

ผลกระทบของวัสดุผสมแทรกต่อกำลังของแอสฟัลต์ผสมร้อน



นายพิทยุทธ์ พลกายนุวัตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

EFFECT OF FILLER MATERIALS ON STRENGTH OF HOT MIX ASPHALTS

Mr. Phitayuth Pholkainuwatra



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของวัสดุผสมแทรกต่อกำลังของแอสฟัลต์ผสมร้อน
โดย	นายพิทยุต์ม์ พลกายนุวัตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

พิทยุตม์ พลกายนุวัตร : ผลกระทบของวัสดุผสมแทรกต่อกำลังของแอสฟัลต์ผสมร้อน.  
(EFFECT OF FILLER MATERIALS ON STRENGTH OF HOT MIX ASPHALTS) อ.ที่  
ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 158 หน้า.

ผิวทางในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นผิวทางแบบยึดหยุ่น แอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นการผสมร้อนระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 กับมวลรวมคละขนาด แต่ในการใช้งานนั้นยังคงพบปัญหาความเสียหายที่ทำให้ถนนชำรุดก่อนเวลาอันควรอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณจราจร น้ำหนักบรรทุก และสภาพภูมิอากาศ ด้วยปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการนำเทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลติกคอนกรีตมาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งหนึ่งในวิธีที่นิยมทำกันมากคือ การปรับปรุงแอสฟัลติกคอนกรีตด้วยการผสมวัสดุผสมแทรก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุผสมแทรกในการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลติกคอนกรีต โดยตัวอย่างแอสฟัลติกคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ได้จากแอสฟัลต์ 2 ประเภท คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC60/70 และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์มาผสมกับมวลรวมประเภทหินปูน สำหรับการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย การทดสอบมาร์แชลล์ การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม การทดสอบโมดูลัสคืนตัว และการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร โดยทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 25 และ 55 องศาเซลเซียส และภายใต้เงื่อนไขความชื้น ซึ่งจากการทดสอบได้ข้อสรุปว่า ผลการทดสอบมาร์แชลล์แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์สามารถเพิ่มค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีขึ้น การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกไม่มีผลมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมวัสดุผสมแทรก แต่เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ภายใต้เงื่อนไขแบบแห้งและแบบเปียก ตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกนั้นมีการสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการทดสอบโมดูลัสคืนตัว ตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวที่มากขึ้น และสุดท้ายการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร พบว่าตัวอย่างที่มีผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีค่ายุบตัวน้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวในทุกเงื่อนไขการทดสอบ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5370561921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: FILLER MATERIAL / FLY ASH / INDIRECT TENSILE STRENGTH / DYNAMIC CREEP TEST / HOT MIX ASPHALT

PHITAYUTH PHOLKAINUWATRA: EFFECT OF FILLER MATERIALS ON STRENGTH OF HOT MIX ASPHALTS. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUCHED LIKITLERSUANG, D.Phil, 158 pp.

Asphaltic concrete is commonly employed for pavement construction in Thailand. The AC60/70 graded asphalt and aggregate are used to prepare a hot mix asphalt (HMA) mixture. There are several limitations of using AC60/70 for pavement design. Therefore, the development of asphalt technology is required. This research aims to study the effect of filler material on asphaltic concrete performance. In this study, Portland cement and fly ash were selected as filler materials. The AC60/70 and polymer modified asphalt (PMA) were mixed with limestone to prepare the asphaltic concrete specimens. The Mashall design standard tests, the indirect tensile test, the resilient modulus test and the dynamic creep test were performed in this study. The tests were carried out under 25 and 55°C; and dry and wet conditions, respectively. The testing results implied that the Portland cement could increase the stability of asphaltic concrete specimen. Although the filler materials would not help to improve the indirect tensile strength at 25°C, they could considerably improve the indirect tensile strength at 55°C under both wet and dry conditions. The filler materials could also increase the resilient modulus of asphaltic concrete specimens. The dynamic creep testing results indicated that the Portland cement could reduce the rutting of asphaltic concrete specimens.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

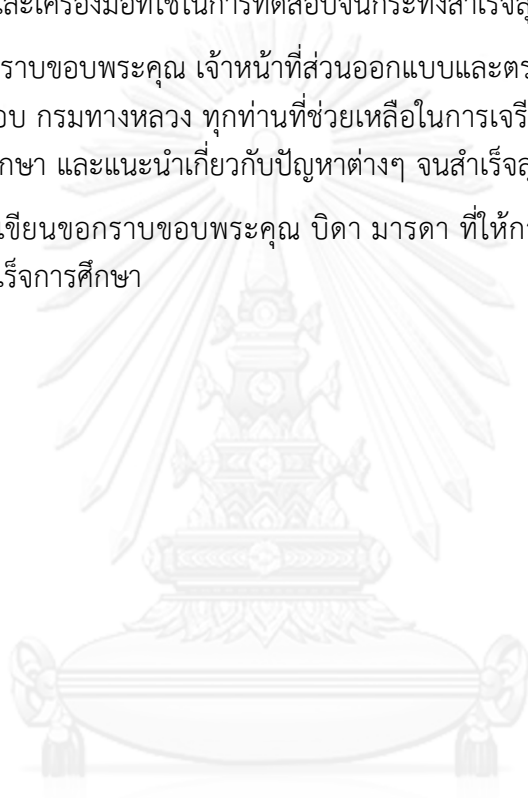
### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และดร.ธนกร ชมภูรัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำตลอดจนกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ส่วนออกแบบและตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ทุกท่านที่ช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างและทำการทดสอบ รวมไปถึงการให้คำปรึกษา และแนะนำเกี่ยวกับปัญหาต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนการศึกษา และให้กำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ลำดับขั้นตอนในการทำการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
3.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม.....	28
3.2 การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Method).....	34
3.3 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	40
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	46
4.2 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์สำหรับการจราจรปริมาณสูง.....	52
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79

5.2 สรุปพฤติกรรมของวัสดุผสมแทรกที่มีต่อแอสฟัลต์คอนกรีต .....	84
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	85
รายการอ้างอิง .....	86
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก.....	91
ภาคผนวก ข.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	158





## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	มาตรฐาน AASTHO M295(ASTM C618) Class C และ Class F.....	11
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมแทรกตามมาตรฐาน AASHTO M17.....	12
ตารางที่ 2.3	เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุของวัสดุผสมแทรก .....	14
ตารางที่ 3.1	มาตรฐานข้อกำหนดวัสดุสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทล.-ก. 401/2531.....	29
ตารางที่ 3.2	มาตรฐานข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ ทล.-ก. 408/2536.....	30
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติวัสดุผสมแทรกที่ใช้ผสมตามมาตรฐาน ASTM D242 .....	33
ตารางที่ 3.4	สรุปวิธีการ และมาตรฐานการทดลอง ส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบ .....	34
ตารางที่ 3.5	ขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลต์ตามมาตรฐาน ทล.-ม.408/2532.....	35
ตารางที่ 3.6	อัตราส่วนผสมวัสดุผสมแทรกที่ผสมเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม .....	38
ตารางที่ 3.7	จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	39
ตารางที่ 4.1	ผลทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ .....	46
ตารางที่ 4.2	ผลทดสอบแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์.....	47
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบคุณสมบัติของหินปูนที่ใช้ในการออกแบบก้อนตัวอย่าง.....	50
ตารางที่ 4.4	การจัดขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการทดสอบ .....	51
ตารางที่ 4.5	ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อให้ได้ช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4 .....	54
ตารางที่ 4.6	ผลการวิเคราะห์ช่องว่างของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตของอัตราส่วนผสมต่างๆ...55	
ตารางที่ 4.7	ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow).....	59
ตารางที่ 4.8	ค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ .....	63
ตารางที่ 4.9	เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 55 °C.....	67
ตารางที่ 4.10	ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคืนตัว ที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง.....	69
ตารางที่ 4.11	สมการเส้นแนวโน้มของผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง.....	75

ตารางที่ 4.12 สมการเส้นแนวโน้มของผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง .....	76
ตารางที่ 4.13 สมการเส้นแนวโน้มของผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก .....	77
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ช่องว่างเมื่อผสมแก้วลอยเพียงอย่างเดียว .....	79
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ช่องว่างเมื่อผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว .....	80
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ช่องว่างเมื่อผสมแก้วลอยและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร่วมกัน .....	80
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพและการไหล .....	81
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่ผสมวัสดุผสมแทรก .....	82
ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างทั้งหมด .....	82
ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดึงทางอ้อม .....	82

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1	ขั้นตอนการศึกษา.....	5
ภาพที่ 2.1	รอยแตกแบบหนังจระเข้หรือรอยแตกจากการล้า.....	6
ภาพที่ 2.2	รอยแตกจากการหดตัว.....	7
ภาพที่ 2.3	รอยแตกแบบเลื่อนไถล.....	7
ภาพที่ 2.4	การเกิดหลุดบ่อนผิวทาง.....	8
ภาพที่ 2.5	การสีกร่อนบนผิว.....	8
ภาพที่ 2.6	รูปแบบการเกิดร่องล้อ.....	10
ภาพที่ 2.7	ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	12
ภาพที่ 2.8	การให้น้ำหนักกระทำก่อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง.....	17
ภาพที่ 2.9	ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นอัดในการทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม.....	19
ภาพที่ 2.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Repeated – Load Indirect Tensile Test.....	20
ภาพที่ 2.11	การทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวแบบควบคุมความเค้น (Stress-Control Test).....	21
ภาพที่ 2.12	การทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวแบบควบคุมความเครียด (Strain-Control Test).....	21
ภาพที่ 2.13	แสดงลักษณะการให้น้ำหนักของการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัววาร.....	23
ภาพที่ 2.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับจำนวนรอบการทดสอบ.....	24
ภาพที่ 3.1	การบดอัดก้อนตัวอย่าง.....	36
ภาพที่ 3.2	ตู้ควบคุมอุณหภูมิก้อนตัวอย่าง.....	40
ภาพที่ 3.3	หม้อควบคุมอุณหภูมิก้อนตัวอย่าง.....	40
ภาพที่ 3.4	การหาค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์และการไหล.....	41
ภาพที่ 3.5	เครื่อง UTM CRT NU 14.....	42
ภาพที่ 3.6	การจัดวางตัวอย่างเพื่อทดสอบการต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม.....	43
ภาพที่ 3.7	การจัดวางตัวอย่างเพื่อทดสอบโมดูลัสคืบตัว.....	44

ภาพที่ 3.8 การจัดวางตัวอย่างเอททดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร.....	45
ภาพที่ 4.1 สัดส่วนขนาดคละที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ช่องว่างของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต.....	53
ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบช่องว่างอากาศของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต.....	56
ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต.....	56
ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ของตัวอย่าง.....	57
ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	60
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอย.....	60
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	61
ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของแต่ละส่วนผสม.....	61
ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหล.....	62
ภาพที่ 4.11 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 25°C แบบแห้ง.....	64
ภาพที่ 4.12 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 55°C แบบแห้ง.....	65
ภาพที่ 4.13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 55°C แบบเปียก.....	66
ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 55°C.....	68
ภาพที่ 4.15 ค่าอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม.....	68
ภาพที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคั้นตัว ที่อุณหภูมิ 25°C แบบแห้ง.....	69
ภาพที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคั้นตัว ที่อุณหภูมิ 55°C แบบแห้ง.....	70
ภาพที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคั้นตัว ที่อุณหภูมิ 55°C แบบเปียก.....	71
ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสการคั้นตัวที่อุณหภูมิ 55°C ของส่วนผสมต่างๆ.....	72
ภาพที่ 4.20 ค่าอัตราส่วนโมดูลัสการคั้นตัว ของส่วนผสมต่างๆ.....	72
ภาพที่ 4.21 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง.....	73
ภาพที่ 4.22 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง.....	74
ภาพที่ 4.23 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก.....	74

ภาพที่ 5.1 แสดงพฤติกรรมแบบลูกกลิ้งของวัสดุผสมแทรก (Roller Effect of Filler).....84



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณการจราจร และน้ำหนักบรรทุกในท้องถนนของประเทศไทยเพิ่มขึ้นทุกวัน ส่งผลให้ผิวจราจรรับน้ำหนักกระทำซ้ำที่มากขึ้น เป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานของผิวจราจรมีอายุสั้นลง จากการที่ได้ทำการออกแบบผิวจราจรไว้ ผิวจราจรในประเทศไทยส่วนใหญ่ ใช้ผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเป็นผิวจราจรแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) และใช้วิธีการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Method) แบบผสมร้อน (Hot Mix Asphalt) โดยมีส่วนผสมประกอบไปด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 ผสมกับวัสดุมวลรวม ซึ่งส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบนี้อาจไม่เพียงพอกับปริมาณการจราจร และน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นแล้ว

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศของโลกที่ประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่ทำให้อุณหภูมิในปัจจุบันสูงขึ้น และด้วยภูมิอากาศในประเทศไทยที่อยู่ในเขตร้อนชื้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นยิ่งสูงตามไปด้วย ก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ถนนเกิดความเสียหายได้เช่นกัน โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผิวทางนั้น ได้แก่ การแตกร้าว (Cracking) การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) และการหลุดร่อน (Striping)

จากการศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความเสียหาย ซึ่งสาเหตุที่พบก็คือมีค่าเสถียรภาพ (Stability) ที่ต่ำกว่าความต้องการของปริมาณจราจร และน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเสียหายเร็วขึ้น นอกจากนี้ในสภาวะอากาศของประเทศไทยที่อยู่ในเขตอากาศแบบร้อนชื้นมีปริมาณน้ำฝนสูง และบางพื้นที่ยังมีน้ำท่วมขัง เป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหาย เนื่องจากความชื้น (Moisture Damage) แก่ถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาผิวทางที่มีความทนทานต่อความเสียหายดังกล่าวด้วยการพัฒนาส่วนผสม (Mix) และวิธีการออกแบบผิวทาง (Design) เพื่อพัฒนาวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงชันกว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตปกติ โดยในอดีตที่ผ่านมา มีการศึกษาและแก้ไขปัญหาดังกล่าวหลายวิธีเช่น Rosner et al. (1982) Ali et al. (1996) และ Oruc et al. (2007) ได้ทำการศึกษาโดยการผสม ปูนขาว ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอย เพื่อปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต Troutbeck (2005) และ Wu et al. (2007) ได้ศึกษาเปรียบเทียบความเสียหายอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีต และลักษณะ (2551) ทวิช (2552) ศึกษาการต้านทานต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 40/50 ,AC 60/70 และ PMA และ ธนกร และคณะ (2555) ศึกษาการต้านทานความเสียหายเนื่องจากความชื้นต่อแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC 40/50 ,AC 60/70 และ AC 80/100

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยการผลิตปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย โดยจะทำการศึกษาภายใต้อุณหภูมิ และความชื้น โดยผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ จะเป็นข้อมูลที่น่าไปสู่การพัฒนาวิธีการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีตและพัฒนาวัสดุผสมแทรก (Mineral Filler) ชนิดใหม่ให้ผิว แอสฟัลต์คอนกรีตมีกำลังที่เพิ่มขึ้นได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มความทนทานและยืดอายุการใช้งานของถนนที่ใช้ผิวทางชนิดแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทยในลำดับต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ประกอบด้วย

1.2.1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุผสมแทรกเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต

1.2.2. ศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และ/หรือ เถ้าลอย และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความชื้น

1.2.3. ศึกษาเปรียบเทียบค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และ/หรือ เถ้าลอย และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความชื้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยประกอบด้วย

1.3.1. แอสฟัลต์ที่ใช้ในการผสมกับวัสดุผสมแทรกใช้เกรด AC60/70 และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์(Polymer Modified Asphalt; PMA)

1.3.2. หินปูน (Limestone) ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุด (Nominal maximum size of aggregate) 12.5 มิลลิเมตร

1.3.3. ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 1 (Portland Cement Type 1)

1.3.4. เถ้าลอย (Fly Ash) นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

1.3.5. ส่วนผสมที่ใช้กับก้อนตัวอย่างที่ผสมกับวัสดุผสมแทรก ประกอบด้วย

- ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม
- เถ้าลอยที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม
- เถ้าลอยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 : 0.5, 1.5 : 1.5 และ 2.5 : 2.5 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม

### 1.3.6. เงื่อนไข และรูปแบบการทดสอบ

- ทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และ การไหล (Flow)
- ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength; IDT) ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 55 °C แบบแห้ง และ 55 °C แบบเปียก
- ทดสอบหาค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus; Mr) ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 55 °C แบบแห้ง และ 55 °C แบบเปียก
- ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร (Permanence Deformation) ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 55 °C แบบแห้ง และ 55 °C แบบเปียก

1.3.7. การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบในการศึกษานี้ทำในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ที่จะนำ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุผสมแทรก

1.4.2. ทำให้ทราบคุณสมบัติด้านกำลังของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และ/หรือ เถ้าลอย และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความชื้น

1.4.3. ทำให้ทราบถึงค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และ/หรือ เถ้าลอย และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความชื้น

## 1.5 ลำดับขั้นตอนในการทำการวิจัย

1.5.1. การทบทวนงานวิจัยในอดีต และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

1.5.2. ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์

1.5.3. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยใช้วิธีมาร์แชลล์สำหรับปริมาณการจราจรสูง

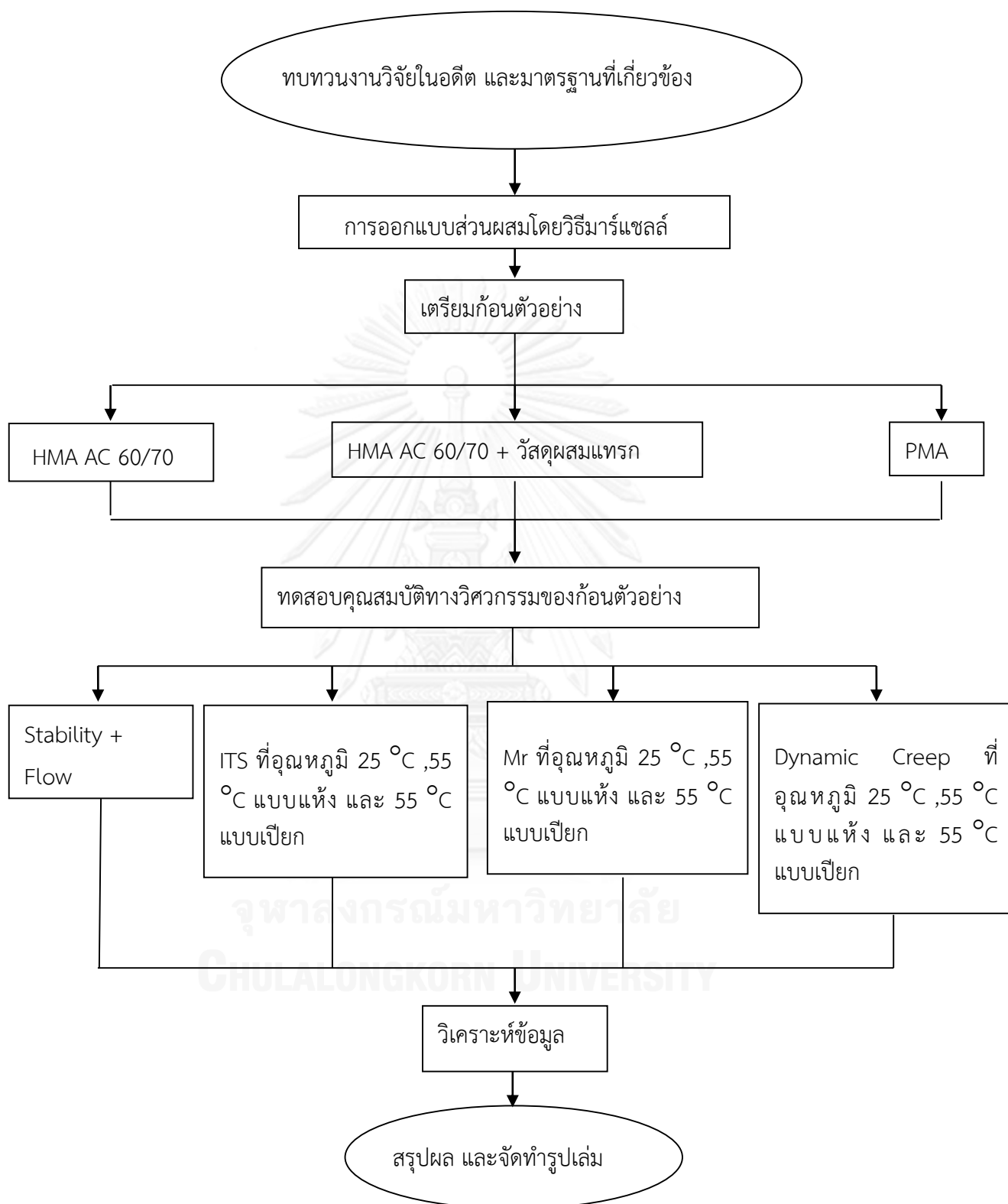
1.5.4. ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของก้อนตัวอย่าง ประกอบด้วย



- ทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และ การไหล (Flow)
- การทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength; IDT) แบบแห้ง และแบบเปียก โดยใช้เครื่อง (Universal Testing Machine; UTM)
- การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus; Mr) แบบแห้ง และแบบเปียก โดยใช้เครื่อง (Universal Testing Machine; UTM)
- การทดสอบค่าความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanence Deformation) แบบแห้ง และแบบเปียก โดยใช้เครื่อง (Universal Testing Machine; UTM)

#### 1.5.5. วิเคราะห์ข้อมูล

#### 1.5.6. สรุป และจัดทำรูปเล่ม



ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 1. สาเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่ 1.การเกิดรอยแตก (Cracking) 2.การเปลี่ยนรูปร่าง (Distortion) 3.การหลุดร่อน (Disintegration) และ 4.ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผิวทาง (Surface Defect)

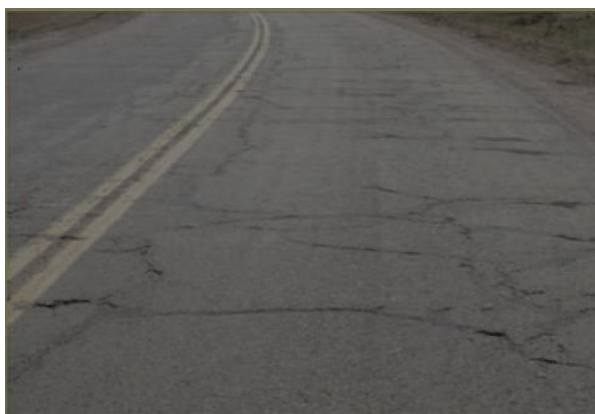
##### 1.1 ความเสียหายที่เกิดรอยแตก

1.1.1 รอยแตกแบบหนังจระเข้หรือรอยแตกจากความล้า (Alligator crack or fatigue crack) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกชนิดนี้มาจากเกิดจากอาการล้าของผิวทาง เนื่องจากมีน้ำหนักสูงมาบดทับผ่านบ่อยครั้ง



ภาพที่ 2.1 รอยแตกแบบหนังจระเข้หรือรอยแตกจากการล้า

1.1.2 รอยแตกจากการหดตัว (Shrinkage crack or Block crack) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกชนิดนี้สืบเนื่องมาจาก การขยายตัวหรือหดตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือ การใช้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติไม่เหมาะสม



ภาพที่ 2.2 รอยแตกจากการหดตัว

1.1.3 รอยแตกแบบเลื่อนไถล (Slippage crack) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกชนิดนี้ มาจากการที่ใช้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับการใช้งาน และโครงสร้างทางรับน้ำหนักมากเกินไปจนทำให้เกิดการวิบัติ



ภาพที่ 2.3 รอยแตกแบบเลื่อนไถล

1.2 การหลุดร่อน (Disintegration) สามารถแบ่งออกได้เป็น การเกิดหลุมบ่อ (Pot holes) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การสึกกร่อน (Reveling or weathering) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สาเหตุที่ทำให้เกิดการหลุดร่อนของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมาจากการที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สม่ำเสมอ ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน การระบายน้ำไม่ดีทำให้มีความชื้นเข้าไปแทรกตัวในแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นจำนวนมาก และการเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 การเกิดหลุมบ่อบนผิวทาง



ภาพที่ 2.5 การสึกกร่อนบนผิว

1.3 การเปลี่ยนรูปร่าง (Distortion) สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายลักษณะ เช่น การทรุดตัวเป็นแอ่ง (Grade Depression) การเกิดร่องล้อ (Rutting) ร่องล้อเป็นลักษณะความเสียหายชนิดหนึ่งของผิวจราจร ซึ่งเกิดการยุบตัวและเสียรูปร่างอย่างถาวรตามแนวล้อรถ โดยความเสียหายอาจเกิดในชั้นโครงสร้างทางหรือในชั้นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตก็ได้ White และคณะ (2002) ได้อธิบายว่าสาเหตุหรือกลไกหลักของปัญหาร่องล้อบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเหนือชั้นโครงสร้างทางที่แข็งแรง เกิดจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่สามารถต้านทานแรงเฉือนได้ Walker (1999) แบ่งร่องล้อเป็น 4 ประเภท

1.3.1 ร่องล้อที่เป็นผลมาจากการอัดแน่นของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต (Consolidation) เนื่องจากการบดอัดไม่เพียงพอหรือไม่ได้ตามข้อกำหนดขณะก่อสร้าง

1.3.2 ร่องล้อที่เป็นผลมาจากผิวทางสึกหรอ (Surface Wear) เนื่องจากการขัดสีระหว่างล้อยางกับผิวจราจร

1.3.3 ร่องล้อที่เป็นผลมาจากการเกิด Flow เนื่องจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตไม่เหมาะสม เช่น ส่วนผสมไม่เป็นไปตามข้อกำหนด แอสฟัลต์ซีเมนต์มีคุณภาพไม่ดี ตลอดจนกระบวนการผสมที่โรงงาน เทคนิคขั้นตอนการปูผิวและการบดอัด วิธีการตรวจสอบควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง เป็นต้น ร่องล้อประเภทนี้จึงมีชื่อเรียกว่า Instability Rutting

1.3.4 ร่องล้อที่เป็นผลมาจากการเสีयरูปร่างเชิงกลศาสตร์ เนื่องจากความสามารถในการแบกทานน้ำหนักบรรทุกของชั้นโครงสร้างทาง ได้แก่ คุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความหนาของโครงสร้างชั้นทางไม่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง

ความเสียหายเป็นร่องล้อที่พบในประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ ได้แก่

- ร่องล้อเกิดในชั้นโครงสร้างทาง (Structural Rutting) เนื่องจากการยุบตัวในแนวตั้งอย่างถาวรของชั้นโครงสร้างทางภายใต้แรงกระทำซ้ำซากของน้ำหนักจราจร (Repeated Traffic Loads) ซึ่งมีสาเหตุหลักเกิดจากการยุบตัวอย่างถาวรในชั้นดินฐานราก (Subgrade Soil) ดังภาพที่ 2.6

- ร่องล้อเกิดในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Rutting หรือ Instability Rutting) เนื่องจากวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวไปด้านข้างตามแนวล้อรถ โดยมีสาเหตุหลักเกิดจากคุณสมบัติด้านโครงสร้างของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น ค่าเสถียรภาพความแข็งแรง (Stability) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตไม่สามารถแบกรับน้ำหนักบรรทุกเกินพิกัดที่กระทำซ้ำซากได้ ดังภาพที่ 2.6

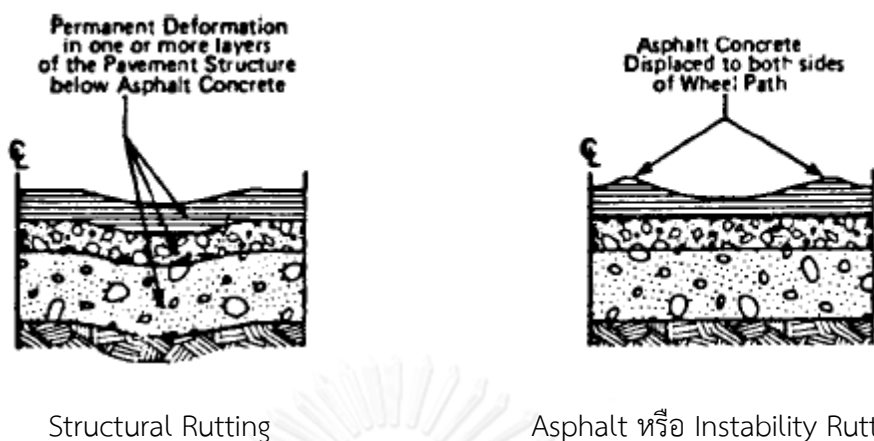
ปัจจุบันปัญหาร่องล้อบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้นำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางแบบใหม่แล้ว (NCHRP 2004) โดยได้แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

- ร่องล้อที่เป็นผลมาจากการอัดแน่นหรือยุบตัวในแนวตั้งของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและชั้นโครงสร้างทาง เนื่องจากปริมาณช่องว่างอากาศของวัสดุชั้นทางสูงเกินไปหรือการบดอัดขณะก่อสร้างไม่ดี โดยการเสีयरูปร่างจะเกิดในแนวตั้งตามแนวกึ่งกลางของล้อรถเท่านั้น แต่จะไม่ปรากฏร่องรอยการปูดบวมหรือเคลื่อนตัวไปด้านข้าง

- ร่องล้อที่เป็นผลมาจากการเกิด Flow หรือการเคลื่อนตัวด้านข้าง โดยการเสีयरูปร่างจะเกิดใน

แนวตั้งตามแนวกึ่งกลางของล้อรถ ร่วมกับการปูดบวม (Shoving) ทั้งสองฝั่งของล้อรถ ทั้งนี้การทำนายและทดสอบพฤติกรรมการเกิดร่องล้อสำหรับกรณีหลังจะมีความซับซ้อนกว่ากรณีแรก

ดังนั้นร่องล้อไม่ได้เกิดจากปัญหาของชั้นดินเดิม (Subgrade) หรือชั้นพื้นทางเท่านั้น แต่อาจเกิดจากปัญหาของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก็ได้ วิธีการออกแบบโครงสร้างชั้นทางให้แข็งแรงและปลอดภัยจำเป็นต้องพิจารณาโครงสร้างชั้นทางทั้งระบบ (NCHRP 2004) กล่าวคือ ถึงแม้ว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ออกแบบให้มีความแข็งแรงที่ดีแล้ว แต่ถ้าชั้นโครงสร้างทางไม่แข็งแรง ปัญหาร่องล้อก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้ และในทางกลับกัน ถ้าชั้นโครงสร้างทางได้ออกแบบให้มีความแข็งแรงดีแล้ว แต่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตหรือกระบวนการก่อสร้างบกพร่อง ปัญหาร่องล้อก็เกิดขึ้นได้เช่นกัน



ภาพที่ 2.6 รูปแบบการเกิดร่องล้อ  
ที่มา: (White และคณะ, 2002)

การแก้ไขปัญหาร่องล้อบนถนนแอสฟัลต์คอนกรีตจำเป็นต้องทราบสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้น แต่สิ่งสำคัญที่สุดคือ การพิจารณาโครงสร้างชั้นทางอย่างเป็นระบบ นั่นคือถึงแม้ว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีความแข็งแรงที่ดีก็ตาม แต่ชั้นโครงสร้างทางไม่แข็งแรง ความเสียหายก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้ หรือในทางกลับกัน ถ้าหากชั้นโครงสร้างทางมีความแข็งแรงดีแล้ว แต่ส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ดีหรือไม่เหมาะสม ความเสียหายก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้เช่นกัน

1.4 การเสียหายจากความชื้น (Moisture Damage) เกิดจากการที่มีความชื้นแทรกตัวเข้าไปในแอสฟัลต์คอนกรีตจนทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถจับตัวได้ดีกับวัสดุมวลรวม จนทำให้เกิดปัญหาการหลุดร่อนของผิวแอสฟัลต์คอนกรีต

## 2. ซีเมนต์ลอย (Fly ash)

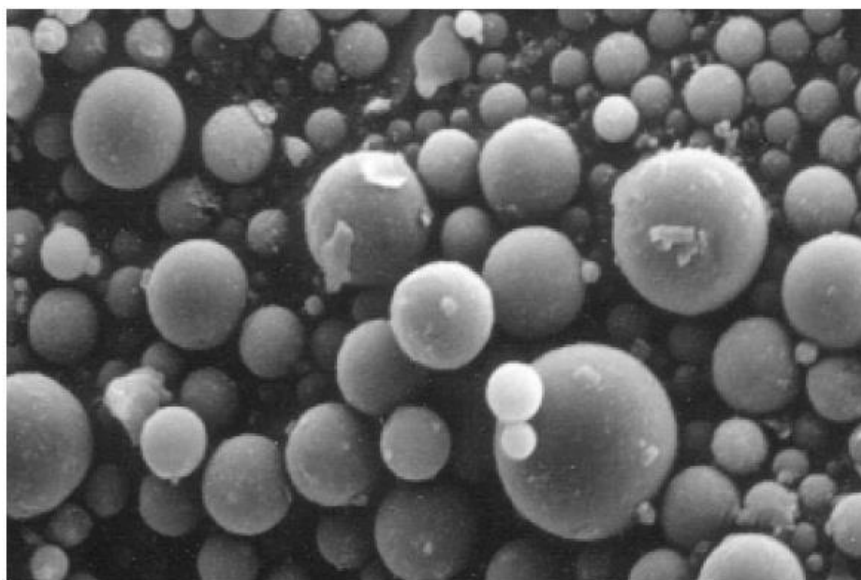
เถ้าลอยได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างมานานมาแล้ว เรียกว่า สารปอซโซลาน คือสารที่ประกอบไปด้วย ซิลิกา และอลูมินา อยู่ในปริมาณที่สูงเมื่ออบเป็นผงละเอียด จะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการ ยึดประสาน โดยนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งในด้าน กำลังอัด ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ความสามารถทำงานได้ ลดการแตกร้าว และลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น และได้ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนน โดยการนำไปปรับปรุงคุณภาพทั้งดินคันทาง รวมถึงในด้านของชั้นพื้นทางด้วย และเริ่มที่จะมีการนำมาผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพชั้นผิวทางอีกด้วย โดยเถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงกันเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย (Fly

ash) ฝุ่นจะถูกลดการจับฝุ่น (Electrostatic Precipitation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า การกระจายตัวของขนาดผล (Gradation) จะขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บและวัสดุที่ใช้เก็บ ส่วนใหญ่ข้อมูลที่ได้จากโรงไฟฟ้าจะมีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 1.5 ไมโครเมตร โดยทั่วไปแล้วรูปร่างของฝุ่นจะมีลักษณะกลมและมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 0.5–100 ไมโคร แต่อย่างไรก็ตามยังมีเศษเล็กๆ น้อยๆ ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ แต่โดยทั่วไปรูปร่างจะเป็นลักษณะกลมที่มีผิวขรุขระ จากลักษณะของฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดเล็กจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมแทรกได้ โดยฝุ่นที่ถูกนำมาใช้สามารถแบ่งประเภทได้เป็น CLASS C และ CLASS F ตามมาตรฐาน AASHTO M295 และ ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน AASHTO M295(ASTM C618) Class C และ Class F

Chemical Requirements		Class F	Class C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	min%	70	50
$\text{SiO}_3$	max%	5	5
Moisture Content	max%	3	3
Loss on Ignition (LOI)	max%	5	5
<b>Optional Chemical Requirements</b>			
Available Alkalies	max%	1.5	1.5
<b>Physical Requirements</b>			
Fineness (+325 Mesh)	max%	34	34
Pozzolanic Activity/Cement (7 Days)	min%	75	75
Pozzolanic Activity/Cement (28 Days)	min%	75	75
Water Requirements	max%	10.5	10.5
Autoclave Expansion	max%	0.8	0.8
Uniformity Requirements: Density : Fineness	max%	5	5
	max%	5	5
<b>Optional Physical Requirements</b>			
Multiple Factor (LOI x Fineness)		25.5	-
Increase in Drying Shrinkage	max%	0.03	0.03
Uniformity Requirements: Air Entraining Agent	max%	20	20
Cement/Alkali Reaction : Mortar Expansion (14 Days)	max%	0.02	-





ภาพที่ 2.7 ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยาย 2000 เท่า  
ที่มา: American Coal Ash Association(2003)

โดยเถ้าลอยที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับวัสดุผสมแทรกที่นำมาผสมกับแอสฟัลต์คอนกรีต AASHTO M17 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมแทรกตามมาตรฐาน AASHTO M17

ขนาดของวัสดุผสมแทรก		การปนเปื้อนของสารอินทรีย์	Plasticity Index
ขนาดตะแกรง	ร้อยละที่ผ่านตะแกรง		
0.6 มม. (No.30)	100	ต้องไม่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อน	< 4
0.3 มม. (No.50)	95 - 100		
0.075 มม. (No.200)	70 - 100		

### 3. ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

จากที่ได้มีการบันทึกว่าปูนซีเมนต์ถือกำเนิดขึ้นมานานแล้ว โดยชาติแรกที่อยู่การใช้ปูนซีเมนต์คืออียิปต์ โดยใช้เป็นช่วยในการก่อสร้างพีรามิด โดยใช้ปูนขาวเป็นปูนก่อ (Mortar) แต่ปูนชนิดนี้ไม่ได้อยู่ตัวด้วยน้ำ ต่อมาจึงได้มีการเติมสารประเภท Hydraulic ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาเข้าไป เช่น หิน Volcanic Pozzolana หรือ ดิน Santorin คำว่า Hydraulic หมายถึงสารซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำแล้วสามารถแข็งตัวในอากาศหรือน้ำได้และเมื่อก่อตัวแล้วจะไม่ละลายในน้ำ และหลังจากนั้นได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านคุณลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ Hydraulic ต่อมาในศตวรรษที่ 19 มีความต้องการที่จะใช้ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จึงได้มีการค้นคว้านำเอาหินปูนมาผสมกับหินดินดานแล้วนำไปเผาจะเกิดสารซีเมนต์ (Cementing Material) ซึ่งสามารถแข็งตัวในน้ำและไม่ละลายน้ำโดยที่เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีสีคล้ายกับสีของหินในเหมืองของเกาะ Portland จึงเรียกกันว่า “ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ”

สำหรับในประเทศไทยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้อธิบายเกี่ยวกับ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์หมายถึงผลผลิตที่ได้จากปูนอัดเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ จนรวมตัวกันสุกพอดี ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ไฮดรอลิกแคลเซียมซิลิเกต (Hydraulic Calcium Silicates) กล่าวว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลผลิตที่ได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ Hydraulic Calcium Silicates วัสดุที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ได้แก่ หินปูน (Lime Stone) หินชอล์ค (Chalk) ดินสอพองหรือหินขาว (Marl) ซึ่งจะให้ธาตุแคลเซียม และพวกหินดินดาน (Shale) ดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate) และทราย (Sand) เป็นตัวให้ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่

3.1 Tricalcium Silicate ( $3\text{CaOSiO}_2$ ) ใช้ชื่อย่อว่า  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นสารประกอบที่ให้ ความแข็งแรงสูงในช่วงแรกและให้ความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

3.2 Dicalcium Silicate ( $2\text{CaOSiO}_2$ ) ใช้ชื่อย่อว่า  $\text{C}_2\text{S}$  เป็นสารประกอบที่ให้ ความแข็งแรงในช่วงแรกต่ำ แต่จะให้กำลังสูงขึ้นภายหลัง และให้ความร้อนต่ำเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

3.3 Tricalcium Aluminate ( $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ) ใช้ชื่อย่อว่า  $\text{C}_3\text{A}$  เป็นสารที่ให้ ความแข็งแรงเพียงเล็กน้อย ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ลื่น แต่ซีเมนต์ที่มีสาร  $\text{C}_3\text{A}$  มากจะไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้มากนัก

3.4 ( $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ใช้ชื่อย่อว่า  $\text{C}_4\text{AF}$  เป็นสารที่ช่วยในด้านความดันอยู่ตัว (Soundness) และช่วยป้องกันปฏิกิริยาเคมีจากสิ่งต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรง

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (ม.อ.ก.) แบ่งพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
2. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 2 เป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ซึ่งให้ความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง
3. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 3 เป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์แข็งเร็ว (High-early Strength Portland Cement)
4. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 4 เป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement)
5. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 เป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทนซัลเฟตสูง (Sulfate-Resistant Portland Cement)

จากวัสดุผสมแทรกที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 2 ตัว สามารถเปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุของวัสดุผสมแทรก

องค์ประกอบ	Fly Ash Class F	Fly Ash Class C	Portland Cement
SiO <sub>2</sub>	55	40	23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	17	4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	6	2
CaO	9	24	64
MgO	2	5	2
SO <sub>3</sub>	1	3	2

#### 4. วัสดุแอสฟัลต์สำหรับผิวทาง

แอสฟัลต์ที่ผลิตเพื่อใช้ในงานทางมีมากมายหลายชนิดตามความเหมาะสมของงานที่ใช้และสภาพดินฟ้าอากาศในแต่ละพื้นที่ รวมไปถึงวิธีการที่จะนำไปใช้งาน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) และแอสฟัลต์ชนิดเหลว (Liquid Asphalt) แอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่ได้จากการกลั่นน้ำมันและผ่านกระบวนการต่างๆ ระบบการแบ่งเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อนำไปใช้งานจะมี 5 ระบบ ตามลักษณะของการผลิตหรือคุณสมบัติที่พิจารณา คือ

4.1.1 เพนนิเตรชันเกรด (Penetration Grade) เป็นการแบ่งเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากการกลั่นโดยตรง เช่น AC/60-70 ; AC หมายถึงแอสฟัลต์ซีเมนต์ 60-70 คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบ Penetration Test

4.1.2 โบลนเกรด (Blown Grade) เป็นการแบ่งเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่ได้จากการนำเอาแอสฟัลต์ซีเมนต์ ไปผ่านกระบวนการเป่าลมที่อุณหภูมิ 250 – 300 OC เพื่อให้คุณสมบัติดีขึ้น ในด้านทนความร้อน และความแข็งแรง เช่น R 85/25 ; R ย่อมาจาก Rubbery มีคุณสมบัติบางส่วนใกล้เคียงยาง สังกะหรหรือยางธรรมชาติ 85 คือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดอ่อนตัว (Softening Point) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ 25 คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ Penetration

4.1.3 ฮาร์ดเกรด (Hard Grade) เป็นการแบ่งเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่ได้จากการนำเอาแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเพนนิเตรชันเกรดไปกลั่นตัวที่อุณหภูมิสูงภายใต้สุญญากาศ ทำให้ได้แอสฟัลต์ที่มีความแข็งแรงมาก เช่น H 80/90 ; H ย่อมาจาก Hard 80/90 คือค่าอุณหภูมิที่แอสฟัลต์อ่อนตัว (Softening Point)

4.1.4 วิคอสซิตีเกรด (Viscosity Grade) เป็นการแบ่งเกรดแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยใช้ค่า Viscosity เป็นตัวกำหนด เช่น AC-10 ; AC หมายถึงแอสฟัลต์ซีเมนต์ 10คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบ Viscosity Test

4.1.5 เพอฟอร์แมน เกรด (Performance Grade) เป็นการแบ่งเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์หรือแอสฟัลต์ซีเมนต์ดัดแปลงคุณภาพตามระบบของ SUPERPAVE (Superior PER forming Asphalt Pavements) ของโครงการ SHRP (The Strategic Highway Research Program) โดยกำหนด ค่าอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดที่แอสฟัลต์ยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพตามข้อกำหนด เช่น PG 58-34 ; PG ย่อมาจาก Performance Grade 58 หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดที่แอสฟัลต์มีคุณสมบัติทาง กายภาพตามข้อกำหนด -34 อุณหภูมิต่ำสุดที่แอสฟัลต์มีคุณสมบัติทาง กายภาพ ตามข้อกำหนด

#### 4.1 แอสฟัลต์ชนิดเหลว Liquid Asphalt

แอสฟัลต์ชนิดนี้ ได้จากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับสารละลาย (Solvents) ซึ่งจะมีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิปกติ เมื่อนำไปใช้งานทำผิวจราจร สารละลายจะระเหยไปเหลือแต่แอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยแอสฟัลต์ชนิดเหลวแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของสารละลายคือ

4.2.1 Cutback Asphalt คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับสารละลายที่เป็นน้ำมันชนิดต่างๆ ลักษณะชั้นเหลวจะขึ้นอยู่กับ Penetration Grade ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาเป็นส่วนผสม Cutback Asphalt สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะคือ

4.2.1.1 Rapid Curing Liquid Asphalt (RC) เป็นประเภทที่แห้งตัวไว (Fast Setting) โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 80/100 หรือ 60/70 ผสมกับ Naphtha (Gasoline) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ระเหยง่าย

4.2.1.2 Medium Curing (MC) เป็นประเภทที่ใช้เวลาในการแห้งตัว (Setting) นานกว่า RC. โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 ผสมกับ Kerosene

4.2.1.3 Slow Curing (SC) เป็นประเภทที่ใช้เวลาในการแห้งตัว (Setting) ช้าโดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 กับน้ำมันหนัก เช่น Diesel Fuel Oil หรืออาจได้จากการกลั่นโดยตรง แต่แอสฟัลต์ชนิด นี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

4.2.2 Emulsified Asphalt คือแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ (Colloidal Particles) กระจายอยู่ในน้ำที่มี Emulsifier ผสมอยู่เล็กน้อยเพื่อให้คงสภาพนี้ได้อยู่ได้ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแอสฟัลต์ประมาณ 60-65 % โดยใช้ Emulsifier ชนิดต่างๆ กัน และให้น้ำที่มีค่า pH ต่างๆ กันจะทำให้ได้ Emulsified Asphalt 2 ชนิดคือ

4.2.1.1 Anionic Emulsified Asphalt คืออนุภาคของแอสฟัลต์ที่กระจายอยู่ในน้ำมีประจุไฟฟ้าล Cationic Emulsified Asphalt คืออนุภาคของแอสฟัลต์ที่กระจายอยู่ในน้ำมีประจุไฟฟ้าบวก โดยทั่วไปในงานก่อสร้างทางจะนิยมใช้ Cationic Emulsified Asphalt มีประจุเป็นบวก Cationic Emulsified Asphalt สามารถแบ่งได้เป็น 3 เช่นเดียวกับ คัทแบคแอสฟัลต์ คือ

- ประเภทแยกตัวเร็ว (Cationic Rapid Setting CRS)

เมื่อนำมาใช้งานจะใช้เวลาที่เม็ดยางรวมตัวกันแล้วประจุไฟฟ้ากลับเป็นกลางเร็ว

- ประเภทแยกตัวปานกลาง (Cationic Medium Setting (MS))

เมื่อนำมาใช้งานจะใช้เวลาที่เม็ดยางรวมตัวกันแล้วประจุไฟฟ้ากลับ  
เป็นกลางปานกลาง

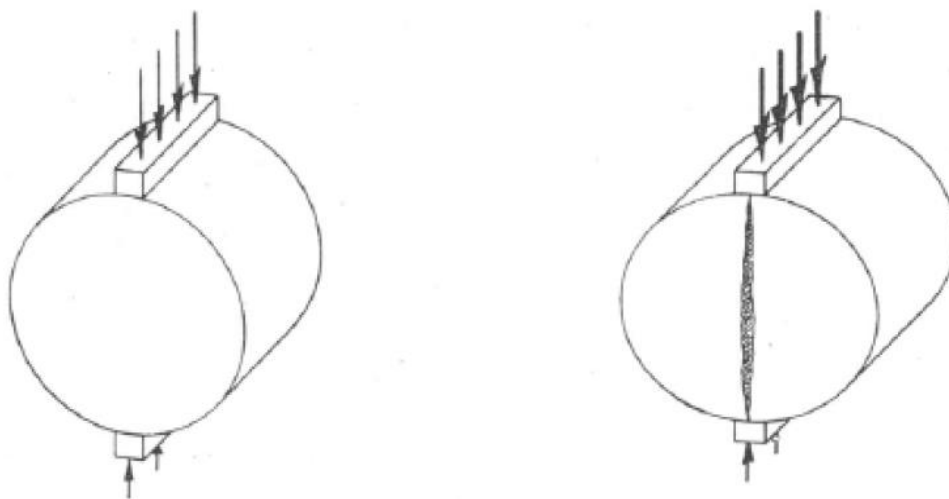
- ประเภทแยกตัวช้า (Cationic Slow Setting (SS))

เมื่อนำมาใช้งานจะใช้เวลาที่เม็ดยางรวมตัวกันแล้วประจุไฟฟ้ากลับ  
เป็นกลาง ช้า

## 5. การทดสอบคุณสมบัติ และออกแบบส่วนผสม

5.1 การทดลองเพื่อออกแบบส่วนผสมมอดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตให้  
ดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 “วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธี  
มาร์แชลล์ Marshall Method”

5.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile  
Strength: ITS) กระทำโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression load) ซึ่งอาจเป็นไป  
ได้ทั้งแบบอัตราคงที่ (Static load) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) โดยที่ให้น้ำหนักกระทำ  
ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง  
ที่มา : ชัยธันว์ พรหมศร (2546)

ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่าง สามารถหาได้จากสมการ 2.1

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

เมื่อ *ITS* คือ ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (เมกะปาสคาล)

*P* คือ แรงกระทำสูงสุด (นิวตัน)

*D* คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

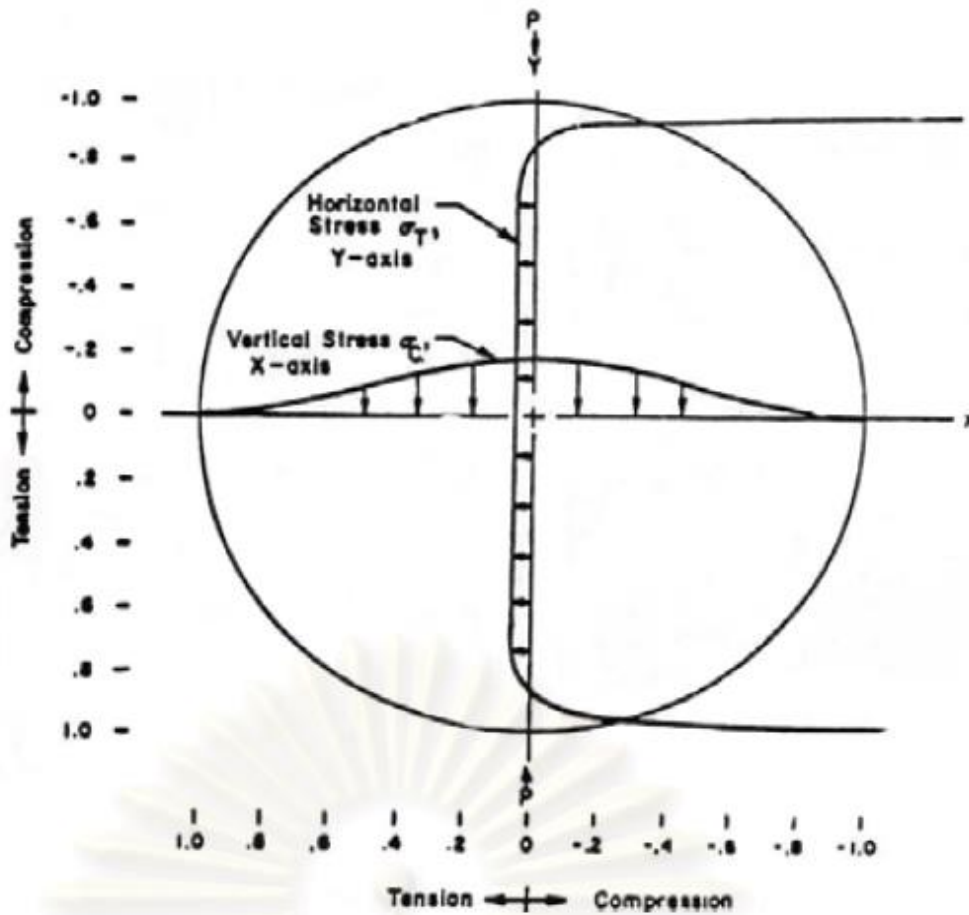
*T* คือ ความหนาเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง

การให้น้ำหนักต้องกระทำผ่านแท่งก้นน้ำหนัสด้านบนที่มีขนาดที่มีขนาดแนะนำ ดังนี้ สำหรับกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งก้นที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร และสำหรับกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งก้นที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร โดยที่แท่งก้นน้ำหนัkdังกล่าวมีด้านสัมผัสกับผิวของตัวอย่างทดสอบเป็นส่วนโค้งที่รัศมีเท่ากับรัศมีของก้อนตัวอย่างทำให้แนบชิดกันได้อย่างพอดี เพื่อประโยชน์ในการกระจายน้ำหนัก และในการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำให้คงที่ ซึ่งการให้น้ำหนักในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการให้น้ำหนักหรือแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้ง ซึ่งในที่สุดจะส่งผลให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวขึ้นมาตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเนื่องจากการให้น้ำหนักแบบคงที่หรือการให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำก็ตาม โดยมีลักษณะการกระจายของความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่างทดสอบทั้งในแนวราบและแนวตั้งขณะทำการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 และจะสังเกตเห็นได้ว่าที่บริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่างทดสอบความเค้นอัด (Compression Stress) ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่าของความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นในแนวราบดังนั้นจึงทำให้แน่ใจได้ว่าผลการทดสอบที่ได้รับเป็นคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุ มิได้มีความคาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวิธีการทดสอบแต่อย่างใด

ชัยธวัช พรหมศร และคณะ (2546) ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบวัสดุแบบแรงดึงทางอ้อมโดยสามารถสรุปถึงข้อดีของวิธีการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

- วิธีการทดสอบมีความเรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- ลักษณะการแตกร้าวของวัสดุเกิดขึ้นบริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดลองค่อนข้างต่ำ

- การทดสอบไม่มีผลจากสภาพผิวของวัสดุทดสอบ ทำให้แน่ใจได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง



ภาพที่ 2.9 ลักษณะการกระจายตัวของความเค้นดึงและความเค้นอัด ในการทดสอบแบบแรงดึง

ทางอ้อม

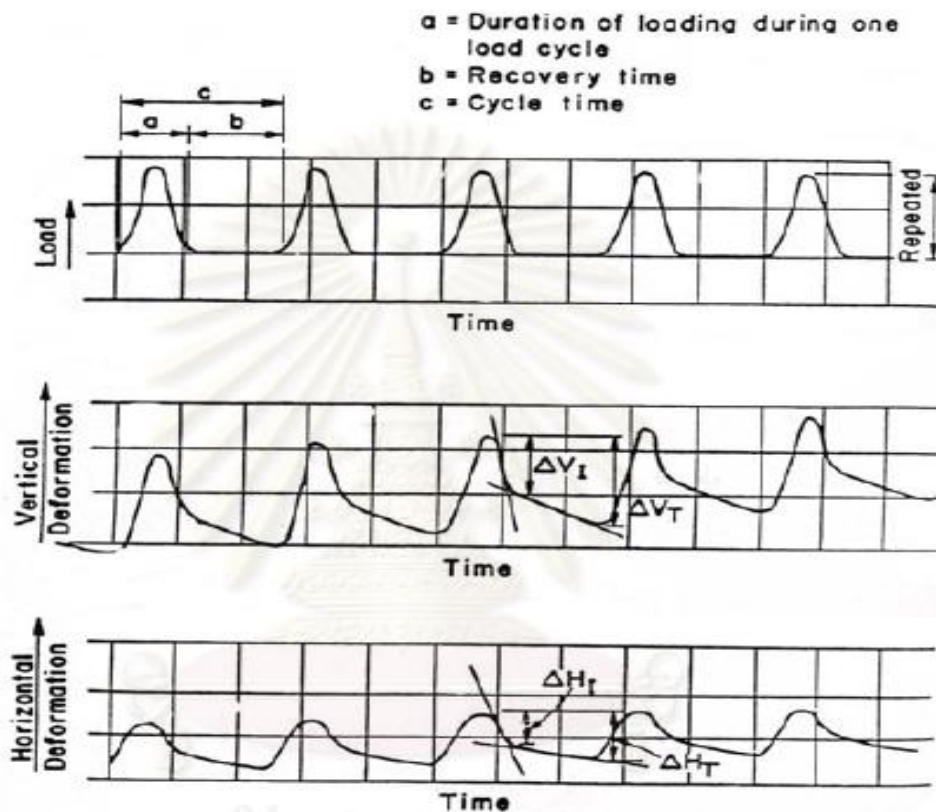
ที่มา : ชัยธันว์ พรหมศร (2546)

### 5.3 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) เป็นรูปแบบการให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) กับก้อนตัวอย่างในลักษณะ Haversine ซึ่งจะมีการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อย เพื่อรักษาสภาพในการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งกดน้ำหนักกับผิวของก้อนตัวอย่าง โดยทำการให้น้ำหนักสลับกับการหยุดพักน้ำหนักเข้าไปเข้ามา โดยตรวจสอบและบันทึกค่า Deformation ทั้งแนวราบและแนวตั้ง แต่จะให้ความสนใจเฉพาะในส่วนของค่า Recoverable Deformation ซึ่งพิจารณาได้จากสมมุติฐานที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Deformation มีลักษณะเป็นเส้นตรงตามที่แสดงในภาพที่ 2.10



ค่าเหล่านี้จะนำมาคำนวณหาค่า Resilient Modulus of Elasticity นอกจากนี้การทดสอบแบบนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่า Permanent Deformation ที่อาจเกิดมาจาก Repeated Load ได้อีกด้วย

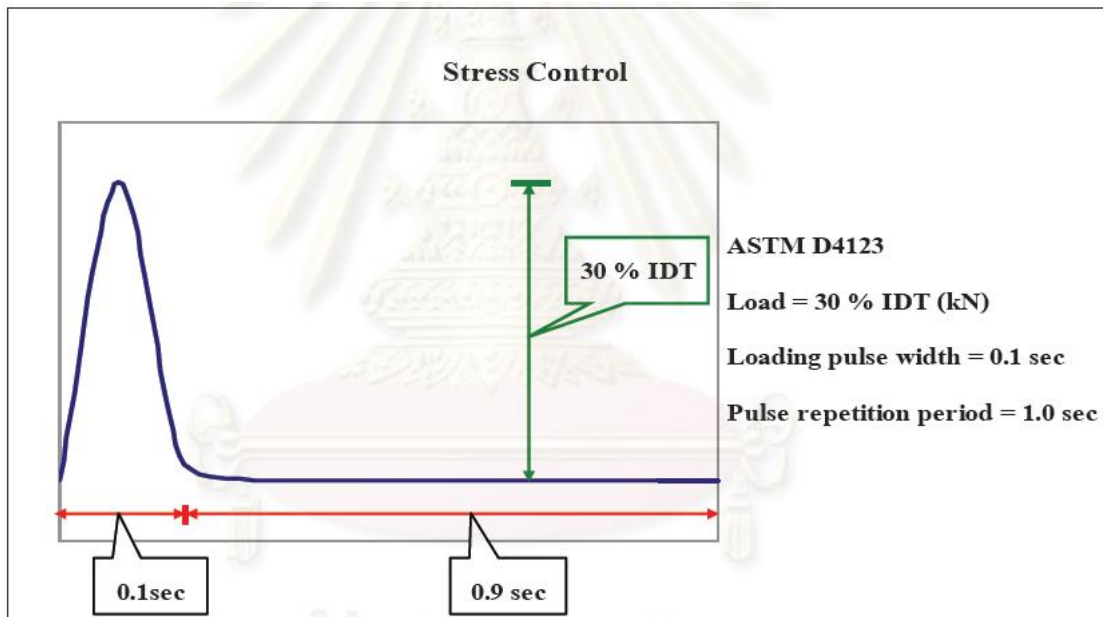


ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Repeated – Load Indirect Tensile Test

ที่มา : ชัยฉันทน์ พรหมศร (2541)

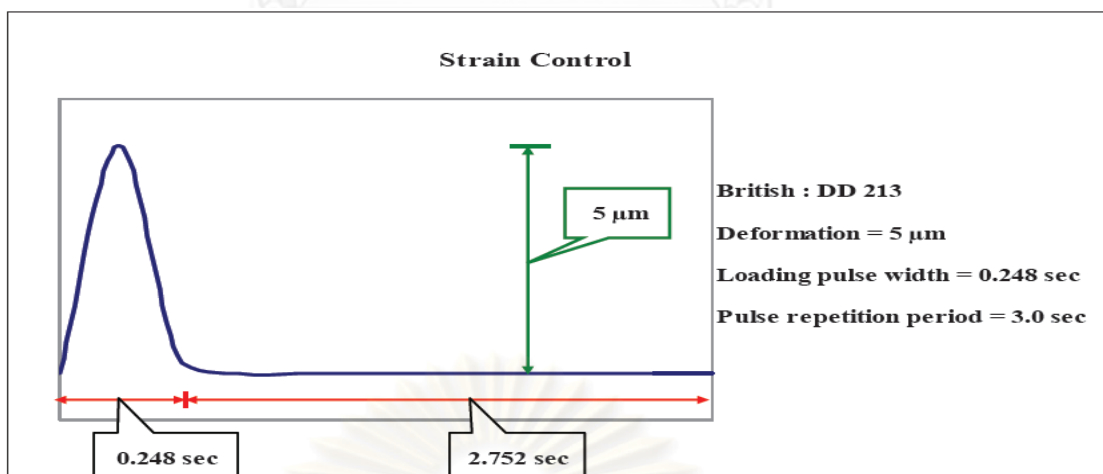
การให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำสามารถแบ่งลักษณะแรงกระทำออกเป็น 2 วิธีคือ การทดสอบแบบควบคุมความเค้นที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (Stress-Control Test) เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา และอีกวิธีหนึ่งทดสอบแบบควบคุมความเครียดที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (Strain-Control Test) เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตค่อนข้างบาง (ชัยฉันทน์ พรหมศร, 2541)

มาตรฐาน ASTM D4123 มีภาพแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในภาพแบบ Haversine Wave ทุกๆ 1 วินาที ซึ่งแบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที โดยแสดงในภาพที่ 2.11 โดยให้น้ำหนักกระทำเท่ากับร้อยละ 30 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ในอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 2.11 การทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวแบบควบคุมความเค้น (Stress-Control Test)

มาตรฐาน British: DD213 มีภาพแบบการป้อนน้ำหนักรจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในภาพแบบ Haversine Wave ทุกๆ 3 วินาที ซึ่งแบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.248 วินาที และเวลาพัก 2.752 วินาที โดยแสดงในภาพที่ 2.12 โดยให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบโดยประมาณเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )



ภาพที่ 2.12 การทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวแบบควบคุมความเครียด (Strain-Control Test)

จากมาตรฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ได้ประยุกต์การให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ตามมาตรฐาน British: DD213 เนื่องจากถนนลาดยางในประเทศไทยมีความหนาที่ค่อนข้างบาง จึงได้เปลี่ยนช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนแอสฟัลต์คอนกรีตเท่ากับ 0.1 วินาที และเวลาพักเท่ากับ 0.9 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM D4123 ซึ่ง

เป็นช่วงเวลาที่สามารถจำลองความถี่ที่เกิดขึ้นจากปริมาณจราจรได้ใกล้เคียงมากกว่า โดยโมดูลัสคืนตัวสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$E = \frac{P(\nu + 0.27)}{h_c H} \quad (2.2)$$

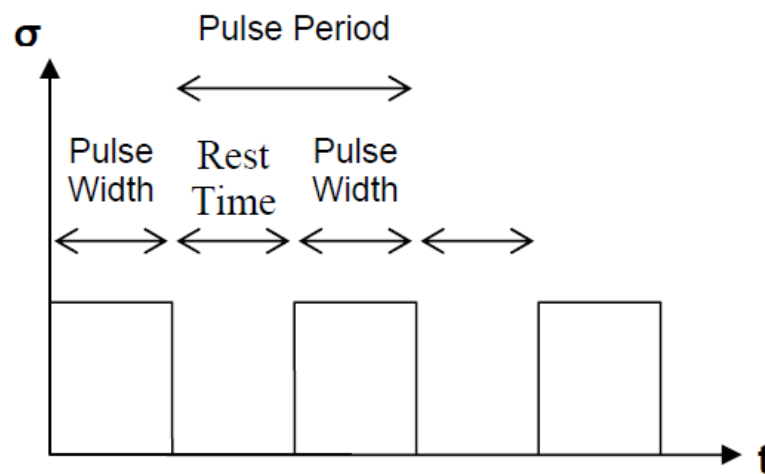
$$\varepsilon = \frac{H}{D} \quad (2.3)$$

โดยที่	$E$	คือ	ค่าโมดูลัสคืนตัวโดยประมาณ (เมกะปาสคาล)
	$P$	คือ	น้ำหนักกระทำสูงสุด (นิวตัน)
	$\nu$	คือ	ค่า Poisson's Ratio โดยประมาณ
	$h_c$	คือ	ความสูงของก้อนตัวอย่างโดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
	$H$	คือ	ระยะการคืนตัวในแนวนอนทั้งหมด (มิลลิเมตร)
	$D$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
	$\varepsilon$	คือ	ค่าการคืนตัว

#### 5.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวร

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานการยุบตัวอย่างถาวร โดยใช้การทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ซึ่งเป็นการทดลองโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกน ในลักษณะกระทำซ้ำต่อก้อนตัวอย่าง สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ BS DD 226:1996 “Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixture subject to unconfined dynamic loading”

ในการทดสอบจะป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำขนาด 100 kPa ด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที แบ่งเป็นช่วงเวลาที่ให้น้ำหนัก 1 วินาที และช่วงเวลาที่พัก 1 วินาที โดยก่อนที่จะป้อนน้ำหนักกระทำซ้ำ จะให้น้ำหนักคงที่ที่ 10% ของน้ำหนักกระทำซ้ำ หรือ 10 kPa เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C 55°C แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และ 55°C แบบแช่น้ำ (Soaked) โดยลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับเวลาจะแสดงในรูปที่ 2.13



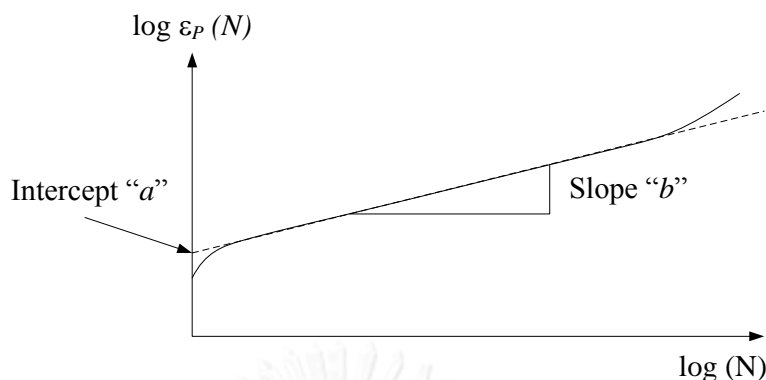
ภาพที่ 2.13 แสดงลักษณะการให้น้ำหนักของการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร

สำหรับค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนหรือค่าการยวบตัวในการ ทดสอบจะวัดโดย เครื่องวัด 2 ชุด ที่ติดตั้งบนก้อนตัวอย่าง เพื่อวัดการยวบตัวที่เกิดขึ้นตามแนวแรง ของก้อนตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปค่าการยวบตัวสะสม หรือค่า ความเครียดสะสม (Accumulated Strain) ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการเพิ่มน้ำหนัก การทดสอบ จะทำที่จำนวน 1800 รอบการป้อนน้ำหนัก โดยสมการคำนวณความเครียดสะสมได้จากสมการที่ 2.4

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta H}{H} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\varepsilon_p$  คือ ค่าการยวบตัวสะสมหรือค่าความเครียดสะสม  
 $\Delta H$  คือ ขนาดการยวบตัว (มิลลิเมตร)  
 $H$  คือ ความหนาของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

โดยค่าการยวบตัวถาวรภายใต้แรงกระทำคงที่สามารถ แบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการ คืบเริ่มต้น (Primary Creep) ช่วงการคืบช่วงที่สอง (Secondary Creep) และการคืบช่วงสุดท้าย (Rapture Creep) โดยจำนวนครั้งของการให้แรง ณ จุดเสียรูปหรือจำนวนการไหล จะหาได้จากจุด เปลี่ยนความชันของช่วงที่สองและช่วงสุดท้าย จากผลการทดสอบทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ โดยสมการการประมาณค่าความเครียดยวบตัวถาวรได้โดยแสดงอยู่ในรูปของสมการเลขยกกำลัง (Power function) เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับจำนวนรอบการทดสอบ  
ที่มา : ธนกร และคณะ (2552)

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Xiao-di และ (2011) พบว่าการออกตัวหรือการเร่งความเร็วของรถไม่มีผลต่อการเกิดร่องล้อบนผิวจราจรช่วงขึ้นทางลาดชันหรือบริเวณทางแยก แต่ในทางกลับกัน การชะลอความเร็วเพื่อหยุดรถหรือจอดรอสัญญาณไฟ ก่อให้เกิดความเครียดแบบเฉือนในแนวราบ (Horizontal Shear Strain) อย่างมาก ซึ่งส่งผลให้ผิวทางปูดบวม (Shoving) และเสียรูปเป็นร่องล้อบริเวณทางแยกได้

Al-Khateeb และคณะ (2011) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดร่องล้อบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดันลมยาง และความแข็งแรงของดินฐานราก ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Finite Element พบว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างมาก วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 40, 25 และ 5 องศาเซลเซียส จะมีค่า Dynamic Modulus เท่ากับ 1700, 1900 และ 3500 MPa ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้เกิดร่องล้อลึกประมาณ 0.9, 0.3 และ 0.2 เซนติเมตร ตามลำดับ ในกรณีที่อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้แรงดันลมยางเท่ากับ 0.8, 0.7 และ 0.55 MPa จะเกิดร่องล้อลึกประมาณ 0.9, 0.5 และ 0.3 เซนติเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ร่องล้อบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตยังลดลงเมื่อค่า CBR ของดินฐานราก Subgrade เพิ่มขึ้น

Pirabaroban และคณะ (2003) ศึกษาประเมินการเกิดร่องล้อในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตอาศัยแบบจำลองทาง Finite Element โดยพบว่าความเร็วของรถมีอิทธิพลต่อการเกิดร่องล้อ วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนามาก จะมีโอกาสเกิดร่องล้อได้สูง โดยความสัมพันธ์มีแนวโน้มการเกิดร่องล้อลดลงเมื่อความเร็วสูง ในทางกลับกันแนวโน้มการเกิดร่องล้อจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลดลง

Wang และ Al-Qadi (2010) ศึกษาการเกิดร่องล้อและการปูดบวมบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต มีสาเหตุเกิดจากรถที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำและขณะที่รถชะลอความเร็ว โดยค่าอัตราการทำลาย (Damage Factor) ขณะที่รถชะลอความเร็วอาจสูงถึง 8-32 เท่าเมื่อเทียบกับสภาพการใช้

งานปกติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากนี้ขณะที่รถชะลอความเร็วยังเพิ่มโอกาสการเกิดร่องล้อหรือการบุบวมบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตประมาณ 2.0 ถึง 2.6 เท่า เนื่องจากความเครียดแบบเฉือนบนผิวทางเพิ่มขึ้น

Dong และคณะ (2010) พบว่าการกระจายของหน่วยแรงภายในโครงสร้างชั้นทางช่วงการออกตัวและการชะลอความเร็วเพื่อจอดรอสัญญาณไฟจราจรบริเวณทางแยก มีความแตกต่างไปจากสภาพการใช้งานปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระจายตัวและขนาดของหน่วยแรงเฉือนสูงสุดและหน่วยแรงเฉือนในแนวราบภายใต้น้ำหนักบรรทุก ส่งผลให้เกิดการเสียดรูปและวิบัติแบบแรงเฉือน โดยในสภาวะดังกล่าวโครงสร้างชั้นทางจะแสดงพฤติกรรมหรือคุณลักษณะที่ส่งผลให้เกิดร่องล้อบนผิวจราจร

Santucci (2001) ได้แนะนำแนวทางของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตด้านร่องล้อ ดังนี้คือคัดเลือกเฉพาะวัสดุส่วนผสมที่ได้คุณภาพเท่านั้น ต้องมีการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้างที่เข้มงวดและส่วนผสมต้องเป็นไปตามมาตรฐานและข้อกำหนดการออกแบบที่ถูกต้องและเหมาะสม ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งประกอบไปด้วยมวลรวมหยาบที่มีคุณลักษณะและคุณสมบัติที่ดี มีปริมาณสัดส่วนวัสดุมวลรวมหยาบเพิ่มขึ้นจะช่วยให้ส่วนผสมสามารถต้านร่องล้อได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ก็มีความสำคัญเช่นกัน แต่อย่างน้อยว่าคุณลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม นอกจากนี้เทคนิคและขั้นตอนการบดทับขณะก่อสร้างจะช่วยเพิ่ม Interlocking ระหว่างเม็ดหินในส่วนผสมได้ ดังนั้นจึงเพิ่มความต้านทานการเกิดร่องล้อให้กับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้เป็นอย่างดี

Puzinauskas (1969) ได้ศึกษาเถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุผสมแทรก (Fillers) ที่มีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพแอสฟัลต์ผสมร้อน (HMA) โดยอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในที่มีขนาดใหญ่ของมวลรวมและแอสฟัลต์ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อความสามารถทำงานได้ ความชื้น แรงดึงผิวและลักษณะของรอยแตก (HMA) ผลของสารตัวเติมเป็นประโยชน์อย่างมากที่จะลดปริมาณช่องว่างของแอสฟัลต์ โดยทั่วไปขนาดอนุภาคที่เหมาะสมคือ 0.6 มม. (No.30) ตะแกรงอย่างน้อย 65-70 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักของอนุภาคที่ผ่าน 0.075 มม. (No.200)

Rosner และคณะ (1982) ได้ศึกษาการใส่เถ้าลอย 3-6% ใน HMA เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของความต้านทานความชื้น และเปรียบเทียบกับวัสดุผสมแทรกชนิดอื่นๆ พบว่าเมื่อผสมวัสดุผสมแทรกไปในก้อนตัวอย่าง ทำให้สามารถต้านทานความชื้นได้ดีขึ้น และยังช่วยในการลดช่องว่างอากาศอีกด้วย

Ali และคณะ (1996) ได้ศึกษาการใส่เถ้าลอย 2% ของน้ำหนักมวลรวม พบว่าเถ้าลอยไม่เพียงแต่ทำให้ยางแอสฟัลต์แข็งขึ้นแต่ยังให้ความแข็งแรงและป้องกันการลอกของยางได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาในเรื่องการทำงานในหน้างานและเรื่องความตึง ความเครียดของยางแอสฟัลต์ ต่อมาได้มีการศึกษานำปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมแทรกในมวลรวม และผลการทดสอบพบว่า

ให้ผลดีต่อการต้านทานความชื้นของ HMA อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของปูนขาว ที่ไม่ค่อยนิยมใช้กัน อย่างแพร่หลายนั้น ซึ่งปัจจุบันใช้ได้กันควบคู่กันไปซึ่งทำให้มีความต้านทานความชื้น ใน HMA

Oruc และคณะ (2007) ได้ศึกษาปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เพิ่มโดยการเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 0-6% พบว่า HMA ที่ไม่มีวัสดุผสมแทรกทิ้งไว้เป็นเวลา 6 ชม. มีความเสียหายมากกว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์

Hao และ Liu (2006) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการเพิ่มเถ้าลอย, ปูนขาว, ปูนซีเมนต์ และน้ำยาต้านการลอก 1% ของน้ำหนักมวลรวม โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติของขนาดคละ ที่แตกต่างกัน พบว่าหินแกรนิตทำให้เกิดร่องล่อมากที่สุด และผลชี้ชัดว่าการผสมปูนขาวจะให้ผลดี ที่สุดในการต้านทานร่องล่อ ร่องลงมาเป็นปูนซีเมนต์ส่วนด้านการต้านทานความชื้นเถ้าลอยและ ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการป้องกันดังกล่าว

ผลการศึกษาและเปรียบเทียบของวัสดุผสมแทรกชนิดต่างๆ สามารถสรุป ได้ดังนี้

1. แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุผสมแทรกจะเกิดร่องล่อได้มากขึ้นถ้าหากเพิ่ม ปริมาณฝุ่นหินปูน, ฝุ่นปูนขาว และปูนซีเมนต์ตามลำดับ
2. ส่วนผสมที่ผสมฝุ่นปูนขาวจะทำให้เกิดปริมาณช่องว่างของอากาศมากขึ้น และยังลดความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตมากกว่าการใส่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของ ฝุ่นปูนขาวที่ผสมกับวัสดุมวลรวมมากกว่าผสมกับปูนซีเมนต์
3. ในการใส่วัสดุผสมแทรกทั้งปูนขาว, ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยควรจะอยู่ในช่วง 3-5.5 %ของน้ำหนักมวลรวม และไม่ควรเกิน 5.5% เนื่องจากจะส่งผลเสียในด้านเสถียรภาพของ แอสฟัลต์คอนกรีตและด้านอื่นๆ การเพิ่มปริมาณวัสดุผสมแทรกที่มากขึ้นจะทำให้การเกิดร่องล่อที่ มากขึ้น ส่วนปูนซีเมนต์ให้ผลการเกิดร่องล่อน้อยที่สุด ร่องลงมาเป็นฝุ่นหินปูนและปูนขาวตามลำดับ
4. ในการใช้วัสดุผสมแทรกไม่ควรใส่วัสดุผสมแทรกหลายๆชนิด เข้าไปผสมกับ แอสฟัลต์คอนกรีต จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสของวัสดุลดลง ควรจะเลือกวัสดุผสมแทรกอย่างใดอย่างหนึ่ง

สมพงษ์ ชีไรสง (2542) ศึกษาปริมาณความเหมาะสมของการนำเถ้าลอยมาเป็นวัสดุ ผสมแทรก โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยร้อยละ 2-6 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม พบว่าเมื่อผสมเถ้าลอย ในก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตทำให้ ช่องว่างอากาศของก้อนตัวอย่างลดลง ค่าเสถียรภาพสูงขึ้น เมื่อ ผสมเถ้าลอยไม่เกินร้อยละ 4

นภัสรพี อนันตชัยพงศ์ และพิพัฒน์ สอนวงศ์ (2552) ศึกษาการทดสอบผลทดสอบ หาค่าเสถียรภาพและค่าการไหลของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทาง หลวงและพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมี ค่าเสถียรภาพสูงกว่าแอสฟัลต์ คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 40/50 และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 60/70

ตามลำดับ ส่วนดัชนีความแข็งแรง ชนิดของยางทั้ง 3 มีผลใกล้เคียงกันคือเกินค่ามาตรฐานที่ 80% (ข้อกำหนดทางหลวงไม่น้อยกว่า 75%) ดังนั้นผิวทาง PMA ให้ผลต่อการต้านทานร่องล้อได้ดีกว่า แอสฟัลต์คอนกรีตเกรด 40/50 และ แอสฟัลต์คอนกรีตเกรด 60/70 ตามลำดับ

นายทวิช ขอบพานิช (2552) ศึกษาหาคุณสมบัติของวัสดุงานทางแบบมาตรฐานซูเปอร์เพฟเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC 40/50 เกรด AC 60/70 และโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) ในการต้านทานการเกิดร่องล้อซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการแตกร้าวเนื่องจากความล้า พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตเกรด AC 60/70 มีความต้านทานการเกิดร่องล้อต่ำที่สุดและแอสฟัลต์คอนกรีต เกรด AC 40/50 มีความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงที่สุดเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ แต่ PMA จะมีความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงที่สุดเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ Dynamic Creep Test

กฤษณะ จันทรโชติ (2551) ศึกษาการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ 5 อุณหภูมิพบว่าโดยทั่วไปแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 40/50 และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 60/70 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่ 5 อุณหภูมิพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 40/50 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5-35 องศาเซลเซียส แต่ที่ อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ ยางแอสฟัลต์ ชนิด PMA จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าในขณะที่ แอสฟัลต์คอนกรีต ที่ใช้ ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 60/70 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำสุดและผลจากการทดสอบ Dynamic Creep test ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 60/70 จะเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรเร็วกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 40/50 และ PMA ในทุกอุณหภูมิ

ธนกร ชมภูรัตน์ และคณะ (2555) ทำการศึกษาความเสียหายที่เกิดจากความชื้นของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยทำการเปรียบเทียบชนิดของเกรดแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 40/50, AC 60/70 และ AC 80/100 พบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 40/50 สามารถลดความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้นได้ดีที่สุด



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ การเตรียมวัสดุเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสม และวัสดุผสมแตรก การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์ เพื่อเป็นส่วนผสมที่จะใช้ในการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุผสมแตรก และตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสมสานต่อไป การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรม การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรม ดังจะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม

การเตรียมส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงจะอ้างอิงถึงมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408/2532 “มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete or Hot Mix Asphalt)” โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

1. การทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 ให้เป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดวัสดุที่ ทล.-ก. 401/2531 “มาตรฐานข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Specification for Asphalt Cement)” และสำหรับแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ให้เป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดวัสดุที่ ทล.-ก. 408/2536 “มาตรฐานข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ (Specification for Polymer Modified Asphalt Cement for Asphalt Concrete)” โดยมีรายละเอียดข้อกำหนดดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานข้อกำหนดวัสดุสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทล.-ก. 401/2531

Properties	Penetration Grade		Unit	Test Method
	60/70			
	Min.	Max.		
Penetration at 25 °C (77 °F), 100 g, 5 s	60	70	0.1 mm	ทล.-ท. 403/2518
Flash point (Cleveland open cup)	232	-	°C	ทล.-ท. 406/2519
	450	-	°F	
Ductility at 25 °C (77 °F), 5 cm per min	100	-	cm	ทล.-ท. 405/2519
Solubility in Trichloroethylene	99.0	-	%	ทล.-ท. 409/2520
Thin-film oven test, 3.2 mm, 163 °C (325 °F), 5 hrs.				AASHTO T 179
Loss on heating	-	0.8	%	
Penetration of residue	54	-	% of original	
Ductility of residue at 25 °C (77 °F), 5 cm per min	50	-	cm	

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ ทล.-ก. 408/2536

Properties	Min.	Max.	Unit	Test Method
Penetration at 25 °C (77 °F), 100 g, 5 s	60	70	0.1 mm	ทล.-ท. 403/2518
Softening Point, Ring and Ball	70	-	°C	ASTM D36
Penetration Index	+3	-		NLT-181
Ductility at 13 °C, 5 cm per min	55	-	cm	ทล.-ท. 405/2519
Elastic Recovery at 25 °C, 10 cm	70	-	%	ASTM D6084
Float Test at 25 °C	3000	-	sec.	ASTM D139
Toughness/Tenacity Test, 25 °C				
Toughness	170	-	Kg-cm	ASTM D5801
Tenacity	100	-	Kg-cm	
Brookfield Viscosity, Share Rate 18.6 s <sup>-1</sup> , Spindle 21				
At 135 °C	-	3000	m Pa.S	ASTM D4402
At 165 °C	-	1000	m Pa.S	

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ ทล.-ก. 408/2536 (ต่อ)

Properties	Min.	Max.	Unit	Test Method
Storage Stability at 163 °C, 24 hrs. Difference in Softening Point	-	2	°C	ASTM D5892
Density at 25 °C	1.00	1.05	g/cc	ASTM D70
Flash point (Cleveland open cup)	220	0	°C	ASTM D92
Solubility in Trichloroethylene	99.0	-	%	ทล.-ท. 409/2520
Test on Residue from Thin Film Oven Test				
Weight Loss	-	0.5	%	ASTM D2872
Retained Penetration at 25 °C	70	-	%	ทล.-ท. 403/2518
Variation in Softening Point	4	6	°C	ASTM D36
Ductility at 13 °C, 5 cm/min	40	-	cm	ทล.-ท. 405/2519
Torsional Recovery at 25 °C	60	-	%	NLT-329

## 2. การทดสอบวัสดุมวลรวม

### 2.1 วัสดุมวลละเอียด ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลละเอียด ดังนี้

2.1.1 ค่าความคงทน (Soundness) ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 213/2531 การทดสอบนี้เพื่อหาสภาพความคงทนต่อสภาพอากาศ โดยการทดสอบใช้ โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ต้องไม่เกินร้อยละ 9

2.1.2 ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.- ท.203/2515 หรือ AASHTO T176 – 73 หรือ ASTM D2419 – 74 ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) วิธีการนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาสัดส่วนระหว่างฝุ่น หรือวัสดุประเภทเหมือนดินเหนียว กับ วัสดุเม็ดหยาบจำพวกกรวด หรือทรายที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งได้กำหนดค่าต่ำสุดของทรายสมมูลที่จะใช้ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

2.1.3 ขนาดคละ (Gradation) ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท.205/2516 หรือ AASHTO T27-70 ขนาดคละสำหรับมวลรวมละเอียด จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่าน หรือค้ำตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง

2.1.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.-ท.209/2518 หรือ AASHTO T84 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กกว่า 4.75 มม.)

### 2.2 วัสดุมวลหยาบ ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลหยาบ ดังนี้

2.2.1 ความคงทน (Soundness) ทำการทดสอบตาม มาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท.213/2531 หรือ AASHTO T104 – 77 หรือ ASTM C88 – 83

2.2.2 ค่าความสึกหรอของวัสดุมวลหยาบ (Los Angeles Abrasion) ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2515 หรือ ASTM C131 และ C535

2.2.3 ขนาดคละ (Gradation) ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท.204/2516 หรือ AASHTO T27-78 หรือ ASTM C136 – 84 A ขนาดคละสำหรับมวลรวมหยาบ จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่าน หรือค้ำตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง

2.2.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.-ท.207/2517 หรือ AASHTO T85 – 77 หรือ ASTM C127 – 84 ความถ่วงจำเพาะ

ของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (ขนาดโตกว่า 4.75 มม.) แบบส่วนใหญ่ (Bulk Specific Gravity) และแบบปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Water Absorption)

2.2.5 ดัชนีความแบน (Flakiness Index) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.-ท.210/2518 โดยเป็นการหามวลของวัสดุที่มีความหนา ของด้านแบนที่น้อยกว่า 3/5 เท่าของขนาดเฉลี่ยของวัสดุนั้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุที่นำมาทดสอบ

2.2.6 ดัชนีความยาว (Elongation Index) ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท.211/2518 เป็นการหามวลของวัสดุที่มีความยาวของส่วนยาวมากกว่า 1.8 เท่า ของขนาดเฉลี่ยของวัสดุ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับมวลของวัสดุที่นำมาทดสอบ

3. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมแตรก ทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D242 “Standard Specification for Mineral Filler For Bituminous Paving Mixture” โดยรายละเอียดมาตรฐานแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติวัสดุผสมแตรกที่ใช้ผสมตามมาตรฐาน ASTM D242

ขนาดตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล	การปนเปื้อนของ สารอินทรีย์	ดัชนีพลาสติก
0.600mm (No.30)	100	ไม่มีสารอินทรีย์ ปนเปื้อน	ไม่เกินร้อยละ 4
0.300mm (No.50)	95-100		
0.075mm (No.200)	70-100		

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานวัสดุมวลรวมที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สรุปลักษณะ และมาตรฐานการทดลอง ส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบ

วัสดุ	การทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ	หมายเหตุ
AC 60/70	คุณสมบัติของแอสฟัลต์	ทล.-ก. 401/2531	-
PMA	ซีเมนต์	ทล.-ก. 408/2536	-
วัสดุมวลละเอียด	ความคงทน	ทล.-ท. 213/2531	<9%
	ทรายสมมูล	ทล.-ท. 203/2515	>50%
	ขนาดคละ	ทล.-ท. 205/2516	-
	ความถ่วงจำเพาะ	ทล.-ท. 209/2518	-
วัสดุมวลหยาบ	ความคงทน	ทล.-ท. 213/2531	<9%
	ความสึกหรอ	ทล.-ท. 202/2515	<40%
	ขนาดคละ	ทล.-ท. 204/2516	-
	ความถ่วงจำเพาะ	ทล.-ท. 207/2517	-
	ดัชนีความแบน	ทล.-ท. 210/2518	<35%
	ดัชนีความยาว	ทล.-ท. 211/2518	<34%
วัสดุผสมแทรก	คุณสมบัติของวัสดุผสมแทรก	ASTM D242	PI ≤ 4%

### 3.2 การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Method)

การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์ ทำการออกแบบโดยใช้มาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 โดยสรุปเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

#### 1. การจัดอัตราส่วน (Proportion)

การจัดอัตราส่วน (Proportion) ของวัสดุมวลรวมหินร้อน (Hot Bin) แต่ละขนาดให้ได้ขนาดคละ (Gradation) ตามที่กำหนด และมีช่องว่างที่เหมาะสม เพื่อว่าเมื่อใส่แอสฟัลต์ลงไปผสม จะได้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณภาพตามต้องการดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลต์ตามมาตรฐาน ทล.-ม.408/2532

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



## 2. การบดอัดก้อนตัวอย่าง

ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์กรณีระดับปริมาณจราจรสูง (Marshall Method for Heavy Traffic Volume) ซึ่งจะทำการบดอัดก้อนตัวอย่างด้านละ 75 ครั้ง อ้างอิงตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 วิธีการแอสฟัลติกคอนกรีต โดยวิธีมาร์แชลล์ ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 การบดอัดก้อนตัวอย่าง

## 3. การหาความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง

การหาความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างนั้น ทำได้โดยการนำตัวอย่างไปชั่งในน้ำเทียบกับตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ เพื่อหาความสัมพันธ์ของช่องว่างของตัวอย่างต่อไป

## 4. การหาความสัมพันธ์ของช่องว่างในตัวอย่าง

การหาความสัมพันธ์ช่องว่างในก้อนตัวอย่างนั้นเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างในก้อนตัวอย่างกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ผสมในก้อนตัวอย่าง ประกอบไปด้วยช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate; VMA) หมายถึง ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่อยู่ในอนุภาคของแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว รวมถึงช่องว่างอากาศ และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วย ช่องว่างอากาศ (Air Voids; AV) หมายถึง ปริมาตรช่องว่างอากาศในก้อน

ตัวอย่าง และช่องว่างที่ถูกปกคลุมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Voids filled with Bitumen; VFB) ช่องว่างที่ถูกปกคลุมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ หมายถึง ช่องว่างในวัสดุมวลรวมที่ถูกปกคลุมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์

การก่อสร้างผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตของกรมทางหลวงในปัจจุบัน จะใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5.0 (ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของวัสดุมวลรวม) และมีช่องว่างของอากาศ (Air Void) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตประมาณร้อยละ 4.0 ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงต้องทำการทดลองเลือกอัตราส่วนหินร้อน (Hot Bin) มาผสมและบดอัดตามวิธีการของมาร์แชล เพื่อให้ได้อัตราส่วน ที่เมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ และทำการบดอัดแล้วทำให้ช่องว่างในส่วนผสมแอสฟัลต์เหลือประมาณ ร้อยละ 4 ทั้งนี้ในการหาอัตราส่วน ในปัจจุบันจะใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) กล่าวคือ ลองกำหนดอัตราส่วนที่มีขนาดคละอยู่ในกรอบของข้อกำหนดขึ้นมาหนึ่งอัตราส่วน แล้วทดลองบดอัดและคำนวณหาปริมาณช่องว่างในส่วนผสม (Air Voids) หากไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ก็จะเปลี่ยนอัตราส่วนใหม่แล้วทดลองซ้ำ ทำจนกว่าจะได้ ปริมาณช่องว่างในส่วนผสมที่เหมาะสม เพื่อเป็นตัวแทนที่จะใช้ในการผสมกับวัสดุผสมแทรกต่อไป

### 3.3 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ จะนำเอาวัสดุผสมแทรก ซึ่งได้แก่ ullaoy และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ มาผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชลล์ตามอัตราส่วนต่างๆ ที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC60/70 เป็นตัวเชื่อมประสาน และตัวอย่างที่ใช้ แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก รวมทั้งหมด 11 ชุดการทดสอบ โดยแต่ละรูปแบบการทดสอบจะแบ่งการทดสอบเป็น 3 เงื่อนไขดังนี้

1. การทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง (Unsoaked) การทำการเตรียมตัวอย่างในเงื่อนไขนี้ เริ่มจากการผสมส่วนผสมต่างๆ แล้วทำการบดอัดโดยวิธีมาร์แชลล์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.1 แล้วจึงนำตัวอย่างมาทำการทดสอบตามการทดสอบต่างๆ ต่อไป
2. การทดสอบที่อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง (Unsoaked) การทำการเตรียมตัวอย่างในเงื่อนไขนี้ เริ่มจากการผสมส่วนผสมต่างๆ แล้วทำการบดอัดโดยวิธีมาร์แชลล์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.2 แล้วจึงนำตัวอย่างมาทำการทดสอบตามการทดสอบต่างๆ ต่อไป
3. การทดสอบที่อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก (Soaked) การทำการเตรียมตัวอย่างในเงื่อนไขนี้ เริ่มจากการผสมส่วนผสมต่างๆ แล้วทำการบดอัดโดยวิธีมาร์แชลล์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำที่อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.3 แล้วจึงนำตัวอย่างมาทำการทดสอบตามการทดสอบต่างๆ ต่อไป

โดยแต่ละรูปแบบ และเงื่อนไขการทดสอบจะทำการเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับรูปแบบ และเงื่อนไขการทดสอบอย่างละ 3 ก้อน รวมทั้งสิ้น 330 ตัวอย่าง โดยสามารถสรุปอัตราส่วนผสม และจำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนผสมวัสดุผสมแทรกที่ผสมเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม

ส่วนผสม	อัตราส่วนผสมวัสดุผสมแทรก (ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม)	
	ปอร์แลนด์ซีเมนต์	เถ้าลอย
HMA	-	-
C1	1	-
F1	-	1
C0.5F0.5	0.5	0.5
C3	3	-
F3	-	3
C1.5F1.5	1.5	1.5
C5	5	-
F5	-	5
C2.5F2.5	2.5	2.5
PMA	-	-

ตารางที่ 3.7 จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (ก้อน)

ส่วนผสม	วิธีการทดสอบ										
	เสถียรภาพ + การไหล	ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม			โมดูลัสคั้นตัว			ความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร			
		25 °C แบบแห้ง	55 °C แบบแห้ง	55 °C แบบเปียก	25 °C แบบแห้ง	55 °C แบบแห้ง	55 °C แบบเปียก	25 °C แบบแห้ง	55 °C แบบแห้ง	55 °C แบบเปียก	
HMA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
C1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
F1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
C0.5F0.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
C3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
F3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
C1.5F1.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
C5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
F5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
C2.5F2.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
PMA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
รวม	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	
									รวมทั้งสิ้น		330



ภาพที่ 3.2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิห้องตัวอย่าง



ภาพที่ 3.3 หม้อควบคุมอุณหภูมิห้องตัวอย่าง

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ภายหลังจากการเตรียมห้องตัวอย่างของแต่ละส่วนผสมเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางวิศวกรรม ประกอบไปด้วย เสถียรภาพของมาร์แชลล์ (Marshall Stability) ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) ค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus) และค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation)

### 1. การทดสอบเสถียรภาพของมาร์แชลล์ (Marshall Stability)

เสถียรภาพของมาร์แชลล์ (Marshall Stability) เป็นค่าที่บอกว่าแอสฟัลต์คอนกรีต จะคงทนต่อการพังทลาย การเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีน้ำหนักรวมกระทำกับก้อนตัวอย่าง องค์ประกอบที่จะต้านทานแรงที่มากระทำ ในส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตคือแรงยึดเกาะ (Cohesion) ระหว่างเม็ดวัสดุผสมรวม สำหรับมาตรฐานวิธีการทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน ทล.-ท.604/2517 ทล.-ท. 604/2517 วิธีการแอสฟัลติกคอนกรีต โดยวิธีมาร์แชลล์ หรือ AASHTO T 245 “Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixture Using Marshall Apparatus” โดยวิธีการทดสอบ จะทำก้อนตัวอย่างของแต่ละสัดส่วน สัดส่วนละ 3 ก้อน มาทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพและการไหลของแต่ละสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.7 โดยใช้เครื่องทดสอบเสถียรภาพของสำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวง ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การหาค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์และการไหล

### 2. การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

ความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุ นอกจากนี้ค่าที่ได้ยังสามารถนำมาอ้างอิงสำหรับการกำหนดน้ำหนักรวม

กระทำของการทดสอบ การหาค่าโมดูลัสการคืนตัวโดยวิธีใช้แรงดึงทางอ้อม สำหรับวิธีการทดสอบ อ้างอิงจากมาตรฐานวิธีการทดสอบ AASHTO T283 “Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage” โดยกำหนดให้ป้อนอัตราน้ำหนักระทำเพื่อให้ยุบตัว คงที่เท่ากับ 2 นิ้ว/นาที่ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างพัง บันทึกค่าน้ำหนักกระทำสูงสุดเพื่อใช้ในการคำนวณ ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

การทดสอบจะแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง ตามเงื่อนไขการทดสอบที่กำหนด ดังตารางที่ 3.7 เพื่อนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Cooper รุ่น CRT NU 14 ของสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ดังแสดงในภาพที่ 3.5 และ 3.6



ภาพที่ 3.5 เครื่อง UTM CRT NU 14





ภาพที่ 3.6 การจัดวางตัวอย่างเพื่อทดสอบการต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

### 3. การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus; MR)

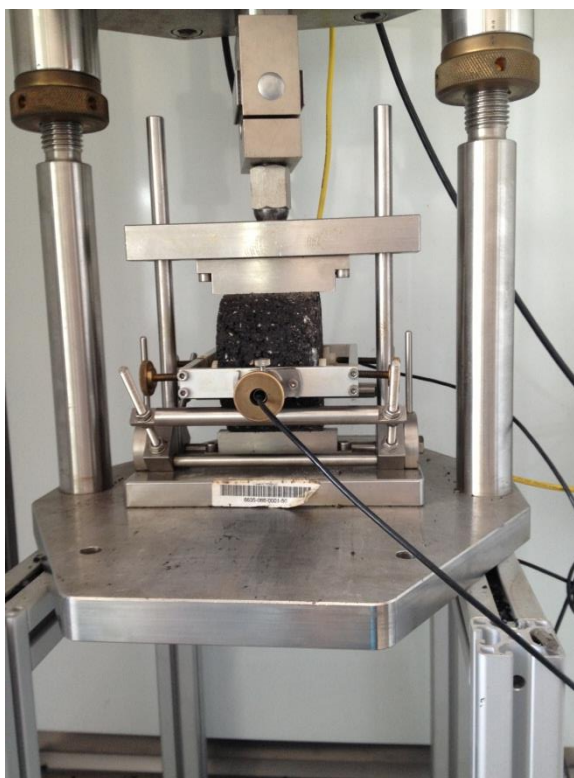
โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus: MR) คือ ค่าที่แสดงถึงการตอบสนองต่อน้ำหนักที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งแสดงออกในรูปแบบของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4123 Standard Test Method for Indirect Tension for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures และมาตรฐาน British DD213 Method for determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures โดยก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบ ในลักษณะเดียวกับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม โดยวางด้านที่เป็นส่วนของวงกลมให้เป็นส่วนรับน้ำหนักที่มากระทำ และทำการติดชุดวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของก้อนตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.7

รูปแบบของน้ำหนักที่มากระทำจะเป็นลักษณะแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในรูปแบบ Haversine Wave ทุกๆ 1 วินาที (1 Hz.) ซึ่งแบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที และใช้น้ำหนักกด 10% ของความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ของแต่ละสัดส่วน

การทดสอบจะแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง ดังตารางที่ 3.7 เพื่อนำไปทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus; MR) ตามเงื่อนไขการทดสอบต่อไป โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Cooper รุ่น CRT NU 14 ของสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง



ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ใช้จะทำการทดสอบที่ 200 รอบก่อน แล้วทำการเก็บข้อมูล ค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายที่มีการคืนตัวคงที่ โดยจะใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ในการคำนวณ ในการศึกษาครั้งนี้ จะใช้ค่าอัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.35



ภาพที่ 3.7 การจัดวางตัวอย่างเพื่อทดสอบโมดูลัสคืนตัว

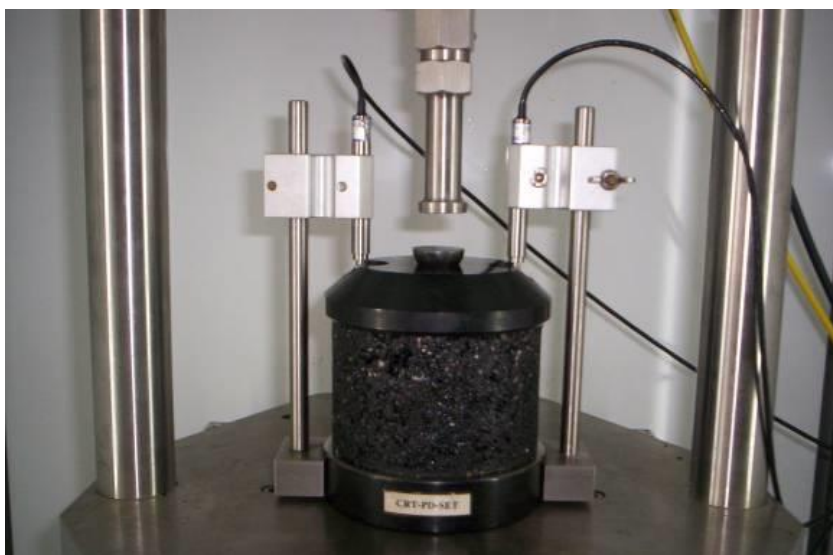
#### 4. การทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation)

การทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร จะทำการทดสอบโดยวิธีการทดสอบการล้าแบบพลวัต (Dynamic Creep Test) การทดสอบจะป้อนน้ำหนักกระทำแบบกระทำซ้ำ โดยการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐาน BS DD 226:1996 “Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixture subject to unconfined dynamic loading”

น้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบจะมีขนาดเท่ากับ 100 kPa โดยกระทำที่ความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที แบ่งเป็นช่วงเวลาการให้น้ำหนัก 1 วินาที และช่วงเวลาพัก 1 วินาที โดยก่อนที่จะป้อนน้ำหนักกระทำซ้ำ จะให้น้ำหนักคงที่ ที่ 10% ของน้ำหนักกระทำซ้ำ หรือ 10 kPa เป็นเวลา 10 นาที โดยการทดสอบจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง ดังตารางที่ 3.7

สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกน หรือค่าการยุบตัว ในการทดสอบจะวัดโดยเครื่องวัด 2 ชุด ที่ติดตั้งบนก้อนตัวอย่าง เพื่อวัดการยุบตัวที่เกิดขึ้นตามแนวแรง ของก้อนตัวอย่าง ดัง

ภาพที่ 3.8 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปค่าการยุบตัวสะสม หรือค่า ความเครียดสะสม (Accumulated Strain) ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการเพิ่มน้ำหนัก การทดสอบ จะทำที่จำนวน 1800 รอบการป้อนน้ำหนัก โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Cooper รุ่น CRT NU 14 ของสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง



ภาพที่ 3.8 การจัดวางตัวอย่างเอททดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร

## บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชลล์ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบทางด้าน คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามส่วนผสม และเงื่อนไขการทดสอบ ที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นได้ผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้

### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์ จากการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่ ทล.-ก. 401/2531 และทล.-ก. 408/2536 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์

Properties	Result	Unit	Penetration Grade		Test Method
			60/70		
			Min.	Max.	
Penetration at 25 °C (77 °F), 100 g, 5 s	64	0.1 mm	60	70	ทล.-ท. 403/2518
Flash point (Cleveland open cup)	322	°C	232	-	ทล.-ท. 406/2519
	612	°F	450	-	
Ductility at 25 °C (77 °F), 5 cm per min	>150	cm	100	-	ทล.-ท. 405/2519
Solubility in Trichloroethylene	99.98	%	99.0	-	ทล.-ท. 409/2520
Thin-film oven test, 3.2 mm, 163 °C (325 °F), 5 hrs.					
Loss on heating	0.014	%	-	0.8	ASHTO T 179
Penetration of residue	71.1	% of original	54	-	
Ductility of residue at 25 °C (77 °F), 5 cm per min	>150	cm	50	-	

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์

Properties	Result	Unit	Min.	Max.	Test Method
Penetration at 25 °C (77 °F), 100 g, 5 s	61	0.1 mm	60	70	ทล.-ท. 403/2518
Softening Point, Ring and Ball	89.8	°C	70	-	ASTM D36
Penetration Index	-	-	+3	-	NLT-181
Ductility at 13 °C, 5 cm per min	86	cm	55	-	ทล.-ท. 405/2519
Elastic Recovery at 25 °C, 10 cm	94	%	70	-	ASTM D6084
Float Test at 25 °C	-	sec.	3000	-	ASTM D139
Toughness/Tenacity Test, 25 °C					
Toughness	295	Kg-cm	170	-	ASTM D5801
Tenacity	245	Kg-cm	100	-	

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์ (ต่อ)

Properties	Result	Unit	Min.	Max.	Test Method
Brookfield Viscosity, Share Rate 18.6 s <sup>-1</sup> , Spindle 21					
At 135 °C	1653	MPa.S	-	3000	ASTM D4402
At 165 °C	470	MPa.S	-	1000	
Storage Stability at 163 °C, 24 hrs. Difference in Softening Point	0.7	°C	-	2	ASTM D5892
Density at 25 °C	1.02	g/cc	1.00	1.05	ASTM D70
Flash point (Cleveland open cup)	284	°C	220	0	ASTM D92
Solubility in Trichloroethylene	99.9	%	99.0	-	ทล.-ท. 409/2520

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์ (ต่อ)

Properties	Unit	Min.	Max.	Test Method	Result
Test on Residue from Thin Film Oven Test					
Weight Loss	%	-	0.5	ASTM D2872	0.2
Retained Penetration at 25 °C	%	70	-	ทล.-ท. 403/2518	
Variation in Softening Point	°C	4	6	ASTM D36	
Ductility at 13 °C, 5 cm/min	cm	40	-	ทล.-ท. 405/2519	
Torsional Recovery at 25 °C	%	60	-	NLT-329	

2. ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมรวม และการจัดขนาดคละ จากการทดสอบคุณสมบัติของหินปูนที่ได้มาจากโครงการก่อสร้างถนนสายบางบัวทอง-ไทรน้อย มีคุณสมบัติต่างเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ได้แก่ค่าความคงทน ค่าความสึกหรอ และค่าทรายสมมูล และเมื่อนำวัสดุผสมรวมมาจัดขนาดคละ ให้อยู่ในขอบเขตบน และขอบเขตล่างของข้อกำหนดของกรมทางหลวง เป็นไปตามตารางที่ 4.3, 4.4 และภาพที่ 4.1 โดยอัตราส่วนที่เลือกใช้ในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอัตราส่วนผสม Bin 1: Bin 2: Bin 3: Bin 4= 43:24:18:15

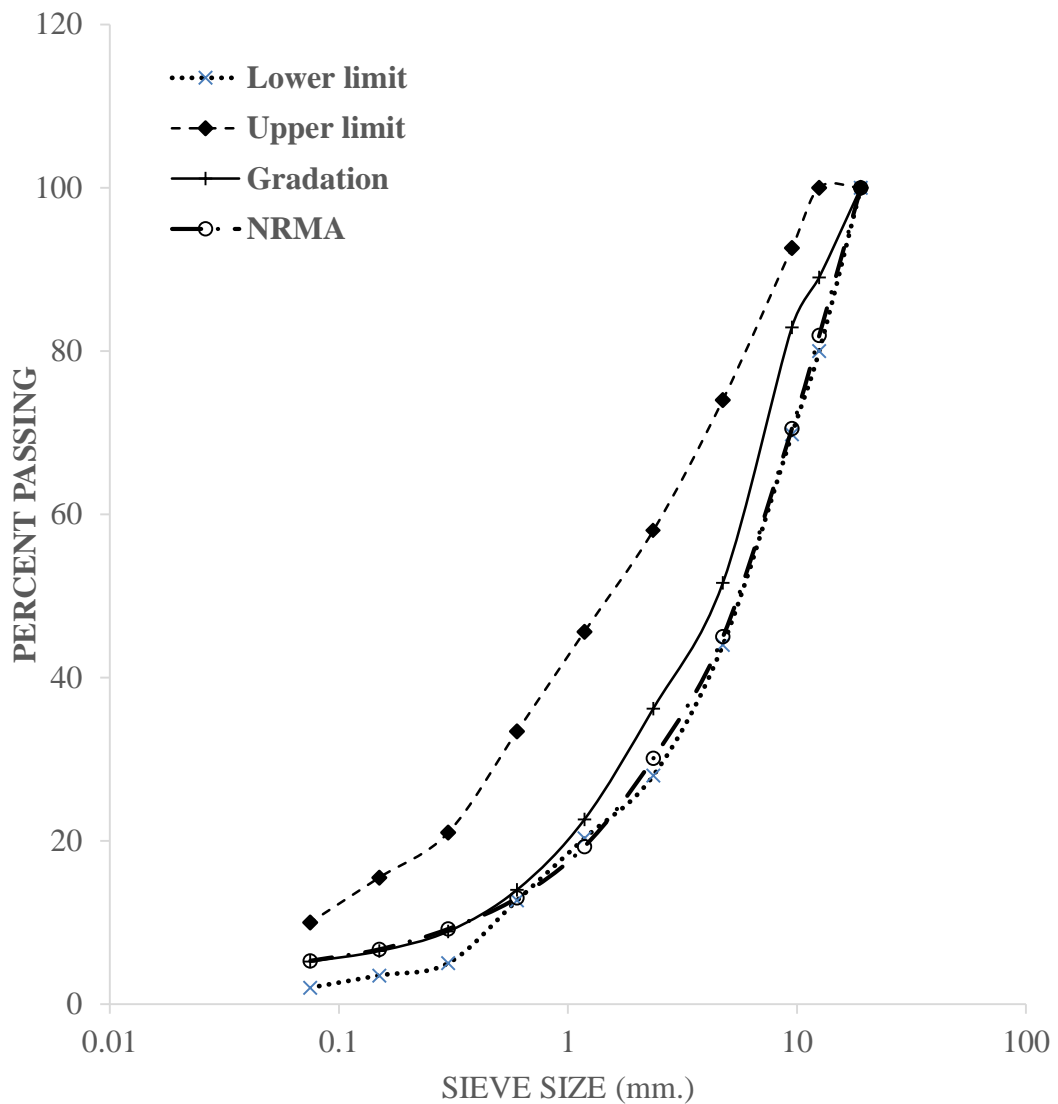
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของหินปูนที่ใช้ในการออกแบบก้อนตัวอย่าง

Description	Hot Bin 1			Hot Bin			Total	มาตรฐาน
	Passing	Retain	Total	Bin 2	Bin 3	Bin 4		
Mix Proportion (%)	-	-	43	24	18	15	100	-
Bulk Specific Gravity	-	2.638	2.642	2.757	2.753	2.724	2.701	-
Apparent Specific Gravity	2.674	2.705	2.701	2.795	2.791	2.753	2.747	-
Effective Specific Gravity	-	-	-	-	-	-	2.719	-
Water Absorption (%)	-	0.94	-	0.50	0.49	0.40	-	-
Flakiness Index (%)	-			43	29	26	33	<35
Elongation Index (%)	-			5	18	16	13	<35
Asphalt Absorption (%)							0.25	-
Los Angeles Abrasion(%)	Aggregate 3/4" = 22.7							<35
Soundness (%)	Weight Loss Aggregate 3/4" = 1.0 , Fine Aggregate = 3.2							<9
Sand Equivalent	64							>60

ตารางที่ 4.4 การจัดขนาดคละของวัสดุรวมที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	BIN1	BIN2	BIN3	BIN4	ส่วนผสม	มาตรฐาน
19 (3/4")				100	100	100
12.5 (1/2")			100	26.5	89.0	80-100
9.5 (3/8")			85.9	2.6	82.9	-
4.75 (# 4)	100	100	8.8	0.1	51.6	44-74
2.36 (# 8)	79.3	28.6	2.8		36.2	28-58
1.18 (# 16)	51.6	6.8	0.8		22.6	-
0.600 (# 30)	32.6	1.0			14.0	-
0.300 (# 50)	20.7				8.9	5-21
0.150 (#100)	15.1				6.5	-
0.075 (# 200)	12.2				5.2	2-10
อัตราส่วนผสม	43	24	18	15		



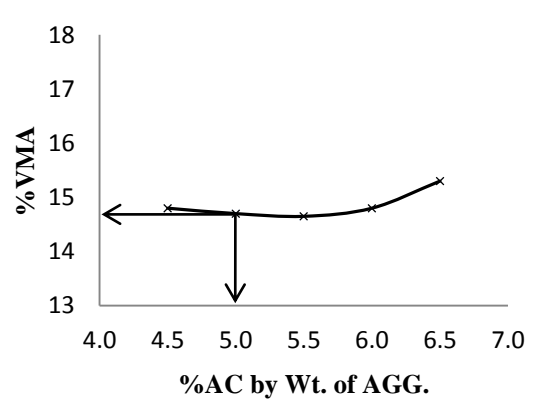
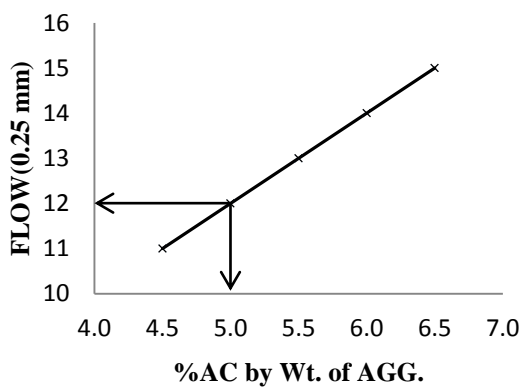
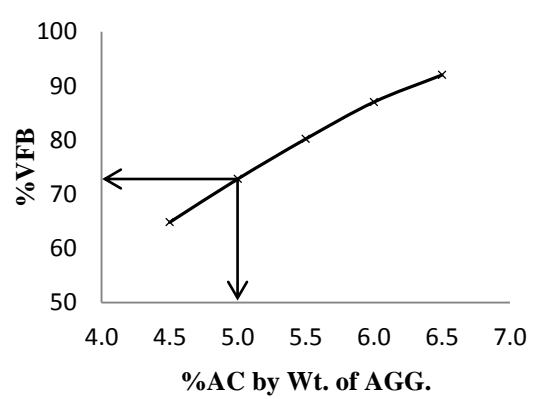
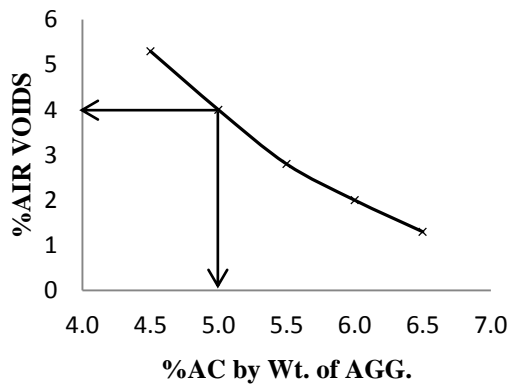
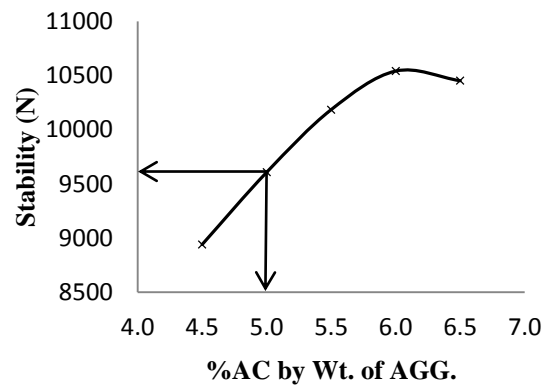
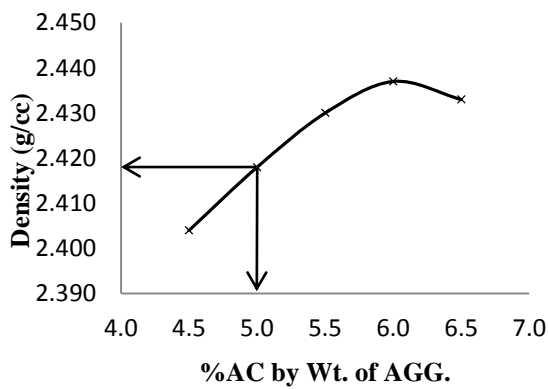


ภาพที่ 4.1 สัดส่วนขนาดคละที่ใช้ในการทดสอบ  
หมายเหตุ NRMA ที่มา อรุณี สายนิลคำ (2556)

จากผลการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์  
เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532

#### 4.2 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์สำหรับการจราจรปริมาณสูง

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในการศึกษานี้ทำโดยการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5 จากนั้นทำการเปลี่ยนขนาดคละไปเรื่อย จนกว่าจะได้ปริมาตรช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4 ได้ขนาดคละตามตารางที่ 4.4 แล้วจึงทำการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อัตราส่วนอื่นๆ จากการออกแบบที่กล่าวมา ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ช่องว่างของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 4.5 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อให้ได้ช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4

ผลการวิเคราะห์	ค่าที่ได้	หน่วย	มาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532
ความหนาแน่นก้อน ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต	2.418	g/cc	-
เสถียรภาพ	9608	N	>8006
ช่องว่างอากาศ	4	%	3-5
VFB	72.8	%	70-80
การไหล	12	0.25mm	8-16
VMA	14.7	%	>12
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์	5	%	3-7
เสถียรภาพ/การไหล	800	N/0.25mm	>712

### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม

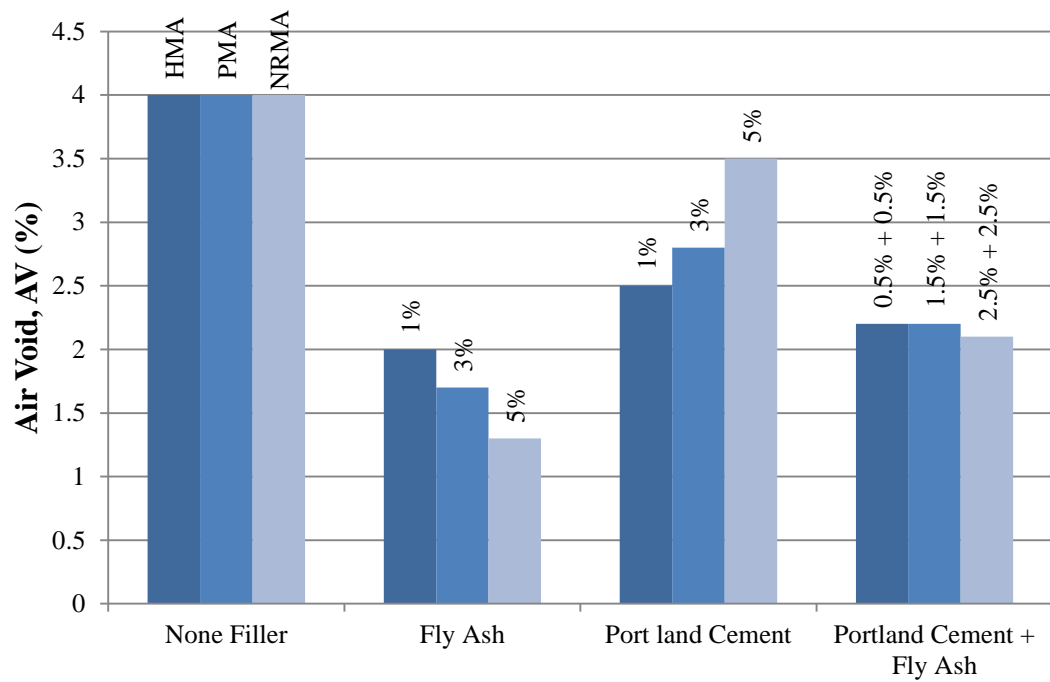
#### 1. ผลการวิเคราะห์ช่องว่างของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

การวิเคราะห์ช่องว่างของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ กับ ปริมาตรช่องว่างของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ตามขนาดผลของวัสดุรวมที่เลือกใช้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.3 ถึง 4.5

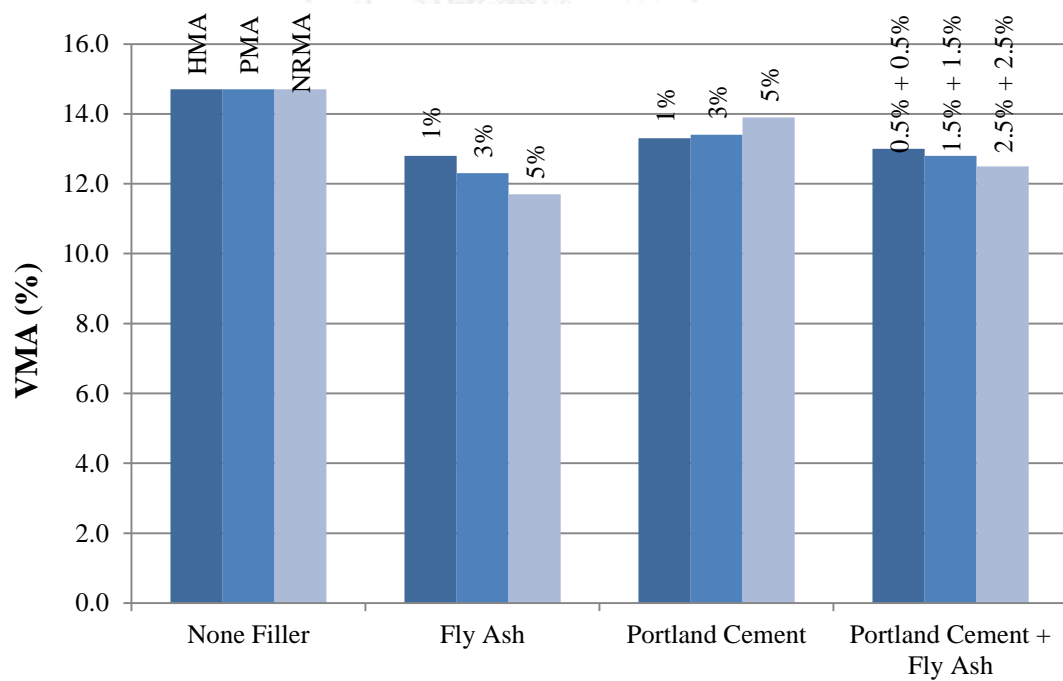
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ช่องว่างของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตของอัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Density (g/ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFB (%)
HMA	2.418	4.0	14.7	72.8
C1	2.461	2.5	13.3	81.2
C3	2.462	2.8	13.4	79.1
C5	2.453	3.5	13.9	74.8
F1	2.467	2.0	12.8	84.4
F3	2.468	1.7	12.3	86.2
F5	2.471	1.3	11.7	88.9
C0.5F0.5	2.465	2.2	13.0	83.1
C1.5F1.5	2.466	2.2	12.8	82.8
C2.5F2.5	2.470	2.1	12.5	83.2
PMA	2.419	4.0	14.7	72.8
NRMA*	2.416	4.0	14.7	72.8

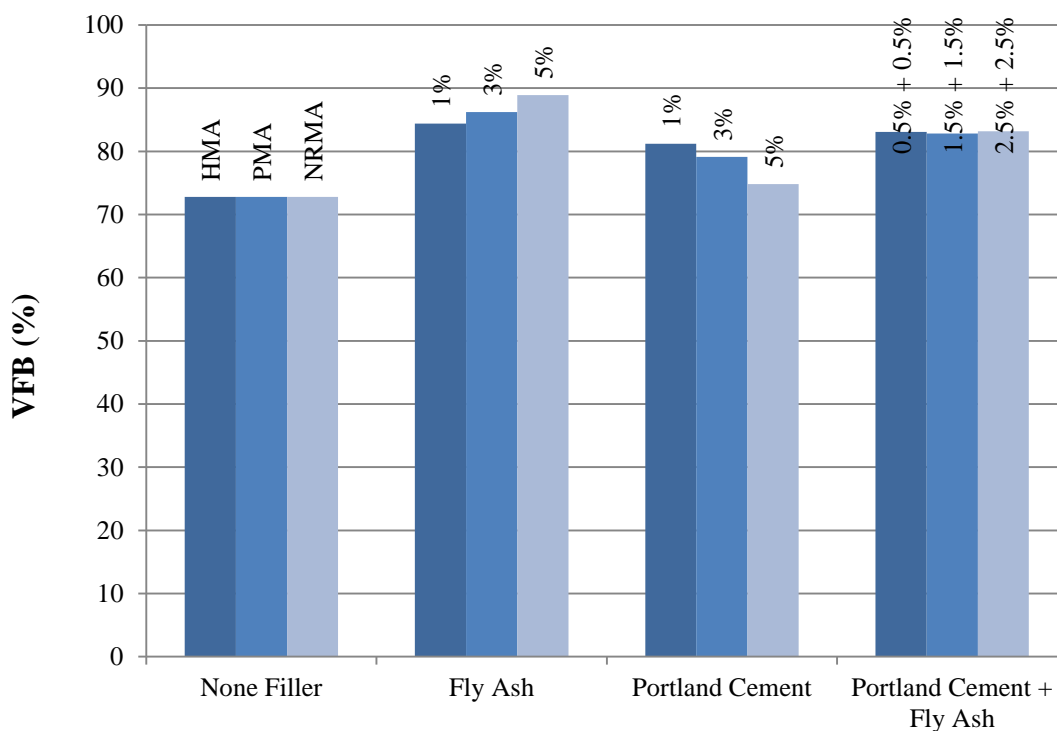
หมายเหตุ NRMA ที่มา อรุณี สายนิลคำ(2556)



ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบช่องว่างอากาศของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต



ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ของตัวอย่าง

จากการเปรียบเทียบช่องว่างอากาศของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุผสมแทรกมีช่องว่างอากาศลดลงในทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบ โดยที่การผสมแอสฟัลต์คอนกรีตส่วนช่องว่างจะแปรผันตามปริมาณแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้นช่องว่างอากาศจะน้อยลงด้วยสืบเนื่องมาจากแอสฟัลต์มีลักษณะเม็ดที่กลม และขนาดเท่าๆ กันทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างช่องว่างเพื่อเติมเต็มช่องว่างของวัสดุมวลรวมได้ดีขึ้น

ในส่วนของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์อัตราส่วนจะแปรผกผันกับปริมาณพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ผสม อาจส่งผลมาจากการที่เม็ดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ไม่สามารถเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างได้หมด และกระจุกกระจายอยู่ตามผิวของวัสดุมวลรวมทำให้เมื่อผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น ช่องว่างอากาศก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย สังเกตได้จากการที่ตัวอย่างมีปริมาตรที่สูงขึ้นแต่มีค่าความหนาแน่นต่ำลง และก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมทั้งแอสฟัลต์และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เข้าด้วยกันมีช่องว่างอากาศที่ใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนผสม

เมื่อเปรียบเทียบช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต (Void in Mineral Aggregate; VMA) พบว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวมีช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงเมื่อมีอัตราส่วนผสมเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ในตัวอย่างที่ผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวพบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคมีปริมาตรที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยร่วมกันพบว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของส่วนผสม จะสังเกตได้ว่าเถ้าลอยมีอิทธิพลในการลดลงของปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาคของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพียงอย่างเดียว

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาตรช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Void Filled with Bitumen; VFB) พบว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวมีปริมาตรที่สูงขึ้นตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอย ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวมีปริมาตรที่ลดลงเมื่อปริมาณส่วนผสมสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกทั้งสองชนิดร่วมกัน พบว่ามีปริมาตรช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนผสม

## 2. ผลทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

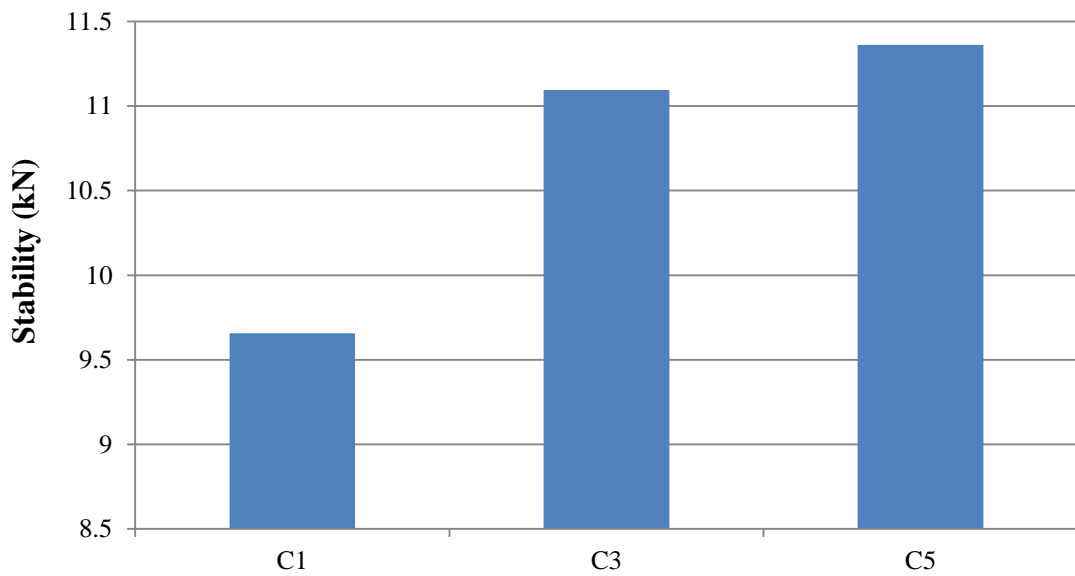
ค่าเสถียรภาพ และ ค่าการไหล เป็นค่าที่บอกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตจะคงทนต่อการพังทลาย และการเปลี่ยนรูปร่าง เมื่อตัวอย่างมีน้ำหนักมากกระทำ โดยความเสียหายในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงกดมากกระทำ องค์ประกอบที่จะต้านทานแรงในส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตคือแรงยึดเกาะ (Cohesion) ระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวม และแรงเชื่อมประสานระหว่างฟิล์มยางกับวัสดุมวลรวม (Adhesive) โดยมีผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.6 ถึง 4.10

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

Specimen	Average Stability lbs , (kN)	Average Flow 0.01in , (0.25mm)	Average Stability/Flow Lbs./0.01in (kN/0.25mm)
HMA	2157(9.596)	13	166(0.74)
C1	2170(9.656)	13	167(0.74)
C3	2493(11.095)	14	178(0.79)
C5	2553(11.362)	13	196(0.87)
F1	2250(10.012)	14	161(0.72)
F3	2343(10.427)	14	167(0.74)
F5	2260(10.056)	14	161(0.72)
C0.5F0.5	2360(10.501)	14	169(0.75)
C1.5F1.5	2450(10.902)	12	204(0.91)
C2.5F2.5	2520(11.213)	12	210(0.93)
PMA	3103(13.809)	14	222(0.99)
NRMA*	2660(11.832)	13	205(0.91)

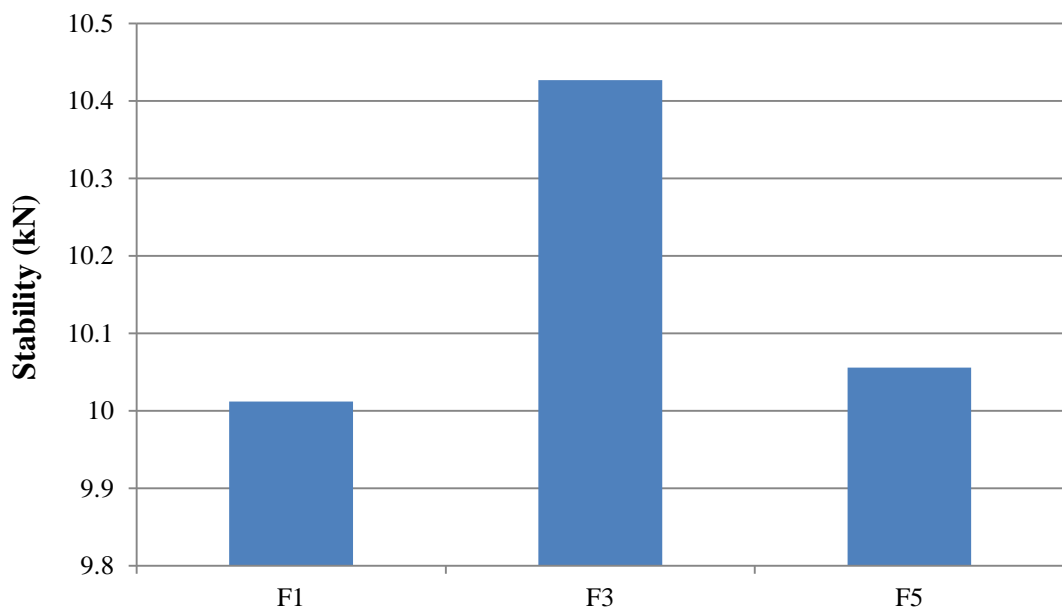
หมายเหตุ NRMA ที่มา อรุณี สายนิลคำ(2556)





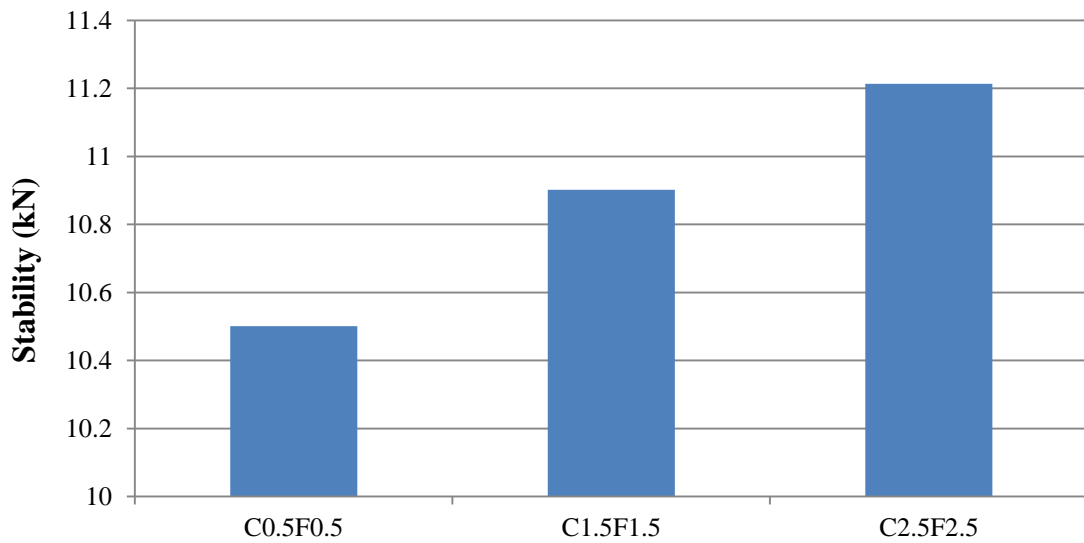
ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

จากการเปรียบเทียบตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่าค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างสูงขึ้นแปรผันตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์



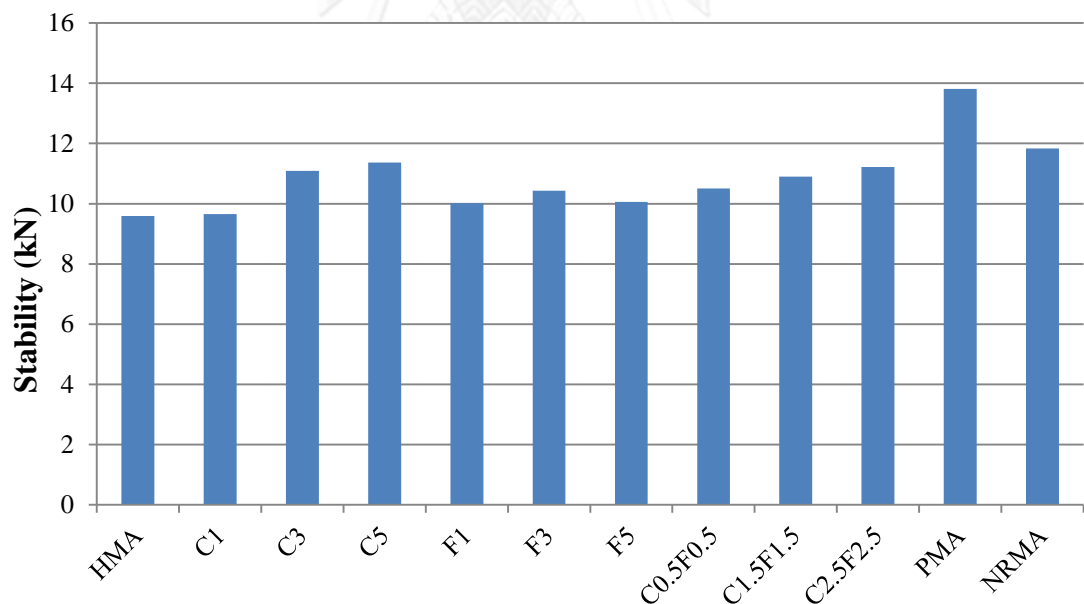
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอย

จากการเปรียบเทียบก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย พบว่าอัตราส่วนผสมเถ้าลอยที่มีค่าเสถียรภาพสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม สาเหตุมาจากเมื่อปริมาณเถ้าลอยมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมไม่สามารถเคลือบวัสดุมวลรวมได้หมดทำให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย เป็นผลให้ค่าเสถียรภาพของตัวอย่างจะลดลงไปด้วย



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

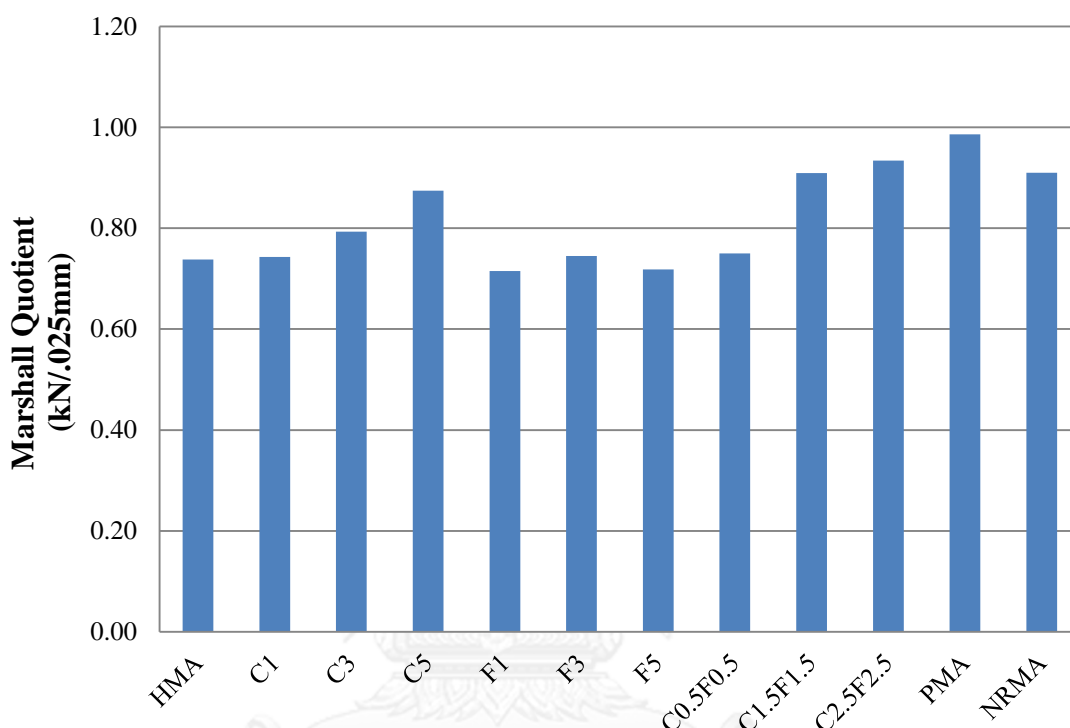
จากการเปรียบเทียบก้อนอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่าก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเสถียรภาพแปรผันตามปริมาณวัสดุผสมแทรกที่เพิ่มขึ้นเหมือนกับกรณีที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของแต่ละส่วนผสม

จากการเปรียบเทียบก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ทำการทดสอบ พบว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกมีค่าเสถียรภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก แต่เมื่อนำก้อนตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกไปเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ตัดแปลงด้วยยางพารา และแอสฟัลต์ตัดแปลงด้วยโพลิเมอร์ พบว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้

แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยยางพารา และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์ มีค่าเสถียรภาพที่สูงกว่า ตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุผสมแทรก สืบเนื่องมาจากการแอสฟัลต์ซีเมนต์มีสภาพที่แข็งขึ้นทำให้สามารถรับกำลังได้มากขึ้นตามไปด้วย โดยแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยยางพารา (Natural Rubber Modified Asphalt ;NRMA) ทำการดัดแปลงโดยการนำแอสฟัลต์เกรด AC 60/70 มาผสมกับน้ำยางพาราที่ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ของแอสฟัลต์ซีเมนต์



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหล

ค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหล (Marshall Quotient; MQ) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของตัวอย่าง (Stiffness) และยังสามารถบ่งบอกถึงความต้านทานต่อหน่วยแรงเฉือน และค่าความต้านทานต่อการเสีรูปของตัวอย่างได้อีกด้วย

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลของตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ส่วนตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ผสมวัสดุผสมแทรก และตัวอย่างที่ผสมร่วมกันระหว่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเถ้าลอยมีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น อาจสรุปได้ว่าวัสดุผสมแทรกที่มีอิทธิพลทำให้ค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลสูงขึ้นคือปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างทั้งหมด พบว่าตัวอย่างที่ผสมร่วมกันระหว่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเถ้าลอยมีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยยางพารา แต่ยังมี

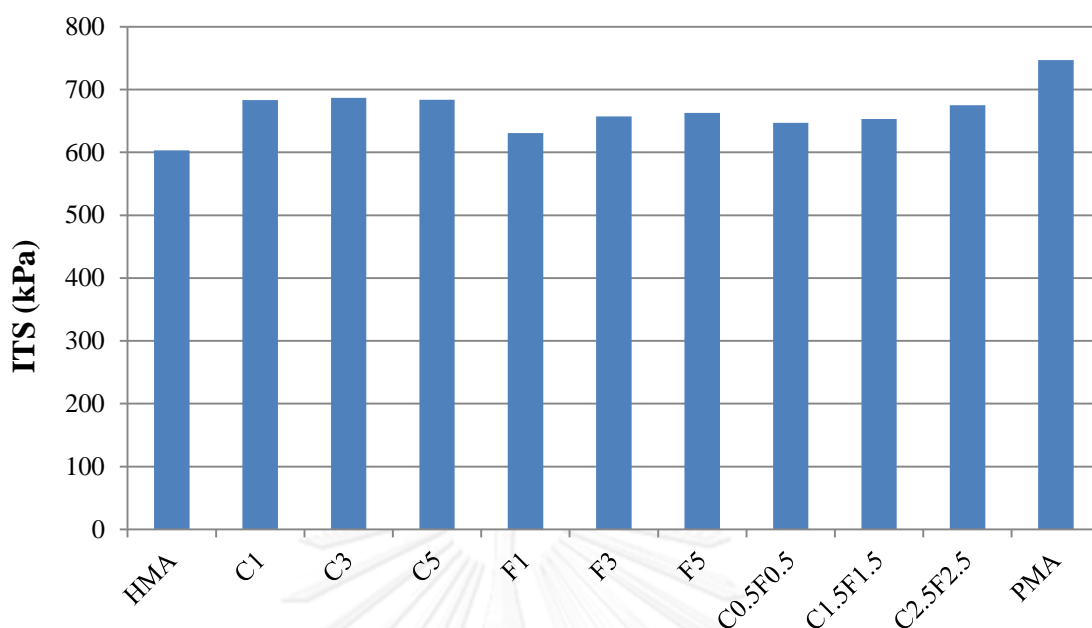
ค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสมที่มีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลสูงที่สุด

3. ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength test)

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตของแต่ละส่วนผสม ส่วนผสมละ 3 ก้อน แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนผสม โดยทดลองที่อุณหภูมิ 25°C และ 55°C แบบแห้ง (Unsoaked) และ 55°C แบบเปียก (Soaked) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.11 ถึง 4.13

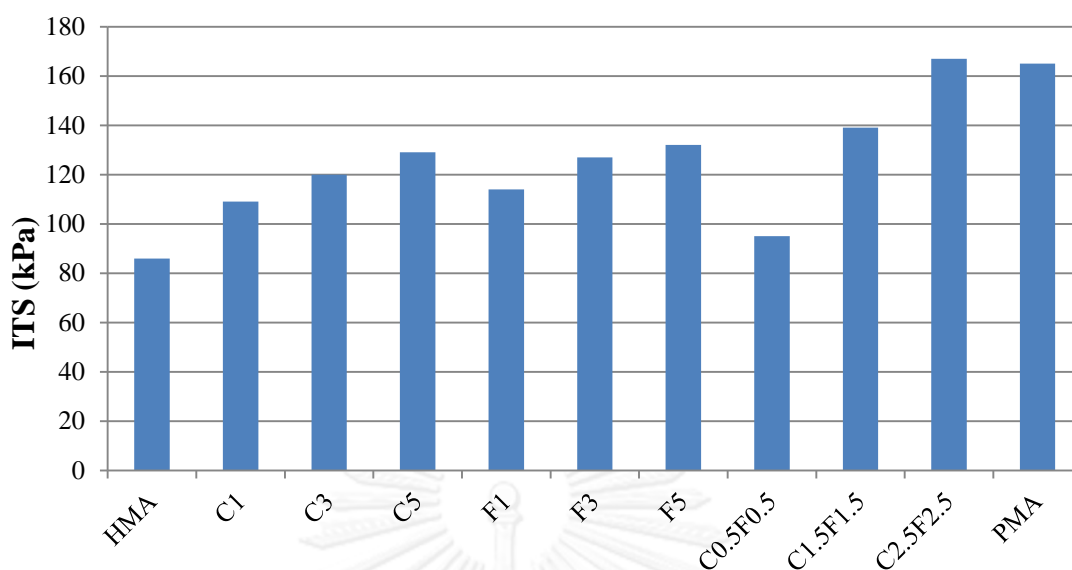
ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ

Specimen	25 °C Unsoaked		55 °C Unsoaked		55 °C Soaked	
	ITS (kPa)	SD	ITS (kPa)	SD	ITS (kPa)	SD
HMA	603	30.05	86	6.35	57	6.43
C1	683	22.11	109	12.70	119	6.08
C3	687	15.50	120	5.77	126	16.17
C5	684	10.82	129	6.35	138	11.02
F1	631	15.13	114	11.02	91	6.08
F3	657	23.76	127	6.08	126	6.35
F5	663	32.60	132	6.08	125	24.54
C0.5F0.5	647	17.43	95	7.23	94	5.77
C1.5F1.5	653	4.36	139	6.35	107	6.08
C2.5F2.5	675	39.53	167	6.35	124	6.43
PMA	747	19.35	169	11.02	131	13.00



ภาพที่ 4.11 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 25°C แบบแห้ง

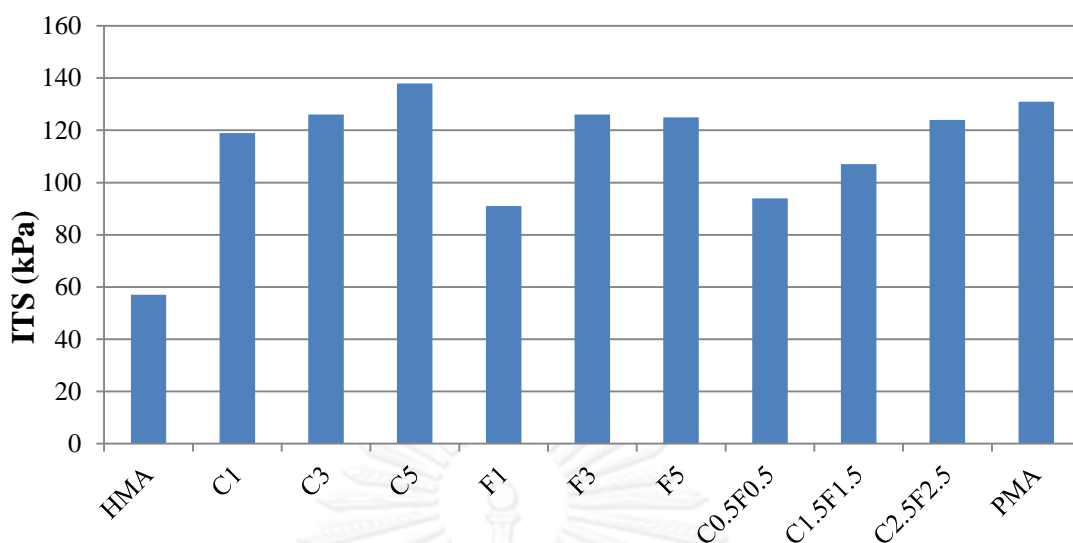
จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 25°C แบบแห้ง พบว่า ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอย และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุผสมแทรกทั้งสองชนิดรวมกัน มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอย ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมคงที่โดยไม่ขึ้นกับปริมาณของอัตราส่วนผสม และเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด พบว่าก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงที่สุด



ภาพที่ 4.12 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 55°C แบบแห้ง

จากผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 55°C แบบแห้ง พบว่าก้อนตัวอย่างที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุผสมแทรกมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เป็นตัวเชื่อมผสมที่ไม่มีวัสดุผสมแทรก เกิดจากการที่มวลเล็กๆ ของวัสดุผสมแทรกสามารถเข้าไปอุดช่องว่างของตัวอย่างได้ดีขึ้นทำให้สามารถรับกำลังได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบชนิดของวัสดุผสมแทรก พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในทุกอัตราส่วน เมื่อนำวัสดุผสมแทรกทั้งสองชนิดมาผสมกันที่ร้อยละ 3 และ 5 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุผสมแทรกชนิดเดียวในปริมาณส่วนผสมที่เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสมพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมร่วมกันระหว่างเถ้าลอย และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ร้อยละ 2.5 : 2.5 มีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสม

เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C และ 55°C แบบแห้ง พบว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมน้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เท่ากัน จะสังเกตได้จากการทดสอบที่ไม่มีผลกระทบต่อความชื้น ตัวอย่างที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะสามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นน้อย



ภาพที่ 4.13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 55°C แบบเปียก

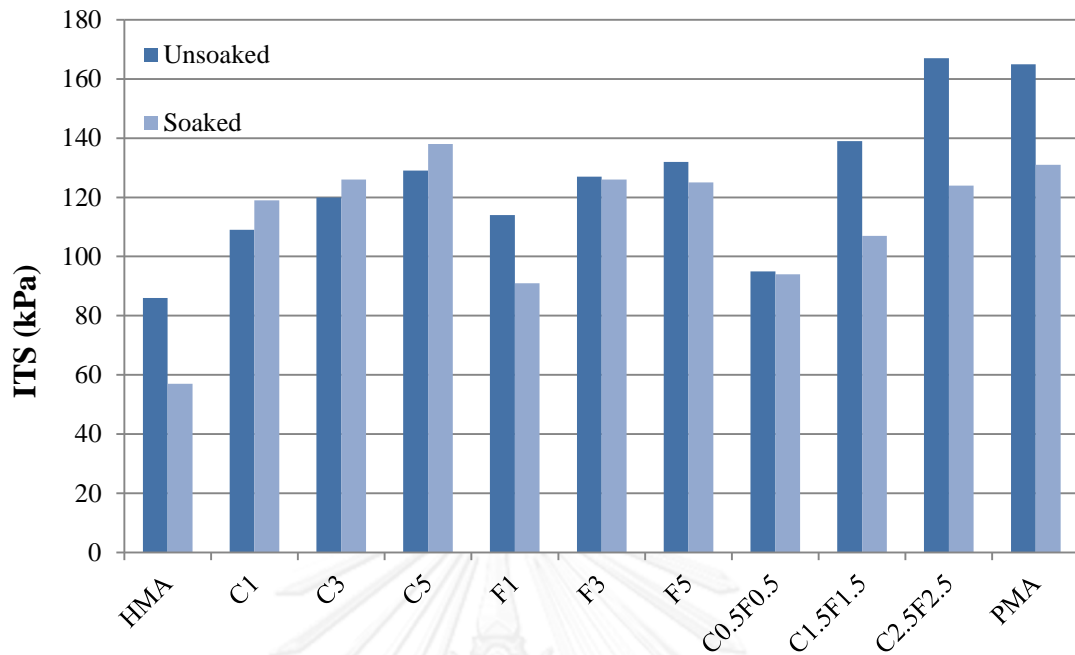
จากผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 55°C แบบเปียก พบว่าก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุผสมแทรกมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เป็นตัวเชื่อมประสานที่ไม่มีวัสดุผสมแทรก และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของวัสดุผสมแทรก พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และเมื่อนำวัสดุผสมแทรกทั้งสองชนิดมาผสมกัน พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต่ำลงเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุผสมแทรกชนิดเดียว และเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบแห้ง และแบบเปียกที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC60/70 และ PMA เป็นตัวเชื่อมประสานโดยไม่มีส่วนผสมของวัสดุผสมแทรกที่เงื่อนไขการทดสอบแบบแห้งนั้นมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าการทดสอบเงื่อนไขแบบเปียก และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกจะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวนั้น เมื่อทำการทดลองในเงื่อนไขแบบเปียกพบว่ามีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าการทดสอบแบบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันอาจส่งผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อตัวอย่างที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ถูกแช่ในน้ำก่อนการทดสอบ ดังตารางที่ 4.9 และ ภาพที่ 4.14 ในขณะเดียวกันตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกทั้งสองชนิดร่วมกัน ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมจะน้อยลงอาจเป็นผลจากการที่เถ้าลอย และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความหน่วงทำให้การพัฒนากำลังได้ไม่เต็มที่ และเมื่อสังเกตอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Tensile Strength Ratio ;TSR) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานความชื้น (Moisture Damage) ของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ โดยมาตรฐานทั่วไปแล้วค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 พบว่าตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เป็นตัวเชื่อมประสานที่ไม่มีวัสดุผสมแทรกมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชนิดอื่น

และตัวอย่างที่ผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวมีค่าอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าร้อยละ 100 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์นอกจากไม่ได้รับความเสียหายจากความชื้นแล้วยังมีกำลังที่เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อสัมผัสกับความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15

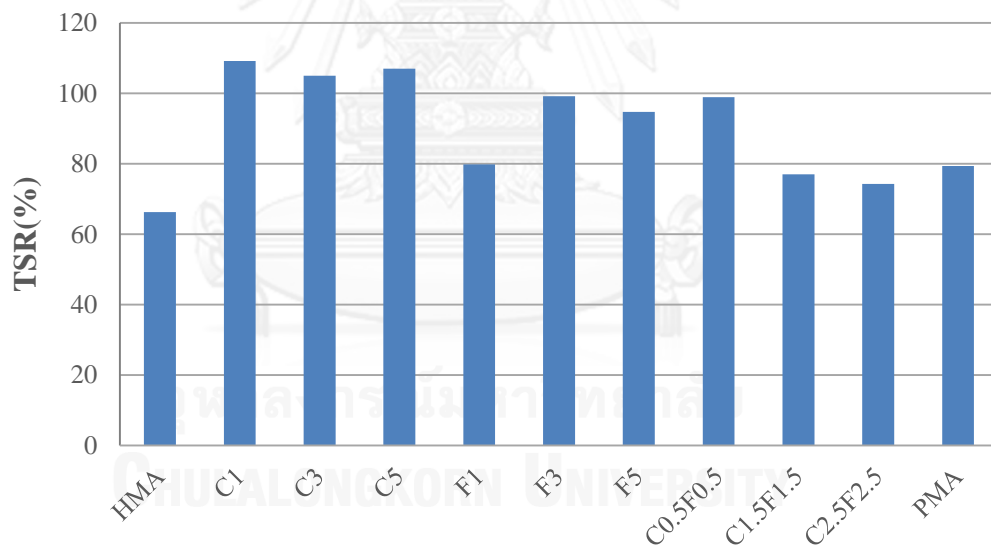
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 55°C

Specimen	ITS @ 55°C (kPa)		TSR (%)
	Soaked	Unsoaked	
HMA	57	86	66.28
C1	119	109	109.17
C3	126	120	105.00
C5	138	129	106.98
F1	91	114	79.82
F3	126	127	99.21
F5	125	132	94.70
C0.5F0.5	94	95	98.95
C1.5F1.5	107	139	76.98
C2.5F2.5	124	167	74.25
PMA	131	169	77.51





ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 55°C



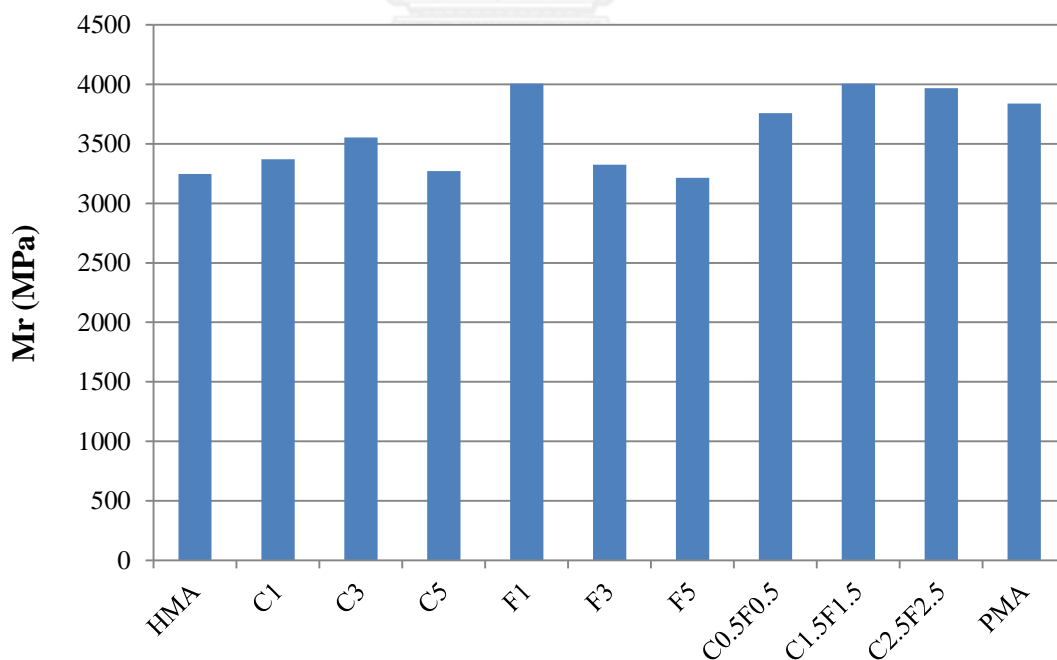
ภาพที่ 4.15 ค่าอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

#### 4. ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test)

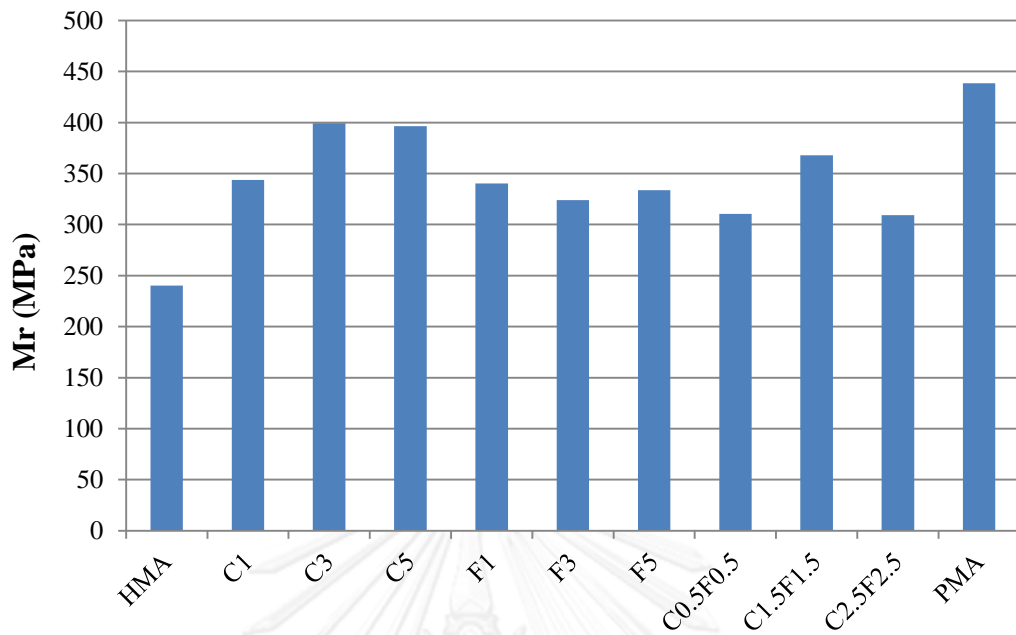
ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของแต่ละส่วนผสม โดยการทดสอบทั้ง 2 ทิศทางของแต่ละก้อนตัวอย่าง แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.16 ถึง 4.18

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคืนตัว ที่อุณหภูมิ 25°C แบบแห้ง

Specimen	25 °C Unsoaked		55 °C Unsoaked		55 °C Soaked		$\frac{Soaked}{Unsoaked}$ (%)
	Mr (MPa)	SD	Mr (MPa)	SD	Mr (MPa)	SD	
HMA	3247	39	240	37.92	153	11.24	63.76
C1	3372	380	344	82.24	163	17.82	47.34
C3	3553	132	399	58.28	193	18.42	48.26
C5	3270	419	396	43.36	192	5.12	48.37
F1	4005	148	340	21.78	224	19.24	65.81
F3	3325	163	324	42.93	174	30.96	53.87
F5	3214	180	334	23.83	149	7.35	44.52
C0.5F0.5	3758	115	310	41.23	225	29.75	72.59
C1.5F1.5	4005	50	368	41.35	354	24.58	96.35
C2.5F2.5	3967	122	309	24.96	275	17.22	88.74
PMA	3839	90	438	18.21	377	48.49	85.90

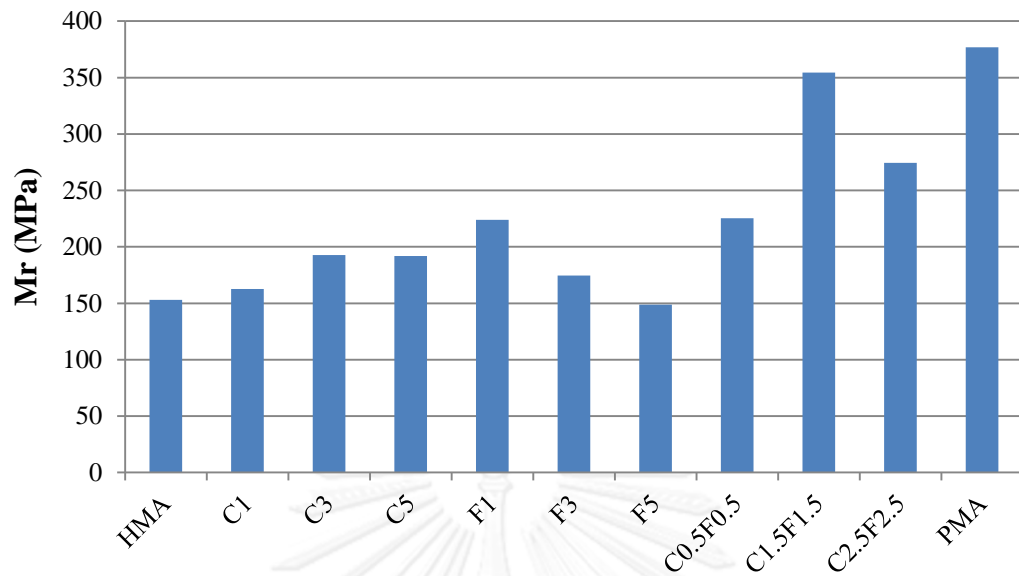


ภาพที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคืนตัว ที่อุณหภูมิ 25°C แบบแห้ง



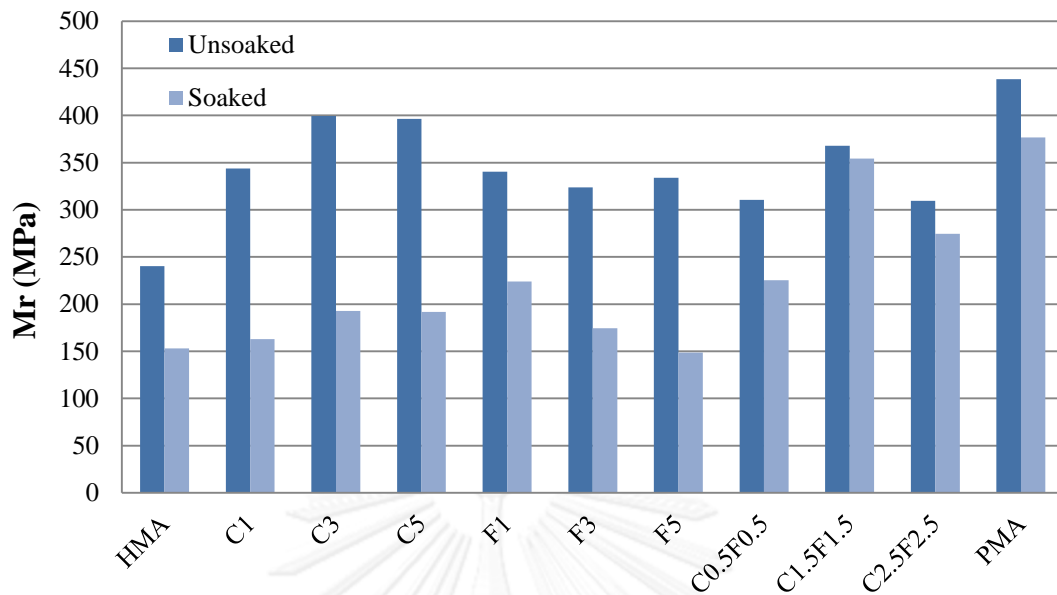
ภาพที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคั้นตัว ที่อุณหภูมิ 55°C แบบแห้ง

จากการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ 25°C และ 55°C แบบแห้ง พบว่าเมื่อผสมเถ้าลอยเป็นวัสดุผสมแทรกมีค่าโมดูลัสคั้นตัวสูงสุดที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และตัวอย่างที่ผสมทั้งเถ้าลอย และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมร่วมกันพบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม แล้วเมื่อผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม ค่าโมดูลัสคั้นตัวจะต่ำลง เมื่อเทียบกับผลวิเคราะห์ช่องว่างอากาศของตัวอย่าง พบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวจะสูงที่สุดเมื่อช่องว่างอากาศของตัวอย่างมีค่าประมาณร้อยละ 2 อาจสรุปได้ว่าโมดูลัสการคั้นตัวในเงื่อนไขการทดสอบแบบแห้งแปรผันกับขนาดคละ และช่องว่างอากาศ

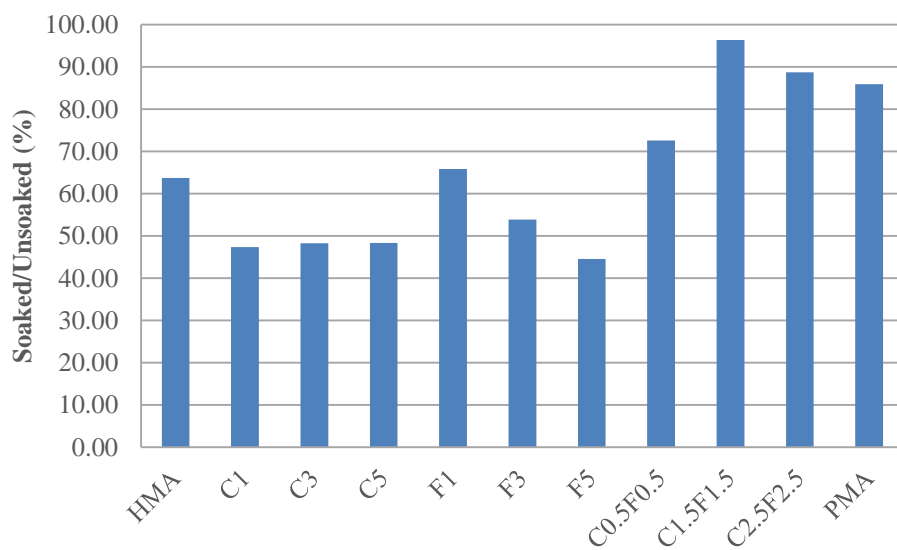


ภาพที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยค่าโมดูลัสคั้นตัว ที่อุณหภูมิ 55°C แบบเปียก

จากการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ 55 °C แบบเปียก พบว่าก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และถ้าลอยเป็นวัสดุผสมแทรก ร่วมกันนั้นมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60/70 เป็นตัวเชื่อมประสานทั้งหมด แต่เมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็น ตัวเชื่อมประสาน พบว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานมีค่าโมดูลัส คั้นตัวที่สูงที่สุด



ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสการคินตัวที่อุณหภูมิ 55°C ของส่วนผสมต่างๆ

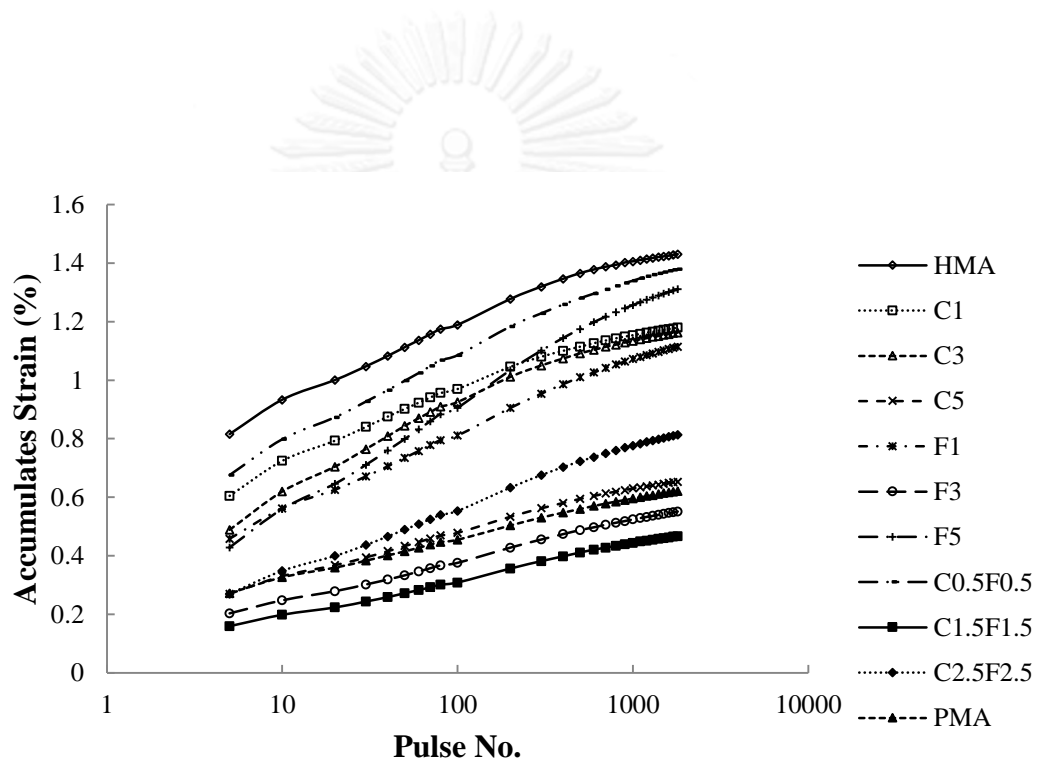


ภาพที่ 4.20 ค่าอัตราส่วนโมดูลัสการคินตัว ของส่วนผสมต่างๆ

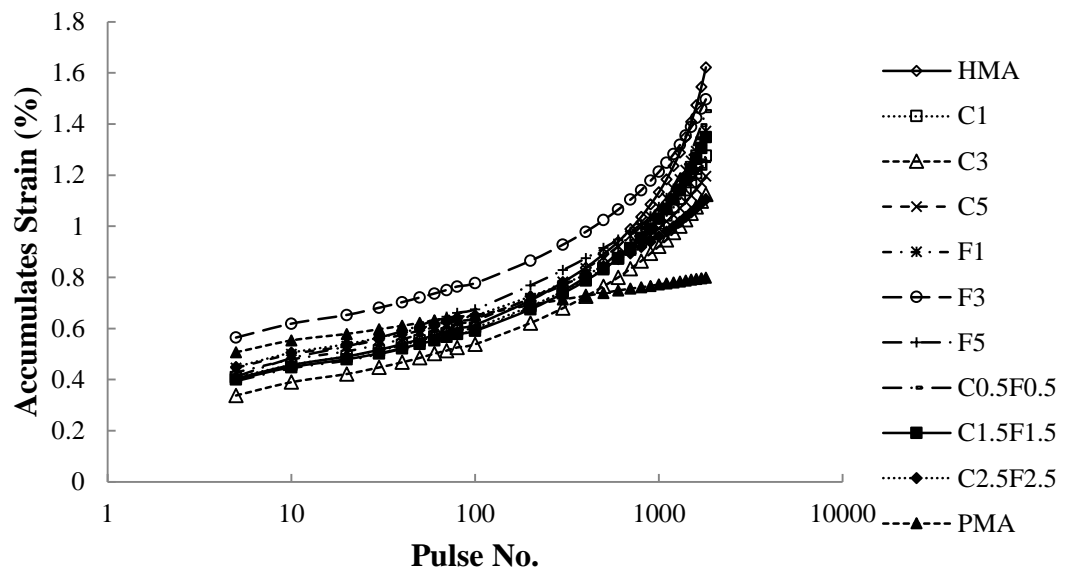
จากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสการคินตัวระหว่างเงื่อนไขการทดสอบแบบเปียก และแบบแห้ง ดังภาพที่ 4.19-4.20 พบว่าตัวอย่างที่ทำการทดสอบแบบเปียกนั้นมีค่าโมดูลัสการคินตัวน้อยกว่าการทดสอบการแห้งในทุกส่วนผสม และตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 1.5 และถ้าลดร้อยละ 1.5 มีผลกระทบต่อความชื้นน้อยที่สุด และเมื่อดูจากผลกระทบจากปฏิกิริยา ไฮเดรชัน และปอซโซลานิก ไม่ใช่ปัจจัยที่มีผลต่อค่าโมดูลัสคินตัว

### 5. ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร

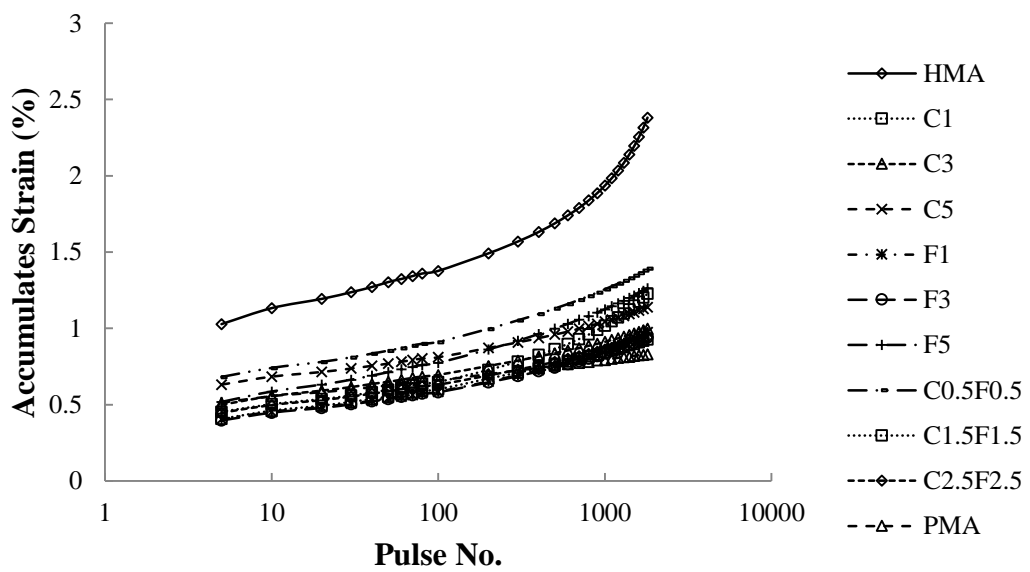
การทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร โดยใช้วิธีการทดสอบแบบใช้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep) นั้น จะทดสอบโดยการเตรียมตัวอย่างตามสัดส่วนต่างๆ สัดส่วนละ 3 ก้อน โดยจะทดสอบที่ อุณหภูมิ 25°C ,55°C แบบแห้ง (Unsoaked) และ 55°C แบบเปียก (Soaked) โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.11 ถึง 4.13 และภาพที่ 4.21 ถึง 4.23



ภาพที่ 4.21 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง



ภาพที่ 4.22 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง



ภาพที่ 4.23 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก

ตารางที่ 4.11 สมการเส้นแนวโน้มของผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง

Specimen	25 °C Unsoaked		
	% $\epsilon$ @ 1800	$y$	$R^2$
HMA	1.4300	$0.1004 \ln(x) + 0.7123$	0.9826
C1	1.1803	$0.0902 \ln(x) + 0.5344$	0.9768
C3	1.1624	$0.1059 \ln(x) + 0.4074$	0.9724
C5	0.6534	$0.0651 \ln(x) + 0.1793$	0.9953
F1	1.1148	$0.1114 \ln(x) + 0.3000$	0.9963
F3	0.5513	$0.0611 \ln(x) + 0.1000$	0.9977
F5	1.3110	$0.1511 \ln(x) + 0.2101$	0.9955
C0.5F0.5	1.3792	$0.1162 \ln(x) + 0.5376$	0.9913
C1.5F1.5	0.4668	$0.0546 \ln(x) + 0.0643$	0.9969
C2.5F2.5	0.8134	$0.0938 \ln(x) + 0.1262$	0.9971
PMA	0.6215	$0.0594 \ln(x) + 0.1845$	0.9979

จากผลการทดสอบที่ อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อผสมวัสดุผสมแทรกเข้ากับมวลรวม พบว่าค่าการยุบตัวลดลงในทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก กรณีเปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มที่ใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุผสมแทรกเพียงอย่างเดียว ค่าการยุบตัวจะลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมแทรกเพียงอย่างเดียว พบว่าค่าการยุบของก้อนตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 3 มีค่าการยุบตัวที่น้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างกลุ่มที่ใช้เถ้าลอย และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมร่วมกันค่าการยุบตัวของอัตราส่วนผสมร้อยละ 1.5 : 1.5 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวมมีค่าน้อยที่สุด แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสมพบว่ก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสม มีค่าการยุบตัวที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างทั้งหมด



ตารางที่ 4.12 สมการเส้นแนวโน้มของผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง

Specimen	55 °C Unsoaked		
	% $\epsilon$ @ 1800	y	R <sup>2</sup>
HMA	1.6219	$0.1954 \ln(x) - 0.1644$	0.8503
C1	1.2762	$0.1479 \ln(x) + 0.0064$	0.9063
C3	1.1238	$0.1378 \ln(x) - 0.0232$	0.9312
C5	1.1963	$0.1291 \ln(x) + 0.1118$	0.9279
F1	1.3728	$0.1612 \ln(x) - 0.0187$	0.8996
F3	1.4969	$0.1593 \ln(x) + 0.1316$	0.9071
F5	1.2511	$0.1447 \ln(x) + 0.0698$	0.9574
C0.5F0.5	1.4510	$0.1755 \ln(x) - 0.1085$	0.8722
C1.5F1.5	1.3488	$0.1599 \ln(x) - 0.0504$	0.8860
C2.5F2.5	1.1062	$0.1144 \ln(x) + 0.1749$	0.9560
PMA	0.7988	$0.0493 \ln(x) + 0.4309$	0.9992

จากผลการทดสอบที่ อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อผสมวัสดุผสมแทรกเข้ากับมวลรวม พบว่าอัตราการยุบตัวลดลงในทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก โดยอัตราการยุบตัวมีการลดลงตามปริมาณวัสดุผสมแทรกที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างก้อนตัวอย่างที่ผสมแกลลวยเพียงอย่างเดียวกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวในปริมาณส่วนผสมที่เท่ากัน พบว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวมีค่าการยุบตัว และอัตราการยุบตัวที่น้อยกว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมแกลลวยเพียงอย่างเดียว ส่วนในก้อนตัวอย่างที่มีแกลลวย และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมรวมกันนั้น จะมีอัตราส่วนการยุบตัวสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกเพียงตัวเดียว ยกเว้นก้อนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 2.5 : 2.5 ที่มีค่าการยุบตัว และอัตราส่วนการยุบตัวที่น้อยกว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกเพียงตัวเดียว แต่เมื่อนำก้อนตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกกับก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ตัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสาน พบว่าค่าการยุบตัว และอัตราส่วนการยุบตัวของก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ตัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานมีค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.13 สมการเส้นแนวโน้มของผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก

Specimen	55 °C Soaked		
	% $\epsilon$ @ 1800	y	R <sup>2</sup>
HMA	2.3813	$0.2172 \ln(x) + 0.4804$	0.9052
C1	1.2274	$0.1342 \ln(x) + 0.1013$	0.9266
C3	0.9991	$0.0851 \ln(x) + 0.3267$	0.9845
C5	1.1400	$0.0878 \ln(x) + 0.4396$	0.9739
F1	0.9754	$0.1004 \ln(x) + 0.1670$	0.9616
F3	0.9409	$0.0948 \ln(x) + 0.1816$	0.9708
F5	1.2624	$0.1310 \ln(x) + 0.2208$	0.9725
C0.5F0.5	1.3937	$0.1267 \ln(x) + 0.3818$	0.9663
C1.5F1.5	0.9264	$0.0918 \ln(x) + 0.2084$	0.9828
C2.5F2.5	0.9431	$0.0870 \ln(x) + 0.2597$	0.9812
PMA	0.8307	$0.0546 \ln(x) + 0.4171$	0.9976

จากผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อผสมวัสดุผสมแทรกเข้ากับมวลรวม พบว่าอัตราการยุบตัวลดลงในทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเทียบกับ ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก โดยอัตราการยุบตัวมีการของก้อนตัวอย่าง ที่มีวัสดุผสมแทรกเพียงอย่างเดียวที่ร้อยละ 3 มีค่าอัตราส่วนการยุบตัวที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับก้อน ตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกชนิดเดียวกัน ในขณะที่ก้อนตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกทั้งสองชนิด ร่วมกันจะมีค่าอัตราส่วนการยุบตัวลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของวัสดุผสมแทรก และเมื่อนำก้อน ตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกมาเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็น ตัวเชื่อมประสาน พบว่าค่าการยุบตัว และอัตราส่วนการยุบตัวของก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลง ด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานมีค่าน้อยที่สุด

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 55°C แบบแห้ง และแบบเปียก พบว่าการยุบของตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกในการทดสอบแบบเปียก มีค่าอัตราการยุบตัวที่น้อยกว่าการทดสอบแบบแห้ง ในทางกลับกันตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุผสมแทรก มีค่าอัตราการยุบตัวที่สูงกว่า การทดสอบแบบแห้ง แต่เมื่อสังเกตในการยุบตัวของช่วงแรกค่าการยุบตัวของการทดสอบที่เงื่อนไข แบบเปียกจะยุบตัวมากกว่าการยุบตัวของการทดสอบแบบแห้ง อาจส่งผลมาจากความเสียหาย เนื่องจากความชื้นทำให้ค่าการยุบตัวในช่วงแรกนั้นมีมากกว่าการทดสอบแบบแห้ง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเสียหายจากความชื้นของการทดสอบทั้ง 3 ชนิด โดยเปรียบเทียบค่าผลการทดสอบ อัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึง อัตราส่วนโมดูลัสคืบตัว ซึ่งเป็น การวิเคราะห์ความเสียหายจากความชื้นแบบดั้งเดิม โดยต้องมีค่าผ่านเกณฑ์ร้อยละ 80 จึงจะถือว่า ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถต้านทานความเสียหายต่อความชื้นได้ดี และการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรในเงื่อนไขการทดสอบแบบเปียก ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน จากผลอัตราส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกมีค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า PMA โดยตัวอย่างที่มีค่าอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ได้แก่ C1 ส่วนผลอัตราส่วนโมดูลัสคืบตัว พบว่าตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกเพียงชนิดส่วนใหญ่มีค่าอัตราส่วนโมดูลัสคืบตัวน้อยกว่า HMA โดยมีเพียง F1 เท่านั้นที่มีค่าใกล้เคียงกับ HMA แต่ก็ยังมีค่าไม่ถึงเกณฑ์ร้อยละ 80 ส่วนตัวอย่างที่ใช้วัสดุผสมแทรกผสมร่วมกันมีค่าโมดูลัสคืบตัวสูงกว่า HMA ทั้งหมด แล้วเมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ร้อยละ 80 มีเพียง 3 ตัวอย่างเท่านั้น ได้แก่ C1.5F1.5 ,C2.5F2.5 และ PMA โดยตัวอย่าง C1.5F1.5 มีอัตราส่วนโมดูลัสคืบตัวสูงที่สุด และจากการทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรในเงื่อนไขแบบเปียก พบว่า PMA มีค่าอัตราการยุบตัว และค่ายุบตัวเมื่อสิ้นสุดการทดลองน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบกันเองระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่ใช้วัสดุผสมแทรกในการปรับปรุงคุณภาพ พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่ใช้ส่วนผสมร่วมกัน ให้ค่าอัตราการยุบตัว และค่ายุบตัวเมื่อสิ้นสุดการทดลองน้อยกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกเพียงชนิดเดียว แล้วเมื่อดูถึงความสอดคล้องกันของค่าการทดสอบทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าอัตราส่วนโมดูลัสคืบตัว และค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร ซึ่งมีลักษณะการให้แรงกระทำกับตัวอย่างแบบพลวัตเหมือนกันมีความสอดคล้องกันในตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกร่วมกัน ที่มีความเสียหายจากความชื้นน้อยที่สุดในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้วัสดุผสมแทรกในการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งแตกต่างจากค่าอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงที่ใช้แรงกระทำแบบสถิตย์ กลุ่มตัวอย่างที่ผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว มีอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด โดยการทดลองแบบพลวัตนั้นมีความน่าเชื่อถือของการทดสอบมากกว่า เนื่องจากการจำลองการทดสอบที่มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับสภาพการรับน้ำหนักจริงในสนามของแอสฟัลต์คอนกรีต ที่เป็นน้ำหนักแบบกระทำซ้ำ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึง กับผลอัตราส่วนโมดูลัสคืบตัว พบว่าผลที่ได้นั้นไม่สอดคล้องกันสังเกตได้จากผลความต้านทานต่อแรงดึงของตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชนิดอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาผลอัตราส่วนโมดูลัสคืบตัวกลับได้ผลในทางตรงกันข้าม คือมีค่าโมดูลัสคืบตัวต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชนิดอื่น อาจเกิดมาจากการทดสอบโมดูลัสคืบตัวนั้นใช้แรงในการทดสอบร้อยละ 10 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างแต่ละชนิด ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์นั้นใช้แรงในการทดสอบสูงที่สุด อาจส่งผลให้ค่าโมดูลัสคืบตัวต่ำกว่าตัวอย่างชนิดอื่นๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมแทรก เพื่อปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต เปรียบเทียบระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุผสมแทรก และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ (PMA) และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ดัดแปลงด้วยยางพารา (NRMA) การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดต่างๆ ประกอบด้วย การหาคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม วัสดุผสมแทรก และแอสฟัลต์ซีเมนต์ การทดสอบมาร์แชลล์ การทดสอบค่าการต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม การทดสอบโมดูลัสการคืนตัว และการทดสอบค่าการต้านทานต่อการยุบตัวถาวร โดยผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ สรุปได้ดังนี้

#### 1. คุณสมบัติมวลรวม แอสฟัลต์ซีเมนต์ และการวิเคราะห์ช่องว่าง

1.1 คุณสมบัติมวลรวม พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ได้แก่ ค่าความคงทน ค่าทรายสมบูรณ์ ความสึกหรอ ขนาดคละ ดัชนีความยาว และดัชนีความแบน

1.2 คุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ พบว่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

#### 1.3 การวิเคราะห์ช่องว่างของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

1.3.1 เมื่อผสมเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว พบว่าช่องว่างอากาศ และ VMA มีค่าน้อยลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า VFB มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอย ดังตารางที่ 5.1 ส่งผลมาจากลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยที่มีรูปร่างกลม สามารถเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างอากาศของตัวอย่างได้ดีทำให้ช่องว่างอากาศลดลงตามปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ช่องว่างเมื่อผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

Air Voids (%)	VMA (%)	VFB (%)
HMA=PMA>F1>F3>F5	HMA=PMA>F1>F3>F5	F5>F3>F1>HMA=PMA

1.3.2 เมื่อผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงชนิดเดียว พบว่าช่องว่างอากาศ และ VMA มีค่าต่ำสุดเมื่อผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 1 และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่เกินค่าช่องว่างอากาศ และ VMA ของ HMA ส่วน VFB มีค่าน้อยลงตามปริมาณ

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 5.2 อาจส่งผลมาจากการที่เม็ดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ไม่สามารถเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างได้หมด และกระจัดกระจายอยู่ตามผิวของวัสดุมวลรวมทำให้เมื่อผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น ช่องว่างอากาศก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ช่องว่างเมื่อผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

Air Voids (%)	VMA (%)	VFB (%)
HMA=PMA>C5>C3>C1	HMA=PMA>C5>C3>C1	C1>C3>C5>HMA=PMA

1.3.3 เมื่อผสมเถ้าลอย และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร่วมกัน พบว่าช่องว่างอากาศลดลงเมื่อผสมวัสดุผสมแทรก โดยที่ค่าช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากันในทุกส่วนผสม ส่วนค่า VMA จะลดลงตามปริมาณวัสดุผสมแทรกที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 5.3 การที่ช่องว่างอากาศมีปริมาตรเท่าๆ กัน อาจส่งผลมาจากเมื่อผสมวัสดุผสมแทรกทั้งสองชนิดพร้อมกัน ทำให้ขนาดคละของวัสดุผสมแทรกดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณช่องว่างอากาศที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ลดลง

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ช่องว่างเมื่อผสมเถ้าลอยและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร่วมกัน

Air Voids (%)	VMA (%)	VFB (%)
HMA=PMA>C0.5F0.5=C1.5F1.5>C2.5F2.5	HMA=PMA>C0.5F0.5>C1.5F1.5>C2.5F2.5	C2.5F2.5>C0.5F0.5>C1.5F1.5>HMA=PMA

## 2. ค่าเสถียรภาพ

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อผสมวัสดุผสมแทรกทำให้ค่าเสถียรภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 5 (C5) มีค่าเสถียรภาพสูงที่สุด แต่ยังคงต่ำกว่าค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยยางพารา และแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมผสมมีค่าเสถียรภาพสูงที่สุด โดยผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยยางพาราที่มีค่าค่อนข้างสูง อาจเกิดมาจากการที่วัสดุมวลรวมมีร้อยละการผ่านตะแกรงเบอร์ใหญ่ค่อนข้างสูง ร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และจากผลของค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหล พบว่าตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมแทรกเพียงอย่างเดียวมีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลใกล้เคียงกับตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกในทุกอัตราส่วน ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และตัวอย่างที่ผสมร่วมกันระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 2.5 : 2.5 มี

ค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานซึ่งมีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพและการไหล

Stability (kN)	Stability/Flow (kN/0.25mm)
HMA<C1<F1<F5<F3<C0.5F0.5<C1.5F1.5<C3 <C2.5F2.5 <C5<NRMA<PMA	F1=F5<HMA=C1=F3<C0.5F0.5<C3 <C5 <C1.5F1.5 =NRMA<C2.5F2.5<PMA

### 3. การทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

จากผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้ง เมื่อผสมวัสดุผสมแทรกส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงขึ้น โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวที่ร้อยละ 3 (C3) มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุผสมแทรกชนิดอื่นที่ปริมาณเท่ากัน และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสานยังมีค่าที่ต่ำกว่าแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสาน การทดสอบที่อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง พบว่าก่อนตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุผสมแทรกนั้นมีแนวโน้มพัฒนาากำลังขึ้นตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยเข้าด้วยกันนั้นให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงที่สุด (C2.5F2.5) เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุผสมแทรกด้วยกัน และมีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสาน เมื่อพิจารณาการทดสอบเงื่อนไขแบบแห้งเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ช่องว่างอากาศในตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณช่องว่างอากาศลดลง มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงขึ้น อาจสรุปได้ว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นมาจากการที่วัสดุผสมรวมมีการยึดเหนี่ยวกันได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียกนั้น พบว่าก่อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 5 % นั้นให้ค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับก่อนตัวอย่างชนิดอื่นๆ และยังสังเกตได้ว่าเมื่อทำการทดลองแบบเปียกนั้น ตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวในอัตราส่วนผสมเท่ากันมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมากที่สุด อาจส่งผลมาจากการที่ตัวอย่างได้รับความชื้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ตัวอย่างรับกำลังได้มากขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ผสมร่วมกันระหว่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอย พบว่าเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้นกำลังของตัวอย่างจะน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ในอัตราส่วนเท่ากัน อาจเกิดจากการที่เถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลาน ไปหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของตัวอย่างส่งผลให้การพัฒนากำลังของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ไม่สูงเท่าตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตารางที่ 5.5

และ 5.6 ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่างที่ผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวที่มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างชนิดอื่น ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่ผสมวัสดุผสมแทรก

เงื่อนไขการทดสอบ	ปริมาณวัสดุผสมแทรก		
	1 %	3 %	5 %
25 °C แบบแห้ง	C1>C0.5F0.5>F1	C3>F3>C1.5F1.5	C5>C2.5F2.5>F5
อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง	F1>C1>C0.5F0.5	C1.5F1.5>F3>C3	C2.5F2.5>F5>C5
อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก	C1>C0.5F0.5>F1	C3=F3>C1.5F1.5	C5>F5>C2.5F2.5

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างทั้งหมด

25 °C แบบแห้ง	อุณหภูมิ 55 °C แบบแห้ง	อุณหภูมิ 55 °C แบบเปียก
PMA>C3>HMA	PMA>C2.5F2.5>HMA	C5>PMA>HMA

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดึงทางอ้อม

TSR (%)
HMA<C2.5F2.5C1.5F1.5<PMA<F1<F5<C0.5F0.5<F3<C3<C5<C1

#### 4. การทดสอบโมดูลัสคืนตัว

สำหรับการทดสอบแบบแห้งที่อุณหภูมิ 25 °C พบว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 1 มีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นในเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ช่องว่างพบว่าตัวอย่างที่มีช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 2 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวใกล้เคียงกันสำหรับการทดสอบแบบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C ตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 3 มีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นในเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน และยังพบอีกว่าตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวในทุกอัตราส่วนมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณากับผลวิเคราะห์ช่องว่างพบว่าตัวอย่างที่มีค่า VMA สูงจะทนต่อสภาพอากาศที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีค่า VMA ต่ำแต่ทั้งนี้ยังต้องดูปริมาณที่เหมาะสมด้วย ที่สุดส่วนการทดสอบที่ 55 °C แบบเปียก ตัวอย่างที่มีส่วนผสมร่วมกันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยที่ร้อยละ 2.5 : 2.5 มีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุด เมื่อพิจารณาระหว่างตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกในทุกอัตราส่วน พบว่าตัวอย่างที่ผสมร่วมกันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ มีค่าโมดูลัสคืนตัวดีกว่าตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกเพียงชนิดเดียว

## 5. การทดสอบค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร

สำหรับการทดสอบแบบแห้งที่อุณหภูมิ 25 °C แบบแห้งตัวอย่างที่มีส่วนผสมร่วมกันระหว่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยร้อยละ 1.5 : 1.5 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม (C1.5F1.5) มีอัตราการยุบตัวต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดสอบทั้งหมด จะสังเกตได้ว่าเมื่อผสมวัสดุผสมแทรกกับตัวอย่างในอุณหภูมิปกติ ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มยางสามารถเทียบเท่าได้กับตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้มีอัตราการยุบตัวที่น้อยลง สำหรับการทดสอบแบบที่อุณหภูมิ 55 °C ทั้งแบบแห้ง และแบบเปียก ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอยที่ร้อยละ 2.5 : 2.5 (C2.5F2.5) มีอัตราการยุบตัวน้อยที่สุด และใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกด้วยกัน แต่ยังมีน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมประสาน และเมื่อพิจารณากับตัวอย่างทั้งหมดพบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 3 มีอัตราการยุบตัวที่น้อยที่สุด อาจสรุปได้ว่าปัจจัยที่ทำให้มีอัตราการยุบตัวลดลงสาเหตุมาจากการที่ตัวอย่างมีช่องว่างอากาศลดลงของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต แต่เมื่อสังเกตในการยุบตัวของช่วงแรก ค่าการยุบตัวของการทดสอบที่เงื่อนไขแบบเปียกจะยุบตัวมากกว่าการยุบตัวของการทดสอบแบบแห้ง อาจส่งผลมาจากความเสียหายเนื่องจากความชื้นทำให้ค่าการยุบตัวในช่วงแรกนั้นมีมากกว่าการทดสอบแบบแห้ง

จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อทำการผสมวัสดุผสมแทรกแล้วสามารถปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ เป็นผลจากการที่วัสดุผสมแทรกนั้นสามารถเข้าไปอุดช่องว่างแอสฟัลต์คอนกรีต และยังสามารถทำให้ฟิล์มยางแข็งขึ้นได้ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ali และคณะ (1996) ได้ศึกษาการใส่เถ้าลอยร้อยละ 2 ของน้ำหนักมวลรวม พบว่าเถ้าลอยไม่เพียงแต่ทำให้ยางแอสฟัลต์แข็งขึ้นแต่ยังให้ความแข็งแรงและป้องกันการลอกของยางได้ และ Hao และ Liu (2006) ได้ศึกษาพบว่าการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเถ้าลอย สามารถต้านทานความชื้นได้ ส่วนผลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปอซโซลานิก มีผลไม่มากนักกับตัวอย่างการทดสอบ

เมื่อศึกษาถึงผลกระทบทางด้านต้นทุนของการก่อสร้างจากงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เป็นตัวเชื่อมประสาน พบว่าตัวอย่างที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 5 มีต้นทุนสูงชันมากที่สุด โดยสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกร้อยละ 6.68 ต่อการผสม 1 ตัน และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างทั้งหมด พบว่าตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์ดัดแปลงด้วยโพลีเมอร์ (PMA) มีต้นทุนเพิ่มขึ้นสูงที่สุด โดยสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกร้อยละ 31.91 ต่อการผสม 1 ตัน

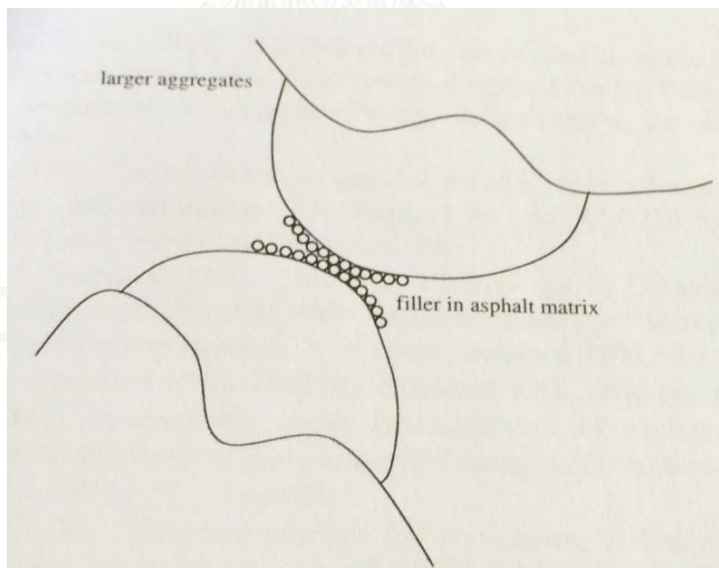


## 5.2 สรุปพฤติกรรมของวัสดุผสมแตรกที่มีต่อแอสฟัลต์คอนกรีต

1. ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ และขนาดคละของวัสดุผสมรวมเท่ากันนั้น เมื่อผสมวัสดุผสมแตรกเข้ากับตัวอย่างจะส่งผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับแอสฟัลต์ซีเมนต์ของวัสดุผสมรวม เนื่องจากวัสดุผสมแตรกที่ผสมเข้าไปนั้นจะเพิ่มเนื้อที่ผิวสัมผัสของวัสดุผสมรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นสาเหตุให้ความต้องการแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่จะห่อหุ้มวัสดุผสมรวมได้พอดีนั้นสูงขึ้นด้วย

2. เมื่อผสมวัสดุผสมแตรกเข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์จะส่งผลให้เนื้อแอสฟัลต์ซีเมนต์แข็งขึ้น เนื่องมาจากการที่อนุภาคของวัสดุผสมแตรกที่มีขนาดเล็กๆ นั้นไปขัดกันภายในเนื้อแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีคุณสมบัติที่แข็งขึ้น โดยความแข็งของเนื้อแอสฟัลต์ซีเมนต์นี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุผสมรวม

3. เมื่อทำการบดอัดตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุผสมแตรก ปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาค (VMA) ของตัวอย่างนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง และขนาดของอนุภาคของวัสดุผสมแตรก โดยตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแตรกที่มีลักษณะของอนุภาคที่มีเหลี่ยมมนน้อยกว่านั้น จะมีปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยกว่า เนื่องจากวัสดุผสมแตรกที่มีเหลี่ยมมนน้อยกว่านั้นจะมีพฤติกรรมแบบลูกกลิ้ง ดังภาพที่ 5.1 ทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคน้อยกว่าวัสดุผสมผสมแตรกที่มีเหลี่ยมมนสูงกว่า ทำให้ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาตรช่องว่างอากาศ (Air Void) ลดลง ส่งผลให้ค่าปริมาตรระหว่างอนุภาคสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 5.1 แสดงพฤติกรรมแบบลูกกลิ้งของวัสดุผสมแตรก (Roller Effect of Filler)

ที่มา : Anggraini Zulkati et al.(2012)

4. การผสมวัสดุวัสดุผสมแทรกนอกจากจะทำให้เนื้อแอสฟัลต์ซีเมนต์แข็งขึ้นแล้ว ยังช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของตัวอย่างจากแบบหยุ่นหนืด (Viscoelastic) เป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) ได้ด้วย โดยการทดสอบที่อุณหภูมิปกติจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของตัวอย่างไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบในอุณหภูมิสูง จะสังเกตได้จากผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิปกติค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกจะมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรก ส่วนในการทดสอบที่อุณหภูมิสูงนั้นค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมวัสดุผสมแทรกจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมวัสดุผสมแทรกอย่างชัดเจน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดสอบค่าความเหมาะสมของอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมแทรกแต่ละชนิด และปริมาณช่องว่างในอากาศของก้อนตัวอย่างเพิ่มเติม เพื่อหาอัตราส่วนในการผสมวัสดุผสมแทรกแต่ละชนิดที่เหมาะสม กับการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไปในอนาคต
2. ควรมีการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างที่มีการผสมวัสดุผสมแทรกเพิ่มเติม เพื่อจะทำให้รู้ถึงปัจจัยในการพัฒนากำลังที่แท้จริงของการผสมวัสดุผสมแทรก
3. ควรมีการทดสอบเกี่ยวกับระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปอซโซลานิก มากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- AASHTO. "Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures." Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1995.
- AASHTO. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete." In Washington, DC American Association of State and Highway Transportation Officials, 2006.
- Al-Khateeb, Saoud A., Al-Msouti. "Rutting Prediction of Flexible Pavements Using Finite Element Modeling." *Jordan Journal of Civil Engineering* 5, no. 2 (2011): 18.
- Ali N, Chan JS, Simms S, Bushman R, Bergan AT. "Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures." *Journal of Materials in Civil Engineering* 8, no. 1 (1996): 19-25.
- ASTM. "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures ". West Conshohocken, PA: ASTM International, 1995.
- BS. "Method for Determination of the Indirect Tensile Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures ". London: British Standards Institution, 1993.
- BS. "Method for Determining Resistance to Permanent Deformation of Bituminous Mixtures Subject to Unconfined Dynamic Loading ". London: British Standards Institution, 1996.

- Hao, P. and Liu, H. "A Laboratory Study of the Effectiveness of Various Additives on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures." *Journal of Testing and Evaluation* 34, no. 4 (2006).
- Oruc, S., Celik, F. and Akpinar, M. V. "Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures." *Journal of Materials Engineering and Performance* 16, (2007): 578-583.
- Pirabarooban S., Zaman M., Tarefder R. A. . "Evaluation of Rutting Potential in Asphalt Mixes Using Finite Element Modeling." In *Conference of the Transportation Association of Canada*. St. John's, Newfoundland and Labrador, 2003.
- Puzinauskas, V.P. *Filler in Asphalt Mixture* Asphalt Insitute, 1969.
- Rosner, J.C., Chehovits, J.G., and Morris, G.R. . *Fly Ash as a Mineral Filler and Anti-Strip Agent for Asphalt Concrete*. Morgantown, W. Va.: United States Department of Energy, 1982, DOE/METC/82/2.
- Troutbeck, R. and Kennedy, C. . *Troutbeck.R, Kennedy.C 2005, 'Review of the Use of Stone Mastic Asphalt (Sma) Surfacing by the Queensland Department of Main Roads*. Queensland University, 2005.
- Wang, Hao and Imad L. Al-Qadi. "Evaluation of Surface-Related Pavement Damage Due to Tire Braking." *Road Materials and Pavement Design* 11, no. 1 (2010): 101-121.
- White T.D., Haddock J.E., Hand A.J.T. and Fang H. *Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements*. Washington, D.C.: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2002.

Wu, Shaopeng, Yongjie Xue, Qunshan Ye and Yongchun Chen. "Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (Sma) Mixtures." *Building and Environment* 42, no. 7 (2007): 2580-2585.

Xiao-di Hu, L. F. Walubita. "Modeling Mechanistic Responses in Asphalt Pavements under Three-Dimensional Tire-Pavement Contact Pressure." *Journal of Central South University of Technology* 18, no. 1 (2011): 250-258.

Zulkati, A., W. Diew and D. Delai. "Effects of Fillers on Properties of Asphalt-Concrete Mixture." *Journal of Transportation Engineering* 138, no. 7 (2011): 902-910.

Zulkati, A., W. Diew and D. Delai. "Effects of Fillers on Properties of Asphalt-Concrete Mixture." *Journal of Transportation Engineering* 138, no. 7 (2012): 902-910.

กรมทางหลวง, กองวิศวกรรมวิจัย "วิธีวิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธีมาร์แชลล์ (เทียบเท่า Astm D-1559)." กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2517.

กรมทางหลวง, กองวิศวกรรมวิจัย "มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต." กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2532.

กรมทางหลวง, กองวิศวกรรมวิจัย "มาตรฐานมอดิฟายแอสฟัลต์คอนกรีต." กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง, 2549.

จันทร์โชติ, กฤษณะ. "คุณสมบัติต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินแกรนิตโดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ." มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.

ชอบพานิช, ทวีช. "การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70, เกรด 40/50 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์ โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานซูเปอร์เพฟ." มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.

ซีไรสง, สมพงษ์. "การทดสอบซีเมนต์ลอยเป็นวัสดุอัดแทรกในแอสฟัลต์คอนกรีต." มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.

ธนกร ชมภูรัตน์ , ศิริลักษณ์ จักรเพชร และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. "ผลของเกรดแอสฟัลต์ที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้ผลกระทบเนื่องจากความชื้น." การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17. อุดรธานี, 2555.

พรหมศร, ชัยฉันทน์. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี *Indirect Tensile Test* เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและพัฒนา งานทาง กรมทางหลวง, 2541, รายงานฉบับที่ วพ.167.

พรหมศร, ชัยฉันทน์. คุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (*Indirect Tensile Strength*) และค่าโมดูลัสคืนตัว (*Resilient Modulus*) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและพัฒนา งานทาง กรมทางหลวง, 2546, รายงานฉบับที่ วพ.204.

สอนวงศ์, นภัสรพี อนันตชัยพงศ์ และ พิพัฒน์. "การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์ชนิดโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์กับชนิดแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด Ac 60/70 และ Ac 40/50 โดยวิธีทดสอบซูเปอร์เพพ." วิศวกรรมสาร ม ก., no. 70 (2552): 110-121.

อรุณี สายนิลคำ, ปรีดา พิทยาพันธ์, อรรถวิทย์ อุปโยคิน, พรหมมา เทพศรีหา. "การวิเคราะห์สมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยยางพาราธรรมชาติ." การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, 1, 417-422. เชียงใหม่, 2556.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบคุณสมบัติของหิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบขนาดคละของหิน HOT BIN 1

Sieve Sizes	Sample 1			Sample 2			Average Passing (%)
	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	
3/8"	-	-	-	-	-	-	-
#4	-	880.7	100	-	826.6	100	100
#8	179.6	701.1	79.6	173.7	652.9	79.0	79.3
#16	238.0	463.1	52.6	234.8	418.1	50.6	51.6
#30	167.5	295.6	33.6	156.7	261.4	31.6	32.6
#50	107.4	188.2	21.4	97.1	164.3	19.9	20.7
#100	50.7	137.5	15.6	44.6	119.7	14.5	15.1
#200	26.3	111.2	12.6	22.7	97.0	11.7	12.2

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบขนาดคละของหิน HOT BIN 2

Sieve Sizes	Sample 1			Sample 2			Average Passing (%)
	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	
3/8"	-	2179	100	-	2243	100	100
#4	1541	638	29.3	1619	624	27.8	28.6
#8	485	153	7.0	476	148	6.6	6.8
#16	133	20	0.9	126	22	1.0	1.0
#30							
#50							
#100							
#200							

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบขนาดคละของหิน HOT BIN 3

Sieve Sizes	Sample 1			Sample 2			Average Passing (%)
	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	
3/4"	-	-	-	-	-	-	-
1/2"	-	4093	100	-	4267	100	100
3/8"	645	3448	84.2	528	3739	87.6	85.9
#4	3120	328	8.0	3330	409	9.6	8.8
#8	242	86	2.1	265	144	3.4	2.8
#16	80	6	0.1	83	61	1.4	0.8
#30							
#50							

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบขนาดคละของหิน HOT BIN 4

Sieve Sizes	Sample 1			Sample 2			Average Passing (%)
	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	Retained (g)	Passing (g)	Passing (%)	
3/4"	-	5028	100	-	5268	100	100
1/2"	3673	1355	26.9	3894	1374	26.1	26.5
3/8"	1228	127	2.5	1236	138	2.6	2.6
#4	121	6	0.1	132	6	0.1	0.1
#8							
#16							
#30							
#50							

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบ Flakiness Index ของหิน HOT BIN 2

Sieve Sizes		Width of Slot Sieve		Retained (X)	Passing (Y)	Total Mass (X + Y)	Flakiness Index
mm.	in.	mm.	in.	g	g	g	%
63.50 – 50.80	2 ½” – 2”	34.29	1.350	-	-	-	
50.80 – 38.10	2” – 1 ½”	26.67	1.050	-	-	-	
38.10 – 25.40	1 ½” – 1”	19.05	0.750	-	-	-	
25.40 – 19.05	1” – ¾”	13.34	0.525	-	-	-	
19.05 – 12.70	¾” – ½”	9.53	0.375	-	-	-	
12.70 – 9.52	½” – ⅜”	6.68	0.263	-	-	-	
9.52 – 4.76	⅜” - #4	4.29	0.169	907	634	1541	
Total				907	634	1541	41.1

$$\%F.I. = \frac{Y}{X+Y} \times 100 = \frac{634}{907+634} \times 100 = 41.1\%$$

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบ Elongation Index ของหิน HOT BIN 2

Sieve Sizes		Gauge length		Retained (X)	Passing (Y)	Total Mass (X + Y)	Elongation Index
mm.	in.	mm.	in.	g	g	g	%
63.50 – 50.80	2 ½” – 2”	34.29	1.350	-	-	-	
50.80 – 38.10	2” – 1 ½”	26.67	1.050	-	-	-	
38.10 – 25.40	1 ½” – 1”	19.05	0.750	-	-	-	
25.40 – 19.05	1” – ¾”	13.34	0.525	-	-	-	
19.05 – 12.70	¾”-½”	9.53	0.375	-	-	-	
12.70 – 9.52	½”-⅜”	6.68	0.263	-	-	-	
9.52 – 4.76	⅜” - #4	4.29	0.169	238	1303	1541	
Total				238	1303	1541	15.4

$$\%E.I. = \frac{X}{X+Y} \times 100 = \frac{238}{238+1303} \times 100 = 15.4\%$$

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบ Flakiness Index ของหิน HOT BIN 3

Sieve Sizes		Width of Slot Sieve		Retained (X)	Passing (Y)	Total Mass (X+Y)	Flakiness Index
mm.	in.	mm.	in.	g	g	g	%
63.50 – 50.80	2 ½” – 2”	34.29	1.350	-	-	-	
50.80 – 38.10	2” – 1 ½”	26.67	1.050	-	-	-	
38.10 – 25.40	1 ½” – 1”	19.05	0.750	-	-	-	
25.40 – 19.05	1” – ¾”	13.34	0.525	-	-	-	
19.05 – 12.70	¾”-1/2”	9.53	0.375	-	-	-	
12.70 – 9.52	1/2”-3/8”	6.68	0.263	328	317	645	
9.52 – 4.76	3/8” - #4	4.29	0.169	2364	756	3120	
Total				2692	1073	3765	28.5

$$\%F.I. = \frac{Y}{X+Y} \times 100 = \frac{1073}{2692+1073} \times 100 = 28.5\%$$

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบ Elongation Index ของหิน HOT BIN 3

Sieve Sizes		Gauge length		Retained (X)	Passing (Y)	Total Mass (X+Y)	Elongation Index
mm.	in.	mm.	in.	g	g	g	%
63.50 – 50.80	2 ½” – 2”	34.29	1.350	-	-	-	
50.80 – 38.10	2” – 1 ½”	26.67	1.050	-	-	-	
38.10 – 25.40	1 ½” – 1”	19.05	0.750	-	-	-	
25.40 – 19.05	1” – ¾”	13.34	0.525	-	-	-	
19.05 – 12.70	¾”-1/2”	9.53	0.375	-	-	-	
12.70 – 9.52	1/2”-3/8”	6.68	0.263	58	587	645	
9.52 – 4.76	3/8” - #4	4.29	0.169	492	2628	3120	
Total				550	3215	3765	14.6

$$\%E.I. = \frac{X}{X+Y} \times 100 = \frac{550}{550+3215} \times 100 = 14.6\%$$

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบ Flakiness Index ของหิน HOT BIN 4

Sieve Sizes		Width of Slot Sieve		Retained (X)	Passing (Y)	Total Mass (X + Y)	Flakiness Index
mm.	in.	mm.	in.	g	g	g	%
63.50 – 50.80	2 ½” – 2”	34.29	1.350	-	-	-	
50.80 – 38.10	2” – 1 ½”	26.67	1.050	-	-	-	
38.10 – 25.40	1 ½” – 1”	19.05	0.750	-	-	-	
25.40 – 19.05	1” – ¾”	13.34	0.525	-	-	-	
19.05 – 12.70	¾”-1/2”	9.53	0.375	2449	1224	3673	
12.70 – 9.52	1/2”-3/8”	6.68	0.263	848	380	1228	
9.52 – 4.76	3/8” - #4	4.29	0.169	96	25	5022	
Total				3393	1629	5022	32.4

$$\%F.I. = \frac{Y}{X+Y} \times 100 = \frac{1629}{3393+1629} \times 100 = 32.4\%$$

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบ Elongation Index ของหิน HOT BIN 4

Sieve Sizes		Gauge length		Retained (X)	Passing (Y)	Total Mass (X + Y)	Elongation Index
mm.	in.	mm.	in.	g	g	g	%
63.50 – 50.80	2 ½” – 2”	34.29	1.350	-	-	-	
50.80 – 38.10	2” – 1 ½”	26.67	1.050	-	-	-	
38.10 – 25.40	1 ½” – 1”	19.05	0.750	-	-	-	
25.40 – 19.05	1” – ¾”	13.34	0.525	-	-	-	
19.05 – 12.70	¾”-1/2”	9.53	0.375	-	3673	3673	
12.70 – 9.52	1/2”-3/8”	6.68	0.263	292	936	1228	
9.52 – 4.76	3/8” - #4	4.29	0.169	81	40	121	
Total				373	4649	5022	7.4

$$\%E.I. = \frac{X}{X+Y} \times 100 = \frac{373}{373+4649} \times 100 = 7.4\%$$

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบ Specific Gravity และ Absorption of Course Aggregate ของหิน  
HOT BIN 2, HOT BIN 3 และ HOT BIN 4

SAMPLE		Mass of Sample (g)			Bulk Specific Gravity (GB)	Apparent Specific Gravity (GA)	% Abs
		In Oven Dry	In Saturate Surface Dry	Immerse d in water			
		(A)	(B)	(C)	$\frac{A}{B-C}$	$\frac{A}{A-C}$	$\frac{B-A}{A}$
HOT BIN 2	No.1	692.8	696.2	445.0	2.758	2.796	0.49
	No.2	892.6	897.1	573.3	2.757	2.795	0.50
	No.3	857.3	861.5	550.5	2.757	2.794	0.49
	Total	2454.8	1568.8	1568.8	2.757	2.795	0.50
HOT BIN 3	No.1	956.4	961.1	613.2	2.749	2.787	0.49
	No.2	963.5	968.3	618.3	2.753	2.791	0.50
	No.3	958.6	963.2	615.5	2.757	2.794	0.48
	Total	2878.5	2892.6	1847.0	2.753	2.791	0.49
HOT BIN 4	No.1	1070.4	1074.7	682.1	2.726	2.757	0.40
	No.2	1069.0	1073.4	680.6	2.721	2.752	0.41
	No.3	1070.2	1074.2	681.2	2.723	2.751	0.37
	Total	3209.6	3222.3	2043.9	2.724	2.753	0.40

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบ Specific Gravity และ Absorption ของหิน HOT BIN 1 ที่ค้าง  
ตะแกรงเบอร์ 200

Determination No.			1	2	3	4	5	6
Wt. Pycnometer + SSD Sample		g	589.7					
Wt. Pycnometer		g	159.8					
Wt. SSD Sample	A	g	429.7					
Wt. Container + Dry Sample		g	649.9					
Wt. Container		g	224.0					
Wt. Dry Sample	B	g	425.8					
Temperature		°C	60	55	50	45	40	35
Density of Water	dt	g/ml	0.9832	0.9857	0.9881	0.9902	0.9922	0.9941
Wt. Pycnometer + Water + Sample	W1	g	924	924.8	925.5	926.1	927	927.5
Wt. Pycnometer + Water	W2	g	653.7	654.8	655.9	656.9	658.1	658.9
Apparent Specific Gravity (t°C)			2.692	2.694	2.694	2.692	2.693	2.693
Apparent Specific Gravity (30°C)			2.704	2.706	2.706	2.704	2.705	2.705
Bulk Specific Gravity (t°C)			2.626	2.628	2.628	2.627	2.627	2.627
Bulk Specific Gravity (30°C)			2.637	2.639	2.639	2.638	2.638	2.638

Average GA (30 °C) = 2.705

Average GB (30 °C) = 2.638

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบ Specific Gravity และ Absorption ของหิน HOT BIN 1 ที่ผ่าน  
ตะแกรงเบอร์ 200

Determination No.			1	2	3	4	5	6
Wt. Pycnometer + SSD Sample		g	-					
Wt. Pycnometer		g	158.2					
Wt. SSD Sample	A	g	-					
Wt. Container + Dry Sample		g	509.9					
Wt. Container		g	225.4					
Wt. Dry Sample	B	g	284.5					
Temperature		°C	60	55	50	45	40	35
Density of Water	dt	g/ml	0.9832	0.9857	0.9881	0.9902	0.9922	0.9941
Wt. Pycnometer + Water + Sample	W1	g	832	832.8	833.6	834.4	835.0	835.9
Wt. Pycnometer + Water	W2	g	652.6	653.6	654.7	655.7	656.5	657.6
Apparent Specific Gravity (t°C)			2.661	2.663	2.662	2.663	2.663	2.663
Apparent Specific Gravity (30°C)			2.672	2.675	2.673	2.675	2.675	2.675
Bulk Specific Gravity (t°C)			-	-	-	-	-	-
Bulk Specific Gravity (30°C)			-	-	-	-	-	-

Average GA (30 °C) = 2.674



$$Total \quad GB = \frac{100}{\left( \frac{\% \text{ Retain\#200}}{GB \text{ Retain\#200}} \right) + \left( \frac{\% \text{ Pas sin g\#200}}{GA \text{ Pas sin g\#200}} \right)}$$

$$Total \quad GB = \frac{100}{\left( \frac{87.8}{2.638} \right) + \left( \frac{12.2}{2.674} \right)} = 2.642$$

$$Total \quad GA = \frac{100}{\left( \frac{\% \text{ Retain\#200}}{GA \text{ Retain\#200}} \right) + \left( \frac{\% \text{ Pas sin g\#200}}{GA \text{ Pas sin g\#200}} \right)}$$

$$Total \quad GA = \frac{100}{\left( \frac{87.8}{2.705} \right) + \left( \frac{12.2}{2.674} \right)} = 2.701$$

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบ Sand Equivalent ของหิน

Sample No.	Sand Reading	Clay Reading	Sand Equivalent % = $\frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}}$
1	3.6	5.7	63 %
2	3.6	5.6	64 %
Average			64 %

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะสูงสุดทางทฤษฎีของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60/70

Description		Unit	Trial 1	Trial 2
% AC by Wt. of Agg.		%	6	6
% AC by Wt. of total mix	<b>X</b>	%	5.66	5.66
Wt. of flask in water	<b>A</b>	g	811.1	811
Wt. of flask in air	<b>B</b>	g	1466.3	1466.3
Wt. of flask + sample in air	<b>C</b>	g	2696.6	2711
Wt. of sample in air = <b>C - B</b>	<b>D</b>	g	1230.3	1244.7
Wt. of flask + sample in water after evacuation	<b>E</b>	g	1544.5	1552.9
Theoretical Maximum Specific Gravity ( $G_m$ )			2.476	2.476
$G_m = \frac{D}{A + D - E}$				
Average Theoretical Maximum Specific Gravity			2.476	
Virtual Specific Gravity ( $G_v$ )			2.708	
$G_v = \frac{100 - X}{\left(\frac{100}{G_m}\right) - \left(\frac{X}{G_{ac}}\right)}$				
Bulk Specific Gravity of mix agg. ( $G_{ag}$ )			2.701	
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )			1.02	
Asphalt Lost by Absorption			0.25	
$Absorption = \frac{100 \times (G_v - G_{ag}) \times G_{ac}}{G_v \times G_{ag}}$		%		

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 43:24:18:15

Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.701

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.76		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.52		
Mass in Air	g	1240.6	1249.2	1244.3
Mass SSD	g	1241.5	1249.9	1245.4
Mass in water	g	728.5	733.3	730.7
Bulk Volume	g	513.0	516.6	514.7
Bulk Density	$g/ml^3$	2.418	2.418	2.418
Average Density	$g/ml^3$	2.418		
Volume AC	%	10.7		
Volume Agg	%	85.3		
VMA	%	14.7		
Air Voids	%	4		
VFB	%	72.8		
Stability	lb(N)	2130(9478)	2160(9611)	(2180(9700))
Adjust	lb(N)	2130(9478)	2160(9611)	(2180(9700))
Average Stability	lb(N)	2157(9596)		
Flow	0.01in(0.25mm)	13	13	11
Average Flow	0.01in(0.25mm)	12		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	180(800)		

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + C1

Mix proportion Hot Bin C:1:2:3:4 = 1:43:24:18:15

Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.705

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.72		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.48		
Mass in Air	g	1266.0	1264.1	1263.0
Mass SSD	g	1267.1	1264.7	1263.6
Mass in water	g	752.8	751.1	750.0
Bulk Volume	g	514.3	513.6	513.6
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.467	2.464	2.465
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.465		
Volume AC	%	10.8		
Volume Agg	%	86.7		
VMA	%	13.3		
Air Voids	%	2.5		
VFB	%	81.2		
Stability	lb(N)	2220(9878)	2080(9255)	2210(9834)
Adjust	lb(N)	2220(9878)	2080(9255)	2210(9834)
Average Stability	lb(N)	2170(9656)		
Flow	0.01in(0.25mm)	12	13	15
Average Flow	0.01in(0.25mm)	13		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	167(743)		

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + C3

Mix proportion Hot Bin C:1:2:3:4 = 3:43:24:18:15

Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.712

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.63		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.39		
Mass in Air	g	1281.0	1284.4	1287.1
Mass SSD	g	1281.5	1285.0	1287.9
Mass in water	g	761.2	763.2	764.9
Bulk Volume	g	520.3	521.8	523.0
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.462	2.461	2.461
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.462		
Volume AC	%	10.6		
Volume Agg	%	86.6		
VMA	%	13.4		
Air Voids	%	2.8		
VFB	%	79.1		
Stability	lb(N)	2460(10947)	2490(11080)	2640(11748)
Adjust	lb(N)	2460(10946)	2490(11080)	2530(11258)
Average Stability	lb(N)	2493(11095)		
Flow	0.01in(0.25mm)	13	17	15
Average Flow	0.01in(0.25mm)	15		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	169(743)		

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + C5

Mix proportion Hot Bin C:1:2:3:4 = 5:43:24:18:15

Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.719

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.55		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.31		
Mass in Air	g	1308.5	1307.4	1307.9
Mass SSD	g	1310.0	1308.4	1308.7
Mass in water	g	776.8	775.4	775.6
Bulk Volume	g	533.2	533.0	533.1
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.454	2.453	2.453
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.453		
Volume AC	%	10.4		
Volume Agg	%	86.1		
VMA	%	13.9		
Air Voids	%	3.5		
VFB	%	74.8		
Stability	lb(N)	2710(12059)	2640(11748)	2640(11748)
Adjust	lb(N)	2600(11569)	2530(11258)	2530(11258)
Average Stability	lb(N)	2553(11362)		
Flow	0.01in(0.25mm)	16	13	12
Average Flow	0.01in(0.25mm)	14		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	191(847)		

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + F1

Mix proportion Hot Bin F:1:2:3:4 = 1:43:24:18:15

Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.695

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.72		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.48		
Mass in Air	g	1259.4	1259.8	1259.2
Mass SSD	g	1260.8	1260.8	1260.1
Mass in water	g	750.4	750.2	749.7
Bulk Volume	g	510.4	510.6	510.4
Bulk Density	$g/ml^3$	2.467	2.467	2.467
Average Density	$g/ml^3$	2.467		
Volume AC	%	10.8		
Volume Agg	%	87.2		
VMA	%	12.8		
Air Voids	%	2		
VFB	%	84.4		
Stability	lb(N)	2180(9701)	2240(9968)	2330(10368)
Adjust	lb(N)	2180(9701)	2240(9968)	2330(10368)
Average Stability	lb(N)	2250(10012)		
Flow	0.01in(0.25mm)	14	15	14
Average Flow	0.01in(0.25mm)	14		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	161(716)		



ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + F3

Mix proportion Hot Bin F:1:2:3:4 = 3:43:24:18:15

Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.683

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.63		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.39		
Mass in Air	g	1283.7	1283.6	1284.5
Mass SSD	g	1284.8	1284.1	1285.4
Mass in water	g	764.7	764.0	765.1
Bulk Volume	g	520.1	520.1	520.3
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.468	2.468	2.469
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.468		
Volume AC	%	10.6		
Volume Agg	%	87.7		
VMA	%	12.3		
Air Voids	%	1.7		
VFB	%	86.2		
Stability	lb(N)	2270(10101)	2460(10947)	2300(10235)
Adjust	lb(N)	2270(10101)	2460(10947)	2300(10235)
Average Stability	lb(N)	2343(10427)		
Flow	0.01in(0.25mm)	14	14	15
Average Flow	0.01in(0.25mm)	14		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	168(745)		

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + F5

Mix proportion Hot Bin F:1:2:3:4 = 5:43:24:18:15

Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.672

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.55		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.31		
Mass in Air	g	1311.9	1301.7	1311.2
Mass SSD	g	1312.8	1302.6	1311.9
Mass in water	g	781.8	775.8	781.3
Bulk Volume	g	531.0	526.8	530.6
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.471	2.471	2.471
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.471		
Volume AC	%	10.4		
Volume Agg	%	88.3		
VMA	%	11.7		
Air Voids	%	1.3		
VFB	%	88.9		
Stability	lb(N)	2210(9834)	2460(10947)	2400(10680)
Adjust	lb(N)	2120(9433)	2360(10501)	2300(10234)
Average Stability	lb(N)	2260(10056)		
Flow	0.01in(0.25mm)	14	14	15
Average Flow	0.01in(0.25mm)	15		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	169(749)		

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + C0.5F0.5

Mix proportion Hot Bin CF:1:2:3:4 =0.5:0.5:43:24:18:15 Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.700

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.72		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.48		
Mass in Air	g	1282.4	1286.1	1284.2
Mass SSD	g	1283.0	1286.7	1284.9
Mass in water	g	763.1	764.7	763.9
Bulk Volume	g	519.9	522.0	521.0
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.467	2.464	2.465
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.465		
Volume AC	%	10.8		
Volume Agg	%	87.0		
VMA	%	13.0		
Air Voids	%	2.2		
VFB	%	83.1		
Stability	lb(N)	2360(10502)	2390(10635)	2340(10413)
Adjust	lb(N)	2360(10502)	2390(10635)	2340(10413)
Average Stability	lb(N)	2360(10501)		
Flow	0.01in(0.25mm)	14	14	14
Average Flow	0.01in(0.25mm)	14		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	169(751)		

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + C1.5F1.5

Mix proportion Hot Bin CF:1:2:3:4 =1.5:1.5:43:24:18:15 Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.697

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.63		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.39		
Mass in Air	g	1287.1	1284.4	1281.0
Mass SSD	g	1287.9	1285.0	1281.5
Mass in water	g	766.1	764.2	762.1
Bulk Volume	g	521.8	520.8	519.4
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.467	2.466	2.466
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.466		
Volume AC	%	10.6		
Volume Agg	%	87.2		
VMA	%	12.8		
Air Voids	%	2.2		
VFB	%	82.8		
Stability	lb(N)	2520(11214)	2610(11614)	2520(11214)
Adjust	lb(N)	2520(11214)	2610(11614)	2520(11214)
Average Stability	lb(N)	2450(10902)		
Flow	0.01in(0.25mm)	10	13	13
Average Flow	0.01in(0.25mm)	12		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	213(946)		

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ HMA + C2.5F2.5

Mix proportion Hot Bin CF:1:2:3:4 =2.5:2.5:43:24:18:15 Pen. Grade AC 60/70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.695

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.55		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.31		
Mass in Air	g	1309.6	1311.6	1311.0
Mass SSD	g	1310.3	1312.2	1311.6
Mass in water	g	779.9	781.2	780.8
Bulk Volume	g	530.4	531.0	530.8
Bulk Density	g/ml <sup>3</sup>	2.469	2.470	2.470
Average Density	g/ml <sup>3</sup>	2.470		
Volume AC	%	10.4		
Volume Agg	%	87.5		
VMA	%	12.5		
Air Voids	%	2.1		
VFB	%	83.2		
Stability	lb(N)	2510(11169)	2620(11659)	2740(12193)
Adjust	lb(N)	2410(10724)	2520(11213)	2630(11703)
Average Stability	lb(N)	2520(11213)		
Flow	0.01in(0.25mm)	10	10	14
Average Flow	0.01in(0.25mm)	11		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	239(1062)		

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ของ PMA

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 43:24:18:15

Pen. Grade PMA

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler ( $G_{agg}$ ) = 2.701

Sp. Gr. Of AC ( $G_{ac}$ ) = 1.02

Compaction number of blows each end = 75

Asphalt Absorption = 0.25 %

No. of Specific Gravity		1	2	3
% Ac by Mass of Agg	%	5.00		
% Ac by Mass of Mix	%	4.76		
%Eff Ac by Mass of Mix	%	4.52		
Mass in Air	g	1243.9	1241.2	1240.9
Mass SSD	g	1245.4	1242.3	1242.5
Mass in water	g	731.3	729.2	729.6
Bulk Volume	g	514.1	513.1	512.9
Bulk Density	$g/ml^3$	2.420	2.419	2.419
Average Density	$g/ml^3$	2.419		
Volume AC	%	10.7		
Volume Agg	%	85.3		
VMA	%	14.7		
Air Voids	%	4.0		
VFB	%	72.8		
Stability	lb(N)	3050(13572)	3130(13928)	3130(13928)
Adjust	lb(N)	3050(13572)	3130(13928)	3130(13928)
Average Stability	lb(N)	3103(13809)		
Flow	0.01in(0.25mm)	14	14	16
Average Flow	0.01in(0.25mm)	15		
Stability/ Flow	lb/0.01in(N/0.25mm)	207(921)		

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA

	HMA																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
Specimen	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.6	102.6	102.8	102.9	102.2	102.3	102.6	102.6	102.8	102.9	102.2	102.2	102.6	102.6	102.3	102.4	102.5	102.5
Avg. Diameter (mm.)	102.6		102.8		102.3		102.6		102.8		102.3		102.6		102.3		102.5	
Thickness (mm.)	64.8	64.5	64.6	64.6	64.6	64.8	64.8	64.5	64.6	64.6	64.6	64.8	64.8	64.5	64.6	64.6	64.6	64.8
Avg. Thickness (mm.)	64.6		64.6		64.7		64.6		64.6		64.7		64.6		64.6		64.7	
Ultimate Load (N)	6164		6050		6618		824		938		938		597		484		711	
ITS (MPa)	0.592		0.580		0.637		0.079		0.090		0.090		0.057		0.047		0.068	
Avg. ITS (MPa)	0.603						0.086						0.057					

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + C1

Specimen	HMA + C1																		
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C						
	1		2		3		1		2		3		1		2		3		
Diameter (mm.)	102.1	102.1	102.5	102.6	102.2	102.6	102.3	102.4	102.0	102.1	102.2	102.3	102.2	102.3	102.8	102.7	101.9	101.9	
Avg. Diameter (mm.)	102.1		102.6		102.4		102.3		102.1		102.3		102.2		102.7		101.9		
Thickness (mm.)	65.1	65.2	64.0	64.1	63.8	64.4	64.3	64.5	64.5	64.5	64.2	64.5	64.2	65.05	65.25	64.43	64.2	64.3	64.1
Avg. Thickness (mm.)	65.1		64.0		64.1		64.4		64.5		64.4		65.2		64.3		64.2		
Ultimate Load (N)	6959		7300		6959		1052		1279		1052		1279		1165		1279		
ITS (MPa)	0.666		0.708		0.675		0.102		0.124		0.102		0.122		0.112		0.124		
Avg. ITS (MPa)	0.683						0.109						0.119						



ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + F1

Specimen	HMA + F1																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.6	102.6	102.5	102.6	101.8	101.9	102.9	102.9	102.6	102.6	102.8	102.7	102.4	102.4	101.9	101.9	102.6	102.7
Avg. Diameter (mm.)	102.6		102.6		101.9		102.9		102.6		102.7		102.4		101.9		102.7	
Thickness (mm.)	64.5	64.7	64.6	64.5	65.3	65.7	63.4	63.8	63.6	63.0	63.5	63.7	64.7	64.6	64.6	64.7	64.3	64.2
Avg. Thickness (mm.)	64.6		64.6		65.5		63.6		63.3		63.6		64.6		64.7		64.3	
Ultimate Load (N)	6618		6391		6732		1165		1052		1279		938		1052		824	
ITS (MPa)	0.636		0.614		0.643		0.113		0.103		0.125		0.090		0.102		0.080	
Avg. ITS (MPa)	0.631						0.114						0.091					

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + C0.5F0.5

Specimen	HMA + C0.5F0.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	101.8	101.9	102.1	102.1	102.5	102.6	102.0	102.0	101.7	101.5	101.9	101.9	102.8	102.9	102.5	102.5	102.4	102.6
Avg. Diameter (mm.)	101.9		102.1		102.5		102.0		101.6		101.9		102.9		102.5		102.5	
Thickness (mm.)	65.1	65.4	64.9	64.2	64.9	64.5	64.0	63.9	65.5	64.8	64.9	64.3	64.8	65.0	64.8	64.3	64.5	64.2
Avg. Thickness (mm.)	65.3		64.6		64.7		64.0		65.2		64.6		64.9		64.6		64.4	
Ultimate Load (N)	6959		6618		6618		1052		938		938		1279		824		824	
ITS (MPa)	0.667		0.639		0.635		0.103		0.090		0.091		0.122		0.079		0.079	
Avg. ITS (MPa)	0.647						0.095						0.094					

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + C3

Specimen	HMA + C3																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	101.9	101.9	102.1	102.3	102.3	102.3	101.9	101.9	102.1	102.3	102.3	102.3	102.6	102.6	101.9	101.8	102.6	102.6
Avg. Diameter (mm.)	101.9		102.2		102.3		101.9		102.2		102.3		102.6		101.8		102.6	
Thickness (mm.)	65.3	64.5	64.2	64.2	64.3	64.5	65.3	64.5	64.2	64.2	64.3	64.5	64.5	65.0	65.6	65.2	65.3	65.1
Avg. Thickness (mm.)	64.9		64.2		64.4		64.9		64.2		64.4		64.7		65.4		65.2	
Ultimate Load (N)	7300		7073		6959		1279		1165		1279		1279		1392		1279	
ITS (MPa)	0.703		0.687		0.672		0.123		0.113		0.123		0.123		0.133		0.122	
Avg. ITS (MPa)	0.687						0.120						0.126					

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + F3

Specimen	HMA + F3																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.5	102.4	102.4	102.5	102.5	102.3	102.6	102.4	102.3	102.6	102.7	102.8	102.5	102.6	102.1	102.1	101.9	101.9
Avg. Diameter (mm.)	102.4		102.5		102.4		102.5		102.5		102.7		102.6		102.1		101.9	
Thickness (mm.)	64.3	64.2	63.9	64.4	64.3	65.0	64.2	64.0	64.8	64.1	64.2	64.5	64.8	64.9	65.1	65.2	65.3	64.8
Avg. Thickness (mm.)	64.3		64.2		64.7		64.1		64.4		64.3		64.8		65.2		65.1	
Ultimate Load (N)	6959		6505		6959		1279		1392		1279		1279		1392		1279	
ITS (MPa)	0.673		0.630		0.669		0.124		0.134		0.123		0.122		0.133		0.123	
Avg. ITS (MPa)	0.657						0.127						0.126					

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + C1.5F1.5

Specimen	HMA + C1.5F1.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	101.7	101.9	102.1	101.9	101.6	101.7	102.3	102.6	102.7	102.6	102.6	102.6	102.4	102.3	102.9	102.8	102.5	102.4
Avg. Diameter (mm.)	101.8		102.0		101.6		102.5		102.6		102.6		102.4		102.8		102.5	
Thickness (mm.)	66.5	66.0	68.1	68.2	67.6	67.5	65.8	65.3	65.5	65.4	65.6	65.2	65.9	66.2	65.1	65.6	65.5	65.8
Avg. Thickness (mm.)	66.3		68.2		67.8		65.6		65.5		65.4		66.1		65.4		65.6	
Ultimate Load (N)	6959		7073		7073		1392		1506		1506		1165		1165		1052	
ITS (MPa)	0.656		0.648		0.655		0.132		0.143		0.143		0.110		0.110		0.100	
Avg. ITS (MPa)	0.653						0.139						0.107					

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + C5

Specimen	HMA + C5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.5	102.5	102.4	102.7	102.7	102.5	101.8	102.0	102.9	102.6	102.1	102.1	101.6	101.5	101.4	101.5	101.6	101.8
Avg. Diameter (mm.)	102.5		102.5		102.6		101.9		102.8		102.1		101.5		101.5		101.7	
Thickness (mm.)	65.3	65.3	65.6	65.2	64.9	65.0	65.7	65.2	64.8	65.3	65.7	65.3	66.8	66.3	66.2	66.4	66.8	66.8
Avg. Thickness (mm.)	65.3		65.4		64.9		65.5		65.1		65.5		66.5		66.3		66.8	
Ultimate Load (N)	7073		7300		7186		1392		1279		1392		1620		1279		1506	
ITS (MPa)	0.672		0.693		0.687		0.133		0.122		0.133		0.153		0.121		0.141	
Avg. ITS (MPa)	0.684						0.129						0.138					

ตารางที่ ข.20 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + F5

	HMA + F5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
Specimen	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.2	102.5	102.8	102.7	103.3	102.6	102.9	102.9	102.6	102.6	102.8	102.7	102.4	102.3	102.1	102.0	102.4	102.5
Avg. Diameter (mm.)	102.3		102.8		103.0		102.9		102.6		102.7		102.3		102.1		102.5	
Thickness (mm.)	65.1	65.1	64.7	65.1	65.7	64.8	63.4	63.8	63.6	63.0	63.5	63.7	65.9	65.2	66.0	65.4	65.2	65.6
Avg. Thickness (mm.)	65.1		64.9		65.2		63.6		63.3		63.6		65.5		65.7		65.4	
Ultimate Load (N)	7300		6618		6959		1392		1392		1279		1279		1279		1392	
ITS (MPa)	0.697		0.632		0.660		0.135		0.136		0.125		0.121		0.121		0.132	
Avg. ITS (MPa)	0.663						0.132						0.125					

ตารางที่ ข.21 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ HMA + C2.5F2.5

Specimen	HMA + C2.5F2.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.8	102.8	102.4	102.4	102.3	102.3	101.9	101.5	102.2	102.2	102.0	102.1	101.8	101.8	102.5	102.4	102.6	102.8
Avg. Diameter (mm.)	102.8		102.4		102.3		101.7		102.2		102.1		101.8		102.5		102.7	
Thickness (mm.)	65.8	65.9	66.3	66.4	66.0	66.4	66.8	66.6	66.0	66.1	66.1	66.5	66.7	66.5	65.5	66.2	65.9	65.5
Avg. Thickness (mm.)	65.9		66.3		66.2		66.7		66.1		66.3		66.6		65.9		65.7	
Ultimate Load (N)	7641		6846		7073		1733		1847		1733		1279		1279		1392	
ITS (MPa)	0.719		0.642		0.665		0.163		0.174		0.163		0.120		0.121		0.131	
Avg. ITS (MPa)	0.675						0.167						0.124					



ตารางที่ ข.22 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength ของ PMA

Specimen	PMA																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.0	102.0	102.4	102.6	102.0	102.0	102.1	102.5	102.6	102.5	101.8	101.6	102.5	102.6	101.5	101.6	101.6	101.6
Avg. Diameter (mm.)	102.0		102.5		102.0		102.3		102.6		101.7		102.5		101.6		101.6	
Thickness (mm.)	65.8	65.6	65.8	65.3	65.8	65.7	65.4	65.1	64.5	64.9	65.8	65.5	63.6	63.3	64.7	64.7	65.3	65.3
Avg. Thickness (mm.)	65.7		65.5		65.8		65.3		64.7		65.6		63.4		64.7		65.3	
Ultimate Load (N)	8095		7754		7754		1620		1733		1847		1392		1279		1392	
ITS (MPa)	0.769		0.735		0.736		0.154		0.166		0.176		0.136		0.124		0.134	
Avg. ITS (MPa)	0.747						0.165						0.131					

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA

Specimen	HMA																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.2	102.5	102.4	102.1	102.7	102.8	102.3	102.2	102.7	102.7	102.8	102.6	102.7	102.8	103.1	103.0	103.1	102.8
Avg. Diameter (mm.)	102.4		102.3		102.8		102.3		102.7		102.7		102.8		103.1		103.0	
Thickness (mm.)	66.5	66.4	65.9	66.0	66.4	66.0	66.5	66.6	65.5	65.6	64.4	64.9	65.0	65.4	65.6	65.9	65.8	65.8
Avg. Thickness (mm.)	66.5		66.0		66.2		66.6		65.6		64.7		65.2		65.8		65.8	

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA (ต่อ)

Specimen	HMA																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3						
Pulse 1 (MPa)	3208	3220	3231	3269	3286	3335	276	268	178	209	241	281	165	142	164	142	164	142
Pulse 2 (MPa)	3219	3255	3219	3258	3288	3272	273	265	177	208	242	275	164	142	164	142	164	143
Pulse 3 (MPa)	3189	3200	3241	3271	3287	3249	274	264	176	207	240	278	164	142	163	142	164	142
Pulse 4 (MPa)	3258	3224	3234	3190	3266	3278	274	264	174	207	240	274	166	142	164	141	164	142
Pulse 5 (MPa)	3233	3224	3234	3190	3266	3278	274	264	175	208	239	279	164	143	164	142	164	142
Avg. Mr.(MPa)	3247						240						153					

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C1

Specimen	HMA + C1																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.4	102.4	102.0	102.0	102.4	102.4	102.9	103.1	102.6	102.6	102.6	102.5	102.7	102.6	102.6	102.5	102.7	102.7
Avg. Diameter (mm.)	102.4		102.0		102.4		103.0		102.6		102.6		102.7		102.6		102.7	
Thickness (mm.)	65.4	65.3	67.0	67.0	66.6	66.8	65.0	64.7	64.9	65.0	64.9	64.7	64.7	64.8	65.4	65.5	67.4	67.4
Avg. Thickness (mm.)	65.4		67.0		66.7		64.9		65.0		64.8		64.8		65.5		67.4	

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C1 (ต่อ)

Specimen	HMA + C1																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	3305	3457	3807	2963	3804	2917	319	352	280	228	467	420	146	145	145	174	183	183
Pulse 2 (MPa)	3362	3524	3799	2893	3779	2847	317	353	279	230	467	422	145	147	145	174	184	183
Pulse 3 (MPa)	3366	3527	3728	2905	3816	2878	318	352	278	229	465	422	146	147	144	174	183	183
Pulse 4 (MPa)	3393	3479	3892	2915	3832	2867	316	353	279	225	468	416	146	145	145	174	183	183
Pulse 5 (MPa)	3337	3457	3732	2914	3789	2862	318	352	280	226	465	418	146	146	145	173	183	183
Avg. Mr.(MPa)	3372						344						163					

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + F1

Specimen	HMA + F1																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.5	102.7	102.6	102.6	102.3	102.1	102.4	101.8	103.0	103.0	102.5	102.7	102.0	102.1	102.9	102.6	102.8	102.7
Avg. Diameter (mm.)	102.6		102.6		102.2		102.1		103.0		102.6		102.1		102.8		102.8	
Thickness (mm.)	64.3	64.2	63.5	63.8	64.9	64.8	64.3	64.3	63.6	63.9	64.0	63.8	64.2	64.1	62.9	62.6	62.7	62.8
Avg. Thickness (mm.)	64.3		63.7		64.9		64.3		63.7		63.9		64.2		62.7		62.8	

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + F1 (ต่อ)

Specimen	HMA + F1																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	4163	4081	4017	4017	3906	3821	318	320	328	348	365	366	251	251	216	217	204	206
Pulse 2 (MPa)	4179	4100	4066	4057	3893	3795	317	308	327	351	364	367	250	248	216	218	204	207
Pulse 3 (MPa)	4239	4156	4049	4061	3734	3758	317	322	329	351	365	365	250	250	216	217	205	206
Pulse 4 (MPa)	4235	4121	3988	4107	3832	3817	318	318	322	351	366	367	250	251	216	217	205	207
Pulse 5 (MPa)	4166	4033	4074	4055	3832	3816	311	309	329	352	365	365	250	249	215	215	206	207
Avg. Mr.(MPa)	4005						340						224					

ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C0.5F0.5

Specimen	HMA + C0.5F0.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.1	101.9	102.7	103.3	103.4	103.6	102.1	102.5	103.1	102.8	102.6	102.6	101.8	101.8	102.6	102.7	103.2	103.2
Avg. Diameter (mm.)	102.0		103.0		103.5		102.3		103.0		102.6		101.8		102.7		103.2	
Thickness (mm.)	65.2	65.3	64.4	64.3	63.8	63.4	64.4	64.4	65.3	65.5	64.6	64.4	66.4	66.4	64.8	64.6	64.4	64.3
Avg. Thickness (mm.)	65.3		64.4		63.6		64.4		65.4		64.5		66.4		64.7		64.4	



ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C0.5F0.5 (ต่อ)

Specimen	HMA + C0.5F0.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	3705	3664	3897	3881	3689	3685	338	280	280	259	387	337	218	195	219	194	252	274
Pulse 2 (MPa)	3710	3739	3940	3851	3689	3671	338	279	281	259	357	335	219	195	219	194	252	278
Pulse 3 (MPa)	3678	3664	3925	3791	3632	3633	337	279	282	258	359	337	219	194	219	194	252	272
Pulse 4 (MPa)	3692	3744	3995	3777	3658	3669	337	277	280	259	389	338	218	195	219	193	252	273
Pulse 5 (MPa)	3796	3640	4031	3890	3663	3752	335	280	281	254	360	338	219	194	218	193	251	274
Avg. Mr.(MPa)	3758						310						225					

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C3

Specimen	HMA + C3																		
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C						
	1		2		3		1		2		3		1		2		3		
Diameter (mm.)	102.8	102.6	102.0	101.7	102.9	102.8	102.8	102.8	102.8	102.1	102.2	102.2	102.6	102.7	102.5	102.6	102.0	102.5	103.0
Avg. Diameter (mm.)	102.7		101.9		102.9		102.8		102.2		102.4		102.6		102.3		102.8		
Thickness (mm.)	65.0	65.1	66.2	66.0	65.5	65.5	65.0	65.1	66.3	66.2	65.4	65.5	65.3	65.4	64.7	64.6	65.7	65.7	
Avg. Thickness (mm.)	65.1		66.1		65.5		65.1		66.3		65.5		65.4		64.7		65.7		

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C3 (ต่อ)

Specimen	HMA + C3																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3						
Pulse 1 (MPa)	3749	3433	3499	3380	3572	3626	385	292	418	404	402	482	215	217	192	189	172	171
Pulse 2 (MPa)	3687	3380	3579	3385	3588	3683	404	285	421	406	400	482	215	217	191	190	173	171
Pulse 3 (MPa)	3776	3450	3582	3412	3562	3682	413	291	424	404	402	486	216	216	191	191	173	170
Pulse 4 (MPa)	3744	3341	3550	3373	3546	3694	375	293	424	405	400	483	215	216	192	191	172	170
Pulse 5 (MPa)	3648	3402	3583	3398	3572	3728	401	289	420	407	400	482	215	215	191	191	172	171
Avg. Mr.(MPa)	3553						399						193					

ตารางที่ ข.28 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + F3

Specimen	HMA + F3																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.3	102.7	102.6	102.4	101.9	101.9	102.2	102.0	102.8	102.5	102.7	102.9	102.4	102.5	102.8	103.0	102.7	102.7
Avg. Diameter (mm.)	102.5		102.5		101.9		102.1		102.7		102.8		102.5		102.9		102.7	
Thickness (mm.)	67.0	67.2	67.3	67.2	67.4	67.5	64.7	64.8	64.8	64.8	64.5	64.3	64.4	64.6	65.2	65.5	65.2	65.5
Avg. Thickness (mm.)	67.1		67.3		67.5		64.8		64.8		64.4		64.5		65.4		65.4	

ตารางที่ ข.28 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + F3 (ต่อ)

Specimen	HMA + F3																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	3212	3186	3646	3518	3225	3222	298	290	281	313	356	402	138	136	211	211	176	175
Pulse 2 (MPa)	3223	3151	3609	3491	3263	3161	298	288	282	313	357	403	137	136	210	212	176	176
Pulse 3 (MPa)	3239	3172	3583	3493	3257	3203	297	291	281	317	357	398	137	136	211	211	176	176
Pulse 4 (MPa)	3232	3161	3589	3482	3320	3217	298	290	281	318	356	398	136	136	211	211	176	177
Pulse 5 (MPa)	3251	3199	3557	3433	3283	3175	297	292	283	320	358	403	137	136	211	211	176	175
Avg. Mr.(MPa)	3325						324						174					

ตารางที่ ข.29 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C1.5F1.5

Specimen	HMA + C1.5F1.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.5	102.7	102.4	102.4	102.4	102.2	102.7	102.6	102.5	102.6	102.0	102.1	102.4	102.2	102.9	102.6	102.8	103.0
Avg. Diameter (mm.)	102.6		102.4		102.3		102.7		102.6		102.1		102.3		102.8		102.9	
Thickness (mm.)	65.5	65.4	65.3	65.3	66.4	66.5	65.8	65.7	66.4	66.4	66.4	66.3	66.3	66.3	65.6	65.5	65.2	65.1
Avg. Thickness (mm.)	65.5		65.3		66.5		65.8		66.4		66.4		66.3		65.6		65.2	

ตารางที่ ข.29 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C1.5F1.5 (ต่อ)

Specimen	HMA + C1.5F1.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	4035	4056	4124	4007	4041	4021	330	344	381	391	439	319	322	323	382	377	359	364
Pulse 2 (MPa)	4041	4066	4000	4002	3922	3907	331	344	382	391	438	325	320	320	380	376	359	367
Pulse 3 (MPa)	3981	3949	4020	3956	4004	3996	329	343	381	389	437	322	322	322	381	379	361	368
Pulse 4 (MPa)	3965	3970	4049	4054	4033	3899	330	346	383	391	440	318	322	321	380	376	358	366
Pulse 5 (MPa)	3993	4027	4062	3966	4016	3989	330	343	382	392	439	322	323	320	376	377	361	367
Avg. Mr.(MPa)	4005						368						354					

ตารางที่ ข.30 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C5

Specimen	HMA + C5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	103.0	102.6	102.6	102.6	102.1	102.1	102.4	102.4	102.4	102.6	102.7	102.7	102.8	102.6	102.0	102.0	102.5	102.4
Avg. Diameter (mm.)	102.8		102.6		102.1		102.4		102.5		102.7		102.7		102.0		102.5	
Thickness (mm.)	65.9	65.9	65.7	65.6	67.0	67.0	66.9	66.9	67.3	67.4	66.7	66.8	66.0	65.9	66.9	66.9	66.2	66.1
Avg. Thickness (mm.)	65.9		65.7		67.0		66.9		67.4		66.8		66.0		66.9		66.2	



ตารางที่ ข.30 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C5 (ต่อ)

Specimen	HMA + C5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3						
Pulse 1 (MPa)	3069	2865	3886	3689	3060	2908	388	428	466	364	336	392	195	195	194	196	185	185
Pulse 2 (MPa)	3074	2935	3941	3836	3080	2861	384	430	469	368	335	391	195	195	195	196	185	184
Pulse 3 (MPa)	3122	2916	3929	3711	3048	2850	390	430	466	368	332	390	194	195	195	197	184	184
Pulse 4 (MPa)	3044	2931	3882	3732	3108	2894	399	427	468	365	336	390	196	195	195	196	185	185
Pulse 5 (MPa)	3098	2911	3982	3765	3091	2870	390	429	469	368	335	391	195	195	196	196	185	185
Avg. Mr.(MPa)	3270						396						192					

ตารางที่ ข.31 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + F5

Specimen	HMA + F5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	103.1	102.8	102.1	102.1	101.8	101.8	102.7	102.6	102.8	102.7	103.2	102.8	102.0	101.9	103.0	102.8	103.4	102.9
Avg. Diameter (mm.)	103.0		102.1		101.8		102.7		102.8		103.0		102.0		102.9		103.2	
Thickness (mm.)	66.7	66.3	67.6	67.5	66.5	66.7	66.2	66.2	66.0	65.9	65.1	65.0	65.7	65.5	65.5	65.5	65.3	65.4
Avg. Thickness (mm.)	66.5		67.6		66.6		66.2		66.0		65.1		65.6		65.5		65.4	

ตารางที่ ข.31 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + F5 (ต่อ)

Specimen	HMA + F5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	3008	3021	3545	3312	3232	3210	340	326	314	342	302	376	138	138	153	153	151	155
Pulse 2 (MPa)	2978	3093	3573	3251	3128	3186	339	326	315	343	302	377	139	138	153	154	154	154
Pulse 3 (MPa)	2944	3054	3544	3291	3153	3246	343	326	317	344	302	374	139	138	153	154	154	156
Pulse 4 (MPa)	3003	3144	3495	3342	3186	3212	342	325	319	343	301	377	139	139	153	153	154	155
Pulse 5 (MPa)	2988	3093	3498	3337	3168	3199	343	326	317	341	300	373	139	138	153	153	154	155
Avg. Mr.(MPa)	3214						334						149					

ตารางที่ ข.32 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C2.5F2.5

Specimen	HMA + C2.5F2.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.8	102.9	101.9	101.7	101.6	102.2	102.2	101.9	102.5	102.5	102.4	102.3	102.1	102.2	101.2	101.6	102.8	102.7
Avg. Diameter (mm.)	102.9		101.8		101.9		102.1		102.5		102.4		102.2		101.4		102.8	
Thickness (mm.)	66.7	66.7	67.0	67.4	67.1	67.3	66.5	66.6	66.4	66.3	67.9	68.0	67.2	67.3	67.3	67.4	65.4	65.4
Avg. Thickness (mm.)	66.7		67.2		67.2		66.6		66.4		68.0		67.3		67.4		65.4	

ตารางที่ ข.32 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) HMA + C2.5F2.5 (ต่อ)

Specimen	HMA + C2.5F2.5																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	3884	3944	3829	4194	3944	3950	327	332	262	327	308	296	270	269	256	257	297	299
Pulse 2 (MPa)	3896	3949	3947	4234	3949	3984	328	336	263	327	306	295	270	269	256	257	296	297
Pulse 3 (MPa)	3936	3959	3840	4186	3959	3951	326	336	265	326	308	296	272	268	257	256	297	298
Pulse 4 (MPa)	3832	3921	3930	4225	3921	4007	328	335	264	327	309	295	270	269	258	256	297	298
Pulse 5 (MPa)	3846	3831	3934	4228	3831	3959	328	337	263	327	309	295	270	271	256	257	296	297
Avg. Mr.(MPa)	3967						309						275					

ตารางที่ ข.33 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) PMA

	PMA																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
Specimen	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Diameter (mm.)	102.6	102.6	102.8	103.2	102.4	102.4	102.5	102.5	102.6	102.6	102.1	102.5	102.3	102.3	101.8	102.0	102.1	102.2
Avg. Diameter (mm.)	102.6		103.0		102.4		102.5		102.6		102.3		102.3		101.9		102.2	
Thickness (mm.)	64.6	64.8	64.6	64.7	65.5	65.0	64.9	64.8	64.8	64.7	64.9	64.9	65.1	65.1	65.8	65.9	65.4	65.5
Avg. Thickness (mm.)	64.7		64.7		65.3		64.9		64.8		64.9		65.1		65.9		65.5	

ตารางที่ ข.33 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) PMA (ต่อ)

Specimen	PMA																	
	Unsoaked 25 °C						Unsoaked 55 °C						soaked 55 °C					
	1		2		3		1		2		3		1		2		3	
Pulse 1 (MPa)	3703	3786	3845	3822	4018	3737	452	435	416	444	415	464	372	373	436	439	320	321
Pulse 2 (MPa)	3829	3803	3809	3955	4039	3746	455	436	417	444	416	462	369	371	439	436	319	322
Pulse 3 (MPa)	3762	3796	3705	3943	3953	3762	457	438	416	447	416	461	370	367	439	436	323	323
Pulse 4 (MPa)	3767	3758	3763	3933	3987	3807	459	436	413	447	416	460	371	368	439	439	320	325
Pulse 5 (MPa)	3796	3814	3794	3935	3880	3808	458	438	417	447	416	458	372	372	440	436	322	322
Avg. Mr.(MPa)	3839						439						377					

ตารางที่ ข.34 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) HMA

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	HMA								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.2	102.2	102.2	102.2	102.2	102.2	102.2	102.2	102.2
Avg. Thickness (mm.)	64.5	63.8	65.2	65.1	65.1	65.3	66.1	66.5	66.1
Accumulated Microstrain	16458	12142	14300	17934	14503	16219	27244	23813	20382
Avg. Accumulated Microstrain	14300			16219			23813		



ตารางที่ ข.35 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) C1

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	C1								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.4	102.2	102.0	102.7	102.2	102.1	102.6	102.3	102.7
Avg. Thickness (mm.)	66.8	67.3	66.4	65.0	66.2	65.5	65.4	64.6	65.6
Accumulated Microstrain	9357	14888	11164	11121	12762	14402	12178	11787	12856
Avg. Accumulated Microstrain	111803			12762			12274		

ตารางที่ ข.36 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) C3

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	C3								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.7	102.6	102.7	102.7	102.3	102.3	102.8	102.9	102.1
Avg. Thickness (mm.)	65.0	65.3	67.3	65.4	66.1	66.7	66.2	64.8	66.4
Accumulated Microstrain	14339	9486	11046	11058	9825	12830	8314	11668	9991
Avg. Accumulated Microstrain	11624			11238			9991		

ตารางที่ ข.37 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) C5

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	C5								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.8	102.6	102.1	102.4	102.5	102.7	102.7	102.0	102.4
Avg. Thickness (mm.)	65.8	65.7	67.0	66.9	67.1	66.8	66.0	67.1	66.4
Accumulated Microstrain	5761	8249	5592	13641	10396	11852	10222	13791	10187
Avg. Accumulated Microstrain	6534			11963			11400		

ตารางที่ ข.38 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) F1

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	F1								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.1	102.8	102.8	102.7	102.7	102.0	103.1	102.3	102.9
Avg. Thickness (mm.)	64.2	62.8	62.7	63.3	62.9	63.8	64.3	64.0	64.8
Accumulated Microstrain	11817	9143	12483	13773	12726	14686	9107	9750	10406
Avg. Accumulated Microstrain	11148			13728			9754		

ตารางที่ ข.39 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) F3

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	F3								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.3	102.7	102.3	102.4	102.3	102.6	102.8	102.8	101.9
Avg. Thickness (mm.)	66.0	65.8	66.0	65.3	65.7	64.8	64.7	64.7	65.3
Accumulated Microstrain	5754	5010	5775	14100	16127	14679	9617	11116	7494
Avg. Accumulated Microstrain	5513			14969			9409		

ตารางที่ ข.40 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) F5

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	F5								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	101.5	102.2	101.9	101.8	101.9	103.0	102.6	102.4	102.3
Avg. Thickness (mm.)	66.5	66.2	66.9	66.9	67.8	65.7	66.0	65.6	66.1
Accumulated Microstrain	10760	15330	13239	12227	13652	11653	12624	13984	11263
Avg. Accumulated Microstrain	13110			12511			12624		

ตารางที่ ข.41 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) C0.5F0.5

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	C0.5F0.5								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	101.8	102.7	103.2	102.8	103.0	102.0	101.9	101.8	102.0
Avg. Thickness (mm.)	66.4	64.9	64.5	64.7	63.9	65.3	65.8	65.0	65.3
Accumulated Microstrain	20938	11303	9134	13530	12726	17275	14254	14946	12611
Avg. Accumulated Microstrain	13792			14510			13937		

ตารางที่ ข.42 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) C1.5F1.5

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	C1.5F1.5								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.3	102.6	102.6	102.8	102.7	101.8	101.8	101.8	102.1
Avg. Thickness (mm.)	65.4	66.5	65.3	65.5	65.6	66.3	67.1	67.2	66.5
Accumulated Microstrain	4086	5380	4539	12530	11998	15935	9180	10400	8213
Avg. Accumulated Microstrain	4668			13488			9264		



ตารางที่ ข.43 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) C2.5F2.5

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	C2.5F2.5								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	102.7	102.2	101.7	101.8	101.8	102.4	101.7	102.4	102.7
Avg. Thickness (mm.)	66.4	65.3	66.5	66.6	66.2	66.3	66.8	64.7	65.7
Accumulated Microstrain	9140	6081	9180	12185	10030	10970	7944	10700	9649
Avg. Accumulated Microstrain	8134			11062			9431		

ตารางที่ ข.44 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) PMA

Test Stress = 100 kPa Test Period = 1800 pulses

Conditioning Stress = 10 kPa Conditioning Period = 600 sec.

	PMA								
	Unsoaked 25 °C			Unsoaked 55 °C			soaked 55 °C		
Specimen	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Avg. Diameter (mm.)	101.7	102.7	102.8	102.8	102.6	102.8	101.9	102.1	102.0
Avg. Thickness (mm.)	64.9	65.0	65.0	64.2	64.5	64.5	65.8	65.2	66.0
Accumulated Microstrain	6501	4727	7418	7710	8270	7985	8307	7917	8696
Avg. Accumulated Microstrain	6215			7988			8307		

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิทยุต์ม์ พลกายนุวัตร เกิดเมื่อวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้า ศึกษาต่อปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**