชาติในการปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตจะใช้น้ำยางสดหรือน้ำยางข้น ไปผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ในเครื่องผสมแล้วนำมาเทราดก่อนจะบดอัด แต่การทำให้ น้ำในยางธรรมชาติระเหยออกไปใช้เวลานานเกินไปและต้องใช้เวลาระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจาก ภายในน้ำยางจะมีแอมโมเนียในการรักษาคุณภาพของน้ำยาง เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดแรงดันสูง นอกจากนั้นการขนส่งน้ำยางไปยังพื้นที่ก่อสร้างนั้นยุ่งยาก ทำให้เกิดการคิดค้นการแปรรูปน้ำยางเป็นยางแห้งขึ้นมา ซึ่งยางแห้งมีข้อดีคือในช่วงระหว่างการผสมไม่ต้องกลัวจะเกิดแรงดันสูงจนเกิดการระเบิดเหมือนน้ำยางไม่มีกลิ่นฉุน ลดค่าขนส่งและค่าใช้จ่ายในการผสมลงอย่างมาก แม้ปัจจุบันจะมีถนนหลายสายที่สร้างขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางธรรมชาติ แต่ยังไม่เห็นหน่วยงานใดของประเทศที่ศึกษาเปรียบเทียบข้อดีและข้อดีของการปรับปรุงถนนแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางธรรมชาติสำหรับมวลรวมทุกชนิดที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตภายในประเทศ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติชนิดน้ำยางข้น (Concentrate latex) ได้แก่ เสถียรภาพ (Stability) ดัชนีความแข็งแรง (Strength index) กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) โมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus) การเกิดการล้า (Indirect tensile fatigue) การยุบตัวถาวร (Permanent deformation) การเกิดร่องล้อ (Rutting resistance) และความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ในพจน์ของปริมาณเนื้อยางธรรมชาติ (อัตราส่วนเนื้อยางธรรมชาติต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์ (R/B) ร้อยละ 0 และ 3 โดยน้ำหนัก) และชนิดของมวลรวม (หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์) ผลการศึกษาจะนำมาซึ่งแนวทางการออกแบบส่วนผสมของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติสมรรถนะสูง ซึ่งสามารถใช้มวล

รวมได้ทุกชนิด นอกจากนี้ยังจะช่วยส่งเสริมการใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของมวลรวม (หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์) ต่อสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชันและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน
3. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ในงานวิจัยนี้ออกแบบสำหรับชั้นทาง Wearing course ขนาดมวลรวมใหญ่สุด 12.5 มิลลิเมตร วัสดุเชื่อมประสานคือแอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเตอร์ชั้นเกรด 60 ถึง 70 และมวลรวม 3 ชนิด ได้แก่ หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ ยางธรรมชาติที่ใช้ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นชนิด น้ำยางพาราชัน (Concentrated latex) อัตราส่วนเนื้อยางธรรมชาติในน้ำยางข้นต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์ (R/B) เท่ากับร้อยละ 0 และ 3 โดยน้ำหนัก การศึกษาแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. การศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน เปรียบเทียบกับข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ก. 409/2556 “ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ”
2. การศึกษาสมบัติพื้นฐานของมวลรวม เปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556 “มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ”
3. การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธีการทดสอบของกรมทางหลวง ทล.-ท. 604/2517 “การทดลองแอสฟัลต์ติกคอนกรีตโดยวิธี Marshall” โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ต้องมีสมบัติตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556 งานวิจัยนี้กำหนดให้ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สำหรับการทดสอบสมรรถนะทางวิศวกรรมมีร้อยละช่องว่าง (Air void) ร้อยละ 4
4. การศึกษาอิทธิพลของชนิดของมวลรวมต่อสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางชันและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน

ประกอบไปด้วย กำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) โมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus) การล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue) การยุบตัวถาวร (Permanent deformation) การเกิดร่องล้อ (Rutting resistance) และความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่องานวิจัยแล้วเสร็จประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเป็น ดังนี้

1. ทราบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น
2. ทราบอิทธิพลของชนิดของมวลรวม (หินแกรนิต หินปูน และหินบะชอลต์) ต่อสมบัติสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น
3. ทราบประสิทธิภาพของน้ำยางพาราชั้นต่อการปรับปรุงสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement, AC)

แอสฟัลต์คือวัสดุประสานสีน้ำตาลแก่อิ่งสีดำ มีบิทูเมน (Bitumen) เป็นส่วนประกอบหลัก เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ ลักษณะค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิปกติ เมื่อให้ความร้อนจะมีลักษณะอ่อนและไหลได้ มีสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลพวกไฮโดรคาร์บอน มีสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดีมาก เมื่อนำมาผสมกับมวลรวมที่สถานะของเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจะมีลักษณะแข็งและยึดมวลรวมไว้ด้วยกัน จึงนิยมใช้แอสฟัลต์เป็นวัสดุปูผิวทาง

แอสฟัลต์สามารถละลายได้ในคาร์บอนไดออกไซด์ (CS_2) นอกจากโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนแล้วแอสฟัลต์ยังมีองค์ประกอบอื่นอีกที่เรียกว่า Heteroatom (ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์และนิกเกิล) ซึ่งสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์จะแตกต่างกันตามธาตุเหล่านี้มักขึ้นอยู่กับแหล่งของน้ำมันดิบ แอสฟัลต์มีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนดังนี้

- Asphaltenes ลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม สามารถแยกออกจากยางแอสฟัลต์ได้ สามารถติดไฟได้ทันทีเมื่อได้รับความร้อนสูงมาก
- Asphaltic resins ลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาลแก่เปราะ จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนสามารถละลายได้เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 93 องศาเซลเซียส (200 องศาฟาเรนไฮต์)
- Oily constituents เป็นส่วนที่แยกจาก Asphaltenes และ Asphaltic resins ออกแล้ว มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลแก่หรือน้ำตาลแกมแดงคล้ายน้ำมันเครื่องชนิดสีเข้มๆ

แอสฟัลต์ซีเมนต์ ได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบเนื่องจากไม่ระเหย เป็นวัสดุที่อ่อนกึ่งแข็ง ในอุณหภูมิปกติ ในการนำไปใช้งานจะต้องให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 150 ± 5 องศาเซลเซียส สามารถแบ่งเป็นเกรดต่าง ๆ ตามค่าเพเนตรชัน (Penetration) จากการทดสอบการหาค่าเพเนตรชันของวัสดุแอสฟัลต์ ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 403 (กรมทางหลวง, 2518) โดยแอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีค่าเพเนตรชันตั้งแต่ 40 ถึง 300 ซึ่งในประเทศไทยจะใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่าเพเนตรชัน เกรด 60 ถึง 70 มีสมบัติในการเชื่อมประสานดีเป็นพิเศษ เพราะมีความแข็งแรง คงทนยึดเกาะ และกันน้ำได้ดี เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์มีความเหนียวหนืดจึงยึดเกาะกับมวลรวมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังมี ความคงทนต่อการรด ด่าง และเกลือ สามารถละลายได้ในสารทำละลายประเภทปิโตรเลียม แอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นวัสดุชนิด Thermoplastic เมื่ออยู่ในอุณหภูมิปกติจะมีสถานะเป็นของแข็งหรือกึ่งแข็ง แต่

จะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวเมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูงมากและที่อุณหภูมิต่ำแอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีความแข็งแรงจนเปราะแตกหักง่าย

แอสฟัลต์ซีเมนต์มีสมบัติตามธรรมชาติที่หนืดและยืดหยุ่น จึงมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ของแรงที่มากระทำ แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถไหลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง แต่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การไหลในปริมาณที่เท่ากัน ต้องใช้เวลานานถึง 10 ชั่วโมง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเวลาและอุณหภูมิมิมีความสัมพันธ์สมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การไหลที่อุณหภูมิสูงใช้เวลาสั้น ขณะที่การไหลที่อุณหภูมิต่ำใช้เวลานาน พฤติกรรมนี้เรียกว่าการสับเปลี่ยนระหว่างเวลากับอุณหภูมิ (Time – Temperature Shift) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ พฤติกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

- พฤติกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูง ในสภาวะอากาศร้อนมากๆ หรือภายใต้การกระทำของน้ำหนักเป็นเวลานานๆ (เช่น การเคลื่อนที่ผ่านอย่างช้าๆ ของรถบรรทุก หรือการจอดรถบรรทุกไว้) แอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีพฤติกรรมเหมือนของเหลวที่หนืด และมวลรวมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแอสฟัลต์คอนกรีตจะทำหน้าที่แบกรับน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำ ดังนั้น ในสภาพภูมิอากาศร้อนผิวทางประเภทแอสฟัลต์คอนกรีตจึงมีเสถียรภาพน้อย ซึ่งจะไหลได้ง่ายภายใต้การกระทำช้าๆ ของน้ำหนักล้อรถและทำให้เกิดรอยร่องล้อตามแนวที่รถวิ่งผ่าน
- พฤติกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่ำ ในสภาวะอากาศเย็น-หนาว หรือภายใต้การเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็วของยานพาหนะ แอสฟัลต์คอนกรีตจะมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งยืดหยุ่นเหมือนกับก้อนยาง เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ แอสฟัลต์คอนกรีตจะเสียดรูปปร่าง และเมื่อไม่มีน้ำหนักมากระทำก็จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิม ถ้าเพิ่มน้ำหนักหรือแรงกระทำจนหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกำลัง แอสฟัลต์ซีเมนต์ก็จะเกิดการแตกหัก ดังนั้น ถึงแม้ว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเป็นของแข็งยืดหยุ่น แต่ที่อุณหภูมิต่ำจะเปราะและแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำ จากเหตุผลดังกล่าวนี้ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมักเกิดการแตกหักในช่วงฤดูหนาว ซึ่งเกิดจากหน่วยแรงภายในขณะที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตพยายามหดตัว แต่ถูกรั้งด้วยชั้นรองพื้นทางด้านล่าง
- พฤติกรรมเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ แอสฟัลต์ซีเมนต์ประกอบด้วยโมเลกุลอินทรีย์สาร ที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจากสภาวะแวดล้อม ซึ่งเรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรวมทั้งองค์ประกอบทางโมเลกุลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การเกิดออกซิเดชันเป็นเหตุให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เปราะง่ายและเสื่อมสภาพ การแข็งตัวจากออกซิเดชันของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะทำให้ไวต่อการแตกหัก การบดอัดผิวทางอย่าง

ไม่เหมาะสมก็ทำให้เกิดการแข็งตัวจากออกซิเดชันก่อนเวลาอันควรด้วย เนื่องจากการบดอัดที่ไม่เพียงพอจะทำให้เกิดโพรงอากาศมาก ทำให้อากาศสามารถทะลุผ่านในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

นอกจากนี้ การแข็งตัวยังเกิดจากการระเหยและการแข็งทางกายภาพ การระเหยจะเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ระเหยได้มีแนวโน้มที่จะระเหยออกไปจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ในขณะที่ผสมร้อนและการก่อสร้าง การแข็งทางกายภาพจะเกิดขึ้นเมื่อแอสฟัลต์ซีเมนต์เผชิญกับสภาวะอุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน เมื่ออุณหภูมิต่ำมีค่าคงที่ แอสฟัลต์ซีเมนต์จะหดตัวและแข็งตัว และจะเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส และจำเป็นที่จะต้องพิจารณาเมื่อทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ (วัชรินทร์ วิทยกุล, 2541)

2.1.1 สมบัติที่สำคัญของแอสฟัลต์ซีเมนต์

1. ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งอ่อนของแอสฟัลต์ ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 5 (ASTM, 2006) โดยวัดความลึกของเข็มโลหะมาตรฐานของเครื่องเพนโตรมิเตอร์ ที่จมลึกลงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ภายใต้น้ำหนักกด 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วินาที ระยะความลึกมีหน่วยเป็นหนึ่งในสิบของมิลลิเมตรที่เข็มมาตรฐานสามารถแทรกทะลุในเนื้อเยื่อ โดยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความแข็งกว่าจะมีค่าเพนิเทรชันต่ำกว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความอ่อนกว่า

2. ค่าจุดอ่อนตัว (Softening Point) เป็นค่าที่บอกถึงอุณหภูมิที่สามารถจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกิดการอ่อนตัวลงจนไม่สามารถรองรับน้ำหนักของตัวเองได้ และเริ่มที่จะอ่อนตัวจนไหลได้ จุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์หาได้จากวิธีการทดสอบ Ring and Ball ตามมาตรฐาน ASTM D 2398 (ASTM, 1982) ค่าจุดอ่อนตัวที่สูงกว่าจะสามารถช่วยให้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี และช่วยป้องกันการเกิดการไหลเยิ้ม (Bleed) ของส่วนผสม

3. Penetration Index (PI) เป็นค่าที่บอกถึงความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Susceptibility) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพนิเทรชัน กับค่าจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน หากแอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดเวลา วัสดุผิวทางอาจเกิดการเสียหายได้ ค่า PI จะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ

- กลุ่มที่ค่า PI มากกว่า + 1 จะเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ

- กลุ่มที่ค่า PI น้อยกว่า - 1 จะเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้างสูง

- กลุ่มที่มีค่า PI อยู่ระหว่าง -1 และ $+1$ จะมีลักษณะกึ่งกลางระหว่าง 2 กลุ่มข้างต้น

4. การยืดดึง (Ductility) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการยืด (Elongation) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่อถูกดึงในอัตราเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส โดยวัดเป็นความยืดสูงสุดของชิ้นตัวอย่างทดสอบก่อนขาดออกจากกัน แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันก็จะมีค่าการยืดดึงที่ต่างกัน โดยทั่วไปแล้วค่าการยืดดึงจะบอกถึงความเหนียวและความสามารถในการยึดเกาะ (Adhesion) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์

5. การคืนตัวกลับ (Torsional Recovery) เป็นการทดสอบเพื่อดูความยืดหยุ่น (Elasticity) ของแอสฟัลต์ โดยการวัดองศาที่คืนกลับของแกนโลหะทรงกระบอกที่อยู่กึ่งกลางตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดแน่นอน เมื่อบิดแกนโลหะทรงกระบอกไป 180 องศา จากตำแหน่งเดิมแล้วปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที

6. ค่า Toughness และ Tenacity เป็นการตรวจสอบความเหนียวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ โดยที่ Toughness หมายถึงพลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบขาดอย่างสมบูรณ์ภายใต้แรงเค้น และ Tenacity หมายถึง งาน (Work) ที่กระทำจากจุดรับแรงสูงสุดจนกระทั่งตัวอย่างขาด การทดสอบทำได้โดยการจุ่มหัวครึ่งวงกลมของอุปกรณ์การทดสอบลงในตัวอย่าง และทำการยืดดึงด้วยความเร็วของการเคลื่อนที่ออกให้คงที่ด้วยความเร็ว 500 ± 5 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างแยกขาดจากกัน

7. ค่าความหนืดที่วัดด้วยเครื่อง Thermal Brookfield Viscometer ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส และ 165 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในโรงผสม เพราะถ้าความหนืดสูงมากอาจทำให้เครื่องผสมไม่สามารถพ่นแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับวัสดุมวลรวมได้

2.1.2 สมบัติที่ต้องปรับปรุงของแอสฟัลต์ซีเมนต์

แม้ว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีคุณลักษณะที่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นวัสดุประสานในการก่อสร้างผิวทาง แต่ยังมีสมบัติบางประการที่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพ ดังนี้

1. ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature Susceptibility)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นวัสดุชนิด Thermoplastic ความแข็งแรงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเป็นผลทำให้เกิดปัญหาการยุบตัวอย่างถาวร นอกจากนี้ที่อุณหภูมิต่ำ ยางแอสฟัลต์จะมีความแข็งมากจนเปราะ และทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าว ความอ่อนไหวในคุณภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากแอสฟัลต์นั้นตรวจสอบได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรง (Stiffness) ของยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างกัน ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของยางแอสฟัลต์

2. ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นในระหว่างใช้งาน (Age Hardening)

ความคงทนของแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถพิจารณาจากความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งในระหว่างขั้นตอนการผสมกับมวลรวม และในระหว่างการใช้งานจริงบนถนน กลไกการแข็งแรงของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในระหว่างใช้งานสามารถอธิบายได้จาก 7 ปฏิกริยา ดังนี้

- ปฏิกริยา Oxidation เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจากออกซิเจนทำปฏิกริยากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกริยานี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์ซีเมนต์ อุณหภูมิ อัตราการกระจายตัวของออกซิเจน และความพรุนของมวลรวมผสม (Barth, 1984) ที่อุณหภูมิและความดันปกติ ปฏิกริยาระหว่างออกซิเจนและแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเกิดขึ้นอย่างช้ามาก โดยปฏิกริยานี้มีผลทำให้ฟิล์มของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์บนผิวถนนมีความแข็งเป็นพิเศษ แต่หากไม่มีการรบกวนใด ๆ ปฏิกริยานี้จะไม่เกิดต่อเนื่องลงไปจนถึงผิวทาง แต่หากผิวเกิดการแข็งเปราะและเกิดรอยแตกแล้ว ปฏิกริยา Oxidation จะเกิดต่อเนื่องในชั้นทางและเกิดการแตกอย่างต่อเนื่อง

- ปฏิกริยา Volatilization เป็นปฏิกริยาการแยกระเหยของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบาจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ ปฏิกริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างมากในระหว่างการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในลักษณะของฟิล์มบางที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกริยา

- ปฏิกริยา Polymerization เป็นปฏิกริยาที่หลาย ๆ โมเลกุลขนาดเล็กของแอสฟัลต์ซีเมนต์มารวมตัวกันขึ้นเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแข็งตัวที่มากขึ้น

- ปฏิกริยา Thixotropy หรือ Steric Hardening เกิดขึ้นจากโมเลกุลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ยึดเกาะกันแน่น เมื่อปล่อยถนนทิ้งไว้เป็นเวลานาน โดยปราศจากการรบกวน ถนนจะแข็งเปราะขึ้นอย่างรวดเร็ว หากปราศจากการสัญจรผ่านเป็นเวลานาน เมื่อเปรียบเทียบกับถนนแบบเดียวกันที่มีการสัญจรไปมา (Barth, 1984)

- ปฏิกริยา Syneresis เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เกิดการแยกตัวกันระหว่างโมเลกุลเบาจากโมเลกุลหนักมาสู่ผิวของแอสฟัลต์ซีเมนต์และระเหยออกไป เป็นผลให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกิดการแข็งขึ้น

- ปฏิกริยา Separation เป็นปฏิกริยาการแยกตัวออกของส่วนของเหลวในแอสฟัลต์ซีเมนต์ เนื่องจากความพรุนของวัสดุมวลรวม

- ปฏิกริยา Physical Hardening เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่แอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในอุณหภูมิต่ำมาก ๆ แม้ว่าอุณหภูมิจะคงที่ แต่แอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีการแข็งตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ชยธันว์ พรหมสร, 2541)

3. ความอ่อนไหวของคุณภาพต่อความชื้น (Moisture Susceptibility)

ความอ่อนไหวของคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่อความชื้นนั้น จะมีผลต่อคุณภาพการใช้งานในแง่ของการสูญเสียความยึดเกาะกันระหว่างผิวของมวลรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ กำลังของแอสฟัลต์คอนกรีตจะสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุหลายประการ ได้แก่ ความสามารถในการรับน้ำหนักของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ความแข็งแรงของวัสดุมวลรวมและความสามารถในการยึดประสานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ หากมีความชื้นแทรกอยู่ระหว่างวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์มีความสามารถในการยึดเกาะไม่ดี ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตอาจเกิดความเสียหายในเวลาอันรวดเร็ว (Majidzadeh, 1968)

4. ความอ่อนไหวต่อแรงเฉือน (Shear Susceptibility)

ปกติแล้วแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูงจะมีสภาพเป็นของไหล ซึ่งค่าความหนืด (Viscosity) ที่วัดได้จะเป็นอิสระต่ออัตราการเฉือน (Shear Rate) แต่ภายหลังจากที่แอสฟัลต์ซีเมนต์เกิดการแข็งตัวขึ้น ไม่ว่าจะเนื่องจากอุณหภูมิต่ำลงหรือเนื่องจากการเกิดปฏิกริยา aging แอสฟัลต์ซีเมนต์จะเปลี่ยนสภาพจากของไหลเป็นสภาพหนืดกึ่งของไหลที่มีสมบัติเป็น viscoelastic ซึ่งค่าความหนืดจะขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน ค่าความหนืดจะสูงขึ้นถ้าอัตราการเฉือนสูงขึ้น ดังนั้นความอ่อนไหวต่อแรงเฉือนจึงวัดจากอัตราการเปลี่ยนไปของค่าความหนืดต่ออัตราการเฉือน ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของแอสฟัลต์ซีเมนต์และจะแปรเปลี่ยนแตกต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Kandhal, 1973)

2.1.3 การปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์

1. การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยสารพอลิเมอร์

การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยการเติมสารผสมเพิ่มเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหาความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นบนผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีต สารผสมเพิ่มที่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์มีอยู่หลายชนิด ทั้งที่เป็นสารตามธรรมชาติและสารที่เป็นกากจากอุตสาหกรรม แต่สารที่สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์อย่างได้ผล คือสารจำพวกพอลิเมอร์ (Polymer)

พอลิเมอร์ หมายถึงการรวมตัวกันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) หลายตัว ซึ่งกรรมวิธีการรวมตัวกันนั้นเรียกว่า โพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ขนาดของพอลิเมอร์นั้นอาจมีตั้งแต่โมเลกุลเล็กๆ ที่มีมวลโมเลกุลระหว่าง 30 – 150 ไปจนถึงโมเลกุล

ขนาดใหญ่ที่มีมวลโมเลกุลระหว่าง 10,000 – 10 ล้าน (Kaufman, 1977) ส่วนมากพอลิเมอร์จะมีการยึดเกาะกันเป็นเส้นตรงและมีสิ่งที่เหมือนกันคือ สมบัติที่เป็น Thermoplastic ซึ่งหมายความว่าสามารถทำให้อ่อนตัวซ้ำแล้วซ้ำอีกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง และทำให้แข็งตัวอีกครั้งได้ด้วยการทำให้เย็นตัวลง โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น (เป็นเพียงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ)

การผสมพอลิเมอร์ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะด้านความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ และช่วยทำให้คุณภาพโดยรวมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง และไม่แข็งจนเกินไปเมื่ออุณหภูมิต่ำลง แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยสารพอลิเมอร์จึงมีความสามารถต้านทานต่อความเสียหายสูงขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์จะช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเล็กๆ เข้าเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีความคงตัวดีกว่าในสภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะไปในทางที่สูงขึ้นหรือต่ำลง ทำให้สามารถต้านทานการยุบตัวอย่างถาวร ได้ดีที่อุณหภูมิสูง และสามารถต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ สารพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์มากที่สุดชนิดหนึ่ง คือ Styrene Butadiene Styrene Block Copolymer (SBS)

Styrene Butadiene Styrene Block Copolymer (SBS) เป็นพอลิเมอร์ประเภท อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) ที่ได้มาจากการก่อตัวของกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน ระหว่าง Styrene และ Butadiene โดยทั่วไปกระบวนการจะมีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก Styrene จะรวมตัวกันเพื่อก่อตัวขึ้นเป็น Polystyrene Blocks ที่มีมวลโมเลกุลตามต้องการ เช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 2 Butadiene รวมตัวกันเพื่อก่อตัวขึ้นเป็น Polybutadiene Blocks ที่มีมวลโมเลกุลตามต้องการ จากนั้นทั้งสอง Blocks จะเกิด โพลิเมอไรเซชันร่วมกันอีกครั้งหนึ่ง เกิดเป็นหนึ่ง โมเลกุลตามสมบัติทางกายภาพที่ต้องการ เมื่อเติม SBS ลงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะเกิดกระบวนการที่ Polystyrene Blocks ของโมเลกุลที่ติดกันจะดึงจุดทางเคมีซึ่งกันและกัน และจะก่อตัวขึ้นเป็นกลุ่มต่อติดกับกลุ่มของ Butadiene อยู่ภายในโครงข่ายเมตริกของแอสฟัลต์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น Styrene Blocks ที่รวมตัวกันเหล่านี้จะหลอมละลาย ทำให้ความหนืดของส่วนผสมพอลิเมอร์แอสฟัลต์ซีเมนต์ลดลง เป็นผลให้ส่วนผสมสามารถไหลตัวได้ แต่ที่อุณหภูมิต่ำ Styrene Domains มีความแข็งแรง เป็นผลให้ส่วนผสมมีความแข็งแรงแต่ไม่แข็งเปราะจนเกินไป

ชยธันว์ พรหมศร (2541) ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีต่อสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารพอลิเมอร์ 4 ชนิด ได้แก่ Styrene Butadiene Styrene Block Copolymer (SBS), Styrene Butadiene Rubber (SBR), Ethylene Vinyl Acetate (EVA) ในอัตราส่วนแต่ละชนิดร้อยละ 3 และ SBR ผสมกับ Polyolefin ในอัตราส่วน 3 : 2 โดยได้

ทำการศึกษเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทั้งชนิดเกรดแข็ง ได้แก่ AC – 20 และชนิดเกรดอ่อน ได้แก่ AC – 10 สารพอลิเมอร์ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำในระหว่างกระบวนการผลิตแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่โรงงานผลิต การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM แล้วทำการเปรียบเทียบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารพอลิเมอร์กับแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา ผลจากการศึกษาพบว่า สารพอลิเมอร์ทุกชนิดช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stability) ให้แก่แอสฟัลต์คอนกรีตได้เป็นอย่างดี และแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารพอลิเมอร์ ประเภท Elastomers ชนิด SBS มีสมบัติที่ดีขึ้น SBS ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงให้แก่แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดอ่อนจนมีความต้านทานแรงสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดแข็ง หรือกล่าวได้ว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารพอลิเมอร์ชนิด SBS สามารถใช้แทนแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดแข็ง

2. การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยยางธรรมชาติ

การปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์จะอาศัยสมบัติบางประการที่เป็นข้อดีของยางธรรมชาติ เช่น ความคงตัว (Stability) สูง ความยืดหยุ่น (Elasticity) ดี และทนความล้า (Fatigue resistance) ดี แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงคงทนเพิ่มมากขึ้น สามารถยืดอายุการใช้งานของถนนที่มีผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ให้ยาวนานขึ้น และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบทั้งความสะดวกสบายและความปลอดภัย ทั้งยังเป็นการช่วยประหยัดงบประมาณในการซ่อมบำรุงถนนในระยะยาวได้อีกด้วย ผลการประชุมของสมาคมประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติ (ANRPC) ครั้งที่ 33 (Committee on other Measures, 1998) สรุปว่าการศึกษาของ The Central Road Research Institute of India ร่วมกับ World Bank เรื่องการใช้ยางธรรมชาติผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ในการทำถนนมีข้อดีคือ ประหยัดพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการจับจี้รถยนต์ เนื่องจาก

1. การจับจี้ยานพาหนะบนถนนที่ทำด้วยยางผสม (Rubberized road) ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงน้อยกว่าปกติร้อยละ 5 ถึง 7

2. Rubberized road มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า

3. Rubberized road มีการเกิดอุบัติเหตุน้อยกว่า เพราะมีความยืดหยุ่นตัวดีกว่า

2.2 ยางธรรมชาติหรือยางพารา (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ประเภทไฮโดรคาร์บอน ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประมาณ 1,000,000 เรียกได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ชนิด Polyisoprene อนุภาคของเนื้อยางมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมหรือรูปลูกแพร์ ขนาด 0.01 – 5 ไมโครเมตร กระจุกกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (Aqueous medium) สมบัติเด่นของยาง คือ มีความยืดหยุ่น (สามารถถูกยืดให้ยาวออกได้ตามแรงดึง) และเมื่อปล่อยให้ป็นอิสระจะกลับคืนสู่สภาพเดิม ซึ่งเกิดจากสายโมเลกุลที่ต่อกันและมีลักษณะไม่

เป็นเส้นตรง แต่ต่อกันในลักษณะที่ก่อให้เกิดสายโมเลกุลที่ยืดหยุ่น ซึ่งเป็นผลให้สายโมเลกุลที่สมบูรณ์ขดอยู่ใกล้กัน ด้วยเหตุนี้ ยางขึ้นหนึ่งๆ จะประกอบด้วยสายโมเลกุลที่ขดกันซับซ้อนเป็นจำนวนมาก และการขดของแต่ละโมเลกุลจะอยู่ในลักษณะซับซ้อนกันแต่ไม่เชื่อมโยงติดกัน ดังนั้นเมื่อถูกแรงดึง แต่ละสายโมเลกุลก็จะเหยียดตรงออกไปและพยายามหดกลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อถูกปล่อยให้เป็นอิสระจากแรงดังกล่าว

ยางธรรมชาติมีสมบัติในการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความยืดหยุ่น (Elasticity) การเหนียวติดกัน (Tack) และความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) ที่สูงมากทั้งในอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง และมีความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ ยางธรรมชาติจึงนิยมถูกนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย (กอบชัย เกิดจันทร์ตรง, 2557)

ปัจจุบันยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบที่ได้มาจากพืชและจากการสังเคราะห์ ยางที่ได้มาจากพืชจะเรียกว่า ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ส่วนยางที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์จะเรียกว่า ยางเทียมหรือยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR) พืชที่ให้น้ำยางธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น ยางพารา ยางกัตคาเปอร์ช่า ยางมาลาตา และยางฉิลเกิล ซึ่งยางแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างโมเลกุล สมบัติ และการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน แต่ยางที่ได้จากยางพาราเป็นยางธรรมชาติที่นำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด ดังนั้นหากเอ่ยถึงยางธรรมชาตินี้ก็จะหมายถึงยางพาราเพียงอย่างเดียว น้ำยางสด (Latex) ประกอบด้วยอนุภาคยางแขวนลอย น้ำยางมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) อยู่ประมาณร้อยละ 30 – 45 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 50 – 65 จะเป็นน้ำ และที่เหลืออีกเพียงเล็กน้อยบางส่วนจะเป็นโปรตีน ไขมัน และเกลืออนินทรีย์ ยางมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 – 0.980 กรัม/มิลลิลิตร มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.93 และมีค่า pH ประมาณ 6.5 – 7 ความหนืดของยางมีค่าประมาณ 12 – 15 centipoise (น้ำบริสุทธิ์ มีความหนืด 1 centipoise) โดยค่าต่างๆ อาจมีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบในน้ำยาง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุของยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น (นราชัย ดันติวรวิทย์, 2546)

2.3 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมที่ใช้สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ค้ำตะแกรงเบอร์ 4)
2. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 4.75 ถึง 75 ไมโครเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำตะแกรงเบอร์ 200)

3. วัสดุอัดแทรก (Mineral filler) หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากกว่า 75 ไมโครเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเติมส่วนละเอียดให้มากขึ้น ส่วนละเอียดเป็นส่วนสำคัญในการผลิตวัสดุผสมที่แข็งแรง วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุอัดแทรกคือฝุ่นของหินปูน

วัสดุมวลรวมเกือบทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทยมีอยู่ 3 ชนิด ดังนี้

1. หินแกรนิต (Granite) เป็นหินที่มีลักษณะเนื้อหยาบ สลิกเกาะกันแน่น มักเป็นหินสีจาง แร่ส่วนใหญ่เป็นควอร์ต หินแกรนิตมีความแข็งแรงมาก มีความหนาแน่นสูง ความพรุนต่ำ และมีค่ากำลังวัสดุสูง ทนต่อการรูดและค้าง ทนต่อการขีดข่วน และต้านทานความชื้นได้ดี (ชั้นวิน สวัสดิ์สถานต์ และคณะ, 2555)

2. หินบะซอลต์ (Basalt) เป็นหินที่มีผลึกละเอียด และมีผลึกขนาดเล็ก เนื้อละเอียด มีสีเข้มเพราะมีสัดส่วนของแร่องค์ประกอบหินในกลุ่มแมกนีเซียมออกไซด์สูง หินบะซอลต์เป็นหินชนิดต่าง ทนทานต่อการสึกกร่อน และมีความพรุนสูง (ชั้นวิน สวัสดิ์สถานต์ และคณะ, 2555)

3. หินปูน (limestone) เป็นหินที่ละลายน้ำได้ดี โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่างหินทั้ง 3 ชนิด หินปูนมีความคงทนและแข็งแรงต่ำกว่าหินแกรนิต และหินบะซอลต์ แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทยมีการใช้หินปูนเป็นส่วนผสมมากที่สุดเนื่องจากพบอยู่มากในประเทศไทย (ชั้นวิน สวัสดิ์สถานต์ และคณะ, 2555)

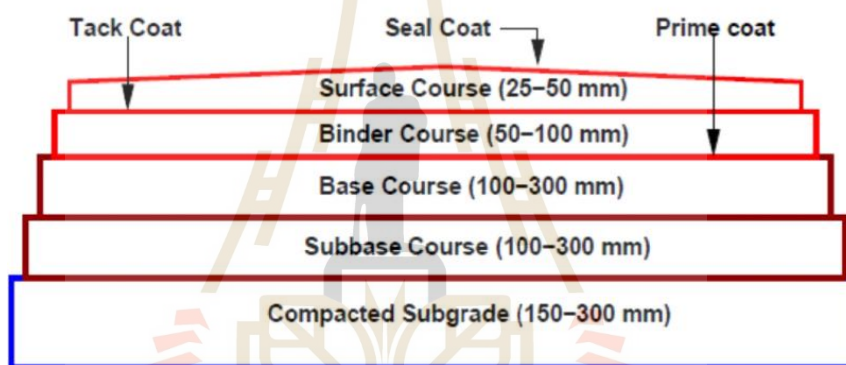
2.3.1 สมบัติของมวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ควรมีสมบัติต่อไปนี้

1. ขนาดละเอียด ให้ส่วนผสมแน่น ถ้าจำเป็นอาจรวมวัสดุอัดแทรกด้วยเพื่อความแข็งแรงของส่วนผสม
2. แข็งแกร่งสำหรับการต้านทานการสึกกร่อนและขัดสีจากการจราจร
3. ความคงทนสำหรับการต้านทานการแตกตัวจากการเพิ่มและลดอุณหภูมิ
4. ลักษณะของผิวควรขรุขระ เพื่อให้มีความเสียดทานมากขึ้นและมีผิวหน้ายึดเกาะกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดีขึ้น
5. ลักษณะของรูปร่าง ไม่ควรแบนและยาวเนื่องจากมีโอกาสแตกหักได้ง่าย
6. ปราศจากสารที่เป็นอันตรายเนื่องจากอาจทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวอนุภาคของมวลรวมที่มีคุณภาพต่ำลงหรืออาจทำให้อนุภาคของมวลรวมบางอนุภาคแตกได้

2.4 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีต คือ วัสดุผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible pavement) ประกอบด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) และมวลรวม (Aggregate) ผสมกันในเครื่องทำความร้อนด้วย อุณหภูมิสูง (Hot mix) จากนั้น จึงนำไปปูผิวทางในขณะที่ยังร้อนอยู่แล้วบดอัดให้แน่น ส่วนใหญ่ แอสฟัลต์คอนกรีตมักจะถูกสร้างเป็นถนนทั่ว ๆ ไป รวมถึงลานจอดรถขนาดใหญ่ แต่จะไม่นิยมไป สร้างในถนนที่มีปริมาณการจราจรเบาบาง ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นถนนที่มีความปลอดภัย ทนทานและมีเสถียรภาพ โดยสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของมวลรวมและ แอสฟัลต์ซีเมนต์ ตลอดจนสัดส่วนที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม (วัชรินทร์, 2544) โครงสร้างของ ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

2.4.1 ส่วนประกอบของแอสฟัลต์คอนกรีต

ภายในแอสฟัลต์คอนกรีตประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ มวลรวมและอากาศ หลังจากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์บางส่วนจะถูกดูดซึมเข้าไปในมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์อีก ส่วนหนึ่งจะทำหน้าที่เคลือบผิวของอนุภาคของมวลรวมและยึดไว้ด้วยกัน ซึ่งเรียกว่าแอสฟัลต์ ประสิทธิภาพ (Effective asphalt) โดยทั่วไปแล้วแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมจะมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำ ที่ถูกดูดซึมในอนุภาคของมวลรวม เนื่องจากภายในอนุภาคของมวลรวมจะมีช่องว่างอยู่ 2 ขนาด คือ 1. ช่องว่างที่น้ำและแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถซึมผ่านได้ 2. ช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้แต่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถซึมผ่านได้ ในการคำนวณหาสัดส่วนของส่วนผสมจึงจำเป็นต้องรวม ปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวมด้วย เพราะว่าปริมาณส่วนผสม

ทั้งหมดในแอสฟัลต์คอนกรีตต้องทำการตรวจวัดอย่างละเอียดและถูกต้องที่สุด ซึ่งปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวมสามารถคำนวณได้จากความหนาแน่น

2.4.2 สมบัติเชิงปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว

ได้แก่ช่องว่างอากาศ (Air voids) ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Void in mineral aggregate, VMA) ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Void filled by asphalt cement, VFA) และค่าร้อยละของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective Asphalt cement) จะเป็นตัวบ่งบอกสมรรถภาพในการใช้งานของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อมวลรวมส่วนใหญ่มีรูพรุนและการดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่างกัน การหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมจึงมีอยู่ 3 วิธีที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (Bulk) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent) และความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ ซึ่งสมบัติเชิงปริมาตรที่กล่าวมา มีนิยาม ดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (Bulk specific gravity) คืออัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัสดุซึ่งมีสมบัติยอมให้ซึมผ่านได้ รวมทั้งช่องว่างที่ซึมผ่านได้และซึมผ่านไม่ได้ ต่อน้ำหนักในอากาศของน้ำที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากับวัสดุที่อุณหภูมิเดียวกัน

2. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity) คืออัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัสดุซึ่งมีสมบัติไม่ยอมให้ซึมผ่าน ต่อน้ำหนักในอากาศของน้ำที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากับวัสดุที่อุณหภูมิเดียวกัน

3. ความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ (Effective specific gravity) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัสดุ ซึ่งมีสมบัติยอมให้ซึมผ่านได้ แต่ไม่รวมช่องว่างที่ยอมให้แอสฟัลต์ซึมผ่านได้ ต่อน้ำหนักในอากาศของน้ำที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากับวัสดุที่อุณหภูมิเดียวกัน

4. แอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective asphalt content) คือปริมาณแอสฟัลต์ซึ่งเคลือบอยู่บนผิวอนุภาคมวลรวม ทำหน้าที่ยึดประสานมวลรวมไว้ด้วยกัน

5. ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in mineral aggregate, VMA) คือ ปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคมวลรวมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งเท่ากับ ปริมาตรช่องว่างอากาศรวมกับปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ

6. ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with asphalt, VFA) เป็นส่วนที่แอสฟัลต์ประสิทธิภาพบรรจุอยู่

7. ช่องว่างอากาศ (Air voids, AV) ปริมาตรทั้งหมดของช่องอากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์หลังจากแอสฟัลต์คอนกรีตถูกบดอัดแล้ว

2.5 สมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต (Engineering performance)

เป็นคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตในการใช้งานจริง โดยการทดสอบจะจำลองการเกิดความเสียหายของแอสฟัลต์คอนกรีตในรูปแบบต่าง ๆ โดยจะมีการทดสอบดังนี้

2.5.1 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล (Stability & flow)

ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 6927 (ASTM, 2015) เป็นการทดสอบเพื่อหาเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต บ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรง โดยที่แอสฟัลต์คอนกรีตไม่เกิดการวิบัติและค่าการไหลคือความสามารถในการยุบตัวก่อนที่แอสฟัลต์คอนกรีตจะวิบัติ ทดสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ต่อนาที ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล

2.5.2 การทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index)

ตามมาตรฐาน ทล.-ท 413 (กรมทางหลวง, 2544) เป็นการทดลองหาค่ากำลังต้านทานต่อการหลุดลอกของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Hot-Mix Asphalt) โดยคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) เป็นร้อยละระหว่างค่า Marshall Stability ของก้อนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายเกลือแคง (Soaked sample) เปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในสารละลายเกลือแคง (Unsoaked sample)

2.5.3 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength, ITS)

ตามมาตรฐาน ASTM D6931 (ASTM, 2017) อัตราการให้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 0.8333 มิลลิเมตรต่อวินาที หรือ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ให้แรงกระทำจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.3 งานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิทดสอบแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังดึงทางอ้อม ค่ากำลังดึงทางอ้อม คำนวณจากสมการที่ (2.1)

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ P คือ แรงกดสูงสุด D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และ t คือ ความหนาของตัวอย่าง



รูปที่ 2.3 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม

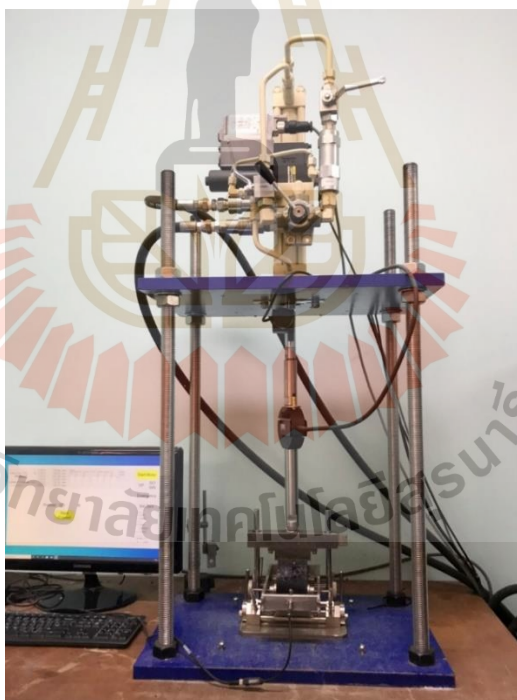
2.5.4 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_R)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม ตามมาตรฐาน ASTM D4123-82 (ASTM, 1995) การทดสอบกระทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ให้แรงกระทำแบบ Haversine ที่ความถี่ 1 รอบต่อวินาที โดยมีระยะเวลาในการให้แรงกระทำ 0.1 วินาที และมีระยะเวลาพัก 0.9 วินาที แรงกดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 15 ของค่ากำลังดึง

ทางอ้อม ทำการทดสอบจำนวน 200 รอบ ค่าโมดูลัสคืนตัวเป็นค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายของการทดสอบ การจัดวางก่อนตัวอย่างในเครื่องทดสอบจะเป็นลักษณะเดียวกันกับการทดสอบหากำลังดึงทางอ้อม แต่จะมีการติดตั้ง Linear Variable Differential Transducers (LVDT) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ด้านข้างแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว ค่าโมดูลัสคืนตัว สามารถคำนวณ ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$M_R = \frac{P(0.27+\nu)}{\Delta H t} \quad (2.2)$$

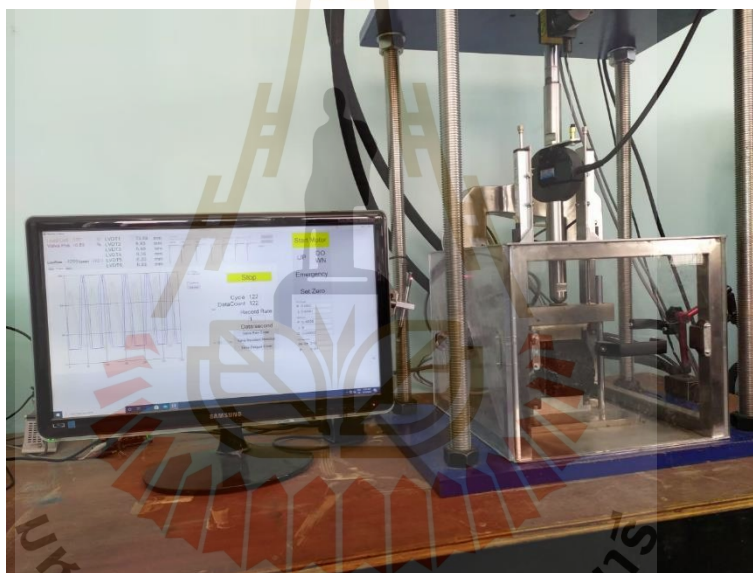
เมื่อ P คือ แรงกดสูงสุด ΔH คือ ค่าการเสียรูปในแนวราบ t คือ ความหนาของตัวอย่าง ทดสอบ และ ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)



รูปที่ 2.4 การทดสอบ โมดูลัสการคืนตัว

2.5.5 การทดสอบความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue)

เพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานต่อความล้า (Fatigue Properties) ที่เกิดขึ้นกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการให้แรงดึงทางอ้อม ตามมาตรฐาน BS EN12697-24 (ASTM, 2012) การจัดวางตัวอย่างและรูปแบบของแรงกระทำเหมือนกับการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว แต่ใช้ค่าหน่วยแรงดึงทางอ้อมในการทดสอบแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 250 300 และ 350 กิโลพาสคาล ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ให้แรงกระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ (การทรุดตัวแนวตั้งมากกว่า 9 มิลลิเมตร) อายุการล้า (Fatigue life, N_f) หาได้จากจุดตัดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดน้อยและส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดมากในความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวตั้งและรอบทดสอบลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.5

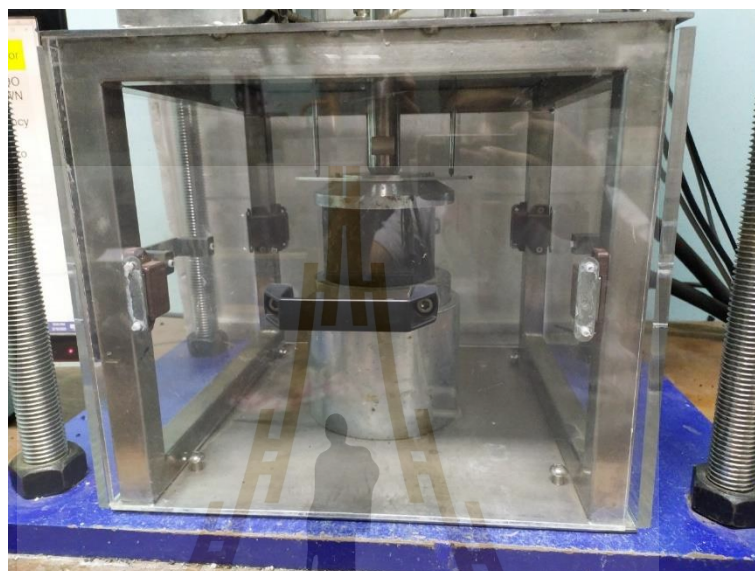


รูปที่ 2.5 การทดสอบกำลังต้านทานการล้า

2.5.6 การทดสอบการยุบตัวถาวร (Permanent deformation)

เพื่อศึกษาความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรหรือความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อ (Rutting) โดยการทดสอบความคืบพลวัต (Dynamic creep test) ตามมาตรฐานการทดสอบ AS 2891.12.1 (1995) เมื่อเริ่มต้นการทดสอบต้องให้แรงกระทำตามแนวแกนกับตัวอย่างเท่ากับ 10 กิโลพาสคาล เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นจึงให้แรงกระทำซ้ำแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ค่าหน่วยแรงกระทำสูงสุดในแต่ละรอบการทดสอบเท่ากับ 120 กิโลพาสคาล ที่ความถี่ 0.5 รอบต่อนาที โดย

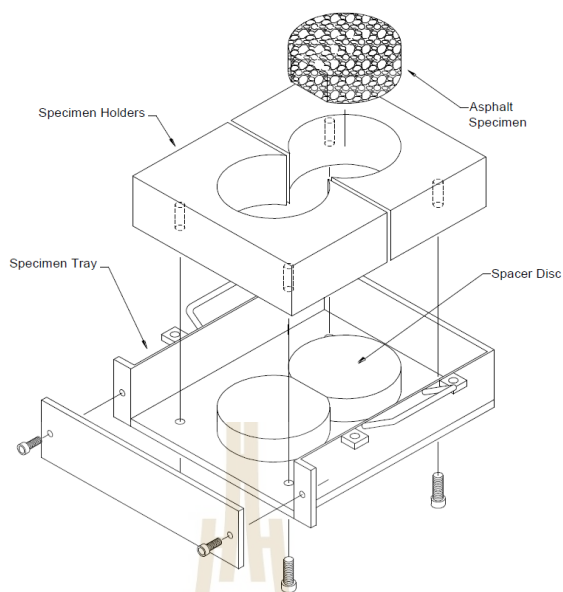
มีระยะเวลาในการให้แรงกระทำ 1 วินาที และมีระยะเวลาพัก 1 วินาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จำนวน 1,800 รอบ แสดงผลเป็นค่าการยุบตัวถาวรสะสมและจำนวนรอบทดสอบ ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทดสอบการยุบตัวแบบถาวร

2.5.7 การทดสอบการเกิดร่องล้อ (Wheel Tracking)

ตามมาตรฐาน AASHTO T 324 (2019) ตัวอย่างทดสอบเป็นแบบทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร หนา 60 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้นต่อกันดังรูปที่ 2.7 การทดสอบใช้ล้อเหล็กจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร กว้าง 47 มิลลิเมตร กดทับลงกับแผ่นตัวอย่างผิวทางทดสอบแล้ววิ่งกลับไปกลับมาจำนวน 10,000 รอบ แรงกดทับมีค่าเท่ากับ 1,500 นิวตัน ซึ่งจะให้ความดันที่ผิวทางเทียบเท่ากับ 707 กิโลพาสคาล หรือเท่ากับแรงดันจากล้อรถบรรทุกทุกขนาดมาตรฐาน ทำการทดสอบแบบแช่น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.8 ในระหว่างที่ทดสอบจะค้นด้วยการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ทุกๆ 1,000 รอบ



รูปที่ 2.7 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการเกิดร่องล้อ



รูปที่ 2.8 การทดสอบการเกิดร่องล้อ

2.5.8 การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance)

ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E 303 (2018) เครื่องทดสอบคือเครื่องบริติส เพนดูลัมเทสเตอร์ (British pendulum tester) แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่กรมทางหลวงใช้

งานในปัจจุบัน โดยจะใช้หลักการวัดแรงเสียดทานด้วยการเหวี่ยงแทนยางสัมพัทธ์พื้นผิวทดสอบ และวัดค่า BPN (British pendulum number)



รูปที่ 2.9 การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้ยางพาราผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อใช้ทำผิวทางแอสฟัลต์ก่อนกรีตได้มีการทดลองมาอย่างยาวนานทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยใช้ยางพาราในรูปของยางแห้ง ยางผง (ยางรีเคลมจากผลิตภัณฑ์ยาง) และน้ำยาง ประเทศไทยได้เริ่มทดลองผสมยางพารากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2500 โดยความร่วมมือระหว่างแขวงทางหลวงสงขลา และสถานีทดลองยางคองหงส์ ชิต ทัศนกุล และคณะ (2510) ได้ทดลองทำยางมาสเตอร์แบตช์ (Masterbatch) ซึ่งเป็นการผสมระหว่างยางแห้ง ชนิดยางเครพดำ กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 : 1 ด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง โดยบดยางธรรมชาติให้น้มนิ่มก่อนเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ริดเป็นแผ่นไว้ใช้งาน ต้มแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้ละลาย (อุณหภูมิไม่ควรเกิน 190 องศาเซลเซียส) จนสมบูรณ์ แล้วเติมยางพาราที่ผสมอยู่ในรูปของ Masterbatch ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งหมด ทดลองปูลาดบนถนนสายหาดใหญ่ - สงขลา บริเวณกิโลเมตรที่ 16 เป็นระยะทาง 100 เมตร ผลการทดลองพบว่ายางพาราช่วยเสริมความแข็งแรงให้ถนน มวลรวมเกาะตัวกันดี ผิวถนนไม่เยิ้มเหนียว

เหมือนใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และได้มีการทดลองซ้ำอีกครั้งในปี พ.ศ. 2505 โดยทดลองปูลาดบนถนนสายหาดใหญ่ - สงขลา บริเวณกิโลเมตรที่ 10+800 - 11+000 เป็นระยะทาง 200 เมตร ซึ่งได้ผลการทดลองในทำนองเดียวกับครั้งแรกและเมื่อเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในปี พ.ศ. 2510 พบว่าถนนที่ปูลาดด้วยแอสฟัลต์ผสมยางพารา ยังไม่มีการซ่อมแซม แต่ถนนที่ปูลาดด้วยแอสฟัลต์ปกติมีการซ่อมแซมแล้ว 1 ครั้ง ในปี พ.ศ. 2507 (ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ, 2544)

Nair et al. (1992) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยใช้ยางแผ่นรมควันที่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงด้วยการละลายยางแผ่นลงใน Fluxing Oil เพื่อทำให้อยู่ในรูปสารละลาย (Liquid Natural Rubber, LNR) แล้วนำไปผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยการผสมแบบให้ความร้อน แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิดเกรดแข็ง และชนิดเกรดอ่อน ผลการศึกษาพบว่าการเติม LNR ช่วยลดค่าการดึงยึด และเพิ่มค่าจุดอ่อนตัว

Narusawa et al. (1992) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยใช้เศษยาง (Flatbark Rubber) ทำให้อยู่ในรูป Rubber – Bitumen Masterbatch ในอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่ากับ 80 : 20 ยางธรรมชาติและแอสฟัลต์ซีเมนต์จะถูกนำมาบดผสมกันด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งก่อนนำไปผสมแบบให้ความร้อน ผลการศึกษาพบว่าการเติมกำมะถันใน Masterbatch ก่อนจะนำไปผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์แบบร้อน ช่วยเพิ่มค่าการดึงยึดให้สูงขึ้น

Fernando and Nadarajah (1992) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยน้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) ชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำยางสด (Field Latex) น้ำยางข้น (Concentrate Latex) และหางน้ำยาง (Skim Latex) ด้วยวิธีการผสมแบบร้อนโดยการพ่นน้ำยางธรรมชาติลงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 300 – 325 องศาเซลเซียส และคนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 นาที การเติมน้ำยางธรรมชาติ ช่วยลดค่าเพนิเทรชันและเพิ่มค่าจุดอ่อนตัว

ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ (2544) ได้ทำการทดลองหาเทคนิคและอัตราส่วนผสมยางพารากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ และทดลองก่อสร้างแปลงทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลความทนทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเทรชัน เกรด 60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพาราธรรมชาติ ยางพาราที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งในรูปยางแผ่นรมควันในอัตราร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 และน้ำยางข้นในอัตราร้อยละ 2 และ 5 ของเนื้อยางแห้งต่อน้ำหนักแอสฟัลต์ การใช้ยางแผ่นรมควันปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำโดยการนำยางแผ่นรมควันมาบดให้หยาบ ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาคัดเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ชนิด AC 60/70 ด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง ที่อัตราเร็วประมาณ 5,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บบ่มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน ผลการวิเคราะห์หลักขณะทางสถานฐานวิทยา

(Morphology) ด้วยการใช้อัลตราซาวด์ที่กึ่งขยาย 40 เท่า แสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 ที่ยังไม่ได้ทำการผสมกับยางแผ่นรมควันมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันสีเหลือง เมื่อผสมยางแผ่นรมควันลงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นน้ำมันอยู่บ้าง ที่อุณหภูมิประมาณ 150 ถึง 170 องศาเซลเซียส ยางแผ่นรมควันจะบวมตัวและละลายในแอสฟัลต์ซีเมนต์ขณะร้อน และเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในแอสฟัลต์ซีเมนต์ นั่นคือสายโซ่ของยางมีการคลายตัว (Disentanglement) จากเดิมที่มีลักษณะพันกันแบบยุ่งเหยิง การใช้ยางพาราผสมในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ต่อน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในแอสฟัลต์ซีเมนต์ดีกว่า การเติมยางธรรมชาติในปริมาณมากกว่าร้อยละ 6 ส่งผลให้เกิดการแยกวัฏภาค (Phase Separation) ระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับยางธรรมชาติอย่างชัดเจน

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับปรุงสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ต่อน้ำหนัก แอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีค่าความหนืดสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ปกติประมาณ 1.7, 3.7 และ 6.6 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่ การใช้ปริมาณยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วนร้อยละ 8 และ 10 นั้นจะมีความหนืดสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ปกติถึงประมาณ 14.5 และ 19.2 เท่า ตามลำดับ ค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นอย่างมากนี้อาจเกิดจากความสามารถในการกระจายตัวของยางแผ่นรมควันในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ลดน้อยลง ปริมาณยางแผ่นรมควันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างส่วนของยางแผ่นรมควันกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยส่วนของยางแผ่นรมควันจะเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนลอยอยู่ที่ผิวหน้าของแอสฟัลต์ซีเมนต์และบางส่วนจะเกาะติดอยู่ในบริเวณแกนของเครื่องผสม ความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์มีผลกระทบต่อการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโรงผสม ความหนืดที่สูงมากเกินไปทำให้เครื่องผสมไม่สามารถพ่นแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อผสมกับวัสดุมวลรวมได้ จนอาจทำให้ระบบการผสมติดขัดและวัสดุส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพไม่ดี

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมยางแผ่นรมควันที่อัตราส่วนร้อยละ 0 – 10
(ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ, 2544)

คุณลักษณะ	หน่วย	อัตราส่วนยางแผ่นรมควันต่อน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์					
		0	2	4	6	8	10
Penetration	-	64	55	49	51	76	78
Softening point	°C	47.5	50.0	60.5	61.0	59.5	56.0
Penetration Index	-	-1.25	-0.96	+1.10	+1.30	+2.11	+1.43
Ductility	cm	150	35	30	32	34	24
Torsional recovery	%	5.6	12.0	20.0	29.0	31.0	24.0
Toughness	kg-cm	67.9	92.2	101.9	109.1	150.6	188.7
Tenacity	kg-cm	32.9	24.3	36.2	46.8	95.2	110.3
Viscosity at 135 °C	cp	360	640	1330	2407	5050	6810
Viscosity at 165 °C	cp	118	205	445	778	1760	2310

ในปี พ.ศ. 2555 ส่วนวิเคราะห์วัสดุทางวิทยาศาสตร์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ได้ทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมยางพาราธรรมชาติร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เรียกว่า Natural Rubber Modified Asphalt Cement (NRMAC) ที่ผลิตโดย บริษัท ทิปโก้ จำกัด(มหาชน) เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60/70) และ Polymer Modified Asphalt Cement (PMA) ตาม มอก.2156-2547 ผลทดลองตามตารางที่ 2.2

เมื่อพิจารณาภาพรวมของสมบัติทั้งหมด สามารถกล่าวได้ว่า NRMAC จะมีสมบัติที่ดีกว่า AC 60/70 ทั้งสมบัติการบดงอและการยืดหยุ่นตัวเพิ่มขึ้น ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดน้อยลง แต่ความสามารถในการรับแรงที่กระทำจะใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติกับ PMA อาจกล่าวได้ว่า NRMAC มีสมบัติความเป็น Viscoelastic การบดงอและการยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง AC 60/70, NRMAC และ PMA (ส่วนวิเคราะห์วัสดุทางวิทยาศาสตร์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2555)

คุณลักษณะ	AC 60/70	NRMAC	PMA	Specification TIS 2156- 2547	วิธีทดสอบ
มอดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์					
เพนิเทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที (0.1 มิลลิเมตร)	67	54	63	55 ถึง 70	มอก. 1201
จุดอ่อนตัว ไม่น้อยกว่า (องศาเซลเซียส)	51.2	55.6	79.2	70	มอก. 1216
ความยืดดึง ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที ไม่น้อยกว่า (เซนติเมตร)	89	80	92	55	มอก. 1202
ความยืดหยุ่นกลับ (elastic recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า (ร้อยละ)	25	65	93	70	ASTM D 6084
ความเหนียวและทนเชิด (Toughness/Tenacity) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเหนียว ไม่น้อยกว่า (กิโลกรัม.เซนติเมตร) ทนเชิด ไม่น้อยกว่า (กิโลกรัม.เซนติเมตร)	55 6	158 84	304 229	170 100	ASTM D 5801

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง AC 60/70, NRMAC และ PMA (ส่วนวิเคราะห์วัสดุทางวิทยาศาสตร์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2555) (ต่อ)

คุณลักษณะ	AC 60/70	NRMAC	PMA	Specification TIS 2156-2547	วิธีทดสอบ
ความหนืด บรูกฟิลด์ อัตราเลื่อน 18.6 วินาที ⁻¹ แกน (spindle) 21 ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ไม่นิ่มเกิน(มิลลิพาสคัล.วินาที) ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ไม่นิ่มเกิน(มิลลิพาสคัล.วินาที)	650 185	1060 265	1430 400	3000 1000	ASTM D 4402
เสถียรภาพต่อการเก็บที่ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส ค่าความแตกต่างของจุดอ่อนตัวระหว่างบนและล่าง ของหลอดทดสอบ ไม่นิ่มเกิน (องศาเซลเซียส)	0.5	0.5	1.0	2	ASTM D 5892 มอก. 1216
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.03	1.01	1.00	1.00 ถึง 1.05	ASTM D 70
จุดวาบไฟ ไม่น้อยกว่า (องศาเซลเซียส)	272	315	332	220	มอก.1182 เล่ม 2
การละลายในทอลูอิน ไม่น้อยกว่า (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	99.95	99.90	99.80	99.0	ASTM D 5546
ความต้านแรงเฉือนไดนามิก $G^*/\sin\delta$ ที่อุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส 10 rad/s ไม่น้อยกว่า (กิโลกรัมพาสคัล)	1.2	1.7	2.6	1.0	AASHTO TP5

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง AC 60/70, NRMAC และ PMA (ส่วนวิเคราะห์วัสดุทางวิทยาศาสตร์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, 2555) (ต่อ)

คุณลักษณะ	AC 60/70	NRMAC	PMA	Specification TIS 2156-2547	วิธีทดสอบ
น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน ไม่เกิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.4	0.2	0.1	0.5	ASTM D 2872
กากที่เหลือจากการอบ					
เพนแทรกชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที ไม่น้อยกว่า (ร้อยละของเพนแทรกชันเดิม)	63.0	70.9	75.9	70	มอก. 1201
จุดอ่อนตัวแตกต่างจากเดิม (องศาเซลเซียส)	+8.0	+2.9	-1.4	-4 ถึง +6	มอก. 1216
ความยืดดึง ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่ออนาที ไม่น้อยกว่า (เซนติเมตร)	8	14	76	40	มอก. 1202
ความยืดหยุ่นกลับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า (%)	40	45	90	60	ASTM D 6084

ในปี 2556 ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และ อุดลย์ ณ.วิเชียร ได้ทดลองทำการนำยางพาราชนิดยางแห้ง (Masterbatch) ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยปริมาณเนื้อยางร้อยละ 5 ต่อน้ำหนักของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนแทรกชันเกรด 60 ถึง 70 พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยยางพาราในปริมาณเนื้อยางร้อยละ 5 มีค่า Toughness, Tenacity, Viscosity และ Penetration index สูงขึ้น

และมีค่าความทนทานเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยยางพาราด้วยปริมาณเนื้อยางร้อยละ 5

สมบัติ	อัตราส่วนยางพาราชนิดยางแห้ง	
	0%	5%
ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point)	46.0	55.3
ความไวต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Penetration index)	-1.50	+0.41
ค่าการคืนตัวกลับ (Torsional recovery)	2.8	21.1
ความเหนียว (Toughness)	88.77	117.96
แรงยึดจนขาด (Tenacity)	37.55	54.38

ในปี 2559 เทคเกอร์ดี ไชยลาภ ได้ทำการผสมยางธรรมชาติชนิดน้ำยางข้น (Concentrated latex) แบบ High ammonia (HA) ในปริมาณเนื้อยางร้อยละ 0 5 8 และ 10 โดยน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ เบนิตเรชันเกรด 60 ถึง 70 พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางข้นในปริมาณเนื้อยางร้อยละ 8 เป็นส่วนผสม มีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength), ค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus) และความต้านทานการยุบตัวถาวร (Permanent deformation) สูงที่สุด

Siriphun et al. (2016) ศึกษาองค์ประกอบของหินชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของประเทศไทย พบว่า แม้องค์ประกอบของหินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลต์จะมี SiO_2 เหมือนกัน แต่มีองค์ประกอบของ SiO_2 ต่างกัน โดยหินแกรนิตมี SiO_2 ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นแร่อามอร์ฟัสซิลิเกตและแร่ควอทซ์ผสมกัน ต่างจาก SiO_2 ของหินปูนและหินบะซอลต์ ที่มีแร่อามอร์ฟัสซิลิเกตเป็นองค์ประกอบทั้งหมด ซึ่ง SiO_2 ที่มีแร่อามอร์ฟัสซิลิเกตและแร่ควอทซ์เป็นองค์ประกอบจะช่วยให้หินมีความทนทานต่อแรงกระแทกและแรงบดอัด แต่หินจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและการขีดสีน้อยกว่า SiO_2 ที่มีแร่อามอร์ฟัสซิลิเกตเป็นองค์ประกอบทั้งหมด นอกจากนี้ หินปูนยังมี CaO เป็นองค์ประกอบคู่กับ SiO_2 อยู่ด้วย ซึ่งต่างจากหินแกรนิตและหินบะซอลต์ที่มี Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบคู่กับ SiO_2

กอบชัยเกิด จันทรตรง (2557) ศึกษาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่า สมบัติของมวลรวม ได้แก่ ขนาดคละ และค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวม มีผลกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม เนื่องจาก อนุภาคมวลรวมขนาดเล็กต้องการแอสฟัลต์สำหรับผสมมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ กล่าวคือ เมื่อปริมาตรเท่ากัน มวลรวมขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมขนาดใหญ่ จึงต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์มากกว่า เพื่อเคลือบผิวอนุภาคของมวลรวม สำหรับมวลรวมที่มีค่าดูดซึมน้ำมาก จะต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้นเพื่อชดเชยส่วนที่ถูกดูดซึมไป

กรมทางหลวงชนบท (2557) ได้ศึกษาชนิดของมวลรวมทั่วไป ที่ใช้ผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลต์ พบว่า หินปูนสามารถรับแรงดึงได้สูง แต่มีกำลังในการรับแรงกด ที่ต่ำกว่าหินแกรนิต ในขณะที่ หินแกรนิตสามารถรับแรงกดได้สูง แต่มีกำลังรับแรงดึงที่ต่ำกว่าหินปูน เนื่องจาก หินแกรนิตมีผิวเป็นผลึกของ SiO_2 ซึ่งมีลักษณะเป็นผิวเนียนเรียบ

Wang Y. et al. (2014) ได้ศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ส่งผลต่อการล้า พบว่า แอสฟัลต์ที่มีค่าความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) สูง จะช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความต้านทานการล้าสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ ได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนไดนามิก เมื่อพิจารณาค่า $G^*/\sin\delta$ ที่ได้จากการทดสอบ พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีค่า $G^*/\sin\delta$ สูง จะช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความต้านทานการขูดถูตัวถาวรสูง และยังทนทานต่อการเกิดร่องล้อสูงขึ้นด้วย

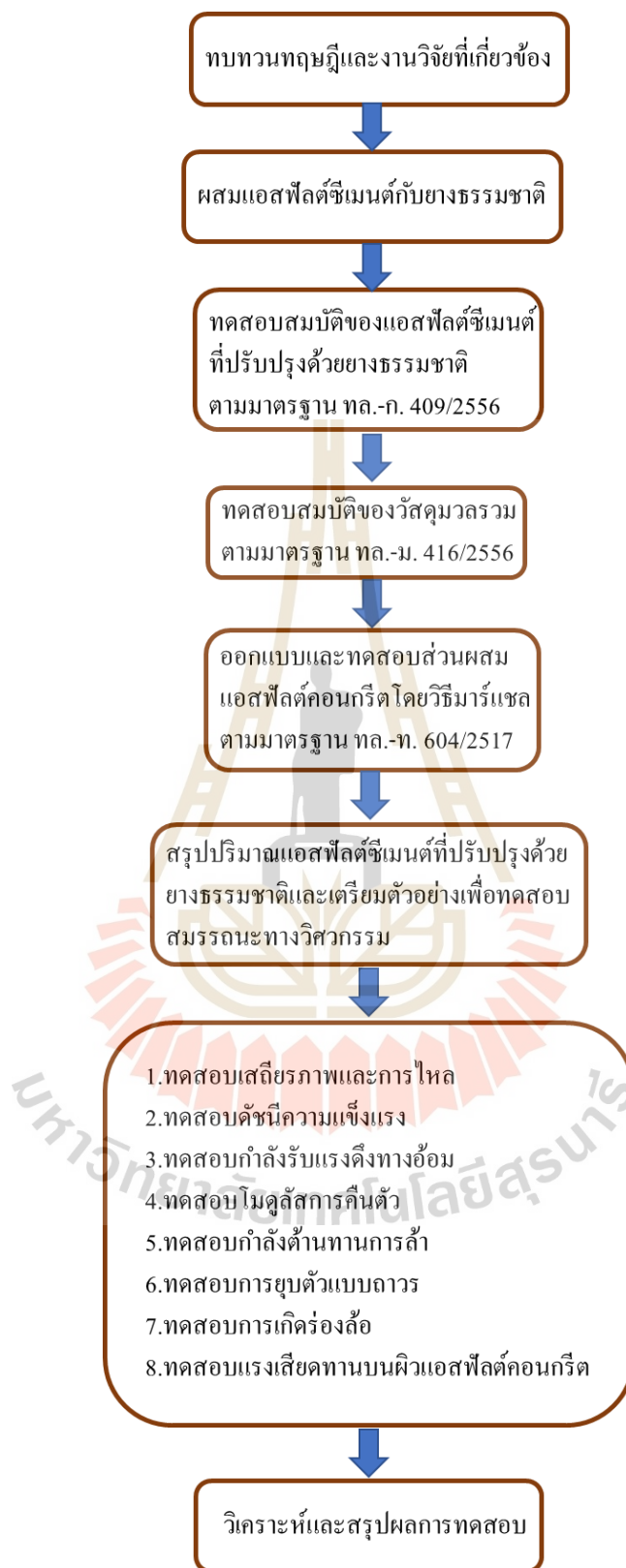
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Wearing course) ที่มีขนาดมวลรวมใหญ่สุด 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ใช้สำหรับชั้นผิวทางหนา 40 ถึง 70 มิลลิเมตร วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด ได้แก่ หินปูนได้จากโรงโม่หินบริษัทศิลาภูพระลานจำกัด ต่าบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี หินแกรนิตได้จากโรงโม่หินเพชรสยามศิลาตราด (บริษัทไออาร์พีซีจำกัด) และหินบะซอลต์ได้จากโรงโม่หินศิลาชัย จังหวัดบุรีรัมย์ และใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตอร์ชันเกรด 60 ถึง 70 จากบริษัททีปโก้แอสฟัลต์จังหวัดนครราชสีมาเป็นวัสดุเชื่อมประสานและน้ำยางข้นจากบริษัท ไทยอัสเทิร์นกรุ๊ป

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556 “มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ” โดยมีแผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 และระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.1

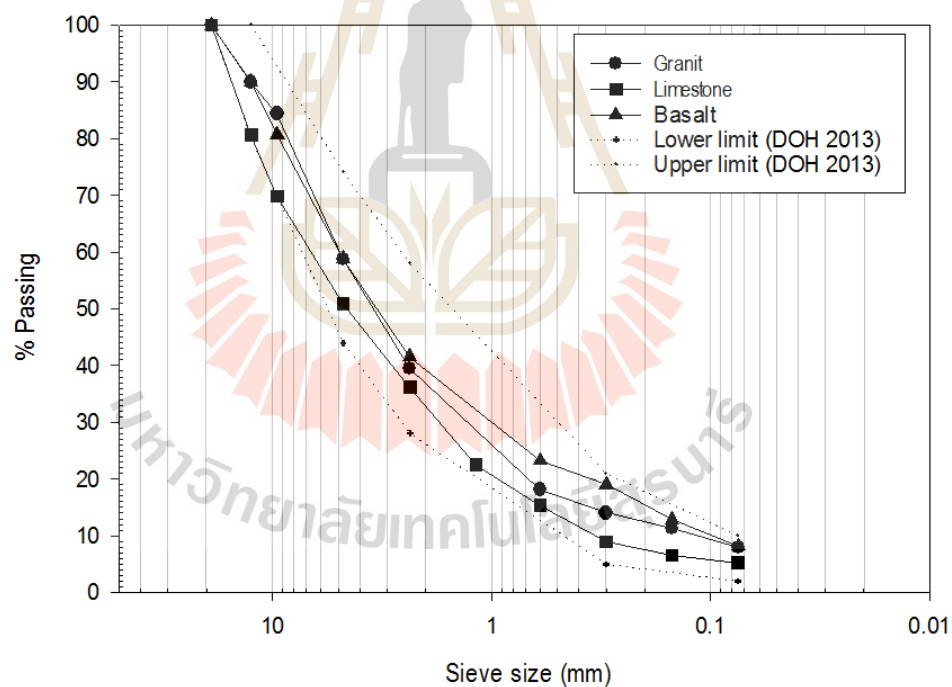


รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 มวลรวม

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นมวลรวมที่ใช้ทั่วไป ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย ได้แก่ หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ โดยมวลรวมทั้ง 3 ชนิด มีการกระจายตัวของขนาดคละดังรูปที่ 3.2 เมื่อพิจารณาปริมาณมวลรวมละเอียด (ขนาดที่เล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร) จะเห็นว่า หินบะซอลต์จะมีปริมาณของมวลรวมละเอียดมากที่สุด ขณะที่ หินแกรนิต และหินปูน มีปริมาณของมวลรวมละเอียดน้อยกว่าตามลำดับ ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมละเอียดสูง จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรง และมีส่วนผสมที่แน่น โดยมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ต้องมีสมบัติและขนาดคละ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556 “มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ” แสดงดังตารางที่ 3.2 ถึง 3.3



รูปที่ 3.2 ขนาดคละของมวลรวมของหินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลต์

ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของมวลรวมทั้ง 3 ชนิด ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556

คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด		มาตรฐานทดสอบ
		มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	
Sand equivalent	ร้อยละ	-	> 60	
Soundness	ร้อยละ	< 9	< 9	ทล.-ท. 213
Los Angeles abrasion	ร้อยละ	< 35	-	ทล.-ท. 202
Coating and stripping	ร้อยละ	> 95	-	AASHTO T 182
Flakiness index		< 35	-	ทล.-ท. 210
Elongation index		< 35	-	ทล.-ท. 211
Aggregate crushing value	ร้อยละ	< 25	-	BS 812
Aggregate impact value	ร้อยละ	< 25	-	ทล.-ท. 208

ตารางที่ 3.3 ขนาดของมวลรวมตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556

ชั้นทาง		Wearing course
ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร	12.5
	นิ้ว	1/2
ความหนา (มิลลิเมตร)		40-70
มิลลิเมตร	นิ้ว	ปริมาณผ่านตะแกรงร้อยละ โดยน้ำหนัก
37.5	1 1/2	-
25.0	1	-
19.0	3/4	100
12.5	1/2	80-100
9.5	3/8	-
4.75	เบอร์ 4	44-74
2.36	เบอร์ 8	28-58
1.18	เบอร์ 16	-
0.600	เบอร์ 30	-
0.300	เบอร์ 50	5-21
0.150	เบอร์ 100	-
0.075	เบอร์ 200	2-10
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ (ร้อยละ โดยน้ำหนักของมวลรวม)		3.0-7.0

3.2.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตรชันเกรด 60 ถึง 70 (AC 60/70)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตรชันเกรด 60 ถึง 70 ที่ได้จากบริษัททีปโก้แอสฟัลต์ มีสมบัติที่ผ่านการทดสอบจากโรงงาน แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตรชันเกรด 60 ถึง 70

Properties	Standard test	Units	Specifications	AC60/70
Penetration	ASTM D 5	-	60-70	67
Flash point	ASTM D 92	°C	>232	332
Softening point	ASTM D 36	°C	45-55	47.8
Ductility	ASTM D 113	cm	>100	150
Solubility in trichloroethylene	ASTM D 2042	% weight	>99	99.97
Specific gravity	ASTM D 70	-	-	1.031
Thin film heating for 5 hrs at 163 °C				
Weight loss	ASTM D 1754	% weight	<0.8	-0.12
Penetration	ASTM D 5	-	>54	71.1
Ductility	ASTM D 113	cm	>50	150

3.2.3 นํ้ายางข้น (Concentrated latex, CL)

นํ้ายางข้นที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากบริษัท ไทยอีสเทิร์นกรุ๊ป มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีกลิ่นฉุน เนื่องจากมีแอมโมเนียผสมอยู่ โดยมีสมบัติที่ผ่านการทดสอบจากโรงงานแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติพื้นฐานของน้ำยางข้น

Properties	Test methods	Test results
Total solid content	ISO 124:2014	61.74
Dry rubber content	ISO 126:2005	60.34
Non-rubber content	-	1.40
Alkalinity as ammonia (on total weight)	ISO 125:2011	0.30
Alkalinity as ammonia (on water phase)	-	0.78
Volatile fatty acid number (VFA number)	ISO 506:1992	0.0322
Mechanical stability time @ 55% TS, seconds	ISO35:2004	773
Magnesium content on solids, (ppm)	ISO 17403:2014	16.26
KOH number	ISO 127:2012	0.60
pH of latex	ISO 976:2013	10.12
Specific gravity	ISO 705:2016	0.94
Coagulum content	ISO 706:2004	0.003
Viscosity (Spindle no. 1, 60 rpm) @61.50% TS, cPs	ISO 1652:2011	69.0
Color of latex	In house	White
Aging days		27

3.3 การผสมน้ำยางข้นกับแอสฟัลต์ซีเมนต์

น้ำยางข้น (Concentrated latex, CL) ที่ใช้ในการวิจัยมีปริมาณเนื้อยาง (Dry rubber content, DRC) ร้อยละ 60.34 โดยน้ำยางข้นที่ใช้ในการวิจัยกำหนดปริมาณเนื้อยางไว้ที่ร้อยละ 0 และ 3 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ การผสมต้องคำนึงถึงอุณหภูมิและความถี่ของใบพัดที่ทำการผสมตัวอย่าง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมอยู่ที่ 170 องศาเซลเซียส และความถี่ของใบพัดในการผสมตัวอย่างอยู่ที่ 180 รอบต่อนาที การผสมต้องใช้ความระมัดระวังเนื่องจากน้ำยางขข้นมีแอมโมเนียเป็นส่วนผสม เมื่อโดนความร้อนจะเกิดแรงดันสูง จึงต้องค่อยๆ เติมน้ำมันในส่วนที่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุระหว่างการผสม การผสมมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมแอสฟัลต์ซีเมนต์และน้ำยางข้นตามจำนวนที่คำนวณไว้ทำการผสมแต่ละครั้งจะกำหนดน้ำหนักของตัวอย่างที่ผสมแล้วเสร็จ 10 กิโลกรัม โดยใช้ปริมาณเนื้อยางร้อยละ 3 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์
2. ใส่แอสฟัลต์ซีเมนต์ตามจำนวนที่เตรียมไว้ในเครื่องผสมตัวอย่าง และให้ความร้อนกับแอสฟัลต์ซีเมนต์จนมีอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นเปิดใบพัดเพื่อทำการกวนตัวอย่าง

3. ค่อย ๆ ใส่น้ำอย่างช้า ๆ จำนวน 5 มิลลิลิตร ทุก ๆ 10 นาที จนครบจำนวนที่เตรียมไว้ คูณอุณหภูมิในเครื่องผสมให้อยู่ที่ 170 องศาเซลเซียส ตลอดกระบวนการกวนตัวอย่าง จนกว่าตัวอย่างจะเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

4. เมื่อตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันแล้วให้รีบบรรจุตัวอย่างเข้าภาชนะทันที จากนั้น เก็บภาชนะที่บรรจุตัวอย่างไว้ในตู้อบ โดยอบภาชนะที่บรรจุตัวอย่างแล้วไว้ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ประมาณ 3-4 ชั่วโมง จากนั้น จึงนำไปใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไป

3.4 การทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

การทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนดของ ทล.-ก. 409/2556 “ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ” แอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติต้องไม่มีสารแปลกปลอมอื่นในส่วนผสมนอกจากยางธรรมชาติที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติและสารผสมเพิ่ม ต้องไม่เกิดการแยกตัวในขณะให้ความร้อนที่ 170 องศาเซลเซียส หรือหลังจากที่ปล่อยให้เย็น และต้องไม่นำมาผสมเพิ่มภายหลัง นอกจากนั้น ต้องเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะการกระจายของเนื้อยางธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอ ปราศจากน้ำมัน และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ต้องไม่มีฟองอากาศ รายการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ

ลำดับที่	คุณลักษณะ	หน่วย	ข้อกำหนด	มาตรฐานทดสอบ
แอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ				
1	เพนิเทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	-	50-70	มอก. 1201
2	จุดอ่อนตัว	องศาเซลเซียส	>50	มอก. 1216
3	จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	>220	มอก. 1182 เล่ม 2
4	ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร	ร้อยละ	>40	ASTM D 6084

ตารางที่ 3.6 ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ (ต่อ)

ลำดับ ที่	คุณลักษณะ	หน่วย	ข้อกำหนด	มาตรฐานทดสอบ
5	เสถียรภาพต่อการเก็บที่ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส ค่าความแตกต่างของจุดอ่อนตัวระหว่างบนและล่างของหลอดทดสอบ	องศาเซลเซียส	<4	IS 15462 และ มอก. 1216
6	ความหนืดบรูคฟิลด์ อัตราเร็ว 18.6 วินาที ¹ แกน (Spindle) 21 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	มิลลิพาสคัลวินาที	200-600	ASTM D 4402
7	ความต้านทานแรงเฉือนไดนามิก $G^*/\sin\delta$ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 10 rad/s	กิโลพาสคาล	>1.0	AASHTO T 315
8	ปริมาณเนื้อยางธรรมชาติ (Rubber content)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	>5.0	Certificate
ภาคที่เหลือจากการอบ (Test on Residue from Thin Film Oven Test)				
9	น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	<1.0	มอก. 1223
10	เพนิเทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	ร้อยละของเพนิเทรชันเดิม	>60	มอก. 1201
11	จุดอ่อนตัวแตกต่างจากเดิม	องศาเซลเซียส	±6	มอก. 1216
12	ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร	ร้อยละ	>25	ASTM D 6084

*หมายเหตุ มาตรฐานวิธีการทดสอบตาม มอก. ASTM AASHTO และ IS ให้ใช้เป็นปีล่าสุด

3.5 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล

3.5.1 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

เป็นขั้นตอนออกแบบส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการออกแบบและการเตรียมตัวอย่างเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ทล.-ท. 604/2517 “วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล” ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมไว้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร ความหนามาตรฐานเท่ากับ 63.5 มิลลิเมตร โดยจะเริ่มจากการกำหนดปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ไว้ที่ร้อยละ 3 ถึง 7 (ทล.-ม. 416/2556) นำมาผสมกับมวลรวม และนำไปบดอัดด้วยค้อนมาร์แชลด้านละ 75 ครั้ง หลังจากที่ได้ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว นำไปทดสอบเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่น (Density) ร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) ร้อยละช่องว่างอากาศ (Air void) และร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (VFB)

3.5.2 การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

การทดสอบส่วนผสมจะประกอบไปด้วย การทดสอบเสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) และดัชนีความแข็งแรง (Strength index) โดยมีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

1. การทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล (Stability and flow) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 1559 เป็นการกดตัวอย่างที่ด้านความสูงของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต โดยตัวอย่างจะถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงนำมาทดสอบทันที เสถียรภาพ คือกำลังของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่รับแรงกดได้ ก่อนที่ด้านที่ถูกบดอัดด้วยค้อนมาร์แชล เกิดการวิบัติ ส่วนการไหล คือ ระยะการยุบตัวสูงสุดก่อนที่ตัวอย่างจะวิบัติ ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องออกแบบให้มีกำลังมากพอในการรับน้ำหนักการจราจรได้ แต่ควรคำนึงไว้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีเสถียรภาพมากเกินไป อาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็ง และขาดความยืดหยุ่น ซึ่งอาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเสียหายได้ง่าย (กอบชัย เกิดจันทร์ตรง, 2557)

2. การทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) อ้างอิงตามวิธีทดสอบของกรมทางหลวง ทล.-ท. 413/2554 เป็นการทดสอบเพื่อหาลำดับด้านทานการหลุดลอกของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างที่แช่ในสารละลายเกลือแอง และไม่แช่ในสารละลายเกลือแอง จากนั้นนำตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มไปกดทดสอบเสถียรภาพ และนำค่าเสถียรภาพของตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มมาเปรียบเทียบกัน

นอกจากนี้ มาตรฐานของกรมทางหลวง ทล.-ม. 416/2556 “มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ” ได้กำหนดขอบเขตสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์คอนกรีตไว้แสดงดังตารางที่ 3.7 เมื่อแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556 ให้ทำการเปลี่ยนสัดส่วนของมวลรวมและทำการทดสอบใหม่ทั้งหมด

ตารางที่ 3.7 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ

คุณลักษณะ	Wearing Course ขนาด 12.5 mm.
Blows	75
Stability (N)	9786
(lb)	2200
Flown 0.01 in	9-17
Flown 0.25 mm.	2-4
Percent Air Voids	3-5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min	14
Stability / Flow Min N/0.25 mm.	750
lb/0.01 in	170
Percent Strength Index Min	75

หลังจากทราบสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว พิจารณาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4 เพื่อนำปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์นี้ไปใช้เตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะทางวิศวกรรม

3.6 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering performance)

3.6.1 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)

- มาตรฐาน ASTM D 6931
- อุณหภูมิทดสอบคือ 25, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส
- กดตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ทดสอบแบบสถิต
- บันทึกหน่วยแรงสูงสุด
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อุณหภูมิ, 1 ชนิดและปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่าง

ทดสอบ

3.6.2 การหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)

- มาตรฐาน ASTM D 4123-82 และ AASHTO TP31-94
- อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส
- ให้หน่วยแรงกระทำเท่ากับร้อยละ 15 ของหน่วยแรงดึงทางอ้อมสูงสุด ที่ 25 องศา

เซลเซียส

- ทดสอบแบบพลวัตที่ความถี่ 1 เฮิรต์ จำนวน 200 รอบ
- วัดการยุบตัวในแนวตั้งและแนวนอน
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดและปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างทดสอบ

3.6.3 การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue)

- มาตรฐาน BS EN12697-24
- อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส
- ทดสอบแบบพลวัตที่ความถี่ 1 เฮิรต์
- หน่วยแรงกระทำ 250, 300 และ 350 กิโลพาสคาล
- วัดการยุบตัวในแนวตั้ง
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 หน่วยแรงกระทำ, 1 ชนิดและปริมาณเนื้อเยื่อของ

ตัวอย่างทดสอบ

3.6.4 การหาค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต (Permanent deformation)

- มาตรฐาน AS 2891.12.1
- อุณหภูมิการทดสอบ 50 องศาเซลเซียส
- ทดสอบแบบพลวัตที่ความถี่ 0.5 เฮิรต์
- หน่วยแรงเท่ากับ 200 กิโลพาสคาล

- วัดการยุบตัวในแนวตั้ง
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดและปริมาณเนื้อยางของตัวอย่างทดสอบ

3.6.5 การทดสอบการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต (Rutting resistance)

- มาตรฐาน AASHTO T 324
- ทดสอบในน้ำที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส
- ทดสอบแบบพลวัตที่ความเร็วล้อเท่ากับ 26 เมตรต่อวินาที
- ทดสอบทุก ๆ 1,000 เพื่อบันทึกค่าการยุบตัวและทดสอบแรงเสียดทานของผิว

ตัวอย่าง

- ทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดและปริมาณเนื้อยางของตัวอย่างทดสอบ

3.6.6 การทดสอบหาค่าแรงเสียดทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Skid resistance by British pendulum)

- มาตรฐาน ASTM E303

จากการสรุปตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแต่ละการทดสอบ สามารถสรุปจำนวนตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 สรุปการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การดำเนินงาน	มวลรวม	นํ้ายางพาราชั้น (ปริมาณเนื้อยางต่อ ปริมาณแอสฟัลต์ ซีเมนต์)	อุณหภูมิ	ระดับ หน่วย แรง	จำนวนตัวอย่าง ทดสอบต่อหนึ่ง อัตราส่วนผสม (ตัวอย่าง)	จำนวน ตัวอย่าง ทั้งหมด
การผสมยาง ธรรมชาติกับ แอสฟัลต์ ซีเมนต์	-	3	-	-	1	1
การทดสอบ สมบัติของ แอสฟัลต์ ซีเมนต์	-	0, 3	-	-	1	2
การทดสอบ สมบัติของมวล รวม	หินแกรนิต หินปูน หินปะ ซอลต์	0, 3	-	-	1	3

ตารางที่ 3.8 สรุปการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

การดำเนินงาน	มวลรวม	น้ำยางพาราชั้น (ปริมาณเนื้อยางต่อ ปริมาณแอสฟัลต์ ซีเมนต์)	อุณหภูมิ	ระดับ หน่วย แรง	จำนวนตัวอย่าง ทดสอบต่อหนึ่ง อัตราส่วนผสม (ตัวอย่าง)	จำนวน ตัวอย่าง ทั้งหมด
การออกแบบ ส่วนผสม แอสฟัลต์ คอนกรีต	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	-	-	15	90
การทดสอบ เสถียรภาพและ การไหล	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	60	-	3	18
การทดสอบค่า ดัชนีความ แข็งแรง	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	-	-	6	36
การทดสอบ กำลังรับแรงดึง ทางอ้อม	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	25, 40, 50, 60	-	3	72
การหาค่า โมดูลัสการคืน ตัว	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	25	-	3	18
การทดสอบการ ล้าจากแรงดึง ทางอ้อม	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	-	250, 300, 350	3	54
การหาค่าการ ยุบตัวถาวร	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	50	-	3	18

ตารางที่ 3.8 สรุปการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

การดำเนินงาน	มวลรวม	น้ำยางพาราชั้น (ปริมาณเนื้อยางต่อ ปริมาณแอสฟัลต์ ซีเมนต์)	อุณหภูมิ	ระดับ หน่วย แรง	จำนวนตัวอย่าง ทดสอบต่อหนึ่ง อัตราส่วนผสม (ตัวอย่าง)	จำนวน ตัวอย่าง ทั้งหมด
การทดสอบการ เกิดร่องล้อ	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	50	-	2	12
การหาค่าแรง เสียดทานของ ผิวทาง แอสฟัลต์	หินแกรนิต หินปูน หินบะ ซอลต์	0, 3	-	-	2	12

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของมวลรวม

สมบัติพื้นฐานของมวลรวม (หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์) ที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย ค่าความคงทน (Soundness) ค่าความสึกหรอ (Los Angeles abrasion) ปริมาณการแตกหักจากการกระแทก (Aggregate impact value, AIV) ปริมาณการแตกหักจากการบดอัด (Aggregate crushing value, ACV) และค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ (Asphalt absorption) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความคงทน (Soundness) พิจารณาค่าร้อยละการสูญเสีย (% Loss) เมื่อทดสอบด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟต อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556 กำหนดไว้ว่าปริมาณค่าร้อยละการสูญเสียต้องไม่เกินร้อยละ 9 พบว่า หินบะซอลต์ หินแกรนิต และหินปูนมีค่าร้อยละการสูญเสียร้อยละ 1.8 1.9 และ 2.4 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หินบะซอลต์มีความคงทนมากที่สุด เนื่องจาก SiO_2 ของหินบะซอลต์มีแร่แอมอร์ฟัสซิลิเกตเป็นองค์ประกอบทั้งหมด ส่วน SiO_2 หินแกรนิตมีแร่แอมอร์ฟัสซิลิเกตและแร่ควอตซ์เป็นองค์ประกอบ ทำให้ความคงทนของหินบะซอลต์มากกว่า หินแกรนิต ในขณะที่ หินปูนมีความคงทนน้อยที่สุด เนื่องจาก หินปูนประกอบไปด้วย SiO_2 และ CaO ซึ่งต่างจากหินบะซอลต์ และหินแกรนิต ที่ประกอบไปด้วย SiO_2 และ Al_2O_3 (Siriphun et al., 2016)

2. ค่าความสึกหรอ (Los Angeles abrasion) พิจารณาค่าส่วนที่เสียหายจากการขัดสี อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556 กำหนดไว้ว่าค่าความสึกหรอต้องไม่เกินร้อยละ 35 พบว่า หินบะซอลต์ หินแกรนิต และหินปูนมีส่วนที่เสียหายร้อยละ 19.1 20.9 และ 24.6 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หินบะซอลต์สามารถทนต่อการขัดสีได้ดีที่สุด

3. ปริมาณการแตกหักจากการกระแทก (Aggregate impact value, AIV) พิจารณาค่าส่วนที่เสียหายจากการกระแทกทันทีทันใด อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556 กำหนดไว้ว่าปริมาณของส่วนที่เสียหายต้องไม่เกินร้อยละ 25 พบว่า หินแกรนิต หินบะซอลต์ และหินปูน มีส่วนที่แตกหักอยู่ร้อยละ 14.9 17.6 และ 20.2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หินแกรนิตมีความทนทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุด

4. ปริมาณการแตกหักจากการบดอัด (Aggregate crushing value, ACV) พิจารณาส่วนที่เสียหายจากการบดอัด อ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556 กำหนดไว้ว่าปริมาณของส่วนที่เสียหายต้องไม่เกินร้อยละ 25 พบว่า หินแกรนิต หินบะซอลต์ และหินปูน มีส่วนที่แตกหักอยู่ร้อยละ 14.9 17.6 และ 20.8 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หินแกรนิตมีความทนทานต่อการบดอัดสูงที่สุด

5. ค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ (Asphalt absorption) พิจารณาร้อยละการดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ของมวลรวม พบว่า หินบะซอลต์ หินปูน และหินแกรนิต มีค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ร้อยละ 0.38 0.25 และ 0.24 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หินบะซอลต์มีค่าการดูดซึมสูงที่สุด หรืออีกนัยหนึ่งคือ มวลรวมที่มีค่าการดูดซึมสูงจะทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตยึดเกาะกันได้ดีขึ้น

ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของมวลรวมเปรียบเทียบกับมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 416/2556) แสดงดังตารางที่ 4.1 จะเห็นว่ามวลรวมทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สามารถใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติของมวลรวมตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556

Properties	Unit	Specifications	Granite	Limestone	Basalt
Soundness	%	< 9	1.9	2.4	1.8
Los Angeles abrasion value, LA	%	< 35	20.9	24.6	19.1
Flakiness index	%	< 35	18.0	16.0	16.0
Elongation index	%	< 35	16.0	20.0	25.0
Aggregate impact value, AIV	%	< 25	16.0	20.2	16.1
Aggregate crushing value, ACV	%	< 25	14.9	20.8	17.6
Coating and stripping	%	> 95	98	97	96
Asphalt absorption	%	-	0.25	0.24	0.38

4.2 ผลการทดสอบสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์

สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิทรชันเกรด 60 ถึง 70 (AC60/70) และแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำพาราวยางชั้น เมื่อพิจารณา ค่าเพนิทรชัน (Penetration) ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ค่าความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) และค่าความต้านทานแรงเฉือนไดนามิก (Dynamic shear) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) อ้างอิงตามข้อกำหนด ทล.-ก. 409/2556 ระบุว่า ค่าเพนิเทรชันควรอยู่ระหว่าง 50 ถึง 70 โดยค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีค่าเท่ากับ 67 และ 56 ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีค่าน้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 แสดงให้เห็นว่า ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ของเนื้อยางในน้ำยางพาราชันช่วยให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความสามารถต้านทานการเจาะทะลุเพิ่มขึ้น หรือสรุปได้ว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีความแข็งแรงมากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70

2. ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) อ้างอิงตามข้อกำหนด ทล.-ก. 409/2556 ระบุว่า อุณหภูมิที่จุดอ่อนตัวควรมีค่ามากกว่า 50 องศาเซลเซียส ผลการศึกษา พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีอุณหภูมิที่จุดอ่อนตัวเท่ากับ 47.8 และ 59.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นว่า อุณหภูมิที่จุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ต่ำกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน แสดงให้เห็นว่า ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ที่อุณหภูมิสูง ของเนื้อยางในน้ำยางพาราชันช่วยให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความไวต่ออุณหภูมิต่ำลง หรือสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิเดียวกัน แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 จะอ่อนตัวมากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน ทำให้กำลังในการยึดเกาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70

3. ค่าความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) อ้างอิงตามข้อกำหนด ทล.-ก. 409/2556 ระบุว่า ค่าความยืดหยุ่นกลับควรมีค่ามากกว่าร้อยละ 40 ผลการศึกษา พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีค่าความยืดหยุ่นกลับร้อยละ 25 และ 65 ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าความยืดหยุ่นกลับของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 มีค่าน้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน แสดงให้เห็นว่า ความยืดหยุ่น (Elasticity) และความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของเนื้อยางในน้ำยางพาราชันช่วยให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น หรือสรุปได้ว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน ทนทานต่อแรงดึง และสามารถคืนตัวโดยไม่เสียรูปได้ดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70

4. ความต้านทานแรงเฉือนไดนามิก (Dynamic shear) อ้างอิงตามข้อกำหนด ทล.-ก. 409/2556 ระบุว่า ค่าความต้านทานแรงเฉือนไดนามิกควรมีค่ามากกว่า 1 กิโลพาสคาล ผลการศึกษา พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีค่าความต้านทานแรงเฉือนไดนามิกเท่ากับ 1.2 และ 6.654 ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าความต้านทานแรงเฉือนไดนามิกของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 มีค่าน้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน

แสดงให้เห็นว่า ความเหนียวติดกัน (Tack) และความยืดหยุ่น (Elasticity) ของเนื้อยางในน้ำยางพาราชั้น ช่วยให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความทนทานต่อแรงเสียดทานมากขึ้น

ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์เปรียบเทียบกับข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติของกรมทางหลวง (ทล.-ก. 409/2556) แสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง สามารถใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้

ตารางที่ 4.2 สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามมาตรฐาน ทล.-ก. 409/2556

คุณลักษณะ	หน่วย	ข้อกำหนด	AC60/70	CLMA
เพนิเทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	-	50-70	67	56
จุดอ่อนตัว	องศาเซลเซียส	>50	47.8	59.5
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	>220	332	250
ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร	ร้อยละ	>40	25	65
เสถียรภาพต่อการเก็บที่ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส ค่าความแตกต่างของจุดอ่อนตัวระหว่างบนและล่างของหลอดทดสอบ	องศาเซลเซียส	<4	0.5	4.0
ความหนืดบรูคฟิลด์ อัตราเร็ว 18.6 วินาที ⁻¹ แกน (Spindle) 21 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	มิลลิพาสคัลวินาที	200-600	550	585
ความต้านทานแรงเฉือนไดนามิก $G^*/\sin\delta$ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 10 rad/s	กิโลพาสคาล	>1.0	1.2	6.654

ตารางที่ 4.2 สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามมาตรฐาน ทล.-ก. 409/2556 (ต่อ)

คุณลักษณะ	หน่วย	ข้อกำหนด	AC60/70	CLMA
กากที่เหลือจากการอบ (Test on Residue from Thin Film Oven Test)				
น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน	ร้อยละ โดย น้ำหนัก	<1.0	0.12	0.122
เพนิเทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	ร้อยละ ของเพนิเทรชัน เดิม	>60	71.1	91.89
จุดอ่อนตัวแตกต่างจากเดิม	องศาเซลเซียส	±6	+8	+1
ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะ 10 เซนติเมตร	ร้อยละ	>25	40	26

AC60/70 = แอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเทรชันเกรด 60 ถึง 70, CLMA = แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพารา

ชั้น

4.3 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต้องคำนึงถึง ความหนาแน่น (Density) ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (Void in mineral aggregate, VMA) ช่องว่างอากาศ (Air void) และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Void filled with bitumen, VFB) แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งคำนวณได้จากการนำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (Weight in air) น้ำหนักในน้ำ (Weight in water) และน้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) โดยค่าช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ถูกกำหนดไว้ที่ร้อยละ 4 จากนั้นจึงนำไปทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ประกอบไปด้วย ค่าเสถียรภาพ (Stability) ค่าการไหล (Flow) และค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index)

ตารางที่ 4.3 สมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางข้น

Mix proportions	Asphalt cement content (%)	Density (g/cm ³)	VMA (%)	Air voids (%)	VFB (%)
G + AC60/70	5.1	2.389	14.7	4.0	74.0
L + AC60/70	5.0	2.368	14.8	4.0	71.6
B + AC60/70	5.7	2.398	14.6	4.0	74.3
G + CLMA	5.5	2.386	15.4	4.0	74.2
L + CLMA	5.4	2.362	15.7	4.0	73.9
B + CLMA	5.8	2.397	14.9	4.0	75.9

G = หินแกรนิต, L = หินปูน, B = หินบะซอลต์, AC60/70 = แอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเทอร์ชันเกรด 60 ถึง 70, CLMA = แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement content) และชนิดของมวลรวม พบว่า ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าช่องว่างอากาศ (Air void) เท่ากับร้อยละ 4 จะขึ้นอยู่กับค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ของมวลรวมแต่ละชนิด (กอบชัยเกิด จันทร์ตรง, 2557) โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม ต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.1 5.0 และ 5.7 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ (ตารางที่ 4.1) ที่ค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ของหินบะซอลต์ (ร้อยละ 0.38) มีค่ามากที่สุด ขณะที่ค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ของหินแกรนิต (ร้อยละ 0.25) และหินปูน (ร้อยละ 0.24) มีค่าน้อยกว่า ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม ต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.5 5.4 และ 5.8 ตามลำดับ จะเห็นว่า ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่นสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่น และเมื่อพิจารณามาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ก. 416/2556) ที่ระบุว่า ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 3 ถึง 7 จะเห็นว่าสามารถใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่นที่ออกแบบเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตได้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (Density) และชนิดของมวลรวม พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขุ่น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมจะมีความหนาแน่นมากที่สุด (2.398 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุง

ด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต (2.389 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และหินปูน (2.368 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) เป็นมวลรวมจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณมวลรวมละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4) ในขนาดกะของหินแต่ละหินชนิด เพราะมวลรวมละเอียดเป็นส่วนที่ทำให้ส่วนผสมแน่น จะเห็นว่า หินบะซอลต์มีปริมาณมวลรวมละเอียดมากที่สุด ขณะที่หินแกรนิต และหินปูนมีปริมาณมวลรวมละเอียดน้อยกว่า ตามลำดับ (รูปที่ 3.2) นอกจากนี้ ปริมาณมวลรวมละเอียดยังสัมพันธ์กับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์อีกด้วย เนื่องจาก มวลรวมขนาดเล็กต้องการแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับผสมมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดใหญ่ เมื่อปริมาตรเท่ากันมวลรวมละเอียดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมหยาบ จึงต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวอนุภาคของมวลรวม (กอบชัยเกิด จันทรตรง, 2557) เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า ความหนาแน่นมีค่าน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น เนื่องจาก เนื้อยางของน้ำยางพาราชั้นเข้าไปแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เคลือบผิวและยึดอนุภาคของมวลรวมไว้ด้วยกัน (Effective asphalt) ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อให้ส่วนที่เป็นแอสฟัลต์เพียงพอสำหรับการยึดเกาะอนุภาคของมวลรวมไว้ด้วยกัน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจึงลดลง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (VMA) และชนิดของมวลรวม พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 14.6) ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต (ร้อยละ 14.7) และหินปูน (ร้อยละ 14.8) เป็นมวลรวม มีช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมมากกว่าตามลำดับ ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณมวลรวมละเอียดของหินแต่ละชนิด เนื่องจาก มวลรวมละเอียดจะช่วยแทรกช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบทำให้ส่วนผสมแน่น และทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมจะมีน้อย โดยหินบะซอลต์จะมีปริมาณมวลรวมละเอียดมากที่สุด ขณะที่หินแกรนิต และหินปูนมีปริมาณมวลรวมละเอียดน้อยกว่าตามลำดับ (รูปที่ 3.2) และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมเพิ่มขึ้น โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมร้อยละ 15.4 15.7 และ 14.9 ตามลำดับ ซึ่งเป็นกรณีเดียวกันกับความหนาแน่น ที่เนื้อยางของน้ำยางพาราชั้นเข้าไปแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เคลือบผิวและยึดอนุภาคของมวลรวมไว้ด้วยกัน (Effective asphalt) ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อให้ส่วนที่เป็นแอสฟัลต์เพียงพอสำหรับการยึดเกาะอนุภาคของมวลรวมไว้ด้วยกัน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณามาตรฐาน

ของกรมทางหลวง (ทล.-ก. 416/2556) ที่ระบุไว้ว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมควรมีค่ามากกว่าร้อยละ 14 พบว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานได้ระบุไว้

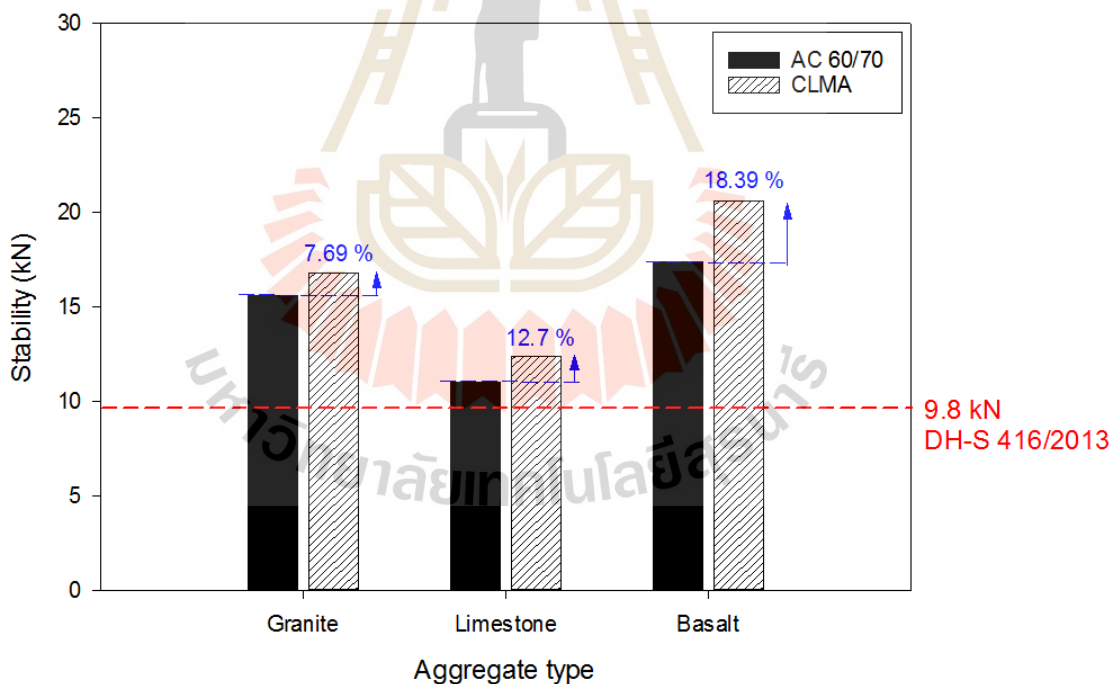
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (VFB) และชนิดของมวลรวม พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และ หินบะซอลต์ มีช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ร้อยละ 74.0 71.6 และ 74.3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมจะมีแอสฟัลต์ประสิทธิผล (Effective asphalt) มากที่สุด บ่งบอกว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีการยึดเกาะกันมากกว่า ขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต และ หินปูนเป็นมวลรวมจะมีแอสฟัลต์ประสิทธิผลน้อยกว่าตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณมวลรวมละเอียดของหินแต่ละชนิด (รูปที่ 3.2) ที่กล่าวก่อนหน้าเห็นว่า เมื่อปริมาตรเท่ากันมวลรวมละเอียดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมหยาบ จึงต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวอนุภาคของมวลรวม (กอบชัยเกิด จันทร์ตรง, 2557) และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ร้อยละ 74.2 73.9 และ 75.9 ตามลำดับ ซึ่งเป็นกรณีเดียวกันกับช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม ที่เนื้อหาของน้ำยางพาราชั้นเข้าไปแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เคลือบผิวและยึดอนุภาคของมวลรวมไว้ด้วยกัน (Effective asphalt) ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อให้ส่วนที่เป็นแอสฟัลต์เพียงพอสำหรับการยึดเกาะอนุภาคของมวลรวมไว้ด้วยกัน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมเพิ่มขึ้น ทำให้มีแอสฟัลต์ซีเมนต์ เข้าไปแทนที่ในช่องว่างมากขึ้น

4.4 ผลการทดสอบเสถียรภาพและดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.1 ผลการทดสอบเสถียรภาพและการไหล (Stability & flow)

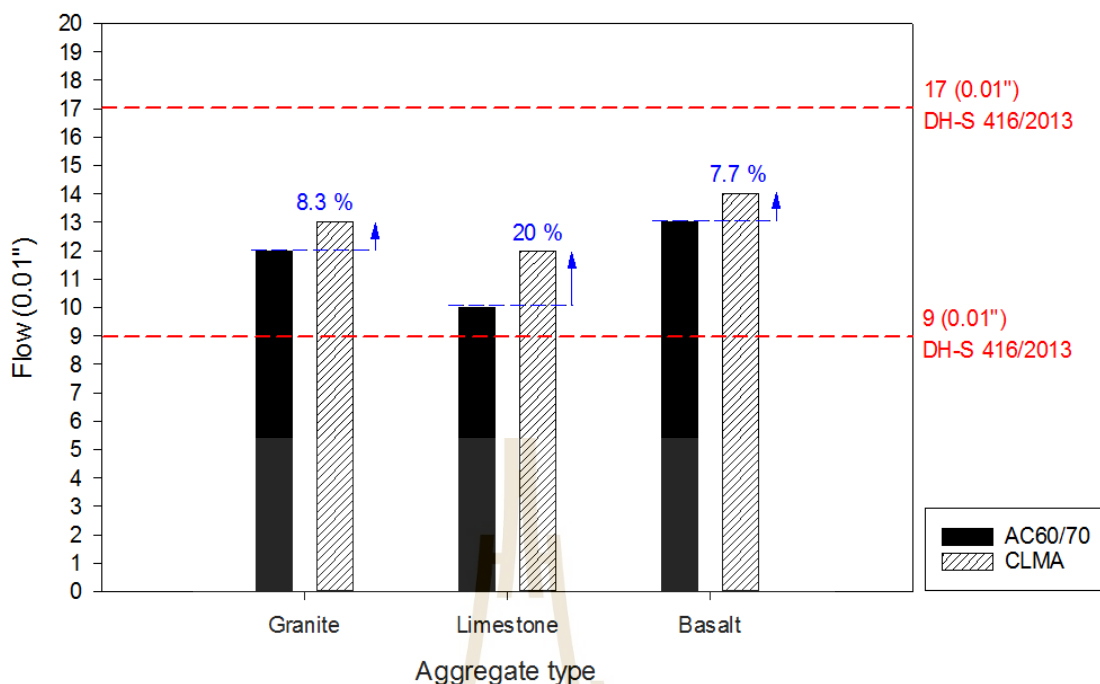
เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น แสดงดังรูปที่ 4.1 แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีค่าเสถียรภาพเท่ากับ 15.6 11.0 และ 17.4 กิโลนิวตัน ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม จะมีค่าเสถียรภาพมากที่สุด เนื่องจาก หินบะซอลต์มีค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ที่มากที่สุด ทำให้ส่วนผสมมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่มากกว่าหินแกรนิต และหินปูนตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีค่า

เสถียรภาพเท่ากับ 16.8 12.4 และ 20.6 กิโลนิวตัน ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีความแข็งแรงมากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ทำให้มีกำลังในการยึดเกาะที่สูงกว่า นอกจากนี้ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน ยังมีความไวต่ออุณหภูมิที่น้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน มีความคงตัวสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 เมื่อถูกกดที่อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสัมพันธ์กับผลการทดสอบเพนิเทรชัน และผลการทดสอบจุดอ่อนตัว (ตารางที่ 4.2) การปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.69 12.7 และ 18.39 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณามาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ก. 416/2556) ที่ระบุไว้ว่าค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีค่ามากกว่า 9.8 กิโลนิวตัน พบว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานได้ระบุไว้



รูปที่ 4.1 เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน

การไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น แสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีค่าการไหลเท่ากับ 0.12 0.10 และ 0.13 นิ้ว ตามลำดับ จะเห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม จะมีค่าการไหลมากที่สุด เนื่องจาก แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (VFB) มากที่สุด ทำให้การยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตมีมากกว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต และหินปูน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีค่าการไหลเท่ากับ 0.13 0.12 และ 0.14 นิ้ว ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีความแข็งมากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ทำให้มีกำลังในการยึดเกาะที่สูงกว่า นอกจากนี้ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ยังมีความไวต่ออุณหภูมิที่น้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีความคงตัวสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 เมื่อถูกกดที่อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสัมพันธ์กับผลการทดสอบเพนิเทรชัน และผลการทดสอบจุดอ่อนตัว (ตารางที่ 4.2) โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าการไหลเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.3 20 และ 7.7 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณามาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ก. 416/2556) ที่ระบุไว้ว่าค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตควรอยู่ในช่วง 0.09 ถึง 0.17 นิ้ว พบว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ทั้งหมด อยู่ในช่วงที่มาตรฐานได้ระบุไว้

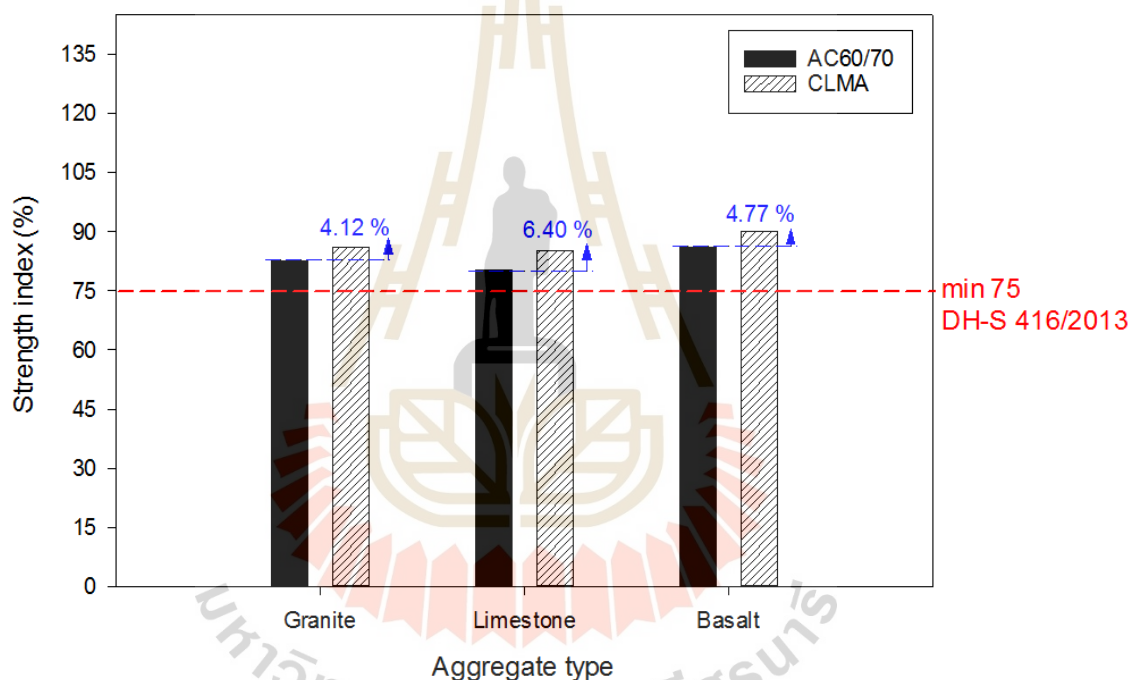


รูปที่ 4.2 ค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น

4.4.2 ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength index)

ดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.3 ค่าดัชนีความแข็งแรงบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน การหลุดลอกของส่วนผสมเนื่องจากสภาวะแวดล้อม ความชื้น และอุณหภูมิ พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีดัชนีความแข็งแรงร้อยละ 82.6 80.2 และ 86 ตามลำดับ โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม จะมีค่าดัชนีความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจาก หินบะซอลต์มีส่วนที่เสียหายจากการกัดกร่อนน้อยกว่าหินแกรนิต และหินปูน ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับผลการทดสอบความคงทน (ตารางที่ 4.1) และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีดัชนีความแข็งแรงเท่ากับร้อยละ 86 85.3 และ 90.1 ตามลำดับ จะเห็นว่า ดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบเสถียรภาพ เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น มีความ

แข็งแรงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ทำให้มีกำลังในการยึดเกาะที่สูงกว่า นอกจากนี้ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นยังมีความไวต่ออุณหภูมิที่น้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีความคงตัวสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 (ตารางที่ 4.2) โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าดัชนีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.12 6.40 และ 4.77 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณามาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ก. 416/2556) ที่ระบุไว้ว่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีค่ามากกว่าร้อยละ 75 พบว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานได้ระบุไว้



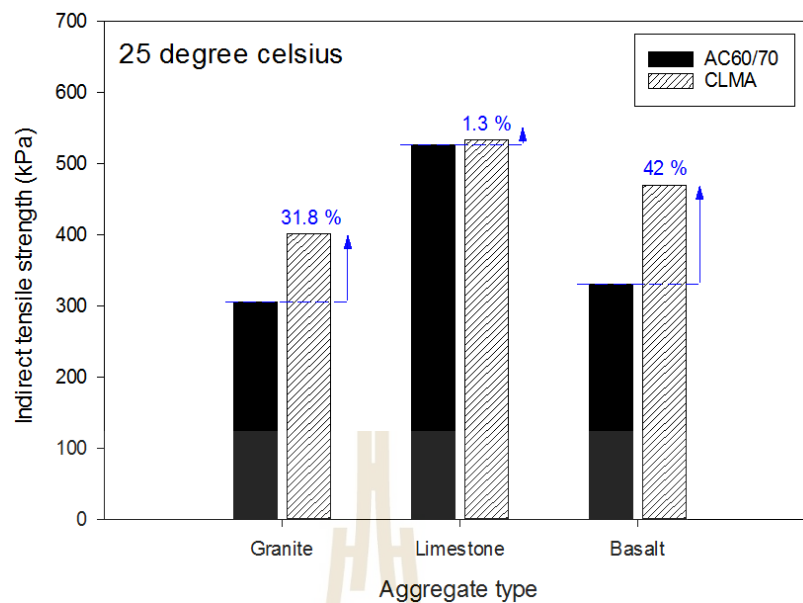
รูปที่ 4.3 ดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น

4.5 ผลการทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต

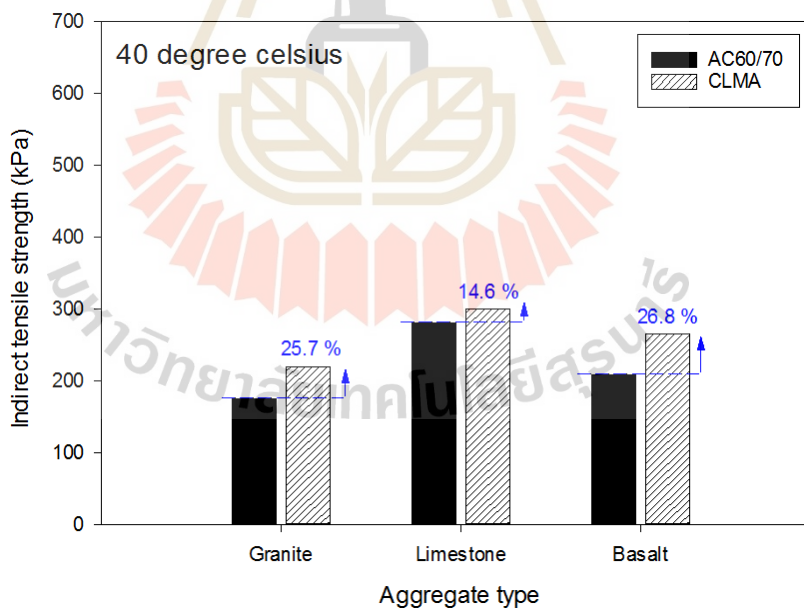
4.5.1 ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)

รูปที่ 4.4 ถึง 4.7 แสดงผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตทุกส่วนผสมจะมีค่าลดลง

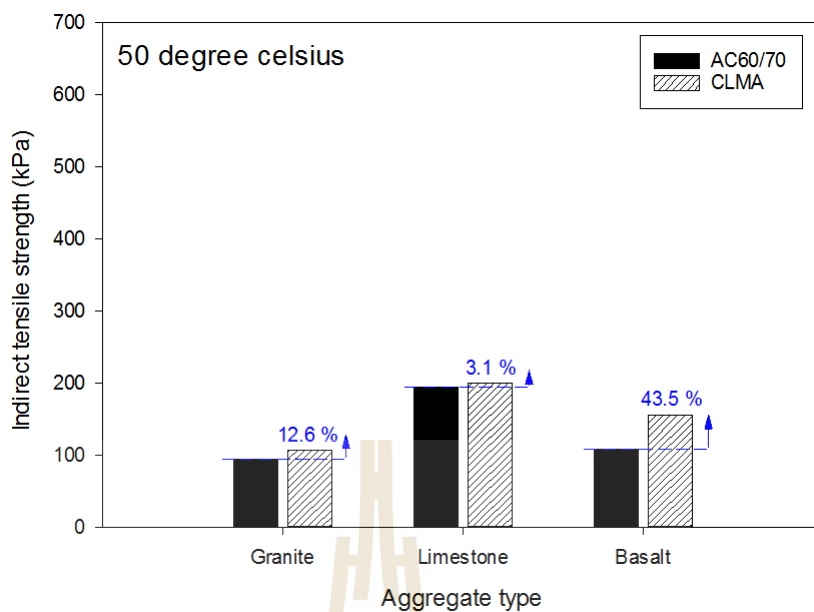
เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีกำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 305 527 และ 331 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 175 280 และ 209 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 95 194 และ 108 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 63 142 และ 71 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม จะมีกำลังดึงทางอ้อมมากที่สุด ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินบะซอลต์ และหินแกรนิตเป็นมวลรวม มีกำลังดึงทางอ้อมน้อยกว่าตามลำดับ เนื่องจาก ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีเสถียรภาพสูงกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต และหินปูนเป็นมวลรวม อาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม แข็งเกินไป และขาดความยืดหยุ่น (กอบชัย เกิดจันทร์ตรง, 2557) ทำให้ตัวอย่างวิบัติด้วยแรงดึงทางอ้อมเร็วกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม ในกรณีของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม จะสอดคล้องกับการศึกษาของกรมทางหลวงชนบท (2557) ที่กล่าวไว้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมสามารถรับแรงดึงได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีกำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 402 534 และ 470 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 220 300 และ 265 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 107 200 และ 155 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 82 153 และ 113 กิโลพาสกาล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีกำลังดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีความแข็ง (Penetration) และความยืดหยุ่น (Elasticity) มากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 (ตารางที่ 4.2) ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีกำลังดึงมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีกำลังแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นร้อยละ 31.8 1.3 และ 42 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ร้อยละ 25.7 14.6 และ 26.8 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ร้อยละ 12.6 3.1 และ 43.5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ ร้อยละ 30.2 7.8 และ 59.2 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



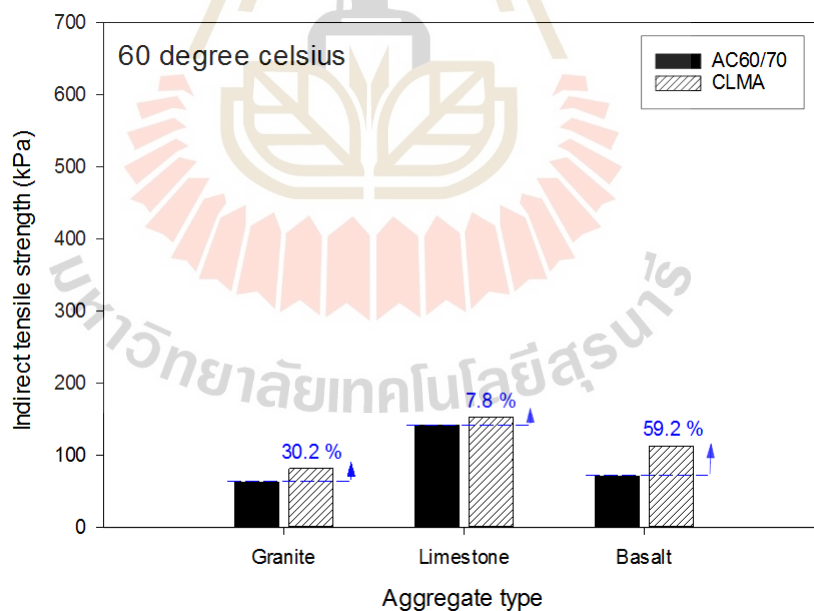
รูปที่ 4.4 กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



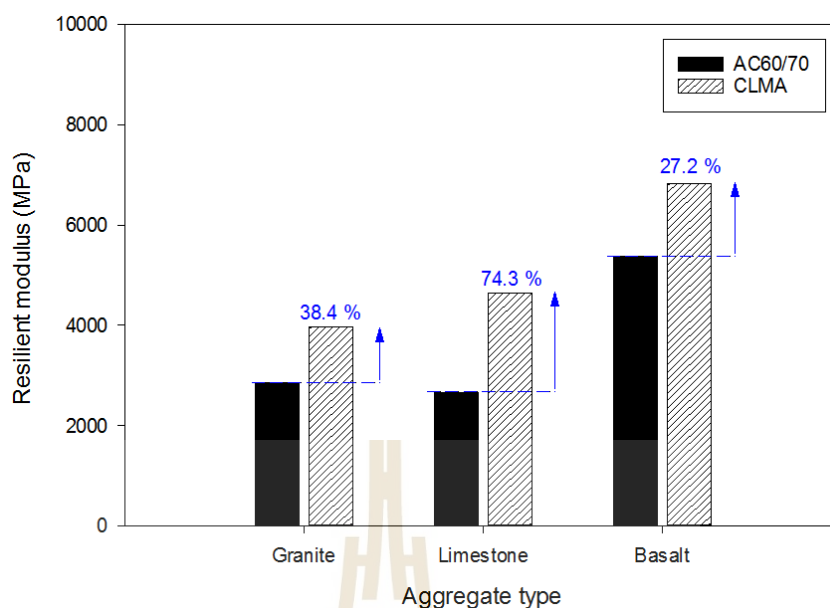
รูปที่ 4.6 กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

4.5.2 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus)

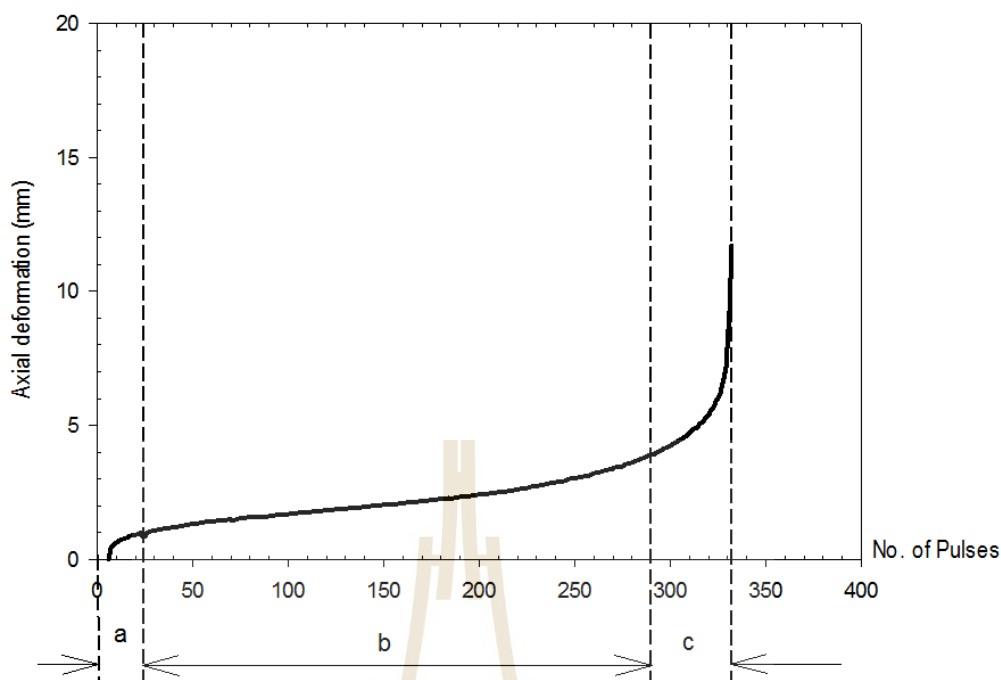
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น โดยค่าโมดูลัสการคืนตัวที่ได้จากการทดสอบ คือความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นในช่วงที่แอสฟัลต์คอนกรีตเกิดการคืนตัวได้ (Elastic) เนื่องจากแรงดึงทางอ้อมแบบพลวัต ค่าทดสอบจึงมีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าโมดูลัสการคืนตัวเท่ากับ 2,862 2,666 และ 5,369 เมกะพาสคาลตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีค่าโมดูลัสการคืนตัวมากที่สุด ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต และหินปูนเป็นมวลรวมมีค่าโมดูลัสการคืนตัวน้อยกว่าตามลำดับ เนื่องจาก แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (ร้อยละ 74.3) มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต (ร้อยละ 74.0) และหินปูน (ร้อยละ 71.6) เป็นมวลรวม (ตารางที่ 4.3) ทำให้ความยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีค่ามากกว่า และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าโมดูลัสการคืนตัวเท่ากับ 3,962 4,646 และ 6,829 เมกะพาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น มีค่าโมดูลัสการคืนตัวมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น มีค่าความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) มากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 (ตารางที่ 4.2) โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าโมดูลัสการคืนตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 38.4 74.3 และ 27.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 โมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น

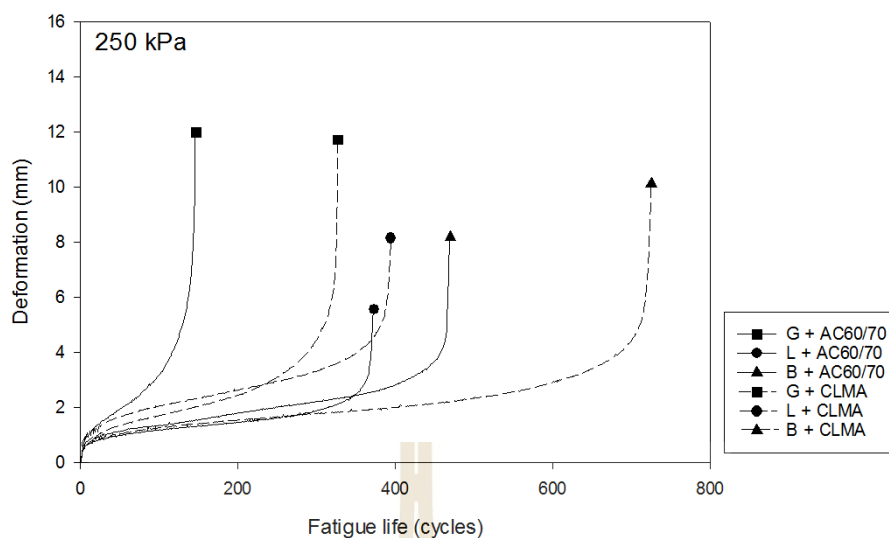
4.5.3 ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue)

พฤติกรรมการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีต จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและจำนวนรอบทดสอบ ดังรูปที่ 4.9 เมื่อแอสฟัลต์คอนกรีตถูกกระทำด้วยหน่วยแรงแบบพลวัตจะทำให้เกิดรอยร้าว (Crack) ความสามารถในการต้านทานการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบทดสอบ (Number of pulse) ที่ทำให้เกิดรอยร้าว (Crack) ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ (Completely fracture) โดยที่จำนวนรอบการทดสอบที่ทำให้เกิดรอยร้าวจะเรียกว่า Service life และจำนวนรอบการทดสอบที่ทำให้เกิดการแตกร้าวอย่างสมบูรณ์เรียกว่า Fracture life โดยในช่วง a แสดงการยุบตัวสูงในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ เนื่องจากการยุบตัวของช่องว่างอากาศในแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่อนุภาคมวลรวมของแอสฟัลต์คอนกรีตชิดกันมากขึ้น หลังจากนั้นค่าการยุบตัวมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังช่วง b หรือ Service life ในช่วงนี้แอสฟัลต์คอนกรีตเริ่มเกิดรอยร้าว และขนาดของรอยร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยอายุการล้า (Fatigue life) จะสิ้นสุดในช่วงนี้ที่จุดสุดท้ายก่อนที่การยุบตัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนรอบการทดสอบเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงดังช่วง c หรือ Fracture life ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการแตกร้าวอย่างสมบูรณ์

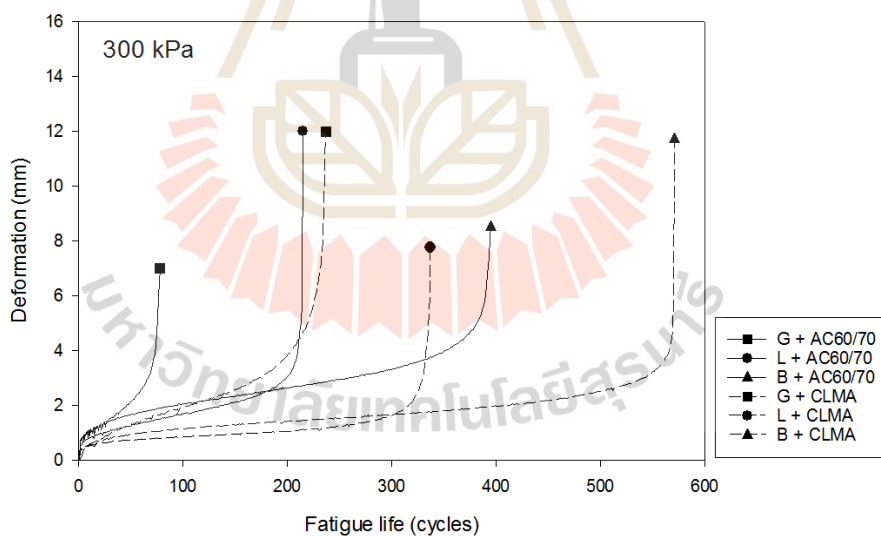


รูปที่ 4.9 พฤติกรรมความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม

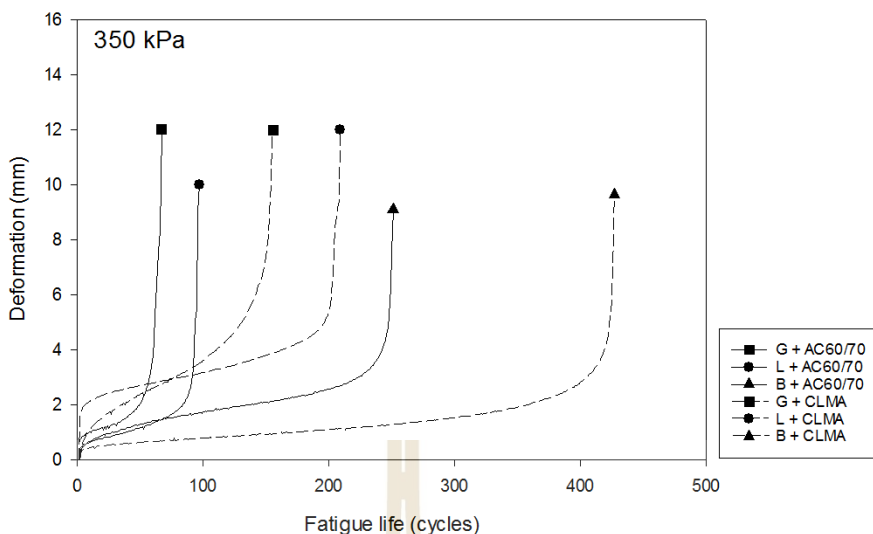
รูปที่ 4.10 ถึง 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขูดตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีต AC60/70 และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นภายใต้หน่วยแรงเท่ากับ 250 300 และ 350 กิโลพาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าการขูดตัวเริ่มต้น (ช่วง a ในรูปที่ 4.9) ของทั้ง 3 หน่วยแรงกระทำมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ ช่วง service life (ช่วง b ในรูปที่ 4.9) มีค่าลดลงเมื่อหน่วยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าอายุการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง เมื่อหน่วยแรงกระทำมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ภายใต้หน่วยแรงเท่ากับ 250 กิโลพาสคาล



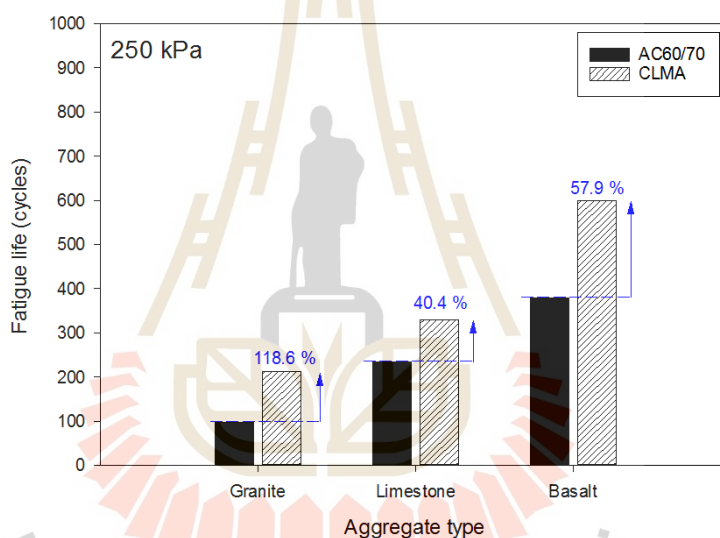
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ภายใต้หน่วยแรงเท่ากับ 300 กิโลพาสคาล



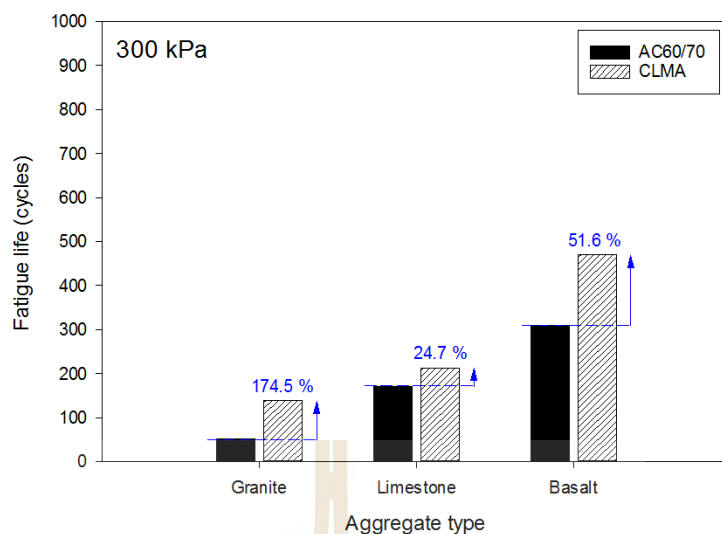
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ภายใต้หน่วยแรงเท่ากับ 350 กิโลพาสกาล

รูปที่ 4.13 ถึง 4.15 แสดงค่าอายุการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 300 และ 350 กิโลพาสกาล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อายุการล้า พบว่า อายุการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตทุกส่วนผสมจะมีค่าลดลง เมื่อหน่วยแรงในการทดสอบเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ มีอายุการใช้งานเท่ากับ 97 235 และ 380 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 กิโลพาสกาล 51 170 และ 310 รอบที่หน่วยแรงทดสอบ 300 กิโลพาสกาล และ 45 110 และ 195 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 350 กิโลพาสกาล จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมจะมีค่าอายุการล้ามากที่สุด ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินปูน และหินแกรนิตเป็นมวลรวมจะมีค่าอายุการล้าน้อยกว่าตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของกรมทางหลวงชนบท (2557) ที่กล่าวไว้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมสามารถรับแรงดึงได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ มีอายุการใช้งานเท่ากับ เท่ากับ 212 330 และ 600 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 กิโลพาสกาล 140 212 และ 470 รอบ ที่หน่วยแรงทดสอบ 300 กิโลพาสกาล และ 125 160 และ 310 รอบ ที่หน่วยแรง

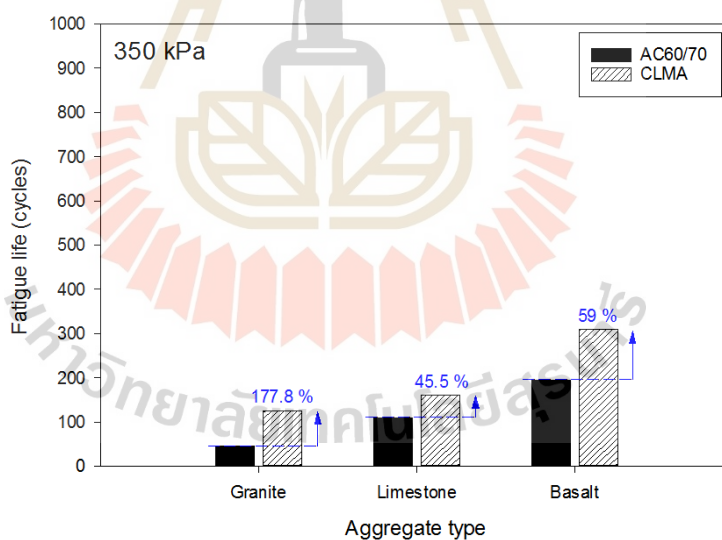
ทดสอบ 350 กิโลพาสกาล จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีค่าอายุการล้าสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีความแข็ง (Penetration) และความยืดหยุ่น (Elasticity) ที่สูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 (ตารางที่ 4.2) ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น สามารถรับแรงดึงได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าอายุการล้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 118.6 40.4 และ 57.9 ที่หน่วยแรงทดสอบ 250 กิโลพาสกาล ร้อยละ 174.5 24.7 และ 51.6 ที่หน่วยแรงทดสอบ 300 กิโลพาสกาล และร้อยละ 177.8 45.5 และ 59 ที่หน่วยแรงทดสอบ 350 กิโลพาสกาล ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ค่าอายุการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้หน่วยแรงการทดสอบ 250 กิโลพาสกาล



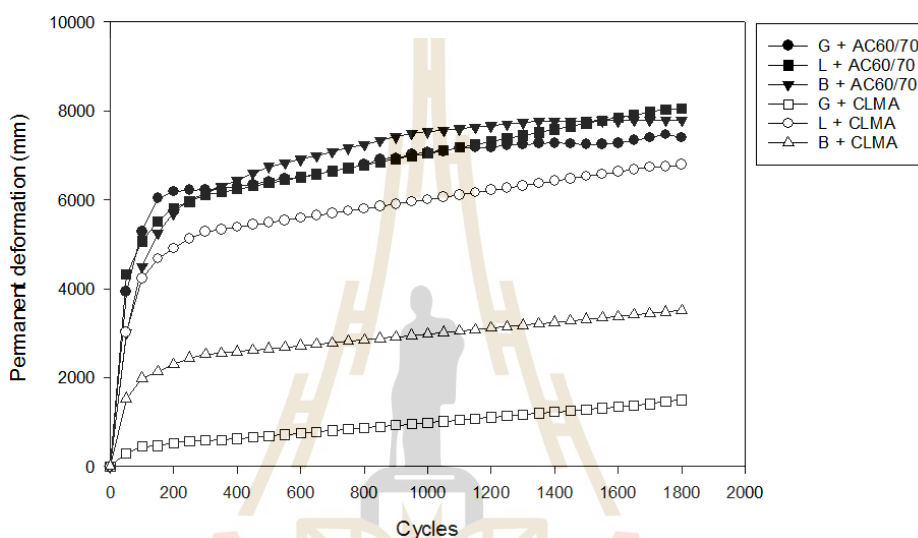
รูปที่ 4.14 ค่าอายุการด้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้หน่วยแรงการทดสอบ 300 กิโลพาสกาล



รูปที่ 4.15 ค่าอายุการด้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ภายใต้หน่วยแรงการทดสอบ 350 กิโลพาสกาล

4.5.4 ผลการทดสอบการยุบตัวถาวร (Permanent deformation)

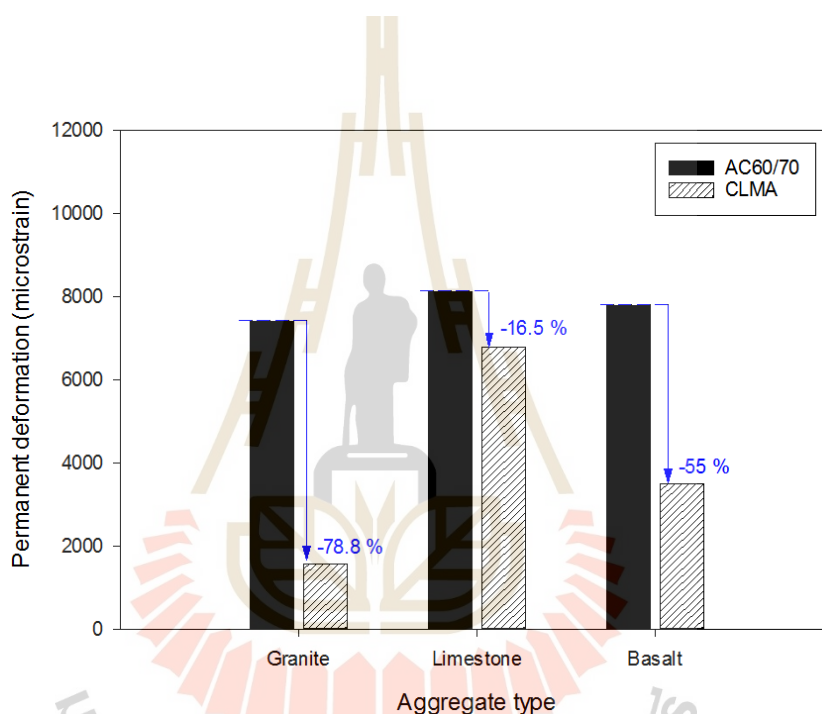
พฤติกรรมของการเกิดการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวถาวรและจำนวนรอบการทดสอบดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า การยุบตัวถาวรมีค่าสูงในช่วงต้นของการทดสอบ เนื่องจากการยุบตัวของช่องว่างระหว่างมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต หลังจากนั้น การยุบตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยด้วยอัตราที่คงที่จนสิ้นสุดการทดสอบ



รูปที่ 4.16 พฤติกรรมของการเกิดการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต

รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่ายุบตัวถาวรเท่ากับ 7,396 8,126 และ 7,796 ไมโครสเตรน ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่ายุบตัวถาวรมากที่สุด ขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน ที่ใช้หินบะซอลต์ และหินแกรนิตเป็นมวลรวม มีค่ายุบตัวถาวرن้อยกว่าตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของกรมทางหลวงชนบท (2557) ที่กล่าวไว้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมสามารถรับแรงกดได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชัน ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่ายุบตัวถาวรเท่ากับ 1,570

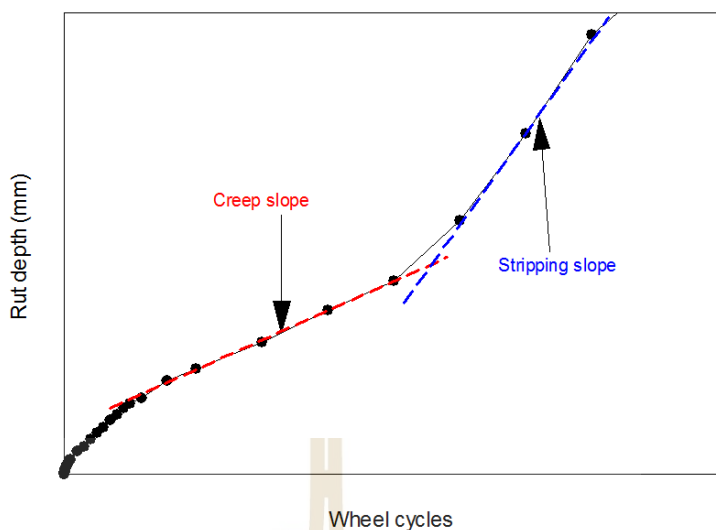
6,787 และ 3,506 ไมโครสเตรน ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีค่าขูดตัวถาวรน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นมีสมบัติต้านทานแรงเฉือน (Dynamic shear) ค่ามากกว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 (ตารางที่ 4.2) จึงทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีความทนทานต่อการเกิดการขูดตัวถาวรมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น (Wang, Y., et al., 2014) โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าขูดตัวถาวรลดลงร้อยละ 78.8 16.5 และ 55 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ค่าขูดตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น

4.5.5 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting resistance)

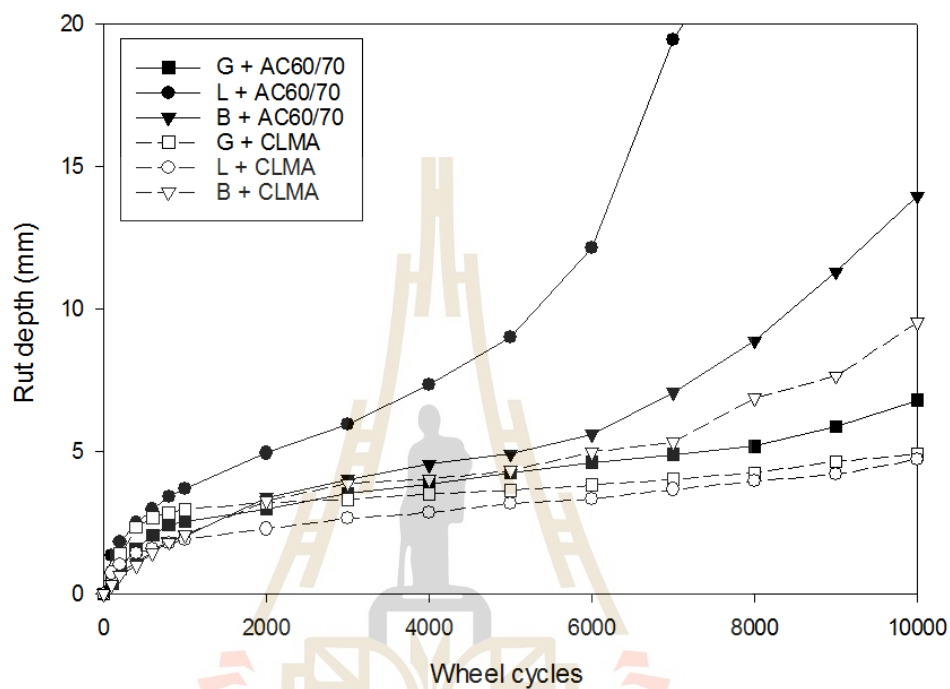
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบ จะเห็นว่า ความชันของเส้นความสัมพันธ์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ Creep slope เป็นช่วงที่แอสฟัลต์คอนกรีตเริ่มเกิดการขูดตัวจากน้ำหนักรถที่กระทำซ้ำ ๆ และ Stripping slope เป็นช่วงที่แอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความเสียหายเนื่องจากความชื้นและอุณหภูมิ โดยผลการทดสอบการเกิดร่องล้อจะพิจารณาค่าของ Creep slope คืออัตราการเกิดร่องล้อ ในหน่วยมิลลิเมตรต่อรอบการทดสอบ โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า Creep slope ต่ำ จะมีความทนทานต่อการเกิดร่องล้อสูง (Quan et al., 2019)



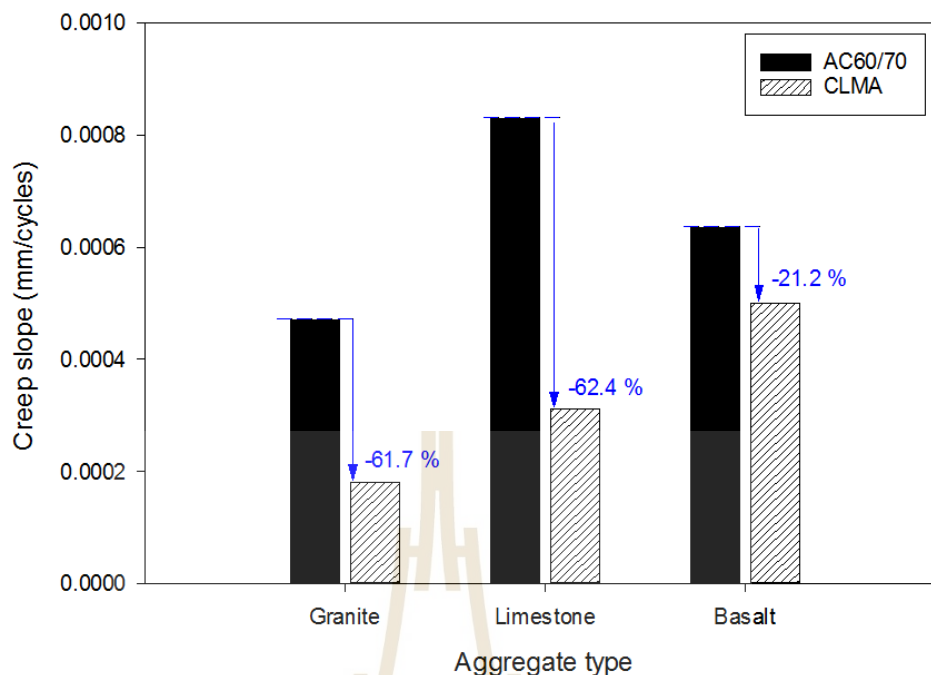
รูปที่ 4.18 Creep slope และ Stripping slope

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น เมื่อนำเส้นความสัมพันธ์มาหาค่าอัตราการเกิดร่องล้อ (Creep slope) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น จะได้อัตราการเกิดร่องล้อแสดงดังรูปที่ 4.20 เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีอัตราการเกิดร่องล้อเท่ากับ 0.00047 0.00083 และ 0.00064 มิลลิเมตรต่อรอบ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต เป็นมวล มีอัตราการเกิดร่องล้อน้อยที่สุด ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินบะซอลต์ และหินปูนเป็นมวลรวม มีอัตราการเกิดร่องล้อที่มากกว่าตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของกรมทางหลวงชนบท (2557) ที่กล่าวไว้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม สามารถรับแรงกดได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีอัตราการเกิดร่องล้อเท่ากับ 0.00018 0.00031 และ 0.0005 มิลลิเมตรต่อรอบ ตามลำดับ จะเห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น จะมีอัตราการเกิดร่องล้อน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น มีสมบัติต้านทานแรงเฉือน (Dynamic shear) ค่ามากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 (ตารางที่ 4.2) จึง

ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีความทนทานต่อการเกิดร่องลึกมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น (Wang et al., 2014) โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นรวม มีอัตราการเกิดร่องลึกลดลงร้อยละ 61.7 62.4 และ 21.2



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องลึกและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น

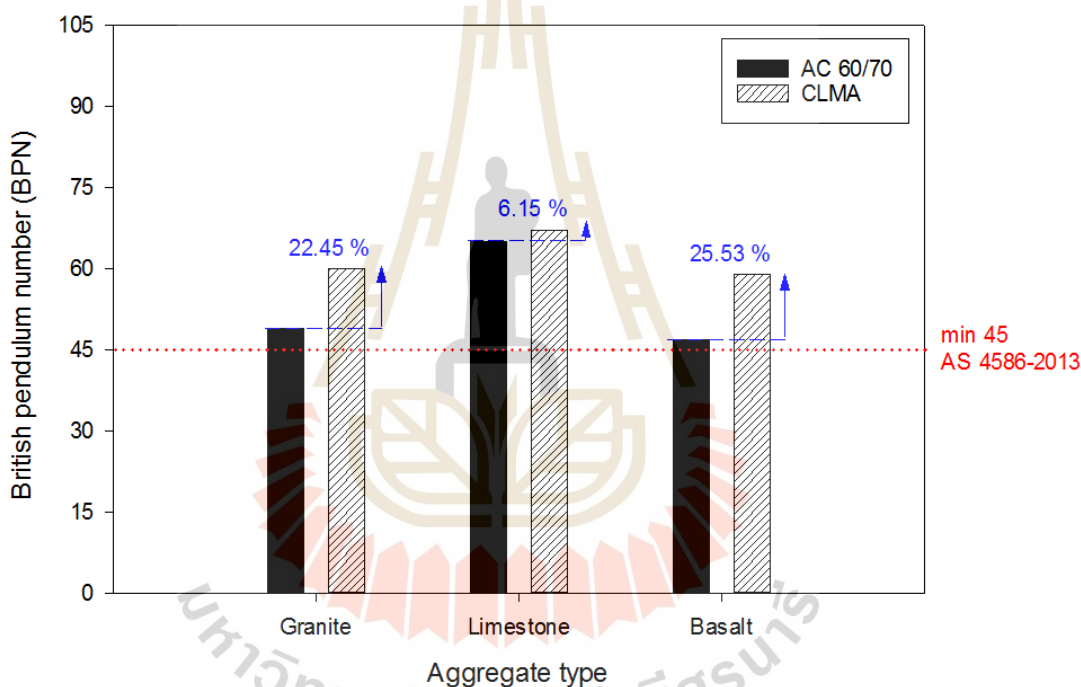


รูปที่ 4.20 อัตราการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น

4.5.6 ผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance)

รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ก่อนเริ่มการทดสอบการเกิดร่องล้อ (จำนวนรอบการทดสอบร่องล้อที่ 0 รอบ) โดยค่าแรงเสียดทานจะอยู่ในหน่วย BPN (British pendulum number) เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าแรงเสียดทานที่ผิวเท่ากับ 49 65 และ 47 BPN ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าแรงเสียดทานที่ผิวมากที่สุด ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต และหินบะซอลต์เป็นมวลรวมมีค่าแรงเสียดทานที่ผิวน้อยกว่า ตามลำดับ เนื่องจาก แอสฟัลต์คอนกรีต ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม มีส่วนละเอียดที่น้อยกว่าหินแกรนิต และหินบะซอลต์ (รูปที่ 3.2) ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม มีลักษณะผิวค่อนข้างหยาบ แรงเสียดทานที่ผิวจึงมากกว่า และเมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มี

ค่าแรงเสียดทานที่ผิวเท่ากับ 60 67 และ 59 BPN ตามลำดับ จะเห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีค่าแรงเสียดทานที่ผิวมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น เนื่องจาก ความเหนียวของเนื้อยางในน้ำยางพาราชั้น จะช่วยให้ผิวสัมผัสของแอสฟัลต์คอนกรีตมีความเหนียว ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น โดยการปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น จะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีค่าแรงเสียดทานที่ผิวเพิ่มขึ้นร้อยละ 22.45 6.15 และ 25.53 ตามลำดับ โดยมาตรฐานความเสียดทานของถนนในประเทศออสเตรเลียระบุว่าค่า British pendulum number (BPN) ควรไม่ต่ำกว่า 45 (Henry, 2000) จะเห็นว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานได้ระบุไว้



รูปที่ 4.21 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ที่จำนวนรอบการทดสอบร่องล้อ 0 รอบ

บทที่ 5

สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของชนิดของมวลรวมที่มีในประเทศไทยต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางธรรมชาติ มวลรวมที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์ ยางธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในรูปของน้ำยางพาราชั้น ผลกระทบของชนิดของมวลรวมและประสิทธิภาพของน้ำยางพาราชั้นต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต พิจารณาจากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ สมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ เสถียรภาพและการไหล ดัชนีความแข็งแรง กำลังดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว ความล้า การยุบตัวถาวร การเกิดร่องล้อและความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีต ประสิทธิภาพของการปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยน้ำยางพาราชั้นถูกอธิบายโดยการเปรียบเทียบกับผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น โดยใช้มวลรวมต่างชนิดกัน ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดมวลรวมต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งชนิดปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น มีค่าความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration) จุดอ่อนตัว (Softening point) ค่าการคืนตัวกลับ (Elastic recovery) และความต้านทานการเสีรูปจากแรงเฉือนพลวัต (Dynamic shear) ที่ดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น ส่งผลให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความไวต่ออุณหภูมิลดลง ความต้านทานการล้าสูงขึ้น และความต้านทานการเสีรูปถาวรหรือการเกิดร่องล้อสูงขึ้น

2. อิทธิพลของชนิดของมวลรวม (หินแกรนิต หินปูน และหินบะซอลต์) ต่อสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้นและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น

ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดมวลรวมต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งชนิดปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราชั้น พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมมีความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร และความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้

หินปูน และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม ขณะที่ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีกำลังดึงทางอ้อม และความต้านทานต่อการลื่น ไถลมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต และหินบะซอลต์เป็นมวลรวม และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวม มีโมดูลัสคืนตัว และอายุการล้ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิต และหินปูนเป็นมวลรวม

3. สมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น

การปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมทั้ง 3 ชนิดด้วยน้ำยางพาราขึ้นในปริมาณน้อยกว่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (r/c) ร้อยละ 3 ทำให้กำลังดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว อายุการล้า ความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร ความต้านทานการเกิดร่องล้อ และแรงเสียดทานที่ผิวของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ปรับปรุงด้วยน้ำยางพาราขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า การปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยน้ำยางพาราขึ้นในปริมาณน้อยกว่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (R/B) ร้อยละ 3 สามารถเพิ่มสมรรถนะทั้งแบบสถิตและพลวัตของแอสฟัลต์คอนกรีตได้



รายการอ้างอิง

- กรมทางหลวง. 2515. วิธีการทดลองหาความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles abrasion. ทล.-ม. 202/2515. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2515. วิธีการทดลองหาค่า Sand equivalent. ทล.-ท. 203/2515. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2516. วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้าง. ทล.-ท. 204/2516. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2517. วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง. ทล.-ท. 205/2517. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2517. วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ. ทล.-ท. 207/2517. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2517. วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธี Marshall. ทล.-ท. 604/2517. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2518. วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุ Aggregate ชนิดเม็ดละเอียด. ทล.-ท. 209/2518. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2518. วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness index). ทล.-ท. 210/2518. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2518. วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความยาว (Elongation index). ทล.-ท. 211/2518. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2531. วิธีการทดลองหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวมโดยการใช้โซเดียมซัลเฟต หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต. ทล.-ท. 213/2531. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2544. วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต. ทล.-ท. 413/2544. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2547. วิธีการทดลองหาปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกแรงตกกระแทก. ทล.-ท. 208/2547. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2547. วิธีการทดลองหาการดูดซึมน้ำของมวลรวม. ทล.-ท. 414/2547. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.

- กรมทางหลวง. 2556. **ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ**. ทล.-ก. 409/2556 กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2556. **มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ**. ทล.-ม. 416/2556 กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวงชนบท. 2557. **การพัฒนาการออกแบบผิวทางด้วยวิธี AC duopave เพื่อความปลอดภัยของทางหลวงชนบทในประเทศไทย**. กรุงเทพมหานคร. กรมทางหลวงชนบท
- กระทรวงคมนาคม. 2554. **แผนปฏิบัติการราชการ พ.ศ. 2555 – 2558 ของกระทรวงคมนาคม**. สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม กรุงเทพฯ
- กอบชัย เกิดจันทร์ตรง. 2557. **การวิจัยอัตราส่วนการผสมยางพาราธรรมชาติในแอสฟัลต์ซีเมนต์**. สาขาวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- กฤษณ์ เจ็ดวรรณะ และ วีระเทพ ชนินทรเทพ. 2560. **การศึกษาและพัฒนาวัสดุปูผิวทางแบบแอสฟัลติกคอนกรีตผสมด้วยยางแผ่นรมควัน**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- จิราภรณ์ ทองศรีนุ่น. 2555. **รายงานผลการวิเคราะห์ที่ทดลองตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมยางพารา**. ส่วนวิเคราะห์วัสดุทางวิทยาศาสตร์สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง.
- ชยชนันวี พรหมศร. 2541. **การวิเคราะห์หาสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี INDIRECT TENSILE TEST เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์**. รายงานฉบับที่ วพ. 167 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง.
- ชยชนันวี พรหมศร. 2541. **การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของยางแอสฟัลต์และวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารพอลิเมอร์**. รายงานฉบับที่ วพ. 166 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง.
- ณัฐพร เนียมกลิ่น. 2548. **สมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่ใช้ยางผสม เอซี เกรด 60-70 และยางแผ่นรมควัน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และ คณะ. 2554. **การใช้ยางพาราปรับปรุงสมบัติยางมะตอยเพื่อใช้ในงานทาง**. รายงานการวิจัยฉบับที่ 43 17 003 004 และรายงานการวิจัยฉบับที่ 44 17 003 006 ศูนย์วิจัยยางเชงเทรา สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการเกษตร.
- ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และ คณะ. 2554. **คำแนะนำการใช้ยางพาราชนิดน้ำยางข้นผสมยางมะตอยในการลาดถนน (พิมพ์ครั้งที่ 2)**. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

- ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และ อุดลย์ ณ.วิเชียร. 2556. การใช้ยางพาราผสมยางมะตอย. วารสารยางพารา ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ 15. สถาบันวิจัยยาง, กรมวิชาการเกษตร.
- ชั้นวิน สวัสดิศานต์ และ กฤษณะ จันทโรจิติ. 2552. การเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70 เกรด 40/50 และยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์. บทความทางวิชาการ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ประจำปี 2552, กรมทางหลวง.
- ชั้นวิน สวัสดิศานต์, ธัญรดี ก่อตั้งสัมพันธ์, อภิสัทธี กล้าเหม็ง, 2555 “การนำวิธีการออกแบบ ส่วนผสมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Superpave มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทย” รายงาน ฉบับที่ วพ. 285 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง.
- นราชัย ดันติวรวิทย์. 2546. ลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ ซีเมนต์ธรรมดาที่ใส่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเมษฐ หอมหวาน. 2560. การปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยน้ำยางพาราธรรมชาติ. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มนตรี เดชาสกุลสม และคณะ. 2555. การศึกษาแนวทางการแก้ไขการเกิดร่องล้อของผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตโดยการใส่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุผสมแทรก. บทความทาง วิชาการ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ประจำปี 2556, กรมทางหลวง.
- มนตรี เดชาสกุลสม และ นวพล พรหมจรรย์. 2555. การใช้วัสดุใยสังเคราะห์เสริมกำลังโครงสร้างลาดยางเพื่อต้านทานการเกิดร่องล้อ. บทความทางวิชาการ สำนักวิเคราะห์และ ตรวจสอบ ประจำปี 2556, กรมทางหลวง.
- ลลิต สวัสดิมงคล. 2553. การตรวจสอบหินเบื้องต้นให้เหมาะสมกับการนำมาใช้ในทาง. ส่วน ธรณีวิศวกรรม สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. 2545. แอสฟัลต์ระบบซูเปอร์เพฟ. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมัคร สนทอง และ นิตยา สาระบรรจง. 2544. การศึกษาอิทธิพลของรีไซเคิลโพลิเอทีลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำที่มีผลต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 และแอสฟัลต์คอนกรีต. รายงาน ฉบับที่ วพ. 187 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2536. วิธีทดสอบเพนิเทรชันของวัสดุยางมะตอย. มอก. 1201/2536. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2537. การทดสอบบีโตรเลียมและผลิตภัณฑ์บีโตรเลียม เล่ม 2 จุดวาบไฟและจุดติดไฟโดยถ้วยเปิดคลีฟแลนด์. มอก. 1182/2537 เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2537. วิธีทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุยางมะตอยโดยใช้ วงแหวนกับลูกปืน. มอก. 1216/2537. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2537. วิธีทดสอบผลของความร้อนและอากาศที่มีต่อ สมบัติของวัสดุยางมะตอย. มอก. 1223/2537. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2559. การใช้ยางพาราในการสร้างและซ่อมถนน. รายงานฉบับ สมบูรณ์ โครงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลเชิงรุกอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา.
- AASHTO. 2002. Standard method of test for coating and stripping of bitumen-aggregate mixtures. T182. Washington, DC : AASHTO.
- AASHTO. 2019. Standard method of test for hamburg wheel-track testing of compacted asphalt mixtures. T324. Washington, DC : AASHTO.
- AASHTO. 2020. Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). T315. Washington, DC : AASHTO.
- ASTM. 1995. Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures. ASTM D4123-95. West Conshohocken, PA : ASTM.
- ASTM. 2015. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. ASTM D4402-15. West Conshohocken, PA : ASTM.
- ASTM. 2015. Standard test method for marshall stability and flow of asphalt mixtures. ASTM D6927-15. West Conshohocken, PA : ASTM.
- ASTM. 2017. Standard test method for indirect tensile (IDT) strength of asphalt mixtures. ASTM D6931-17. West Conshohocken, PA : ASTM.
- ASTM. 2018. Standard test method for measuring surface frictional properties using the british pendulum tester. ASTM E303-18. West Conshohocken, PA : ASTM.
- ASTM. 2018. Standard test method for elastic recovery of asphalt materials by ductilometer. ASTM D6084-18. West Conshohocken, PA : ASTM.

- AS (Australian Standards). 1995. Methods of sampling and testing asphalt – Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt – Dynamic creep test. New South Wales, Australia. (AS 2891.12.1-95)
- Barth, E.J. 1984. **Asphalt Science and Technology**. Gordon and Breach Science Publishers, 3rd Edition.
- BSI (British Standards Institution). 1990. Method for determination of aggregate crushing value (ACV) part 110. BS-812. London, UK : BSI.
- BSI (British Standards Institution). 2012. Bituminous mixtures. **Test methods for hot mix asphalt part 24 : Resistance to fatigue**. BS-EN-12697-24. London, UK : BSI.
- Committee on Other Measures 1998. An Introduction to a Possible Survey on Rubberised Asphalt for Road Surfacing. 33th Meeting ANRPC.
- Fernando, M.J., and Nadarajah, M. 1992. **Use of Natural Rubber Latex in Road Construction. Polymer Modified Asphalt Binders**. ASTM STP 1108, Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Material Philadelphia.
- Henry J.J., 2000 **Evaluation of Pavement Friction Characteristics: A Synthesis of Highway Practice**. NCHRP Synthesis 291. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Kandahl, P.S., L.D.Sandvig and M.Wenger. 1973. **Shear Susceptibility of Asphalts in Relation to Pavement Performance**. Proceedings AAPT, Vol.42.
- Kaufman,.H.S. and J.J. Falcetta. 1977. **Introduction to Polymer Science and Technology**. John Wiley & Sons, Inc., Majidzadeh, K. and F.N. Brovold, (1968). State of the Art : “Effect of water on Bitumen-Aggregate Mixtures.” HRB., Special Report 98.
- Nair, N.R. Mathew, N.M., Thomas, S., Chatterjee, P. and Siddqui, MA. 1992. Physical and Rheological Characteristics of Liquid Natural Rubber Modified Bitumen Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108. Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Material Philadelphia.
- Narusawa, S., Kunisawa, S. and Asao, M. 1992. **Rubberised Bitumen from Rubber-Bitumen Masterbatch Polymer Modified Asphalt Binders**. ASTM STP 1108. Kenneth R. Wardlaw and Scott Shuler, Eds., American Society for Testing and Material Philadelphia.

- Quan et al., 2019 Investigation of the rutting performance of various modified asphalt mixtures using the Hamburg Wheel-Tracking device test and multiple stress creep recovery test. *Construction and Building Materials*, 206, 62-70
- Shelburne, T.E. and Sheppe, R.L. Field Experiments with Powdered Rubber in Bituminous Road Construction. *Rubber Age*. Vol.66(5). P 531-538.
- Siriphun et al., 2016. Skid resistance of asphalt concrete at the construction stage based on Thai aggregates. *American Society of Civil Engineers*.
- Wang, Y., et al., 2014. Evolution and locational variation of asphalt binder aging in long-life hot-mix asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 68, 172–182.





ภาคผนวก ก

การเข้าร่วมประชุมวิชาการ



CERTIFICATE

— OF PARTICIPATION —

International Conference on Civil, Architectural and
Environmental Sciences - (ICAES-21)

30th May 2021, Mumbai, India

This is to certify that **Kongsak Akkharawongwhatthana**
of Suranaree university of technology ,India
..... has done his/her excellence in presenting the
research paper titled..... "Improved performance of asphalt concrete by concentrated latex treatment"
.....
on 30th May 2021 at Mumbai, India.

Dr. Joe Franklin
President



Sanjay D' Souza
Program Co-ordinator

ประวัติผู้เขียน

นายคงศักดิ์ อัครวงษ์วัฒนา เกิดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2535 เริ่มศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนมารีย์วิทยา นครราชสีมา และสำเร็จระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2560 โดยหลังจากที่สำเร็จการศึกษาแล้วมีความสนใจทางด้านปฐพีกลศาสตร์ จึงเข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

