



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง คุณสมบัติต้านทานความล้าและการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์  
ที่ผสมกับหินบะซอลต์โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

Fatigue and Permanent Deformation Resistance Properties of  
Lab-Made Asphalt Concrete Mixtures Using Basalt Aggregates

นามผู้วิจัย นายวิฑูร ไร่ห้วย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล, วศ.ม. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์ธันวิน สวัสดิ์สถานต์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติต้านทานความล้าและการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินบะซอลต์  
โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

Fatigue and Permanent Deformation Resistance Properties of Lab-Made Asphalt Concrete  
Mixtures Using Basalt Aggregates

โดย

นายวิฑูรย์ ไร่ห้วย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

วิทยุ ไรห้วย 2552: คุณสมบัติด้านทานความล้าและการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเอสฟิลต์ที่ผสมกับหินบะซอลต์โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล, วศ.ม. 152 หน้า

ความมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านทานความล้าและการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเอสฟิลต์ที่ผสมกับหินบะซอลต์โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ และทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเอสฟิลต์คอนกรีตโดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน ได้แก่ ยางเอสฟิลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ โพลีเมอร์โมดิฟายด์เอสฟิลต์ (PMA) เพื่อเปรียบเทียบกับเอสฟิลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ 5 อุณหภูมิ พบว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 40/50 จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5-20 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 35-60 องศาเซลเซียส เอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด PMA จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่า ในขณะที่เอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 60/70 จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมต่ำสุด สำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่ 5 อุณหภูมิพบว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 40/50 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5-35 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด PMA จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่า ในขณะที่เอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 60/70 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำสุด สำหรับผลการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางชนิด 60/70 มีความต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำกว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 40/50 และ PMA และผลจากการทดสอบ Dynamic Creep Test ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 60/70 จะเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรเร็วกว่า เอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด PMA และ 40/50 ในทุกอุณหภูมิ

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของก้อนตัวอย่างในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 40/50 และ PMA มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเอสฟิลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสฟิลต์ชนิด 60/70 และเนื่องจากราคาของยางเอสฟิลต์ชนิด 60/70 กับ ยางเอสฟิลต์ชนิด 40/50 ที่ใกล้เคียงกัน ผลจากงานวิจัยนี้จึงบ่งชี้ว่าควรมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ผลิตเอสฟิลต์คอนกรีตในประเทศไทยจากยางเอสฟิลต์ชนิด 60/70 เป็นยางเอสฟิลต์ชนิด 40/50 โดยเฉพาะอย่างยิ่งถนนที่มีปริมาณจราจรปานกลางถึงสูงมาก

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Wittawat Raihuai 2009: Fatigue and Permanent Deformation Resistance Properties of Lab-Made Asphalt Concrete Mixtures Using Basalt Aggregates. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Watcharin Witayakul, M.Eng. 152 pages.

The objectives of this research is to study the fatigue and permanent deformation resistance properties of lab-made asphalt concrete mixtures using basalt aggregates. Also it aims to test the engineering properties of the asphalt concrete with asphalt binders penetration grade 40/50 and 60/70 (AC 40/50 and AC 60/70) and polymer modified asphalt (PMA) to compare with the present asphalt cement grade 60/70.

Results of indirect tensile strength test at 5 temperatures indicated that asphalt concrete materials with AC 40/50 have indirect tensile strength higher than those with PMA at 5-20 degree Celsius. Where as at 35-60 degree Celsius, asphalt concrete materials with PMA have higher indirect tensile strength than those with AC 40/50. Note that, at any temperature, the asphalt concrete materials with AC 60/70 have the lowest indirect tensile strength. Results of resilient modulus test at 5 temperatures that asphalt concrete materials with AC 40/50 have resilient modulus higher than those with PMA at 5-35 degree Celsius. Where as at 50-60 degree Celsius, asphalt concrete materials with PMA have higher resilient modulus than those with AC 40/50. Note that, at any temperature, the asphalt concrete materials with AC 60/70 have the lowest resilient modulus. Results of indirect tensile fatigue test at 35 degree Celsius indicated that asphalt concrete materials with AC 60/70 have fatigue life lower than those with AC40/50 and PMA respectively. Finally, the results of dynamic creep tests at 40 and 60 degree Celsius indicated that at both temperatures permanent deformation failures initiated in asphalt concrete materials with AC 60/70 curlier than those with PMA and AC40/50 respectively.

Based on the laboratory test results of asphalt concrete materials in the research, it can be concluded that asphalt concrete materials with AC 40/50 and PMA have superior properties than asphalt concrete materials with AC 60/70. Since the costs of AC 40/50 and AC 60/70 are indifferent, it is suggested in this study that the binder type of asphalt concrete materials in Thailand should be changed from AC 60/70 to AC 40/50 especially for roads with medium to high traffic.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ชั้นวิน สวัสดิทานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนทำการตรวจสอบและแก้ไขจนเสร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ชั้นวิน สวัสดิทานต์ที่ให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์ในการให้ใช้ วัสดุ สถานที่ อุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนางานทางและเจ้าหน้าที่ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ที่ให้การช่วยเหลือในงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา น้องสาว ญาติพี่น้อง ที่อุปการะเลี้ยงดูและเป็นกำลังใจให้จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแก่ บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

วิฑวัธ ไร่ห้วย  
พฤศจิกายน 2552

## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	7
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	65
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
สรุป	89
ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	94
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติของหินบะซอลต์และแอสฟัลต์คอนกรีต	98
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	152

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	4
2	ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	5
3	ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA)	6
4	แรงพยายามบดอัดของการหมุนที่ออกแบบตามระบบซูเปอร์เพฟ	11
5	ระดับในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธีซูเปอร์เพฟ	12
6	ค่าคุณสมบัติของวัสดุหินในประเทศไทย	14
7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความถี่จากการทดสอบ	26
8	แสดงค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ	28
9	สรุปผลการทดสอบ	29
10	ค่าความต้านทานต่อการยุบตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต	31
11	แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Power model ตามปริมาณยางที่ทดสอบ	35
12	แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Power model ตามปริมาณช่องว่างอากาศ	35
13	หลักเกณฑ์สำหรับ VMA ที่ยอมรับได้	49
14	หลักเกณฑ์สำหรับ VFA ที่ยอมรับได้	49
15	การจัดขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ทดสอบ	65
16	ผลการทดสอบวัสดุหินชะลอที่ที่ใช้ออกแบบก่อนตัวอย่าง	66
17	ผลการบดอัดก่อนตัวอย่าง โดยใช้ยางแอสฟัลต์ร้อยละ 6.34	68
18	ผลการบดอัดก่อนตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ -0.5%	69
19	ผลการบดอัดก่อนตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้	69
20	ผลการบดอัดก่อนตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ +0.5%	70

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ผลการบดอัดก้อนตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ +1%	70
22	คุณสมบัติส่วนผสมออกแบบ	72
23	ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)	73
24	ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)	74
25	ผลการทดสอบการหาสัดส่วนกำลังรับแรงดึง	74
26	กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	75
27	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	76
28	จำนวนรอบกระทำซ้ำที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์โดยระบุค่าความเครียด และความเค้น	78
29	ผลการทดสอบการแตกร้าวจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70 เกรด 40/50 และ PMA	81
30	ผลการทดสอบค่า Dynamic Creep Test ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส	84
31	แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Power model ที่ทดสอบ	88
32	สมการเลขยกกำลังผลงานวิจัยที่ผ่านมา	88
33	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ PMA	92

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ผลการจัดขนาดคละของหินบะชอลท์ โครงการก่อสร้างสายทางหลวง หมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย – อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา	99
ก2	ผลการทดสอบ Flakiness index ของหินบะชอลท์ (Bin 2)	100
ก3	ผลการทดสอบ Elongation index ของหินบะชอลท์ (Bin 2)	100
ก4	ผลการทดสอบ Flakiness index ของหินบะชอลท์ (Bin 3)	101
ก5	ผลการทดสอบ Elongation index ของหินบะชอลท์ (Bin 3)	101
ก6	ผลการทดสอบ Flakiness index ของหินบะชอลท์ (Bin 4)	102
ก7	ผลการทดสอบ Elongation index ของหินบะชอลท์ (Bin 4)	102
ก8	ผลการทดสอบ Specific gravity and absorption of coarse aggregate ของ หินบะชอลท์ (Bin2, Bin 3 และ Bin 4)	103
ก9	ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินบะชอลท์ (Retained #200)	104
ก10	ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินบะชอลท์ (Passing #200)	105
ก11	ผลการทดสอบ Sand equivalent test ของหินบะชอลท์	106
ก12	ผลการทดสอบ Abrasion test of coarse aggregate by Los Angeles Machine	106
ก13	ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Coarse Aggregate) ของ หินบะชอลท์	107
ก14	ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Fine Aggregate) ของ หินบะชอลท์	108
ก15	ผลการทดสอบ Uncompacted void content of Fine aggregate ของ หินบะชอลท์	109
ก16	ผลการทดสอบ Determining Fractured Particles in Coarse aggregate ของ หินบะชอลท์ (Bin 2)	110
ก17	ผลการทดสอบ Determining Fractured Particles in Coarse aggregate ของ หินบะชอลท์ (Bin 3)	110

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก18	ผลการทดสอบ Determining Fractured Particles in Coarse aggregate ของ หินบะซอลท์ (Bin 4)	111
ก19	ผลการทดสอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบกับความแบนและความยาวของอนุภาค ของหินบะซอลท์	111
ก20	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50(6.34 %)	112
ก21	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50(5.03%)	112
ก22	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50(5.53 %)	113
ก23	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50(6.03 %)	113
ก24	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50(6.53 %)	114
ก25	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70(6.34 %)	114
ก26	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70(5.25 %)	115
ก27	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70(5.75 %)	115
ก28	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70(6.25 %)	116
ก29	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70(6.75 %)	116
ก30	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70(5.50 %)	117
ก31	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิดPMA(6.34 %)	117
ก32	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิดPMA(5.03 %)	118
ก33	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA(5.53 %)	118
ก34	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA(6.03 %)	119
ก35	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA(6.53 %)	119
ก36	ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	120
ก37	ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	121
ก38	ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA	122

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก39	ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	123
ก40	ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	124
ก41	ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA	125
ก42	ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	126
ก43	ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	128
ก44	ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA	130
ก45	ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	132
ก46	ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	133
ก47	ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	134
ก48	ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	135
ก49	ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	136
ก50	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	137
ก51	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	138
ก52	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	139

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก53	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	140
ก54	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	141
ก55	ผลการทดสอบ Fatigue test ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	142
ก56	ผลการทดสอบ Fatigue test ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	144
ก57	ผลการทดสอบ Fatigue test ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA	146
ก58	ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	148
ก59	ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	149
ก60	ผลการทดสอบวัสดุผสมรวมของหินบะซอลต์ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกรมทางหลวง	150
ก61	ผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสานยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	151

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor	8
2	กลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับเครื่อง SCG	9
3	แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด	10
4	การจัดขนาดกละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับขนาดใหญ่สุด 19 mm	15
5	ขีดจำกัดการจัดขนาดกละระบบซูเปอร์เพฟ	16
6	แผนผังส่วนประกอบของก้อนตัวอย่างที่บดอัดแล้วของ HMA	18
7	การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง	20
8	รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Stress-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM D 4123	22
9	รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Strain-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM DD 213:1993	23
10	รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Strain-Control Test ในงานวิจัยนี้	24
11	ผลการทดสอบความล้าของส่วนผสม Conventional Mixture and HMAM	27
12	ผลการทดสอบความล้าโดยวิธี Indirect tensile fatigue test (ITFT)	28
13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกระทำซ้ำกับค่าหน่วยแรง	28
14	รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1	30
15	กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa	33
16	กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างตามปริมาณของ SBS ที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa	33
17	กราฟแสดงผลการทดสอบของส่วนผสมที่ Modified และ Unmodified	34
18	กราฟแสดงค่าความเครียดสะสมหลังจากให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 150000 รอบ	35
19	รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ในงานวิจัยนี้	36
20	เครื่อง Gyrotory Compactor	44

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	แสดงขั้นตอนการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ยางที่จะใช้ในการผสมก้อนตัวอย่าง	53
22	แสดงขั้นตอนการหาปริมาณแอสฟัลต์ออกแบบ	54
23	การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ Indirect Tensile Strength Test	57
24	การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ Indirect Resilient Modulus Test	58
25	การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากโปรแกรม UTM 16 V2.05 Indirect Tensile Resilient Modulus Test	59
26	แสดงวิธีการวัดก้อนตัวอย่าง	60
27	แสดงโปรแกรมการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากการล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม	61
28	การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม	61
29	แสดงวิธีการใส่ถุงยางเพื่อจะให้เกิดแรงดันด้านข้าง (Confining Stress)	62
30	การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ Dynamic Creep Test	63
31	การทดสอบ Dynamic Creep Test ที่ได้จากโปรแกรม UTS005 1.30 Simple Performance Flow Test	64
32	กราฟแสดงการจัดขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ทดสอบ	66
33	กราฟแสดงช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เทียบกับปริมาณแอสฟัลต์	71
34	กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	75
35	กราฟแสดงค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ ต่างๆ	76
36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกการริ้มของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) กับค่าลอกการริ้มของค่าความเค้น (Log of stress) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ PMA	79

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกการริซึมของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) กับค่าลอกการริซึมของค่าความเครียดเริ่มต้น (Log of initial strain) ของวัสดุเอสพีลด์คอนกรีตที่ใช้ยางเอสพีลด์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ PMA	80
38	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Accumulates Strain ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	82
39	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Accumulates Strain ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	83
40	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Strain Rate ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	83
41	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Strain Rate ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	84
42	ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมความเครียดถาวรกับจำนวนครั้งของการให้แรง	85
43	ความหมายของค่าคงที่ $a$ และ $b$	86
44	แสดงตัวอย่างการหาการคืบช่วงที่สอง	86
45	แสดงตัวอย่างการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	87
46	แสดงตัวอย่างการหาค่าคงที่ $a$ และ $b$ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	87

# คุณสมบัติต้านทานความล้าและการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับ หินบะซอลต์โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

## Fatigue and Permanent Deformation Resistance Properties of Lab-Made Asphalt Concrete Mixtures Using Basalt Aggregates

### คำนำ

การก่อสร้างถนนในประเทศไทยที่มีลักษณะผิวทางประเภทยืดหยุ่น (Flexible Pavement) นั้น จะใช้แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) ซึ่งเป็นวัสดุผสมร้อน (Hot Mix) ที่นิยมนำมาใช้ปูลาดชั้นผิวทาง โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 และวัสดุผสมรวม (Aggregate) ที่ผ่านการให้ความร้อนมาผสมกัน และนำไปปูทับบนชั้นพื้นทาง (Base Course) แล้วทำการบดอัดแน่นด้วยเครื่องจักร ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานกรมทางหลวง และสืบเนื่องจากการพัฒนาอย่างรวดเร็วของการคมนาคมขนส่ง ทำให้ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในปัจจุบันต้องเผชิญกับสภาพการใช้งานที่หนักมากขึ้น ทั้งในด้านของสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิจากอากาศ และการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของปริมาณการจราจร รวมไปถึงน้ำหนักบรรทุกที่สูงมากขึ้นเกินกว่าข้อกำหนด ส่งผลให้เกิดปัญหาความเสียหายอย่างรวดเร็ว ซึ่งประเภทความเสียหายบนถนนแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถแบ่งออกได้หลักๆ คือ การเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent Deformation) การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Thermal Cracking) การแตกร้าวเนื่องจากการอ่อนล้าจากการรับน้ำหนักบรรทุก (Fatigue Cracking) ผลที่ตามมาทำให้การขบขี้ล้ามากขึ้น การบำรุงรักษาผิวทางเพื่อฟื้นฟูสมรรถนะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงขึ้น ผู้ขับขี่หลีกเลี่ยงการใช้เส้นทางสายนั้นมากขึ้น

หินบะซอลต์ เป็นหินภูเขาไฟ มีเนื้อแน่นละเอียด ส่วนมากมีรูพรุนเนื่องจากก๊าซที่ปนอยู่ในลาวาที่เย็นตัวแข็งบนผิวโลก จากการทดลองค่ากลสมบัติของหินสี่ประเภท คือ หินปูน หินแกรนิต หินบะซอลต์ และหินทราย หินบะซอลต์มีความแข็งแรงมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่า Aggregate Impact Value (AIV) , Aggregate Crushing Value(ACV) , Los Angeles Abrasion Test (LAA) , Polished Stone Value (PSV) หินบะซอลต์ เป็นหินที่มีมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนใต้ ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ดังกล่าว จึงมีการนำหินบะซอลต์มาใช้ก่อสร้างทางเป็นส่วนใหญ่

ซูเปอร์เพฟ (SUPERPAVE) ย่อมาจากคำว่า SUperior PERforming Asphalt PAVements ลักษณะเด่นของระบบซูเปอร์เพฟ คือเป็นระบบที่ทำการทดสอบและวิเคราะห์ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นตามสภาพจริงในสนาม และเทคโนโลยีสมัยใหม่ของอุปกรณ์เครื่องมือช่วยทำให้ได้วัสดุผสมมีคุณภาพและประหยัดค่าก่อสร้างมากขึ้น ความเสียหายหลักๆ ที่นำมาวิเคราะห์ในระบบซูเปอร์เพฟ ได้แก่ การเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) การแตกร้าว เนื่องจากความล้า (Fatigue Resistance) การที่จะลดความเสียหายเหล่านี้ลงได้นั้น ก็ต้องมีการวางแผนในการออกแบบโครงสร้างของถนน เพื่อที่จะรองรับปริมาณการจราจรที่เพียงพอต่อการใช้ถนนนั้นจริงๆ

ได้มีการศึกษาคุณสมบัติด้านการต้านทานความล้าและการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บในสนาม และผลที่ได้นั้นยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการออกแบบเชิงวิเคราะห์ (Analytical Design) จึงต้องมีการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นในห้องปฏิบัติการ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาคุณลักษณะความต้านทานการล้า (Fatigue Resistance) ความต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation Resistance) และทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆ ได้แก่ ค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) , ดัชนีความแข็งแรง (Strength Index), ความไวต่อความชื้น, คุณสมบัติต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength), ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินบะซอลต์ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีการทดสอบด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ และใช้วัสดุเชื่อมประสาน 3 ชนิด ได้แก่ ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 , 60/70 และ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA)

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของหินบะซอลท์ที่ใช้ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยหินบะซอลท์ที่ใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย ถึง อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา
2. เพื่อเป็นการศึกษาคูณลักษณะค่าความต้านทานต่อการล้างของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับ หินบะซอลท์โดยการเตรียมก้อนตัวอย่างด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ
3. เพื่อเป็นการศึกษาคูณลักษณะค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ แอสฟัลต์ที่ผสมกับหินบะซอลท์โดยการเตรียมก้อนตัวอย่างด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ

## ขอบเขตของการศึกษา

1. มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาจะใช้หินบะซอลท์เป็นวัสดุที่ใช้ในโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย – อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา โดยการตรวจสอบคุณสมบัติที่เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงและขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามการจัดขนาดคละของโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 ดังกล่าว
2. ชนิดของวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษาคือ ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 , 40/50 และ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์หรือ PMA แบบ Styrene Butadiene Styrene (SBS) โดยเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง
3. ทำการทดลองคูณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมเบื้องต้นของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินบะซอลท์ที่ใช้ในโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย – อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา โดยใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 และ PMA และเปรียบเทียบผลการทดสอบของยางทั้ง 3 ชนิด โดยที่ผลการทดสอบของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 ได้ผลทดสอบจากกรมทางหลวง

4. ทำการทดลองเพื่อหาคุณลักษณะค่าความต้านทานต่อการฉีกของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินบะซอลต์โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 และ PMA และเปรียบเทียบผลการทดสอบของยางทั้ง 3 ชนิด โดยที่ผลการทดสอบของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 ได้ผลทดสอบจากกรมทางหลวง

5. ทำการทดลองเพื่อหาคุณลักษณะค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินบะซอลต์โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 และ PMA และเปรียบเทียบผลการทดสอบของยางทั้ง 3 ชนิด โดยที่ผลการทดสอบของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 ได้ผลทดสอบจากกรมทางหลวง

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

รายการ ที่	คุณสมบัติ	หน่วย	ข้อกำหนด	วิธีการทดสอบ
			AC 40/50	
1	เพนิเตอร์ชันที่อุณหภูมิ 25 °ซ	0.1 มม.	40 – 50	ASTM D5
2	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 25 °ซ	ซม.	Min 100	ASTM D113
3	จุดวาบไฟ	°ซ	Min 250	ASTM D92
4	การละลายในไตรโคโรเอธิลีน การทดสอบที่เหลือจากการอบ	%	Min 99	ASTM D2042
5	น้ำหนักที่หายไป	%	Max 0.8	ASTM D1754
6	ค่าเพนิเตอร์ชันที่เหลือ	%	Min 60	ASTM D5
7	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 25 °ซ	ซม.	-	ASTM D2042

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

รายการ ที่	คุณสมบัติ	หน่วย	ข้อกำหนด	วิธีการทดสอบ
			AC 60/70	
1	เพนิเตอร์ชันที่อุณหภูมิ 25 °ซ	0.1 มม.	60 – 70	ทล.-ท.403/2518
2	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 25 °ซ	ชม.	Min 100	ทล.-ท.405/2519
3	จุดวาบไฟ	°ซ	Min 232	ทล.-ท.406/2519
4	การละลายไนโตรโคโรเอธิลีน การทดสอบที่เหลือจากการอบ	%	Min 99	ทล.-ท.409/2520
5	น้ำหนักที่หายไป	%	Max 0.8	AASHTO T 179
6	ค่าเพนิเตอร์ชันที่เหลือ	%	Min 54	AASHTO T 179
7	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 25 °ซ	ชม.	Min 0.8	AASHTO T 179

ที่มา: มาตรฐานกรมทางหลวง (2531)

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิดโพลีเมอร์  
โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA)

รายการที่	คุณสมบัติ	หน่วย	ข้อกำหนด	
			PMA	วิธีการทดสอบ
1	เพนิเตอร์ชันที่อุณหภูมิ 25 °ซ	0.1 มม.	60 – 70	DH-T 403
2	ดัชนีเพนิเตอร์ชัน	-	Min 3	NLT-181 <sup>a</sup> *
3	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 13 °ซ	ซม.	Min 55	DH-T 405
4	จุดวาบไฟ	°ซ	Min 220	ASTM D92
5	การละลายในไตรโคโรเอธิลีน	%	Max 99	DH-T 409
6	ความหนืดที่อุณหภูมิ 135 °ซ	cP	1100	ASTM D4402
7	ความหนาแน่น	kg/l	1.00 - 1.05	ASTM D70
8	การทดสอบที่เหลือจากการอบ น้ำหนักที่หายไป	%	Max 0.5	ASTM D1754
9	ค่าเพนิเตอร์ชันที่เหลือ	%	Min 70	DH-T 403
10	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 13 °ซ	ซม.	Min 40	DH-T 405

หมายเหตุ \* = The National Laboratory of Transportation Madrid, Spain

ที่มา: มาตรฐานกรมทางหลวง (2536)

## การตรวจเอกสาร

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติด้านทานความล้าและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรและทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆของหินบะซอลต์ผสมยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (Styrene-Butadiene-Styrene) โดยวิธีซูเปอร์เพฟ ซึ่งในส่วนนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีการออกแบบก้อนตัวอย่างและการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ ดังนี้

#### 1. การออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟ (Superpave)

ปี ค.ศ. 1987 โครงการ SHRP (The Strategic Highway Research Program) ได้เริ่มพัฒนาข้อกำหนดของวัสดุแอสฟัลต์ขึ้นมาใหม่ เรียกว่า ซูเปอร์เพฟ (SUPERPAVE ย่อมาจาก Superior Performing Asphalt Pavements) ซึ่งเป็นลักษณะของการรวบรวมข้อกำหนดการเลือกวัสดุ วิธีการทดสอบวัสดุ วิธีการออกแบบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้างถนนที่มีผิวชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมุ่งเน้นคุณภาพในการใช้งานในสนามเป็นหลัก

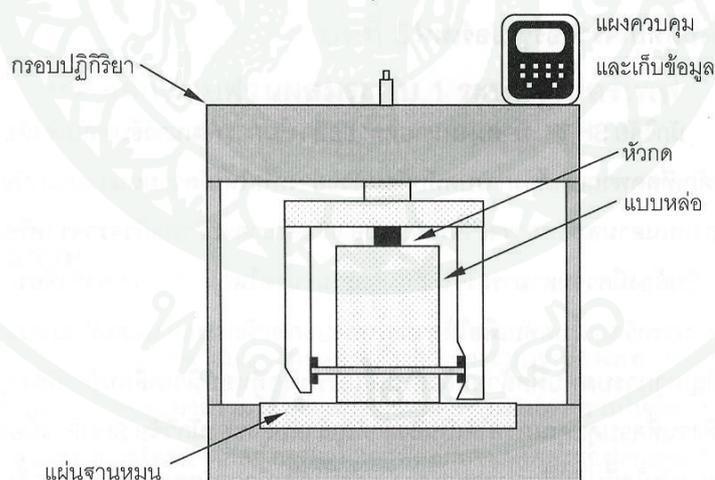
สิ่งที่สำคัญ 2 ประการ ในระบบซูเปอร์เพฟ คือ การบดอัดเชิงห้องปฏิบัติการและการทดสอบสมรรถภาพ การบดอัดเชิงห้องปฏิบัติการสามารถบรรลุความสำเร็จได้ด้วยการใช้เครื่องบดอัดโรตอรีซูเปอร์เพฟ ที่เรียกกันย่อๆว่า SGC (Superpave Gyrotory Compactor)

วิธีการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในวิธีซูเปอร์เพฟนั้นจะใช้เครื่อง SGC ซึ่งใช้ในการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยสามารถใช้บดอัดวัสดุผสมเพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างได้ 2 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและ 150 มิลลิเมตร จำนวนรอบของการบดอัดขึ้นอยู่กับระดับปริมาณการจราจรและอุณหภูมิอากาศสูงสุดเฉลี่ย วัสดุผสมที่ใช้รองรับปริมาณการจราจรและอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นสูง ดังนั้นการบดอัดในห้องปฏิบัติการควรจะสามารถบดอัดก้อนตัวอย่างให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นได้ตามต้องการ ซึ่งการเพิ่มความหนาแน่นนี้ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการบดอัด

พื้นฐานของเครื่อง SGC มาจากเครื่องบดอัดแบบหมุนเทกซ์ส (Texas Gyrotory Compactor) ซึ่งถูกดัดแปลงเพื่อใช้กับทฤษฎีบดอัดแบบหมุนฝรั่งเศส (French Gyrotory Compactor) เครื่องบดอัดแบบหมุนเทกซ์สที่ถูกดัดแปลงนี้บดอัดก้อนตัวอย่างได้เสมือนจริงตรงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ได้สำเร็จจากเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างมีขนาด 6 นิ้ว จึงเหมาะสมที่จะใช้บรรจุส่วนผสมที่มีขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดได้ถึง 50 มม. ผู้วิจัยของ SHRP จึงได้ดัดแปลงเครื่องบดอัดแบบหมุนเทกซ์สโดยทำมุมการหมุนให้ต่ำลง ลดความเร็วของการหมุนให้ช้าลงและเพิ่มความสามารถในการบันทึกความสูงของก้อนตัวอย่างให้ตรงกับเวลาที่เกิดขึ้นจริง

ส่วนต่างๆของเครื่อง SGC (Superpave Gyrotory Compactor) ประกอบด้วย

- โครงคานยึด (Reaction Frame), ฐานหมุนได้ (Rotating Base) และมอเตอร์ (Motor)
- ระบบแรงกระทำ (Loading System), แรงกระทำที่เครื่องกระทำ (Loading Ram) และเครื่องวัดแรงดัน (Pressure Gauge)
- เครื่องวัดค่าความสูง (Height Measuring) และระบบบันทึกข้อมูล (Recordation System)
- แบบเหล็ก (Mold) และแผ่นเหล็กรองฐาน (Base Plate)

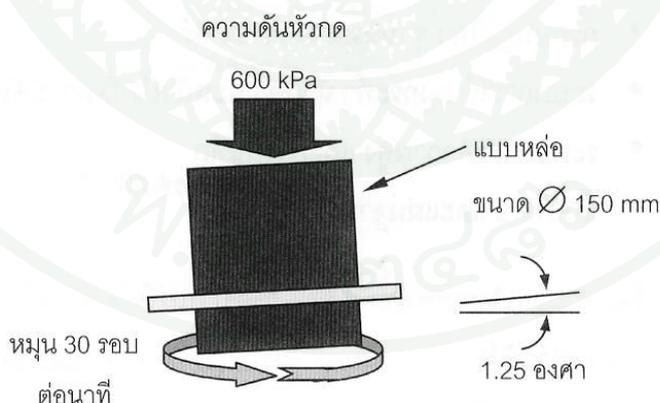


ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

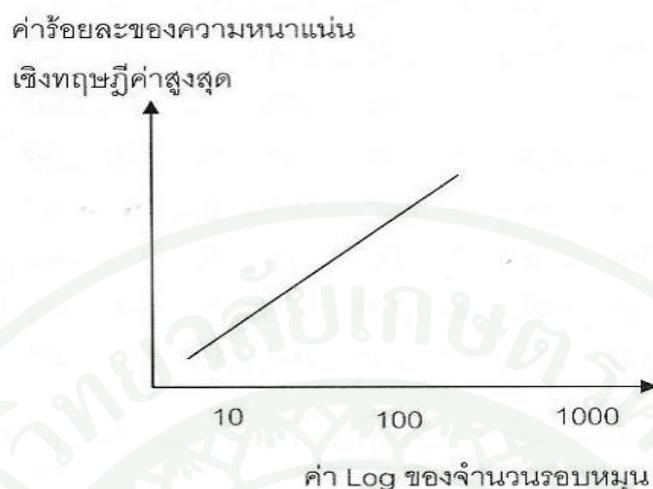
กระบวนการบดอัดจะเริ่มขึ้น โดยนำวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะทำการบดอัดบรรจุลงในแบบหล่อ จากนั้นนำแบบหล่อดังกล่าวเข้าติดตั้งกับส่วนฐานรับก้อนตัวอย่างซึ่งส่วนฐานจะหมุนในอัตรา 30 รอบต่อนาที และจะรองรับแบบหล่อไว้ขณะทำการบดอัด นอกจากนี้ที่ฐานจะมีขอบเพื่อล็อกกับ Bearing ที่ทำหน้าที่บังคับวัสดุผสมในแบบหล่อ ทำมุม 1.25 องศากับหัวกด ที่ควบคุมความดันกดบนวัสดุในแบบหล่อด้วยความดันคงที่ 600 กิโลปาสกาล (kPa) เพื่อทำการบดอัดวัสดุในแต่ละรอบตามภาพที่ 2 ซึ่งเป็นการลอกเลียนแบบจากสภาพจริงในสนามที่ล้อเหล็กของรถบดอัดทำกับถนน ขณะทำการบดอัดถนนในสนาม

นอกจากนี้ในการบดอัดตัวอย่างวัสดุแต่ละรอบของการหมุน เครื่อง SGC ยังได้รับการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ทำให้สามารถทราบความสูงของก้อนตัวอย่างในทุกๆรอบของการบดอัดอีกด้วย การที่ได้ทราบความสูงของก้อนตัวอย่างในทุกๆรอบของการบดอัดประกอบกับข้อมูลอื่นที่ทราบอยู่แล้ว เช่น มวลของวัสดุที่บรรจุลงในแบบหล่อเพื่อบดอัด และเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อทำให้สามารถคำนวณความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทุกรอบของการบดอัด และสามารถได้รับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุที่ทำการบดอัดต่อจำนวนรอบของการบดอัด ดังภาพที่ 3 ซึ่งจากกราฟลักษณะนี้สามารถทำให้ทราบถึงคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุรวมในวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างชัดเจนในขณะที่ทำการบดอัด อีกทั้งทำให้สามารถคาดการณ์ถึงการใช้งานในสนามของวัสดุนั้นอีกด้วย



ภาพที่ 2 กลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับเครื่อง SGC

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)



ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนรอบการหมุน สำหรับกระบวนการออกแบบส่วนผสมอื่น ส่วนผสมจะได้รับการออกแบบที่ระดับจำเพาะของแรงพยายามบดอัด (Compactive Effort) ในระบบซูเปอร์เพพจะเป็นฟังก์ชันของจำนวนออกแบบของรอบหมุน ( $N_{\text{design}}$ ) ซึ่งใช้แปรค่าแรงพยายามบดอัดของส่วนผสมออกแบบและเป็นฟังก์ชันของสภาพภูมิอากาศกับระดับจราจร ตัวแทนของสภาพภูมิอากาศใช้ค่าอุณหภูมิอากาศสูงออกแบบเฉลี่ย (The Average Design High Air Temperature) สำหรับสภาพโครงการตัวแทนของการจราจรคือ ESALs ออกแบบ (Design ESALs) ช่วงของค่าต่าง ๆ สำหรับ  $N_{\text{design}}$  แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แรงพยายามบดอัดของการหมุนที่ออกแบบตามระบบซูเปอร์เพฟ

Design ESALs (millions)	Average Design High Air Temperature											
	<39°C			39-40°C			41-42°C			43-44°C		
	N <sub>ini</sub>	N <sub>des</sub>	N <sub>max</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>des</sub>	N <sub>max</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>des</sub>	N <sub>max</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>des</sub>	N <sub>max</sub>
< 0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3-1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1-3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3-10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10-30	8	109	174	8	121	195	9	128	208	9	135	220
30-100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
>100	9	143	235	10	158	262	10	165	275	10	172	288

ที่มา: Asphalt Institute (1996)

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่ามีการหมุนอีก 2 ระดับ คือ จำนวนรอบการหมุนเริ่มต้น (N<sub>initial</sub>) และจำนวนรอบการหมุนมากที่สุด (N<sub>maximum</sub>) ซึ่งสัมพันธ์กับระดับการหมุนของจำนวนรอบการหมุนออกแบบ (N<sub>design</sub>) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Log } N_{\text{max}} = 1.1 \text{ Log } N_{\text{des}}$$

$$\text{Log } N_{\text{ini}} = 0.45 \text{ Log } N_{\text{des}}$$

ตารางที่ 5 ระดับในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพพ

Level	Superpave	Traffic , ESALs <sup>1</sup>	Testing Requirements <sup>2</sup>
1	Volumetric Mix Design	10 <sup>6</sup>	Materials selection and Volumetric proportioning
2	Intermediate Analysis	10 <sup>7</sup>	Volumetric mix design + Performance prediction tests
3	Complete Analysis	>10 <sup>7</sup>	Volumetric mix design + Enhanced performance prediction tests

หมายเหตุ <sup>1</sup> = ปริมาณจราจรของน้ำหนักเพลลาเดี่ยวเทียบเท่า

<sup>2</sup> = ในทุกกรณีใช้ AASHO T283 ประเมินค่าความไวต่อความชื้น

ที่มา: Asphalt Institute (1995)

## 2. การจัดขนาดคละ

ประเภทของหินตามการกำเนิดทางธรณีวิทยา สามารถจำแนกได้ 3 จำพวก คือ

1) หินอัคนี (Igneous Rock) เกิดจากการเย็นตัวและแข็งตัวของวัสดุร้อนหลอมละลาย เรียกว่าหินหนืด (Magma) ที่อัดตัวอยู่ภายใต้เปลือกโลกแล้วดันตัวขึ้นมาตามรอยแยกของผิวโลก หินชนิดนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Extrusive Rock และ Intrusive Rock, Extrusive Rock คือ หินที่ดันขึ้นมาบนผิวโลก เช่น ทางภูเขาไฟ มีลักษณะพิเศษ คือ มีโครงสร้างคล้ายแก้ว ได้แก่ ไรโอไลต์ (Rhyolite) แอนดีไซต์ (Andesite) และหินบะซอลท์ (Basalt) เป็นต้น Intrusive Rock คือ หินที่ก่อตัวโดยการเย็นตัวและแข็งตัวที่ความลึกมากๆ ได้เปลือกโลก ลักษณะโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline) ได้แก่ หินแกรนิต (Granite) ไดออไรท์ (Diorite) และแกบโบร (Gabbro) เป็นต้น เนื่องจากการเคลื่อนตัวของผิวโลกและการกัดเซาะต่างๆ ทำให้หินจำพวกนี้ปรากฏอยู่บนผิวโลกในปัจจุบัน

2) หินชั้น (Sedimentary Rock) เกิดจากการทับถมสะสมรวมตัวกันของตะกอน ซึ่งเคลื่อนที่พัดพาโดยน้ำ ธารน้ำแข็ง หรือลมเป็นเวลานานๆ จนในที่สุดแข็งตัวกลายเป็นหิน ตะกอนที่ทับถมสะสมรวมตัวกันอาจเป็นชั้นส่วนเล็กๆ ของทราย กรวด เศษหิน ดิน โคลน ซากพืช ซากสัตว์ ตลอดจนตะกอนจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือจากการระเหยของน้ำ หินตะกอนบางชนิดอาจเกิดจากตะกอนที่พ่นออกมาจากภูเขาไฟ แล้วมีการพัดพามาสะสมบนแผ่นดินหรือน้ำ ลักษณะพิเศษของหินประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ อาจพบได้บริเวณก้นทะเลสาบ ทะเล หรือมหาสมุทร ได้แก่ กรวด (Conglomerate) ถ่านหิน (Coal) ดินประสิว (Salt) ยิปซัม (Gypsum) หินทราย (Sandstone) และหินดินดาน (Shale) เป็นต้น

3) หินแปร (Metamorphosed Rock) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของหินชั้นและหินอัคนี เนื่องจากความดันสูงของการเคลื่อนตัวอย่างรุนแรงของโลก หรือจากความร้อนและสารละลายต่างๆ ลักษณะเด่นชัดของหินชนิดนี้ คือ โครงสร้างเรียงตัวกันเป็นระนาบขนาน (Parallel Planes) หินอาจจะแตกออกจากกันได้ ในแนวระนาบนี้เนื่องจากเป็นแนวที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ลักษณะการจัดตัวเช่นนี้เรียกว่า Foliation ได้แก่ Gneisses และ Schists ซึ่งแปรสภาพมาจากหินอัคนี หินชนวน (Slate) ซึ่งแปรสภาพมาจากหินดินดาน (Shale) หินอ่อน (Marble) ซึ่งแปรสภาพมาจากหินปูน (Limestone) และควอตไซต์ (Quartzite) ซึ่งแปรสภาพมาจากหินทราย (Sandstone)

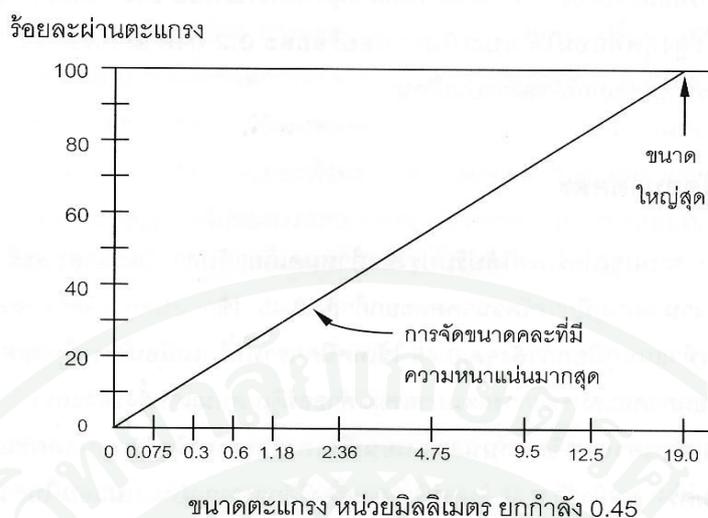
ลักษณะธรณีวิทยาทั่วไปของหินบะซอลต์ คือ หินบะซอลต์เป็นหินภูเขาไฟ มีเนื้อแน่นละเอียด ส่วนมากมีรูพรุนเนื่องจากก๊าซที่ปนอยู่ในลาวาที่เย็นตัวแข็งบนผิวโลก เกิดในลักษณะเป็นผนังหรือเป็นชั้นเนื่องมาจากลาวาอ่อนลงทับซ้อนกันต่อๆ มา มีสีเทาแก่เกือบดำสนิทประกอบด้วยแร่เฟลด์สปาร์ ไพรอกซีน ฮอร์นเบลนด์และโอลิวีน แต่ผลึกละเอียดมากต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น พบที่จังหวัดแพร่ ลำปาง นครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ อุบลราชธานี ลพบุรี จันทบุรี ตราด กาญจนบุรีและเพชรบูรณ์ เป็นต้น ใช้ทำหินผสมคอนกรีต หินประดับ นอกจากนี้ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัสดุงานทางโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนใต้ จากการทดลองค่ากลสมบัติของหินสี่ประเภทคือ หินปูน หินแกรนิต หินบะซอลต์ และหินทราย ปรากฏว่า หินบะซอลต์มีความแข็งแรงมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่า Aggregate Impact Value (AIV) เป็นการตรวจวัดประเมินค่าความต้านทานการแตกหักลงเป็นเม็ดขนาดเล็กของวัสดุมวลรวมที่จะเกิดขึ้นทั้งในขณะก่อสร้างและเมื่อรับน้ำหนักจากยานพาหนะตลอดช่วงอายุการใช้งาน, Aggregate Crushing Value(ACV) เพื่อหาปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกแรงบด, Los Angeles Abrasion Test (LAA) เพื่อหาค่าความสึกหรอของวัสดุมวลรวม, Polished Stone Value (PSV) เพื่อหาความต้านทานการลื่นไถลของหินเมื่อถูกขัด ดังตารางที่ 6 โดยหินบะซอลต์ที่นำมา

ทดสอบได้มาจากโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย – อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ  
อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา

ตารางที่ 6 ค่าคุณสมบัติของวัสดุหินในประเทศไทย

ชนิดหิน	AIV (%)		ACV (%)		PSV		Abrasion value (%)		Specific gravity	Water absorption (%)
	Range	Avg	Range	Avg	Range	Avg	Range	Avg		
Basalt	12.1-14.8	13.9	11.4-14.6	13.4	49.1-51.8	50.1	15-20	17	2.638-2.924	0.5-1.9
Granite	13.5-18.2	16.1	19.2-23.8	21.1	48.0-52.0	51.3	21-29	25	2.598-2.750	0.3-1.06
Limestone	9.7-14.8	12.5	17.5-26.0	21.5	36.0-44.0	41	22-33	28	2.684-2.762	0.15-0.55
Sandstone	15.3-40.0	23.1	19.2-37.5	26.4	53.0-65.0	59	31-75	62	2.237-2.642	1.21-3.8
Andesite	11.0-13.0	11.8	12.0-15.0	13.6	49.4-51.3	51.7	-	22	2.635-2.662	0.7-1.05

ที่มา: สุรพล (2547)



ภาพที่ 4 การจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับขนาดใหญ่ที่สุด 19 mm

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

ลักษณะของแผนภูมินี้คือการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุด การจัดขนาดคละนี้จะพล็อตเป็นเส้นตรงจากขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดจนถึงจุดกำเนิด ในระบบซูเปอร์เพฟใช้จำกัดความขนาดมวลรวมดังนี้

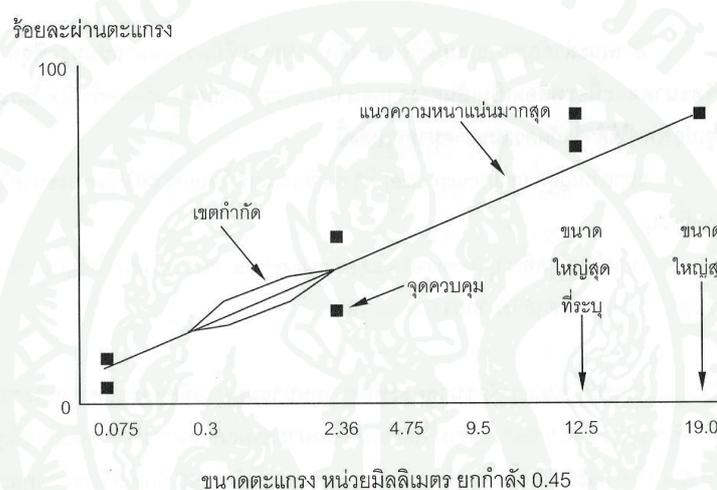
ขนาดใหญ่ที่สุด (Maximum Size) คือขนาดตะแกรงใหญ่กว่าหนึ่งชั้นของขนาดใหญ่ที่สุดที่ระบุ

ขนาดใหญ่ที่สุดที่ระบุ (Nominal Maximum Size) คือ ขนาดตะแกรงใหญ่กว่าหนึ่งชั้นของตะแกรงแรกที่วัสดุค้ำมากกว่าร้อยละ 10

จากภาพที่ 4 การจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดจะแสดงการจัดขนาดคละซึ่งอนุภาคต่างๆ ของมวลรวมจับตัวกันพอเหมาะตามสภาพความหนาแน่นมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ และยังแสดงแผนภูมิการจัดขนาดคละยกกำลัง 0.45 กับการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับมวลรวมขนาดใหญ่ที่สุด 19.0 mm

เขตจำกัดมีอาณาเขตอยู่ตามแนวการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดระหว่างตะแกรงขนาดกลางและตะแกรงขนาด 0.3 mm ภาพที่ 5 แสดงจุดควบคุมและเขตจำกัด สำหรับ

ส่วนผสมซูเปอร์เฟฟ 12.5 mm เขตจำกัดจะก่อให้เกิดแถบตลอดช่วงที่การจัดขนาดคละไม่ผ่านข้อกำหนด การจัดขนาดคละที่ผ่านเขตจำกัดมีชื่อเรียกว่า การจัดขนาดคละแบบ Humped Gradation ในกรณีส่วนมากการจัดขนาดคละแบบ Humped Gradation นี้ให้เห็นว่าเป็นส่วนผสมที่มีทรายมากเกินไปหรือเป็นส่วนผสมที่มีทรายละเอียดมากเกินไปเมื่อเทียบกับทรายทั้งหมด การจัดขนาดคละแบบนี้มักมีผลกับส่วนผสมในแง่ที่ว่าก่อให้เกิดปัญหาในการบดอัดยุ่งยากในช่วงระหว่างการก่อสร้างและมักลดความต้านทานต่อการเสียดรูปอย่างถาวรในช่วงอายุการใช้งานให้บริการแก่การจราจร



ภาพที่ 5 ขีดจำกัดการจัดขนาดคละระบบซูเปอร์เฟฟ

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

เขตจำกัดกีดกันการจัดขนาดคละจากการตามแนวความหนาแน่นสูงสุดในตะแกรงมวลรวมละเอียด การจัดขนาดคละตามการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นสูงสุดนี้ มักจะมีค่า VMA ไม่เพียงพอที่จะยอมให้มีแอสฟัลต์มากพอสำหรับความทนทานที่ต้องการ การจัดขนาดคละเป็นสิ่งที่ไวต่อปริมาณแอสฟัลต์ และสามารถกลายสภาพเป็นพลาสติกได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอสฟัลต์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 3. คุณสมบัติเชิงปริมาตรของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

#### 3.1 ช่องว่างอากาศ

ช่องว่างอากาศ (Air Voids,  $V_a$ ) ของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง ช่องว่างเล็ก ๆ ของอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคทั้งหมดของมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ในส่วนผสม แสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 6 ปริมาตรช่องว่างอากาศมีผลต่อความทนทานของผิวแอสฟัลต์คอนกรีต ถ้าปริมาตรช่องว่างอากาศน้อย น้ำและอากาศมีโอกาสซึมผ่านเข้าไปทำลายการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้น้อยทำให้ผิวทางมีอายุยาวนาน อย่างไรก็ตาม ปริมาตรช่องว่างอากาศมีน้อยเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาบนผิวหน้าถนนได้

#### 3.2 ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม

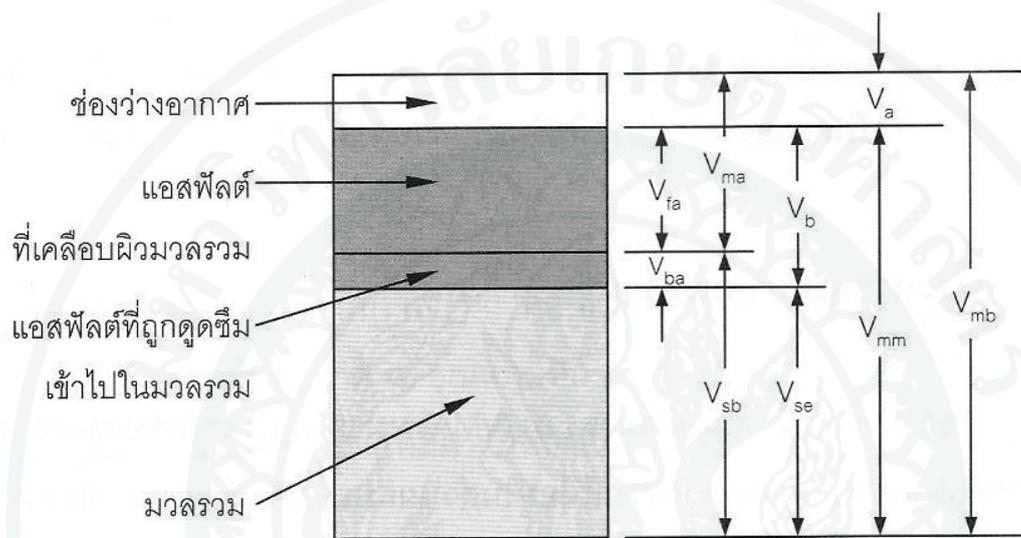
ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (VMA) หมายถึง ปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคแต่ละอนุภาคของมวลรวมที่มีอยู่ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งเป็นผลรวมของช่องว่างอากาศกับปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ แสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 6 ในการออกแบบเพื่อให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณภาพดีนั้นอยู่ที่ว่าวัสดุมวลรวมที่ใช้ นั้น จะต้องมียค่า VMA ที่พอเหมาะซึ่งขึ้นอยู่กับ Nominal Maximum Particle Size ของวัสดุมวลรวม จึงมีการกำหนดค่า VMA ที่น้อยที่สุดที่ต้องการ เพราะทำให้ได้ฟิล์มที่ห่อหุ้มเคลือบผิววัสดุมวลรวมหนาเพียงพอ ซึ่งจะมีผลต่อความคงทนของแอสฟัลต์คอนกรีต

#### 3.3 ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์

ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ (VFA) หมายถึง ค่าร้อยละของปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ของมวลรวมที่บรรจุด้วยปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ จึงแสดงเป็นอัตราส่วนของ ( $VMA - V_a$ ) กับ VMA ดังแสดงในภาพที่ 6 ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพมีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตในกรณีค่า VFB สูงเกินไปทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มเคลือบผิววัสดุมวลรวมหนาเกินไป ทำให้ไม่คงตัวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก สำหรับในกรณีค่า VFB น้อยเกินไปจะมีผลต่อการแอ่นตัวและความคงทน

### 3.4 ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ

ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ ( $P_{bc}$ ) หมายถึง ปริมาณแอสฟัลต์ที่ได้จากผลแตกต่างระหว่างปริมาณแอสฟัลต์ทั้งหมดของส่วนผสมกับปริมาณแอสฟัลต์ส่วนที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคทั้งหมดของมวลรวมในส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แผนผังส่วนประกอบของก้อนตัวอย่างที่บดอัดแล้วของ HMA

ที่มา: วัชรินทร์ วิทย์กุล (2547)

- $V_{ma}$  = ปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม
- $V_{mb}$  = ปริมาตรทั้งก้อนของส่วนผสมที่บดอัดแล้ว
- $V_{mm}$  = ปริมาตรปราศจากช่องว่างของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- $V_{fa}$  = ปริมาตรของช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์
- $V_a$  = ปริมาตรของช่องว่างอากาศ
- $V_b$  = ปริมาตรของแอสฟัลต์
- $V_{ba}$  = ปริมาตรของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม
- $V_{sb}$  = ปริมาตรของมวลรวมโดยความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน
- $V_{se}$  = ปริมาตรของมวลรวมโดยความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ

#### 4. แอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์คือผลิตภัณฑ์แอสฟัลต์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ ที่เรียกว่า Asphalt Base Crude เป็นสีดำในอุณหภูมิบรรยากาศปกติจะมีความเหนียวและความหนืด มีลักษณะกึ่งของแข็งเมื่อให้ความร้อนจะอ่อนตัวและจะแข็งตัวเมื่อเย็นลง การแบ่งเกรดใช้การทดสอบด้วย Penetration Test ซึ่งมีเกรดมาตรฐานอยู่ 5 เกรด คือ 40/50, 60/70, 85 /100,120/150 และ 200 /300 ตัวเลขของเกรดจะแสดงความอ่อนความแข็งของแอสฟัลต์ เกรดอ่อนที่สุดคือ 200/ 300 เกรดที่แข็งที่สุดคือ 40/ 50 การผลิตออกมาหลายเกรดเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน แอสฟัลต์ซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน เคลือบผิววัสดุมวลรวมและจับตัวเข้าด้วยกันทำให้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความแข็งแรง และมีความทนทาน

โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ คือแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ โดยการผสมสารโพลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องผสมชนิดแรงเฉือนเพื่อให้โพลิเมอร์กระจายตัวและคงสภาพอยู่ได้ในแอสฟัลต์โพลิเมอร์ คือสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มวลโมเลกุลสูง เกิดจากการรวมตัวของสารโมเลกุลเล็กๆ ที่เรียกว่า โมโนเมอร์จำนวนมากมาเกิดพันธะเชื่อมต่อกัน โดยทั่วไปแล้วโพลิเมอร์สามารถที่จะแยกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. อีลาสโตเมอร์ (elastomers) หมายถึงวัสดุที่แสดงพฤติกรรมหยุ่นตัวได้ นั่นคือที่อุณหภูมิห้องวัสดุดังกล่าวสามารถรองรับการยืดตัวได้อย่างน้อยสองเท่าของความยาวเดิมด้วยแรงกระทำที่ต่ำและสามารถปรับตัวสู่สภาพเดิมได้เองเมื่อปลดปล่อยแรงกระทำ นอกจากนี้อีลาสโตเมอร์ยังมีประเภทย่อยๆ ไปอีกซึ่งรวมไปถึง Homopolymers, Random Copolymers หรือ Styrene Butadiene Rubber (SBR) และBlock Copolymers หรือ Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) ได้มาจากการก่อตัวขึ้นของกระบวนการโพลิเมอไรเซชันระหว่าง Styrene และ Butadiene โดยทั่วไป จะมี 2 ขั้นตอนเกิดในกระบวนการ โดยขั้นตอนแรก Styrene จะได้รับการโพลิเมอไรซ์เพื่อก่อตัวขึ้นเป็น Polystyrene Blocks ที่มีมวลโมเลกุลตามที่ต้องการ เช่นเดียวกับขั้นที่สอง Butadiene จะได้รับการโพลิเมอไรซ์เพื่อก่อตัวขึ้นเป็น Polybutadiene Blocks ที่มีมวลโมเลกุลตามต้องการ จากนั้นทั้งสอง Blocks ได้รับการโพลิเมอไรซ์ร่วมกันอีกครั้งหนึ่ง การผลิต (SBS) หากได้รับการควบคุมองค์ประกอบต่างๆอย่างเหมาะสมแล้วผู้ผลิตสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ส่วนผสมโพลิเมอร์แอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เป็นที่ต้องการคือ มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำค่อนข้างคงที่และไม่สูงเกินค่าวิกฤติที่จะเกิดการแตกร้าว (Thermal Cracking) ส่วนที่อุณหภูมิสูงก็มีความยืดหยุ่นเพียงพอที่สามารถป้องกันการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation)

2. Plastomers เป็นวัสดุออร์แกนิกที่มีมวลโมเลกุลสูงที่สามารถได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ นอกจากนี้ Plastomers ยังสามารถก่อตัวโครงข่ายสามมิติที่แข็งแกร่งทนทานต่อการอ่อนตัวได้และมีกำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกภายใต้การรับน้ำหนัก

## 5. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

### 5.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test)

การทดสอบแบบ Indirect Tensile Test นั้นกระทำโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression Load) ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งแบบอัตราคงที่ (Static) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ก็ได้แล้วแต่กรณี โดยที่ให้น้ำหนักกระทำในแนวขนานตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ตามที่แสดงในภาพที่ 7



(ก) แรงอัดกระทำบนก้อนตัวอย่าง

(ข) ก้อนตัวอย่างเสียหาย

ภาพที่ 7 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง

(ก) การให้แรงอัดกระทำกับก้อนตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก

(ข) ก้อนตัวอย่างชำรุดภายใต้แรงอัด

ที่มา: Anagnos. (1972)

ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างจากการทดสอบ Indirect Tensile สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$\sigma_T = 2P / \pi D T \quad (1)$$

เมื่อ	$\sigma_T$	=	Tensile stress (MPa)
	P	=	น้ำหนักที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (N)
	T	=	ความสูงเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)

\* ในกรณีที่ P เป็นแรงกระทำที่ทำให้ก้อนตัวอย่างวิบัติ (Failure) เนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ค่า Stress ได้จากสมการจะเป็นค่า Indirect Tensile Strength (ITS)

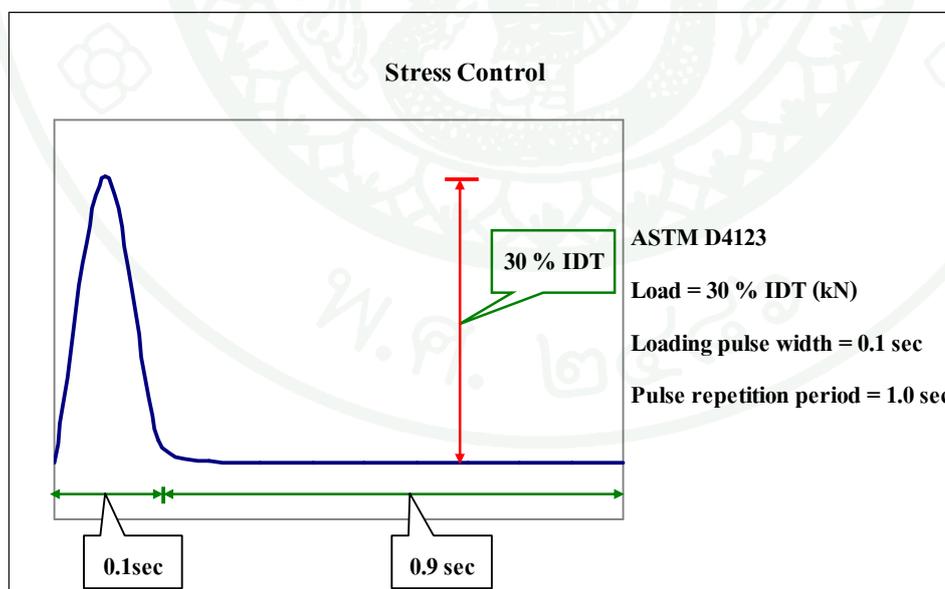
การให้น้ำหนักต้องกระทำผ่านแท่งกดที่มีขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร ก้อนตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร โดยที่แท่งกดน้ำหนักดังกล่าวจะมีด้านสัมผัสกับผิวก้อนตัวอย่างทดสอบเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเท่ากับรัศมีก้อนตัวอย่างทำให้สามารถกระจายน้ำหนักลงพอดีและในการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำคงที่ ซึ่งการให้น้ำหนักลักษณะนี้จะทำให้เกิด Tensile Stress ที่สม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการให้น้ำหนัก และจะส่งผลให้ก้อนตัวอย่างเกิดการแตกร้าวขึ้นตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเนื่องจากการให้ Single Load หรือ Repeated Load ก็ตาม โดยที่ลักษณะการกระจายของ Stress ที่เกิดขึ้นของก้อนตัวอย่างจะพบว่าบริเวณที่กึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง Compression Stress ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะมีค่าประมาณ 3 เท่า ของ Tensile Stress ที่เกิดขึ้นในแนวราบ โดยในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Fatigue Test ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำหนักกระทำค่าหนึ่งกระทำเข้าไปเรื่อยๆจนกระทั่งก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า(เสกซ์ัย และคณะ ,2549)

งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6931 - Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures

## 5.2 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

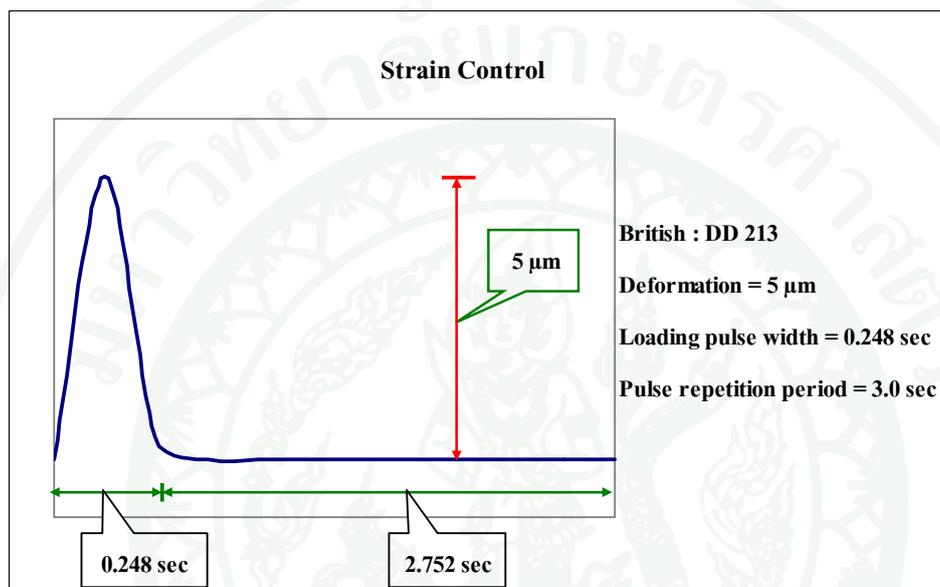
โดยการใช้วิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile) ในการทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ กับก้อนตัวอย่างที่ทดสอบ เพื่อให้น้ำหนักที่กระทำนั้นเป็นลักษณะรูปคลื่น Haversine น้ำหนักที่กระทำในแนวตั้ง ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของก้อนตัวอย่าง จะทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวในแนวราบ และขณะช่วงเวลาหยุดพักการให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างจะมีการคืนตัวกลับเรียกว่าค่าการคืนตัว (Resilient Strain) เมื่อให้น้ำหนักกระทำซ้ำอีกตาม 50-200 ครั้งจนกระทั่งค่าการคืนตัวมีค่าค่อนข้างคงที่แล้วทดสอบ 5 ค่าสุดท้ายแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย และกำหนดค่า Poisson's Ratio โดยการประมาณของก้อนทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตจะทำให้ได้ค่าโมดูลัสการคืนตัว

ตามมาตรฐาน ASTM D 4123-82(1995) Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures จะมีการให้น้ำหนักเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในรูปแบบ Haversine Wave ทุก ๆ 1 วินาที ซึ่งเวลาที่น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที โดยให้น้ำหนักกระทำมีค่าเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 8



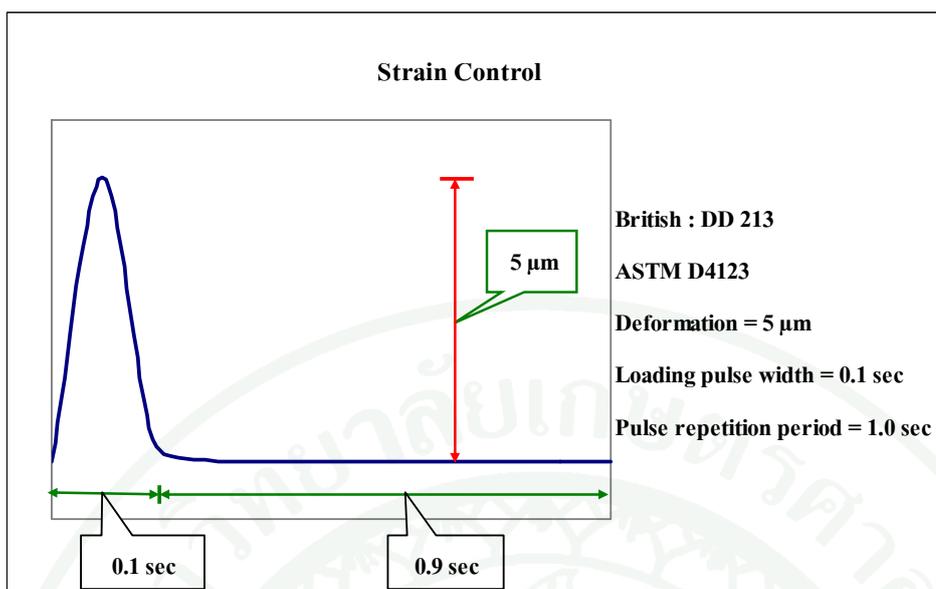
ภาพที่ 8 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Stress-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM D 4123

และตามมาตรฐาน BS DD 213:1993 Method for Determination of The Indirect Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures จะมีการให้น้ำหนักเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในรูปแบบ Haversine Wave ทุก 3 วินาที ซึ่งน้ำหนักที่กระทำก่อนตัวอย่าง 0.248 วินาที และเวลาพัก 2.752 วินาที โดยให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคั้นตัวแบบ Strain-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM DD 213:1993

จากมาตรฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จะให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ตามมาตรฐาน BS DD 213 แต่เปลี่ยนช่วงเวลาที่น้ำหนักกระทำก่อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาทีตามมาตรฐาน ASTM D 4123 เนื่องจากถนนของประเทศไทยมีความหนาที่ค่อนข้างบางและเป็นช่วงเวลาที่สามารถจำลองความถี่ที่เกิดจากปริมาณจราจรได้ใกล้เคียงได้มากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Strain-Control Test ในงานวิจัยนี้

การทดสอบโมดูลัสคืนตัว จะใช้เครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM-14P) ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถคำนวณได้จากค่าความสัมพันธ์ของสมการต่อไปนี้ (Austroads Pavement Reference Group [APRG], 1999)

$$E = P(V + 0.27) / h_c \times H \quad (2)$$

$$\epsilon = H / D$$

เมื่อ	E	=	ค่าโมดูลัสคืนตัวโดยประมาณ (MPa)
	P	=	น้ำหนักกระทำสูงสุด (N)
	V	=	ค่า Poisson's Ratio โดยประมาณ
	$h_c$	=	ความสูงของก้อนตัวอย่าง โดยเฉลี่ย (mm)
	H	=	ระยะการคืนตัวทั้งหมด (mm)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (mm)
	$\epsilon$	=	ค่าการคืนตัว

### 5.3 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)

การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test) งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS DD ABF: 1995, Method for the Determination of Fatigue Characteristics of Bituminous Mixtures Using Indirect Tensile Fatigue เป็นการทดสอบที่หาจำนวนรอบของน้ำหนักระทำซ้ำต่อก่อนตัวอย่างจนกระทั่งเกิดเสียหายเนื่องจากความล้า (Fatigue Failure) เกณฑ์ในการพิจารณาจุดที่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า นั้นมีหลายเกณฑ์ ในงานวิจัยนี้ตั้งเกณฑ์ความเสียหายจากความล้าไว้ที่จุดซึ่งค่า Resilient / Stiffness Modulus ของก้อนตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำซ้ำลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่า Resilient / Stiffness Modulus ที่เริ่มต้นการทดสอบ ซึ่งการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้า เป็นการทดสอบที่แสดงถึงสมรรถนะ (Performance) ในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะสามารถทนรับแรงกระทำซ้ำจากน้ำหนักจราจรได้โดยไม่เกิดการแตกร้าวก่อนเวลาอันควร

นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำที่ระดับต่างกัน ก็จะสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่กระทำ (Stress) หรือค่าความเครียดที่เกิดขึ้น (Strain) กับจำนวนรอบที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะรับแรงกระทำจนเกิดการเสียหายได้ ซึ่งสมการดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้พยากรณ์อายุการใช้งานของชั้นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้

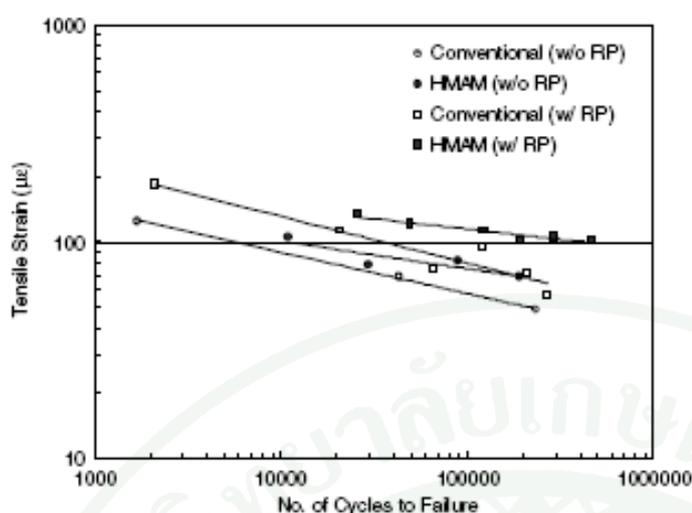
เสกชัย และคณะ (2549) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความต้านทานความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนาม โดยการทดสอบการต้านทานความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม กระทำที่อุณหภูมิ 25°C ทำการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 0.25-0.6 MPa โดยการให้น้ำหนักระทำประกอบไปด้วยช่วง Load-Unload เท่ากับ 0.1 วินาทีในลักษณะ Haversine และมีช่วง Rest Period เท่ากับ 0.9 วินาที จนกระทั่งค่าโมดูลัสลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่าโมดูลัสเริ่มต้น จึงถือว่าตัวอย่างวิบัติเนื่องจากความล้า ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permissible Strain ( $\epsilon_{mi}$ ) และจำนวนครั้งที่กระทำจนก้อนตัวอย่างวิบัติเนื่องจากการล้า ( $N_f$ ) ที่ได้จากการทดสอบมีความสัมพันธ์แบบผกผัน คือ เมื่อ  $\epsilon_{mi}$  เพิ่มขึ้น ค่า  $N_f$  จะลดลง และพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\epsilon_{mi}$  และ  $N_f$  ของก้อนตัวอย่างแต่ละภูมิภาคมีลักษณะใกล้เคียงกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้สมการความสัมพันธ์  $\epsilon_{mi}$  และ  $N_f$  (Fatigue Model) สมการเดียวสำหรับประเทศไทย คือ  $\log \epsilon_{mi} = 3.405 - 0.159 \log N_f$

หรือ  $\epsilon_{ini} = 282 * \left( \frac{N_f}{10^6} \right)^{-0.159}$  โดยมีค่า Level of Confidence ร้อยละ 95

Hyun, J.L., Lee, J.H. และ Park, H.M. (2007) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Life Asphalt Pavements” เพื่อคุณสมบัติของ High Modulus Asphalt Binder (HMAB) และ Mixes (HMAM) โดยทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อมในรูปของ Haversine ให้น้ำหนัก 0.1 วินาที และ With and Without Rest Periods ที่ 0.9 วินาที ทดสอบจนค่าโมดูลัสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าโมดูลัสเริ่มต้น ได้ค่าสมการ  $N_f = a(e_0)^b$  เมื่อ  $N_f$  คือ ค่า Fatigue Life ของส่วนผสมแอสฟัลต์,  $e_0$  คือ ค่าความเครียดดึงเริ่มต้น,  $a$  และ  $b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน ภาพที่ 11 แสดงผลการทดสอบความต้านทานว่าค่า Fatigue Lives ของส่วนผสมทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ Rest Period โดยที่ค่าความต้านทานต่อความต้านทานของ HMAM ดีกว่า Conventional Mix ที่ซึ่งค่า Tensile Strain ต่ำกว่า 150 Microstrain จึงสรุปได้ว่าความต้านทานต่อความต้านทานของ HMAM ดีกว่า Conventional Mix สำหรับผิวทางแอสฟัลต์ที่หนา ในทางกลับกันความต้านทานต่อความต้านทานของ HMAM ดีกว่า Conventional Mix ที่ผิวทางแอสฟัลต์บาง และตารางที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจากการทดสอบ

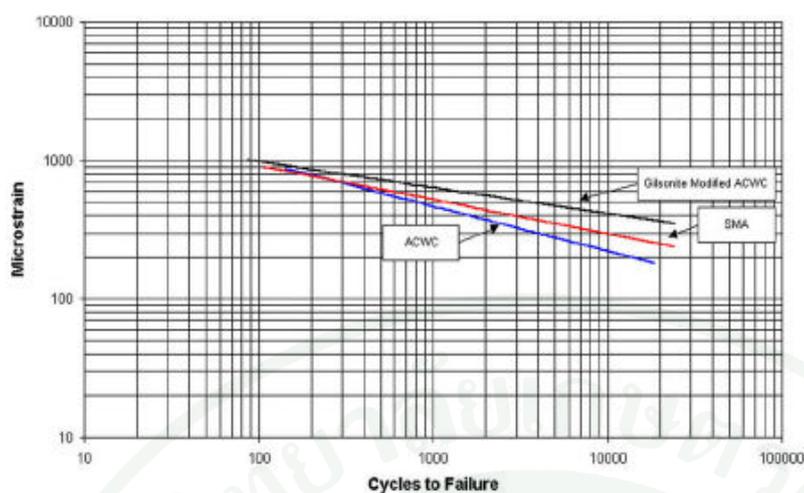
ตารางที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจากการทดสอบ

	Mixture	Average air void (%)	Fatigue coefficient		
			a	b	R <sup>2</sup>
Without rest period	conventional	4.87	$6 \times 10^{-18}$	-5.245	0.9993
	HMAM	5.45	$1 \times 10^{-21}$	-6.2882	0.7927
With rest period	conventional	4.72	$8 \times 10^{-13}$	-4.1622	0.9005
	HMAM	5.91	$3 \times 10^{-38}$	-10.823	0.9672

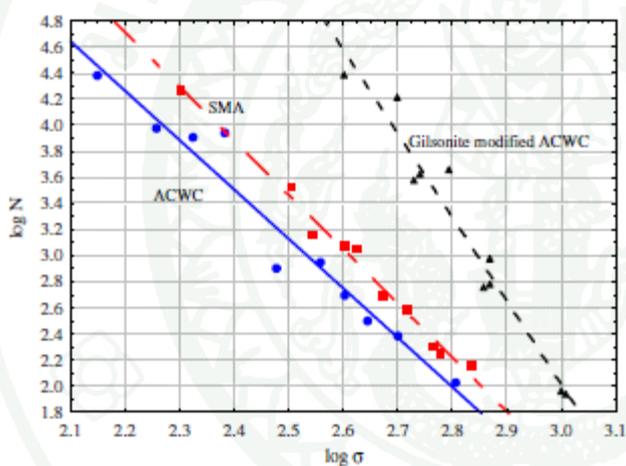


ภาพที่ 11 ผลการทดสอบความล้าของส่วนผสม Conventional Mixture and HMAM

Zhi, S. และ Wong, W.G. (2009) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in Asphalt Concrete Material in Wearing Course” เพื่อจะแสดงลักษณะของพฤติกรรมการเสียหายจากความล้าในเทอมของ Micro-Damage Mechanics โดยใช้วัสดุชั้นผิวทาง 3 ชนิดคือ Gilsonite Modified Asphalt Concrete Wearing Course (GM-ACWC), Stone Mastic Asphalt (SMA) และ Conventional Asphalt Wearing Course (ACWC) ใช้ยางแอสฟัลต์ AC60/70 บดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้เครื่อง SGC แบบควบคุมความหนาแน่น แล้วทดสอบ Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) แบบควบคุมแรง ผลจากการทดสอบพบว่า GM-ACWC มีค่า Fatigue Life สูงตามด้วย SMA และ ACWC และค่า Fatigue Life จะมีลักษณะใกล้เคียงกันที่ค่าความเครียด 1000  $\mu\epsilon$  ดังภาพที่ 12 ส่วนภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่เกิดการพังและค่าหน่วยแรงที่ใช้จากการทดสอบ ITFT และได้ค่าสมการดังตารางที่ 8



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบความล้าโดยวิธี Indirect tensile fatigue test (ITFT)



ภาพที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกระทำซ้ำกับค่าหน่วยแรง

ตารางที่ 8 แสดงค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ

	Average stiffness modulu (Mpa)	Continuum damage parameters			
		lg c	p	$K_T$	a
ACWE	1590	13.8385	4.1494	3	1.572E-15
GM-ACWC	2330	21.2313	6.4053	3.2	4.365E-23
SMA	1380	12.5801	3.7809	3.1	2.934E-14

Saad, A.Q. และ Shatnawi, I. (2007) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Prediction of Bituminous Mixture Fatigue Life Based on Accumulated Strain” มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำนายจำนวนรอบที่เป็นสาเหตุของการเกิด Fracture ของก้อนตัวอย่าง HMA อาศัยจำนวนรอบที่ซึ่ง Slope ของ Accumulated Strain Switched from Decreasing to Increasing Mode ก้อนตัวอย่าง HMA ใช้วิธีออกแบบมาร์แชลล์หาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม โดยใช้มวลรวมก้อนหินปูนมีขนาดละเอียดของมวลรวมใหญ่สุดระบุ 3 ขนาดคือ 12.5, 19.0 และ 25.0 มม. และยางแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 ทดสอบ Indirect Tensile Fatigue แบบควบคุมแรงให้น้ำหนักกระทำขนาด 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 kN โดยใช้เครื่องทดสอบ UTM ที่อุณหภูมิทดสอบ 25°C และที่อุณหภูมิ 10, 45 และ 60°C ใช้ประเมินที่น้ำหนัก 3.5 kN ด้วยการให้น้ำหนัก 0.1 วินาทีช่วงพัก 0.4 วินาที กระทำซ้ำจนก้อนตัวอย่างพังได้ผลดังตารางที่ 9 และสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อไม่คำนึงถึงขนาดละเอียดของมวลรวมและขนาดน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ จำนวนรอบที่เกิดขึ้นจนกระทั่งก้อนตัวอย่างพังสามารถทำนายได้ว่า Slope ของ Accumulated Strain ยังคงลดลงต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งจำนวนรอบน้ำหนักกระทำเข้าใกล้ค่า 44% ของจำนวนรอบที่จะเกิดการพัง
- ที่อุณหภูมิและขนาดน้ำหนักเดียวกัน ก้อนตัวอย่าง HMA ที่เตรียมโดยขนาดมวลรวม 12.5 มม. มีค่า Fatigue Life สูงสุด ตามด้วยขนาดละเอียดมวลรวม 19.0 มม. ในขณะที่ขนาดละเอียดมวลรวม 25.0 มม. มีค่า Fatigue Life ต่ำสุด
- ที่อุณหภูมิและน้ำหนักเดียวกัน ก้อนตัวอย่าง HMA ที่ใช้ขนาดละเอียดมวลรวม 12.5 มม. มีค่า Stiffness Modulus เริ่มต้นสูงที่สุด ตามด้วยขนาดละเอียดมวลรวม 19.0 มม. ขณะที่ขนาดละเอียดมวลรวม 25.0 มม. มีค่า Stiffness Modulus ต่ำที่สุด

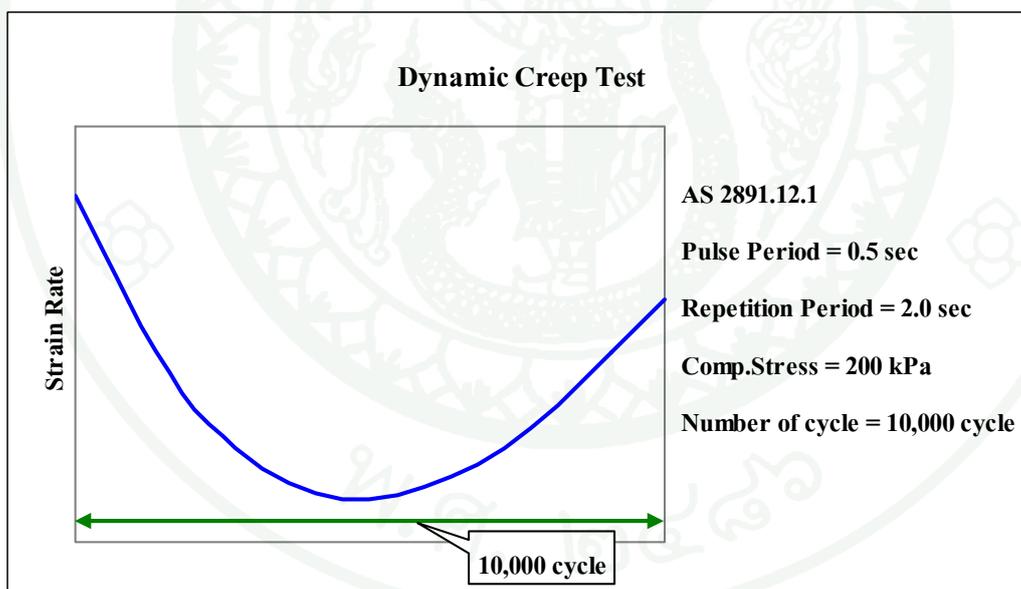
#### ตารางที่ 9 สรุปผลการทดสอบ

Maximum aggregate size (mm)	Load (kN)	Average initial stiffness (MPa)	Average final stiffness (MPa)	Fatigue life (cycles)	Average number of cycles at change slope of accumulated strain	Number of cycles to change slope/number of fatigue life cycles
12.5	3.5	213	72	3832	1674	0.44
12.5	3.0	209	54	9100	3860	0.42
12.5	2.5	200	80	39,200	17,242	0.44
12.5	2.0	182	49	188,964	84,742	0.45
12.5	1.5	176	69	268,480	123,017	0.46
19.0	3.5	191	59	3813	1619	0.42
19.0	3.0	188	75	7863	3484	0.44
19.0	2.5	174	77	25,657	11,660	0.45
19.0	2.0	167	68	116,457	49,964	0.43
19.0	1.5	155	72	171,206	74,588	0.44
25.0	3.5	156	59	1640	724	0.44
25.0	3.0	147	83	5514	2424	0.44
25.0	2.5	144	66	8130	3599	0.44
25.0	2.0	132	61	64,867	28,577	0.44
25.0	1.5	128	56	82,214	36,035	0.44

#### 5.4 การทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test)

การเปลี่ยนรูปร่างถาวรของชั้นผิวทาง โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุก บนเส้นทางการจราจรการเปลี่ยนรูปร่างถาวรโดยทั่วไปจะพบอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ การยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุกนานกับทิศทางของการจราจรเรียกว่า Rutting และการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางของการจราจรและมักจะเกิดบริเวณที่มีการจราจรหยุด

ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 Determination of The Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt – Dynamic Creep Test ซึ่งได้กำหนดเงื่อนไขไว้ว่าปริมาณช่องว่างของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 4 % อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส หน่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 200 kPa ช่วงเวลาในการให้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 0.5 วินาที และช่วงเวลาที่หยุดเพื่อรอให้น้ำหนักกระทำ 1.5 วินาที ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1

ชยธันว์ และคณะ(2546) ทำการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตชั้น Wearing Course ตามภูมิภาคต่างๆ 4 ภาค โดยปริมาณช่องว่างของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์ หน่วยแรงในการทดสอบเท่ากับ 100 kPa ช่วงการให้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 0.2 วินาที

และช่วงเวลาการหยุดให้น้ำหนักในรอบต่อไปเท่ากับ 0.8 วินาที ในการทดสอบจะทำการทดสอบให้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ ไปเรื่อยๆจนกระทั่งก่อนตัวอย่างมีค่า Accumulated Strain เท่ากับ 1 % จึงหยุดทำการทดสอบ ส่วนในตารางจะประกอบด้วยผลการทดสอบความต้านทานต่อการยวบตัวถาวรที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 10

**ตารางที่ 10** ค่าความต้านทานต่อการยวบตัวถาวรของวัสดุเอสฟัลต์คอนกรีต

จำนวนรอบที่ได้จากการทดสอบ	อุณหภูมิการทดสอบ	
	40 องศาเซลเซียส	60 องศาเซลเซียส
ค่าน้อยที่สุด (Min)	1,085	106
ค่ามากที่สุด (Max)	87,872	2,327
ค่าเฉลี่ย (Average)	25,531	1,034

**ที่มา:** กรมทางหลวง (2546)

ธนกร (2552) ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยวบตัวถาวรของเอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้การทดสอบแรงกระทำซ้ำแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 10°C 25°C 40°C และ 55°C โดยค่าระดับความเค้น (Stress Level) ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 207 กิโลปาสกาล (NCHRP Report 465, 2002) การให้ความเค้นดังกล่าวจะให้แรงกดในลักษณะกระทำซ้ำ (Repeated Load) จำนวน 40,000 รอบ หรือจนกว่าตัวอย่างจะเสียหาย โดยแรงกดดังกล่าวจะกระทำที่ความถี่ 1 เฮิร์ต (Hz) นั่นคือ มีสัดส่วนช่วงการให้แรง (Load) ต่อช่วงเวลาการปล่อยแรง (Unload) เท่ากับ 1 ต่อ 9 หรือก็คือในแต่ละชุดของแรงกระทำ 1 วินาที มีช่วงเวลาการให้แรง 0.1 วินาที สำหรับรูปร่างของการให้แรงกำหนดให้มีลักษณะเป็น ครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (Haversine Function) ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิมิผลกระทบต่อค่าการยวบตัวถาวร โดยค่าของแรงกระทำที่จุดเสียหายจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิต่ำ (10°C) นั้นไม่สามารถประมาณค่าการยวบตัวถาวรได้ภายในรอบของแรงกระทำที่กำหนด ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุแสดงพฤติกรรมแบบอีลาสติกสมบูรณ์ สำหรับที่ 25°C นั้นพฤติกรรมของเอสฟัลต์คอนกรีตไม่แสดงพฤติกรรมความเสียหายในช่วงที่ 3 สุดท้าย ณ อุณหภูมิ 40°C และ 55°C เกิดความเสียหายที่จำนวนครั้งของการให้แรง ณ จุดเสียหายประมาณ 11,000-11,500 และ 3,000 รอบ ตามลำดับ จากการทดสอบจะทำให้สามารถหาค่าความเครียดยวบตัวได้ จากสมการเลขยกกำลัง (Power Model) ได้คือ

$$\varepsilon_p = aN^b$$

เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่จากการทดสอบ

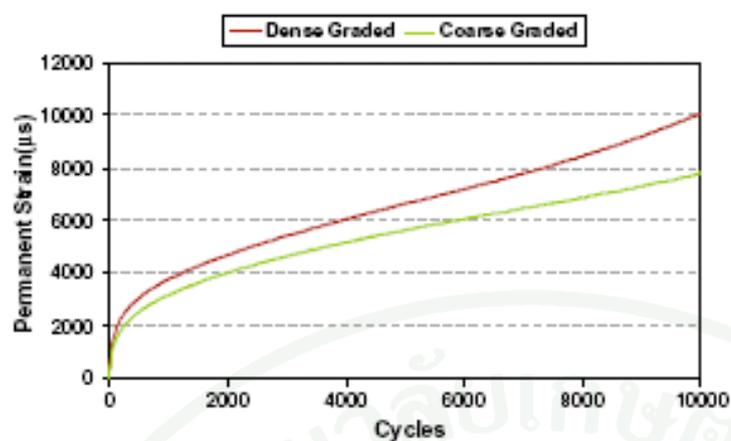
การประมาณค่าคงที่  $a$  และ  $b$  ณ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ เมื่อ  $\theta$  คือ ค่าอุณหภูมิองศาเคลวิน คือ

$$a = 93.6 \exp(-0.0245\theta); R^2 = 0.632$$

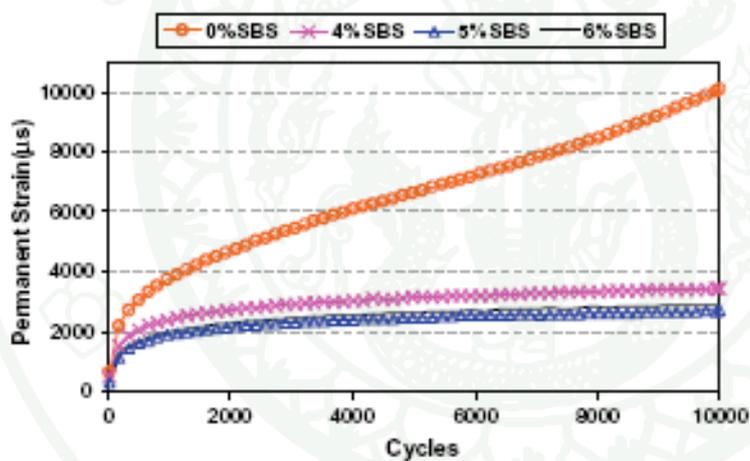
$$b = 10^{-5} \exp(-0.0322\theta); R^2 = 0.847$$

Khodaii, A. และ Mehrara, A. (2009) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test” เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการเปลี่ยนรูปถาวรของส่วนผสมแน่นกับส่วนผสมหยาบ และเปรียบเทียบผลของความแตกต่างของปริมาณ SBS ในส่วนผสมเพื่อกำหนดปริมาณของโพลิเมอร์ที่เหมาะสม โดยใช้ยางแอสฟัลต์ AC60/70 กับ SBS Modified บดอัดก้อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐาน ASTM D1559 แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ UTM 25 โดยใช้ Square Pulse Wave ด้วยความถี่ 0.5 Hz ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 ผลจากการทดสอบดังภาพที่ 15 ถึงภาพที่ 17 และสามารถสรุปได้ดังนี้

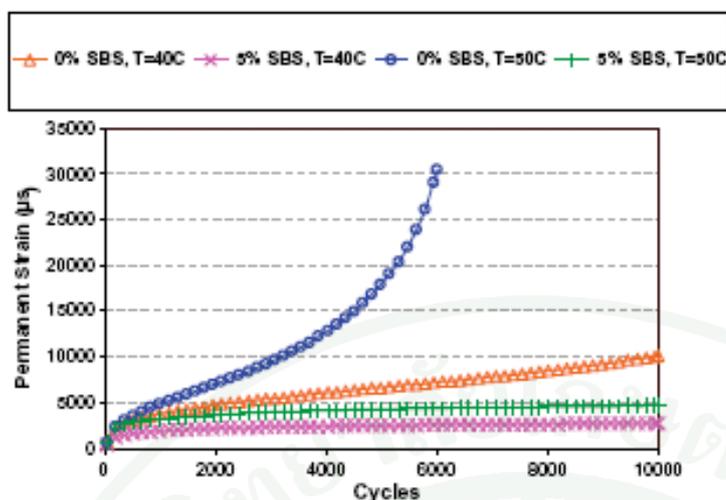
- ส่วนผสมหยาบมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรมากกว่าส่วนผสมแน่น
- ในจำนวนส่วนผสมยางโพลิเมอร์ SBS คือที่ 4%, 5% และ 6% พบว่าที่ 5% SBS มีพฤติกรรมทางกลดีที่สุด
- ส่วนผสม Modified Asphalt SBS มีความไวต่ออุณหภูมิต่ำกว่าส่วนผสมแบบ Unmodified
- ส่วนผสม SBS Modified มีความสามารถต่อการบดอัดสูงกว่าส่วนผสมแบบ Unmodified



ภาพที่ 15 กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa



ภาพที่ 16 กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างตามปริมาณของ SBS ที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa



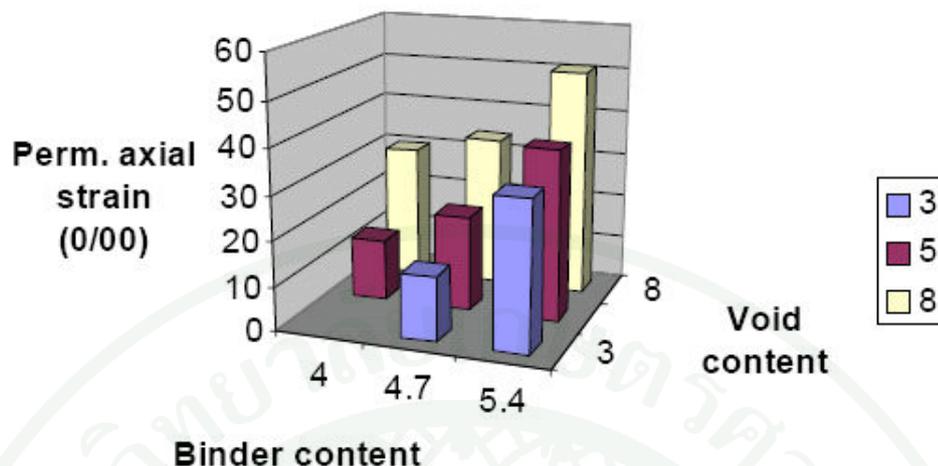
ภาพที่ 17 กราฟแสดงผลการทดสอบของส่วนผสมที่ Modified และ Unmodified

Garba, R. (2002) ได้ศึกษาภายใต้หัวข้อ “Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures” โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของปริมาณ น้ำหนักและอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้วิธีการออกแบบ มาร์แชลล์ ใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ 4.0%, 4.7% (Optimum) และ 5.4% เพื่อศึกษาผลของปริมาณยางแอสฟัลต์ มวลรวมประกอบด้วยหินบด 51% กรวดและทราย 44% และ 5% ของส่วนผสมเพิ่ม หินปูน บดอัดก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูงประมาณ 180 มม. ทดสอบ Creep ที่อุณหภูมิ 50°C ที่หน่วยแรง 450, 750 และ 1000 kPa, Confining Pressure 150 kPa Square Load Pulse 10 วินาที ช่วงพัก 10 วินาที ให้น้ำหนักกระทำซ้ำจำนวน 150,000 รอบ ผลจากการทดสอบพบว่าปริมาณยางแอสฟัลต์มีผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรกล่าวคือ ปริมาณยางที่มากกว่าทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปร่างสูงกว่าและปริมาณช่องว่างอากาศของส่วนผสมมากทำให้ค่าการยุบตัวสูงตาม ดังภาพที่ 18 ผลจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักพบว่าที่หน่วยแรงมากค่าการเปลี่ยนรูปร่างถาวรก็มากตามไปด้วย จากแบบจำลอง Power Model คือ  $\epsilon_p = aN^b$  เมื่อ  $\epsilon_p$  คือค่าความเครียดสะสม  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ได้จาก Regression บนกราฟ Log-Log เมื่อ

$a =$  Intercept, Represents the Permanent Strain at  $N=1$

$b =$  Slope, Represents the Rate of Change in Permanent Strain

ผลจากการทดสอบได้ค่าแบบจำลองตามตารางที่ 11 ถึงตารางที่ 12



ภาพที่ 18 กราฟแสดงค่าความเครียดสะสมหลังจากให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 150000 รอบ

ตารางที่ 11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Power model ตามปริมาณยางที่ทดสอบ

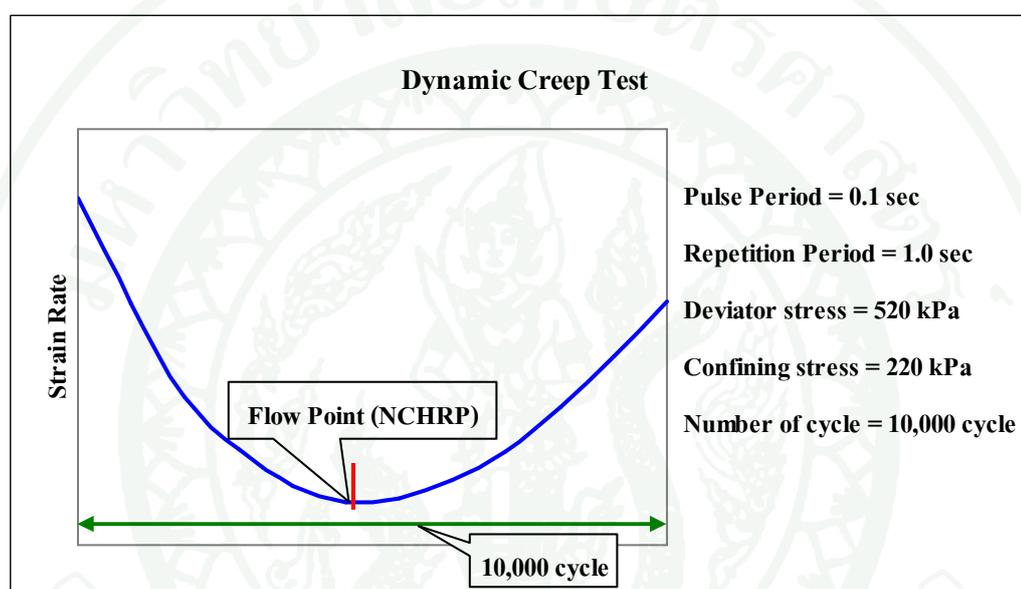
ปริมาณยาง (%)	4.0	4.7	5.4
a	2.0305	2.9806	4.5185
b	0.1617	0.1663	0.1806

ตารางที่ 12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Power model ตามปริมาณช่องว่างอากาศ

ช่องว่างอากาศ	3	5	8
a	1.6485	2.9806	6.9103
b	0.1836	0.1663	0.135

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบโดยการเพิ่มลักษณะการพิจารณา Flow Point หรือจุดที่ก้อนตัวอย่างเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวร ซึ่งในรายงานของ NCHRP (NCHRP, 2002) ได้อธิบายว่าเป็นจุดที่เกิด Tertiary Flow ซึ่งคือจุดที่มีค่า Strain Rate มีค่าต่ำสุด ดังภาพที่ 19 และเพื่อจำลองสภาพอากาศร้อนของประเทศไทยและแรงกระทำที่เกิดขึ้นจริงใน โครงสร้างทาง จึง

ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส และใช้แรงดันด้านข้าง (Confining Stress) เท่ากับ 220 kPa และแรงกระทำด้านบนเพื่อสร้างความเค้นเพิ่มในแนวตั้ง (Deviator Stress) เท่ากับ 520 kPa โดยค่าแรงดันและความเค้นดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยางเมื่อรับน้ำหนักเพลลาเดี่ยวมาตรฐาน (ESAL) ที่มีแรงดันลมยาง 100 psi โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ChevronX ส่วนจำนวนรอบการทดสอบ (Number of Cycle) ที่ 10,000 รอบหรือ 50,000 Microstrain



ภาพที่ 19 รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ในงานวิจัยนี้

ความเครียดสะสม (Accumulated Strain,  $\epsilon_p$ ) คือผลบวกสะสมของความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เมื่อวัสดุนั้นได้รับแรงกระทำซ้ำๆ สามารถหาได้จาก

$$\epsilon_p = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3)$$

เมื่อ  $\Delta h$  = ระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรตามแนวแกนของตัวอย่างตั้งแต่ครั้งแรกที่ได้รับแรงกระทำ (mm)  
 $h_0$  = ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างที่ทดสอบ (mm)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. วัสดุ

##### 1.1 แอสฟัลต์ (Asphalt)

แอสฟัลต์ที่ใช้ในการวิจัยนี้คือยางแอสฟัลต์เกรด 40/50, 60/70 และโพลีเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์เป็นวัสดุประสานโดยเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

แอสฟัลต์ (Asphalt) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มถึงดำ มีสภาพเป็นวัสดุที่แข็ง มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นปิทูเมน ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ หรือที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม (Asphalt Institute, 1995)

##### 1.2 วัสดุผสมรวม

มวลรวม (Aggregate) หมายถึงวัสดุ แข็ง ฉ่ำ เป็นอนุภาคของแร่ธาตุ เช่น ทราย กรวด ตะกรัน หรือหินย่อย ใช้ในการผสมกับวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่างๆ หรืออาจใช้มวลรวมเพียงอย่างเดียวในการทำเป็นชั้นพื้นทาง หรือการถม ตัวอย่างงานทั่วไปที่ใช้มวลรวมเป็นวัสดุก่อสร้างได้แก่ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แอสฟัลต์คอนกรีต ผิวทางแอสฟัลต์ พื้นทาง หินโรย ทางรถไฟ

มวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ. โขกชัย ถึง อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ. โขกชัย จ.นครราชสีมา โดยการตรวจสอบคุณสมบัติที่เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงและขนาดกะของมวลรวมเป็นไปตามการจัดขนาดกะของโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 ดังกล่าว

## วิธีการ

### 1. วิธีการตรวจสอบวัสดุมวลรวม

ในการตรวจสอบวัสดุมวลรวมนั้นแยกออกเป็น การตรวจสอบวัสดุมวลรวมละเอียด และ การตรวจสอบวัสดุมวลรวมหยาบ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- 1.1 วัสดุมวลรวมละเอียด ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด ดังนี้
- ขนาดคละ (Gradation) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.-ท.205/2517 หรือ AASHTO T37 – 77 หรือ ASTM C136 – 84A
  - ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.-ท.209/2517 หรือ AASHTO T84 – 77 หรือ ASTM C128 – 84
  - ความคงทน (Soundness) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.- ท. 213/2531
  - ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.- ท.203/2515 หรือ AASHTO T176 – 73 หรือ ASTM D2419 – 74
  - ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO TP33

1.1.1 ขนาดคละ (Gradation) วิธีการนี้เป็นการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่าน หรือค้างตะแกรงขนาดต่างๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{R \times 100}{T} \quad (4)$$

เมื่อ  $P$  = เปอร์เซ็นต์รวมที่ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก

$R$  = มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

$T$  = มวลของตัวอย่างทั้งหมด

1.1.2 ความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ ในการทดสอบจะต้องทำการแยกวัสดุมวลรวมละเอียดนี้ออกเป็น 2 ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 กับส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วทำการคำนวณจากสมการดังนี้

ความถ่วงจำเพาะรวม ( Bulk Specific Gravity )

$$GB (30^{\circ}C) = \frac{WD \times dt}{0.9957 \times (WS + W2 - W1)} \quad (5)$$

เมื่อ GB = ค่าความถ่วงจำเพาะรวมขณะทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิ t°C  
 WD = น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (Weight of Dry Sample); gm  
 WS = น้ำหนักของตัวอย่างชื้น (Weight of Saturated Surface Sample); gm  
 W2 = น้ำหนักขวดแก้ววัดความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer) + น้ำ; gm  
 W1 = น้ำหนักขวดแก้ววัดความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer) + น้ำ + ตัวอย่าง; gm  
 dt = ค่าความหนาแน่นของน้ำขณะทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิ t°C

ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

$$GA (30^{\circ}C) = \frac{WD \times dt}{0.9957 \times (WD + W2 + W1)} \quad (6)$$

สำหรับวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นั้น ไม่สามารถจะหาความถ่วงจำเพาะรวมได้ เพราะไม่สามารถทำให้ผิวนอกของมวลรวมแห้ง โดยที่ยังมีความชื้นอยู่ภายในได้ (เนื่องจากมวลรวมนั้นมีความเป็นพลาสติกมาก)

1.1.3 ค่าความคงทน (Soundness) วิธีการนี้ เป็นการทดสอบที่ครอบคลุมถึงการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อการแตก หรือการแยกของมวลรวมในสารละลายอิมัลชันโซเดียมซัลเฟต หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อจะได้ใช้เป็นข้อมูลในการช่วยพิจารณาค่าความคงทนของมวลรวมที่ถูกกระทำโดยสภาพดินฟ้าอากาศ

1.1.4 ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) วิธีการนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาสัดส่วนระหว่างฝุ่น หรือวัสดุประเภทเหมือนดินเหนียว กับ วัสดุเม็ดหยาบจำพวกกรวด หรือทรายที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งได้กำหนดค่าต่ำสุดของทรายสมมูลที่จะใช้ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 50 % โดยหาได้ดังสมการ

$$SE = \frac{\text{Sand Reading} \times 100}{\text{Clay Reading}} \quad (7)$$

เมื่อ SE = ทรายสมมูล (Sand Equivalent)

1.1.5 ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียดเป็นคุณสมบัติที่เพิ่มระดับความเสียดทานภายในอนุภาคของมวลรวมละเอียด

$$U = \frac{V - (F/G)}{V} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ U = Uncompacted Voids in the Material

V = ปริมาตรของ Cylinder

F = น้ำหนักสุทธิของมวลรวมใน Cylinder

G = ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

1.2 วัสดุมวลรวมหยาบ ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบ ดังนี้  
ขนาดคละ (Gradation) ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท.204/2516 หรือ AASHTO T27 – 78 หรือ ASTM C136 – 84 A

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

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

ดัชนีความแบน (Flakiness Index) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.-ท.210/2518

ดัชนีความยาว (Elongation Index) ทำการทดสอบตาม การทดลองที่ ทล.-ท.211/2518

ความสึกหรอของมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท.202/2518 หรือ AASHTO T96 – 77 หรือ ASTM C131 – 81

ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ ทำการทดสอบตาม การทดลองมาตรฐาน ASTM D 5821

ความแบนความยาวของอนุภาคทำการทดสอบตาม การทดลองมาตรฐาน ASTM D 4791

1.2.1 ขนาดคละสำหรับมวลรวมหยาบ จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ด้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่าน หรือค้างตะแกรง

ขนาดต่าง ๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4)

1.2.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (ขนาดโตกว่า 4.75 มม.) ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk Specific Gravity) และความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Water Absorption) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$\text{Bulk Specific Gravity (Dry)} = \frac{W_D}{W_S - W_W} \quad (9)$$

$$\text{Bulk Specific Gravity (Sat)} = \frac{W_S}{W_S - W_W} \quad (10)$$

$$\text{Apparent Specific Gravity} = \frac{W_D}{W_D - W_W} \quad (11)$$

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_S - W_D}{W_D} \quad (12)$$

เมื่อ  $W_D$  = มวลของวัสดุอบแห้งในอากาศ; gm

$W_S$  = มวลของวัสดุผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ; gm

$W_W$  = มวลของวัสดุในน้ำ; gm

1.2.3 ค่าความคงทน (Soundness) โดยการหาค่าความคงทนของวัสดุมวลรวมหยาบ ตามวิธีการเดียวกันกับการหาค่าความคงทนของวัสดุมวลรวมละเอียดในหัวข้อ 1.1.3

1.2.4 ดัชนีความแบน (Flakiness Index) เป็นการหามวลของวัสดุที่มีความหนาของด้านแบนที่น้อยกว่า 3/5 เท่าของขนาดเฉลี่ยของวัสดุนั้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุที่นำมาทดสอบ สำหรับข้อกำหนดของกรมทางหลวง ค่าดัชนีความแบนต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งค่าดัชนีความแบนจะคำนวณได้จากสมการที่ (13)

$$FI = \frac{100 \times x}{x + y} \quad (13)$$

เมื่อ  $FI$  = ดัชนีความแบน

$x$  = มวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ลอดผ่านช่องวัดความหนาทุกช่อง; gm

$y$  = มวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ค้างช่องวัดความหนาทุกช่อง; gm

1.2.5 ดัชนีความยาว (Elongation Index) เป็นการหามวลของวัสดุที่มีความยาวของส่วนยาวมากกว่า 1.8 เท่า ของขนาดเฉลี่ยของวัสดุ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับมวลของวัสดุที่นำมาทดสอบ สำหรับข้อกำหนดของกรมทางหลวง ค่าดัชนีความยาวต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งค่าดัชนีความยาวจะคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$EI = \frac{100 \times x}{x + y} \quad (14)$$

เมื่อ EI = ดัชนีความยาว

$x$  = มวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ลอดผ่านช่องวัดความยาวทุกช่อง; gm

$y$  = มวลรวมของตัวอย่าง ส่วนที่ค้างช่องวัดความยาวทุกช่อง; gm

1.2.6 ความสึกหรอของมวลหยาบ โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นการทดสอบหาค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบที่มีความต้านทานต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัดความแน่นดีหรือไม่ โดยกรมทางหลวงยอมให้ค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมชั้นผิวทางไม่เกินร้อยละ 40 ในการคำนวณค่าการสึกหรอสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$(\text{Abrasion}) = \frac{(M1 - M2) \times 100}{M1} \quad (15)$$

เมื่อ M1 = มวลของตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ

M2 = มวลที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12

1.2.7 ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบเป็นการเพิ่มระดับความเสียดทานภายในของมวลรวมและการยึดเกาะกับวัสดุเชื่อมประสาน

1.2.8 ความแบนความยาวของอนุภาคเป็นค่าร้อยละโดยมวลของมวลรวมหยาบที่มีอัตราส่วนด้านใหญ่สุดกับด้านเล็กสุดมีค่ามากกว่าห้า

## 2. การออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟ

สำหรับการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 จะอ้างอิงการเตรียมตัวอย่างตามวิธีทดสอบ “Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt(HMA) Specimens by Means of the SHRP Gyratory Compactor (AASHTO TP4)” โดยทำการออกแบบตามปริมาณน้ำหนักบรรทุกทุกเพลลาเดี่ยวมวล (ESALs) 10-30 ล้านหน่วยและค่าอุณหภูมิอากาศสูงออกแบบเฉลี่ย 44 องศาเซลเซียส มาทำการบดอัดในขั้นตอนนี้จะทำการผสม 1 ส่วนผสม หลังจากสิ้นสุดการออกแบบในขั้นตอนนี้จะได้ผลการออกแบบ 4 ค่าแล้วเลือกส่วนผสมที่ดีที่สุดไปทำการทดลองคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่อไป

วิธีการทดลองบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่อง Gyratory Compactor นำอัตราส่วนผสมของมวลรวมที่เหมาะสมมาทำการบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory Compactor ให้ได้ก้อนตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 70 มิลลิเมตร โดยการบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory Compactor ใช้แรงกดต่อก้อนตัวอย่างคงที่ 600 กิโลปาสกาล (kPa) ฐานของเครื่องหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ที่ 30 รอบต่อนาที ตำแหน่งการบดอัดก้อนตัวอย่างทำมุม 1.25 องศาตลอดช่วงการบดอัด สำหรับขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีนี้ จะทำการออกแบบโดยใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50,60/70 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ อุณหภูมิของมวลรวมที่ใช้ผสมคือ 180 องศาเซลเซียสและแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ผสมมีอุณหภูมิ 170,160 และ 180 องศาเซลเซียสสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50,60/70 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมก่อนที่จะทำการบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory Compactor คือ 165-170 องศาเซลเซียส เพื่อออกแบบหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมให้ได้เปอร์เซ็นต์โพรงอากาศ (Air Voids) 4 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 20 เครื่อง Gyrotory Compactor

การทำการบดอัดครั้งแรกเป็นการบดอัดเพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ที่ จะใช้ในการผสมก้อน ตัวอย่างโดยสามารถหาได้จากการหาค่าความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพของมวลรวมที่ผสมกัน ( $G_{se}$ ) หาได้จาก

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb}) \quad (16)$$

- เมื่อ
- $G_{se}$  = ความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพของมวลรวมที่ผสม
  - $G_{sb}$  = ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมทั้งก้อนของมวลรวมที่ผสม
  - $G_{sa}$  = ความถ่วงจำเพาะปรากฏผลของมวลรวมที่ผสม

ปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในมวลรวม ( $V_{ba}$ ) หาได้จาก

$$V_{ba} = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left( \frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right)} \times \left( \frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right) \quad (17)$$

- เมื่อ  $V_{ba}$  = ปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม  $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$  ของส่วนผสม  
 $P_b$  = ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ (สมมุติมีค่า 0.05)  
 $P_s$  = ค่าร้อยละของมวลรวม (สมมุติมีค่า 0.95)  
 $G_b$  = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ (สมมุติมีค่า 1.02)  
 $V_a$  = ปริมาณของช่องว่างอากาศ (สมมุติมีค่า 0.04 ของส่วนผสม)

ปริมาณของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ ( $V_{be}$ ) หาได้จาก

$$V_{be} = 0.176 - 0.675 \log(S_n) \quad (18)$$

- เมื่อ  $S_n$  = ขนาดตะแกรงสูงสุดที่ระบุของมวลรวมที่ผสมในหน่วยมิลลิเมตร

และสำหรับปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้น ( $P_{bi}$ ) หาได้จาก

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{[G_b \times (V_{be} + V_{ba})] + W_s} \times 100 \quad (19)$$

- เมื่อ  $P_{bi}$  = ค่าร้อยละของแอสฟัลต์โดยมวลของส่วนผสม  
 $W_s$  = มวลของมวลรวม มีหน่วยเป็นกรัม หาได้จาก

$$W_s = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left( \frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right)} \quad (20)$$

จะทำการบดอัด 2 ก้อน โดยใช้เครื่อง Gyrotory Compactor และเตรียมตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง สำหรับหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ซึ่งจะต้องหาค่าต่ำสุดตามวิธี ASTM D 2041

การหาค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศในส่วนผสมอัดแน่น (Percent Air Void) Asphalt Institute (1996) ได้กล่าวว่าจำนวนรอบการหมุนมากที่สุด ( $N_{max}$ ) จำนวน 220 รอบ การหมุนออกแบบ ( $N_{des}$ ) จำนวน 135 รอบ การหมุนเริ่มต้น ( $N_{ini}$ ) จำนวน 9 รอบ เกณฑ์การออกแบบปริมาตรส่วนผสมวีซีซีซูเปอร์เพฟ (VMA, VFB, สัดส่วนฝุ่น) คือเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศมีค่าเท่ากับ 4 ที่จำนวนรอบการหมุนออกแบบ ( $N_{des}$ )

ถ้าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่เปรียบเทียบหาค่าถือว่าเสร็จสมบูรณ์ แต่หากโพรงอากาศบรรจุที่จำนวนรอบการหมุนออกแบบ ( $N_{des}$ ) เปลี่ยนแปลงไปจาก 4 เปอร์เซ็นต์ ค่าประมาณการออกแบบแอสฟัลต์บรรจุเพื่อให้ได้ 4 เปอร์เซ็นต์โพรงอากาศที่จำนวนรอบการหมุนออกแบบ ( $N_{des}$ ) ต้องหาใหม่

การวิเคราะห์ข้อมูลและการคำนวณหาส่วนประกอบต่างๆของแอสฟัลต์คอนกรีต ข้อมูลการบดอัด Superpave แบบหมุนจะนำมาใช้หาค่าความถ่วงจำเพาะรวมโดยประมาณความถ่วงจำเพาะรวมที่ถูกต้องและเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความถ่วงจำเพาะทางทฤษฎีสูงสุดในระหว่างการบดอัด ความสูงของตัวอย่างจะถูกวัดและบันทึกไว้ในแต่ละรอบการหมุน  $G_{mb}$  ของตัวอย่างที่ถูกบดอัดกับ  $G_{mm}$  ของตัวอย่างแบบหลวมจะถูกวัดการประมาณค่า  $G_{mb}$  คำนวณได้จากสมการที่ (21) ดังนี้

$$G_{mb} \text{ (estimated)} = \frac{W_m / V_{mx}}{\gamma_w} \quad (21)$$

เมื่อ	$G_{mb}$	=	ความถ่วงจำเพาะรวมโดยประมาณของตัวอย่างช่วงที่บดอัด
	$W_m$	=	น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม
	$\gamma_w$	=	ความหนาแน่นของน้ำ = $1 \text{ g/cm}^3$
	$V_{mx}$	=	ปริมาตรของแบบหล่อในหน่วย $\text{cm}^3$

ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (22)

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0.001 \text{ cm}^3 / \text{mm}^3 \quad (22)$$

เมื่อ  $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อ 100 มิลลิเมตร  
 $h_x$  = ความสูงของก้อนตัวอย่างที่อยู่ในแบบหล่อระหว่างบดอัด (mm)

หาค่าร้อยละของช่องว่างอากาศที่  $N_{des}$  จากสมการที่ (23)

$$V = 100 - \%G_{mm} @ N_{des} \quad (23)$$

เมื่อ  $V_a$  = ช่องว่างอากาศ @  $N_{des}$  คิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมด  
 $\%G_{mm} @ N_{des}$  = ความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด @  $N_{des}$  คิดเป็นร้อยละ

หาค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมด

$$\%VMA = 100 \left( \frac{\%G @ N_{des} \times G_{mm} \times P_s}{G_{sb}} \right) \quad (24)$$

เมื่อ  $VMA$  = ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมด  
 $\%G_{mm} @ N_{des}$  = ความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด @  $N_{des}$  คิดเป็นร้อยละ

$G_{mm}$  = ความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด

$G_{sb}$  = ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมทั้งหมด

$P_s$  = ปริมาณมวลรวม  $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$  โดยมวลทั้งหมดของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ปริมาณแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ที่  $N_{des}$  เท่ากับ 4% สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_b = P_{bi} - [0.4 \times (4 - V_a)] \quad (25)$$

เมื่อ  $P_b$  ที่ประเมินได้ = ปริมาณแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ คิดเป็นร้อยละ

โดยมวลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

$P_{bi}$  = ปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้นคิดเป็นร้อยละโดยมวล  
ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

$V_a$  = ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศที่  $N_{des}$  ที่ทดลอง

ค่าปริมาตรของ VMA และ VFA ที่  $N_{des}$  และความหนาแน่นของส่วนผสมที่  $N_{mi}$  และ  $N_{max}$   
ประเมินหาจากสมการดังนี้

$$\%VMA \text{ ที่ประเมินได้} = \%VMA \text{ เริ่มต้น} + C \times (4 - V_a) \quad (26)$$

เมื่อ  $\%VMA$  =  $\%VMA$  จากปริมาณแอสฟัลต์ที่ทดลองใช้

$C$  = ค่าคงที่ = 0.1 ถ้า  $V_a < 4\%$

= 0.2 ถ้า  $V_a > 4\%$

ค่าต่ำสุดที่ระบุสำหรับ VMA ที่ปริมาณช่องว่างอากาศออกแบบ 4% เป็นฟังก์ชันของขนาด  
มวลรวมใหญ่สุดที่ระบุและมีค่าดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 หลักเกณฑ์สำหรับ VMA ที่ยอมรับได้

Nominal Maximum Size	Minimum Voids in Mineral Aggregate (%)
9.5 mm	15.0
12.5 mm	14.0
19.0 mm	13.0
25.0 mm	12.0
37.5 mm	11.0
50.0 mm	10.5

ที่มา: Asphalt Institute (1995), Superpave Level 1 Mix Design, Superpave Series No.2 (SP-2)

สำหรับ VFA

$$\%VFA = 100 \times \frac{\%VMA - 4.0}{\%VMA} \quad (27)$$

ช่วงที่ยอมรับของ VFA ออกแบบที่ช่องว่างอากาศ 4% เป็นฟังก์ชันของระดับจราจรมีค่าแสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 หลักเกณฑ์สำหรับ VFA ที่ยอมรับได้

Traffic Level (ESALs) , (10 <sup>6</sup> )	Design VFA (%)
< 0.3	75-80
< 1	65-78
< 3	65-78
< 10	65-75
< 30	65-75
< 100	65-75
□ 100	65-75

ที่มา: Asphalt Institute (1995), Superpave Level 1 Mix Design, Superpave Series No.2 (SP-2)

สำหรับ  $\%G_{mm}$  ที่  $N_{ini}$

$$\%G_{mm} \text{ ที่ประเมินได้@}N_{ini} = \%G_{mm} \text{ ที่ทดลอง@}N_{ini} - (4.0 - V_a) \quad (28)$$

สำหรับ  $\%G_{mm}$  ที่  $N_{max}$

$$\%G_{mm} \text{ ที่ประเมินได้@}N_{max} = \%G_{mm} \text{ ที่ทดลอง@}N_{max} - (4.0 - V_a) \quad (29)$$

ความหนาแน่นส่วนผสมที่ยอมรับได้ค่าสูงสุดที่  $N_{max}$  คือ 98

สัดส่วนฝุ่น

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}} \quad (30)$$

เมื่อ  $P_{0.075}$  = ปริมาณมวลรวมที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร  
คิดเป็นร้อยละโดยมวล

$P_{be}$  = ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ คิดเป็นร้อยละ  
โดยมวลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

$$P_{be} = (P_s \times G_b) \times \frac{G_{se} \times G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} + P_b \text{ ที่ประเมินได้} \quad (31)$$

เมื่อ  $P_s$  = ปริมาณมวลรวม คิดเป็นร้อยละ โดยมวลทั้งหมดของมวลรวม

$G_b$  = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์

$G_{se}$  = ความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพของมวลรวม

$G_{sb}$  = ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อนของมวลรวม

$P_b$  = ปริมาณแอสฟัลต์ คิดเป็นร้อยละ โดยมวลทั้งหมดของมวลรวม

สัดส่วนฝุ่นที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 0.6-1.2 สำหรับทุกส่วนผสม

### 3. การคำนวณหาค่าปริมาตรและองค์ประกอบของส่วนต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

ในการคำนวณส่วนต่าง ๆ ของก้อนตัวอย่างของแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ว่าจะเป็นการคำนวณหาน้ำหนักของส่วนประกอบ หรือปริมาตรของส่วนประกอบก็ตาม จะคิดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการนำค่าต่าง ๆ ไปใช้สามารถคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (Gag)

$$Gag = \frac{100}{\left[ \frac{PF}{GF} + \frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \frac{P4}{G4} \right]} \quad (32)$$

เมื่อ PF = ปริมาณวัสดุอัดแทรกเป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมทั้งหมด

Pn = ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n เป็นร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมทั้งหมด

GF = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุอัดแทรก

Gn = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไปเนื่องจากการดูดซึมของมวลรวม (Asphalt Lost by Absorption Asphalt)

$$Ab = \frac{100 \times GV - Gag \times Gac}{GV \times Gag} \quad (33)$$

เมื่อ Ab = เปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไป เนื่องจากการดูดซึมของมวลรวม

Gac = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์

$$GV = \frac{100 - b}{\frac{Gm}{Gac} - b} \quad (34)$$

เมื่อ GV = Virtual Specific Gravity

Gm = Theoretical Maximum Specific Gravity

b = ปริมาณแอสฟัลต์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทั้งหมดของส่วนผสม

ในการคำนวณหาถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(Theoretical Maximum Specific Gravity ; Gmm) ค่าต่างๆ ที่จะใช้ในการคำนวณ ได้จาก การทดสอบตามวิธีการของ ASTM D2041 และ คำนวณตามสมการ

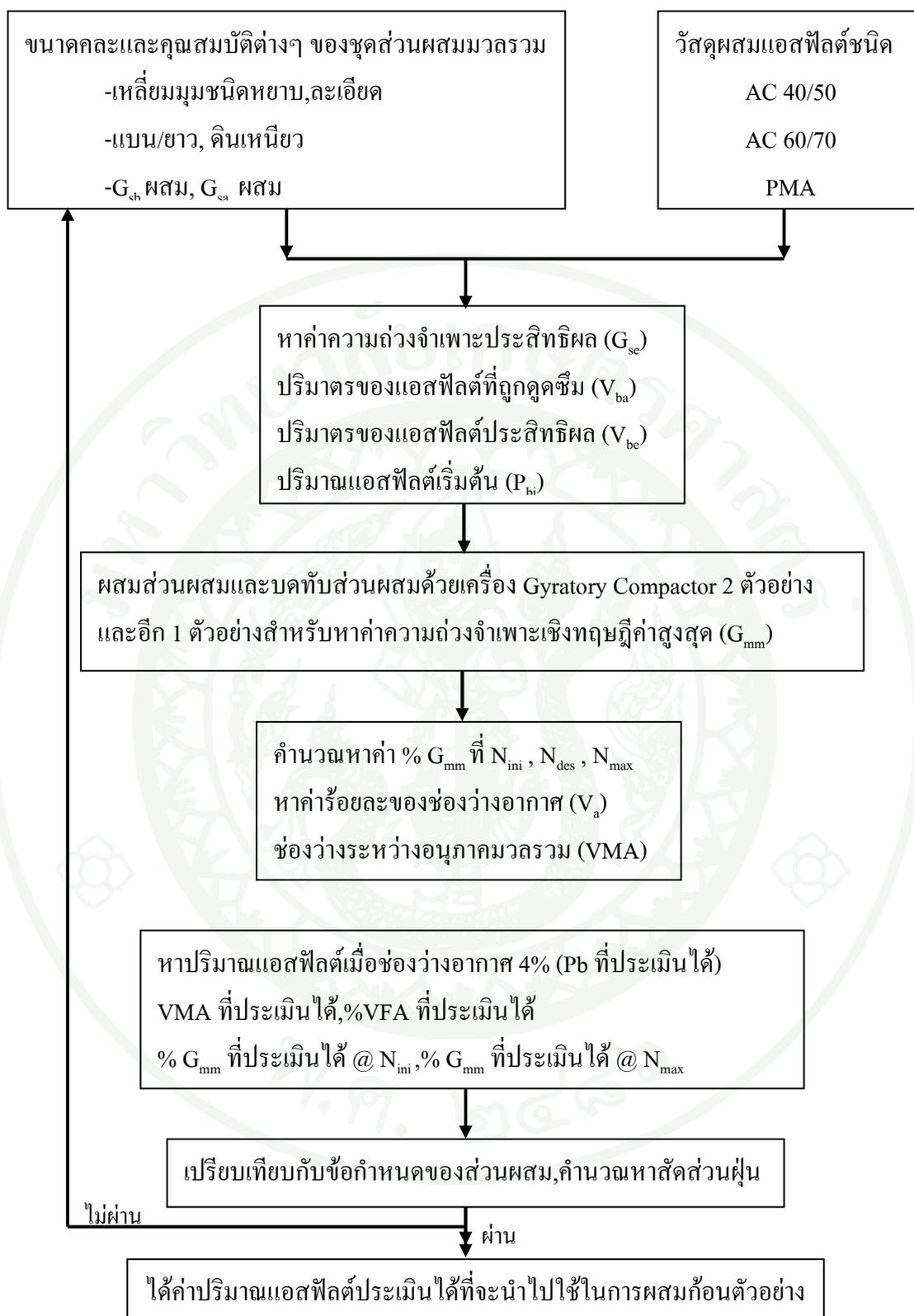
$$G_{mm} = \frac{D}{A + D - E} \quad (35)$$

เมื่อ  $D =$  น้ำหนักของตัวอย่างในอากาศ  
 $A =$  น้ำหนักของ Flask ในน้ำ  
 $E =$  น้ำหนักของ Flask + น้ำหนักตัวอย่างในน้ำหลังจากดูดฟองอากาศส่วนเกินออกไปแล้ว

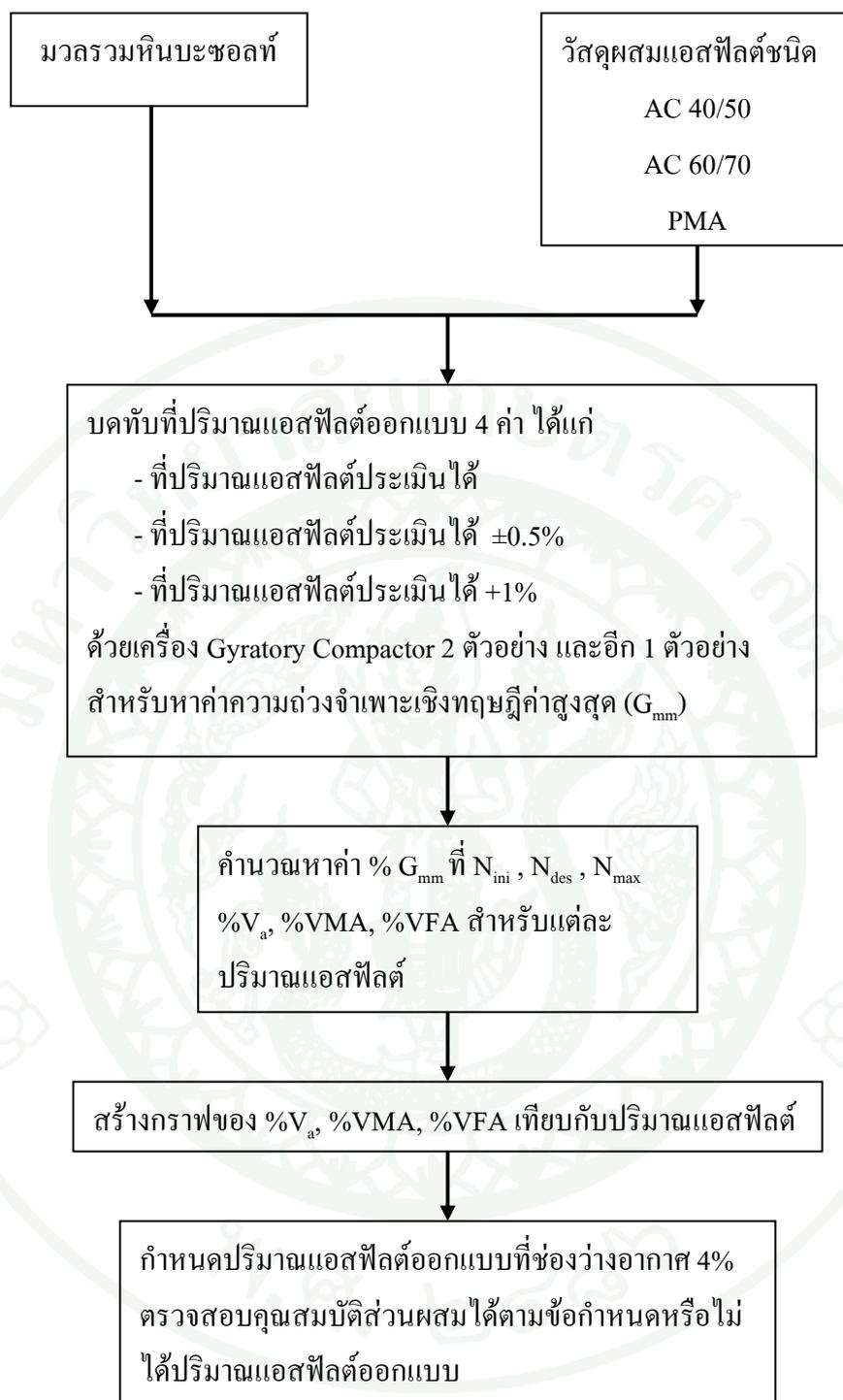
การคำนวณหาความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง (Bulk Density)

$$DB = \frac{ACa}{ACs - ACw} \quad (36)$$

เมื่อ  $DB =$  ความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง  
 $ACa =$  น้ำหนักก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศ  
 $ACs =$  หนักก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศเมื่อความชื้น (สภาพ Saturated Surface Dry)  
 $ACw =$  น้ำหนักก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในน้ำ



ภาพที่ 21 แสดงขั้นตอนการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ยางที่จะใช้ในการผสมก้อนตัวอย่าง



ภาพที่ 22 แสดงขั้นตอนการหาปริมาณแอสฟัลต์ออกแบบ

#### 4. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสม

##### 4.1 ทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow )

เป็นการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการให้แรงกระทำแบบ Marshall ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1559 ค่าเสถียรภาพคือค่ากำลังรับแรงสูงสุดของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และค่าการไหลคือค่าการยุบตัวของก้อนตัวอย่างเมื่อรับกำลังสูงสุด โดยทั่วไปจึงถือว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าเสถียรภาพสูงมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าเสถียรภาพต่ำ

##### 4.2 ทดสอบหาค่าดัชนีความแข็ง (Strength Index, SI)

เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อความเสียหายจากความชื้นโดยการให้แรงกระทำแบบ Marshall ของแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท.413/2544 เพื่อหาความแข็งแรงที่เหลืออยู่ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตภายหลังการจำลองสภาพความเสียหายเนื่องจากความชื้น วัสดุที่มีค่าดัชนีความแข็ง (ค่าสัดส่วนกำลังรับแรงของก้อนตัวอย่างที่จำลองความเสียหายเนื่องจากความชื้นต่อกำลังรับแรงของก้อนตัวอย่างปกติ) สูงแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่างหินและยางซึ่งจะช่วยต้านทานการเสื่อมสภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากความชื้นได้ดี ซึ่งตามมาตรฐานกรมทางหลวงวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องมีค่าดัชนีความแข็งแรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ค่าดัชนีความแข็งแรง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SI = \frac{\text{Soaked Sample} \times 100}{\text{Unsoaked Sample}} \quad (37)$$

Soaked Sample และ Unsoaked Sample คือ ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบหาเสถียรภาพของก้อนตัวอย่าง

##### 4.3 ค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio)

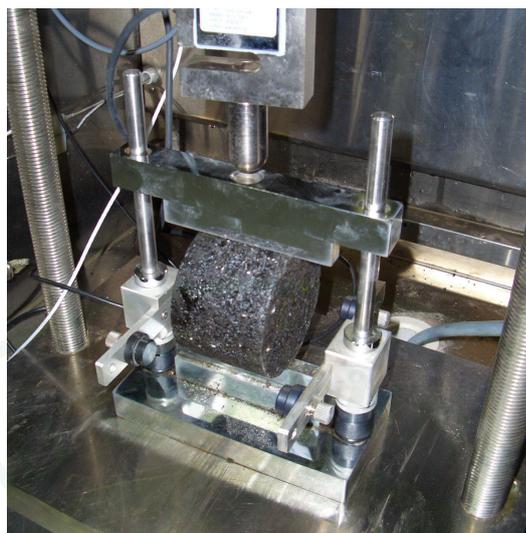
เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อความเสียหายจากความชื้นโดยการให้แรงกระทำแบบแรงดึงทางอ้อม การทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับการหาค่าดัชนีความแข็งแรง

แต่มีวิธีการทดสอบที่ต่างกัน วัสดุที่มีค่า TSR สูงแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่างหินและยาง สามารถต้านทานความเสียหายจากความชื้น ได้ดี ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต จะต้องมามีค่า TSR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 การทดสอบหาค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบ AASHTO T283 (Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage) ซึ่งจะเตรียมก้อนตัวอย่าง โดยทำการบดอัดให้ได้ช่องว่างอากาศ (Air void) มีค่าประมาณ ร้อยละ 7 ทำการจัดชุดก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 3 ก้อน โดยชุดที่ 1 จะเป็นชุดตัวอย่าง ควบคุม (Control Specimens) โดยจะทำการแช่น้ำ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วจึง นำไปทดสอบ สำหรับชุดที่ 2 จะเป็นชุดตัวอย่างเงื่อนไข (Conditioned Specimens) โดยจะทำการดูด อากาศด้วยเครื่องสุญญากาศ (Vacuum) ที่ความดัน 40 cm. Hg โดยใช้เวลา 5 - 10 นาที หลังจากนั้น ทำการต้มก้อนตัวอย่างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำก้อนตัวอย่าง แช่น้ำ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปทดสอบ Indirect Tensile Strength

#### 4.4 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test)

แบ่งตัวอย่างแต่ละกลุ่มออกเป็น 3 ก้อน นำมาทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยทำการ ทดสอบที่อุณหภูมิ 5,20,35,50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบจะต้องนำตัวอย่างเข้าไปใน ตู้ควบคุมอุณหภูมิอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อน แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยการทดสอบจะให้ น้ำหนักด้วยอัตราเร็ว 50.8 มิลลิเมตรต่อนาที (2 นิ้วต่อนาที) จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย บันทึก น้ำหนักสูงสุดแล้วทำการคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม

โดยอัตราการให้น้ำหนักนั้น อ้างอิงจากมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D 6931 - Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures การติดตั้งก้อนตัวอย่างจะทำการติดตั้งดังภาพที่ 23 และการคำนวณในสมการที่ (1)

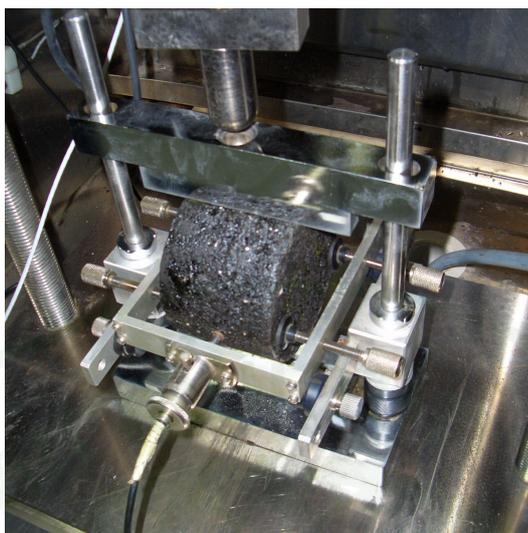


ภาพที่ 23 การติดตั้งก่อนตัวอย่างในการทำ Indirect Tensile Strength Test

#### 4.5 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test)

แบ่งตัวอย่างแต่ละกลุ่มออกเป็น 3 ก้อน นำมาทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยการติดตั้งก่อนตัวอย่างจะกระทำในลักษณะเดียวกับการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม แต่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ LVDTs (Linear Variable Differential Transducers) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างเพิ่มเข้าไป เพื่อให้สามารถนำค่าการขยายตัวออกไปคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว ดังภาพที่ 24 และการคำนวณในสมการที่ (2)

การทดสอบจะทำการให้น้ำหนักกดในลักษณะกระทำซ้ำ โดยใช้การขยายตัวของก้อนตัวอย่าง (Target Peak Deformation) เท่ากับ  $5 \mu\text{m}$  และช่วงเวลาการให้น้ำหนัก (Loading Pulse Width) เท่ากับ 0.1 วินาที และช่วงเวลา Pulse Repetition Period เท่ากับ 1 วินาที รูปร่างของการกดน้ำหนัก (Loading Waveshape) จะกำหนดให้เป็นรูป Haversine ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D 4123-82 และ BS DD 213: 1993

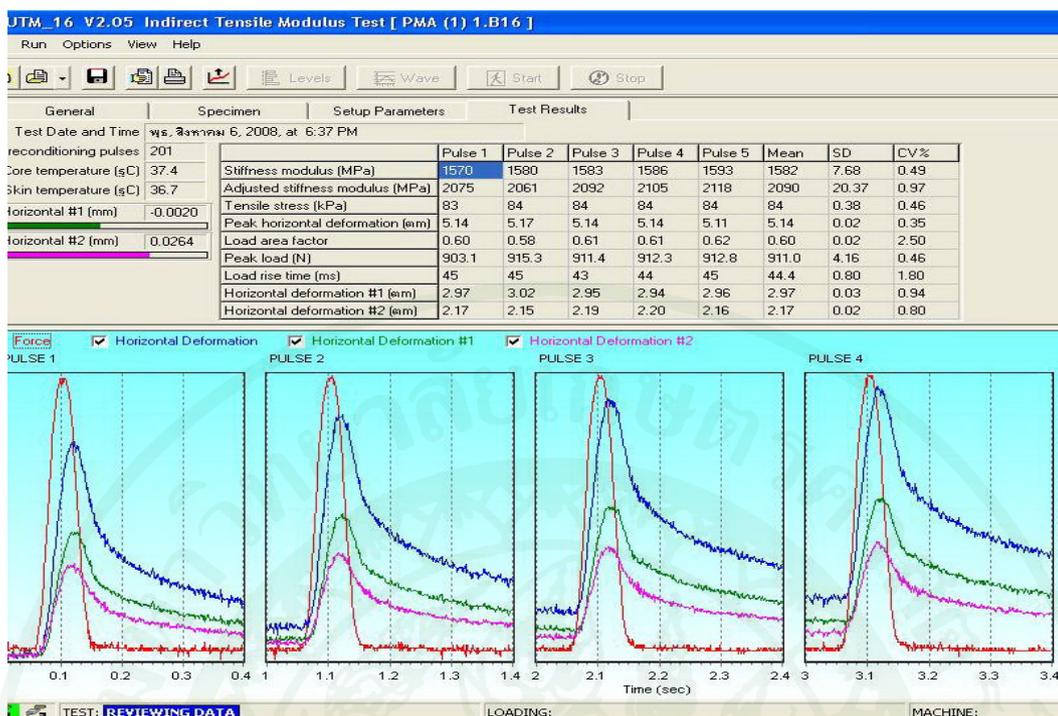


ภาพที่ 24 การติดตั้งก่อนตัวอย่างในการทำ Indirect Resilient Modulus Test

การเก็บข้อมูลและการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของเครื่อง UTM-14P ทำการคำนวณ โดยค่าโมดูลัสคืนตัวที่ใช้จะทำการทดสอบที่ 200 รอบก่อน แล้วทำการเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายที่มีค่าการคืนตัวของที่ ในแต่ละก่อนจะทำการทดสอบ 2 ทิศทาง โดยค่าต่างกัน 90 องศาตามแนวที่ขีดไว้ โดยที่ค่าร้อยละการกระจายตัวเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย (% CV) ต่างกันไม่เกินร้อยละ 10

โดยการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว จะต้องใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ช่วยในการคำนวณ ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง คือ 0.30 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 5 และ 20 องศาเซลเซียส, 0.35 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและ 0.40 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวได้จากโปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากโปรแกรม UTM 16 V2.05  
Indirect Tensile Resilient Modulus Test

#### 4.6 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านความต้านทานต่อความล้าที่เกิดขึ้นกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้อุณหภูมิ 35°C จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยความเครียดที่กระทำอยู่ในช่วง 100 -500 Microstrain โดยการให้น้ำหนักกระทำประกอบไปด้วยช่วง Load-Unload เท่ากับ 0.1 วินาที ในลักษณะ Haversine และมีช่วง Rest Period เท่ากับ 0.9 วินาที ซึ่งอ้างอิงมาตรฐานวิธีการทดสอบ BS DD ABF: 1995 สำหรับขั้นตอนการทดสอบ Indirect Tensile Fatigue Test คือ

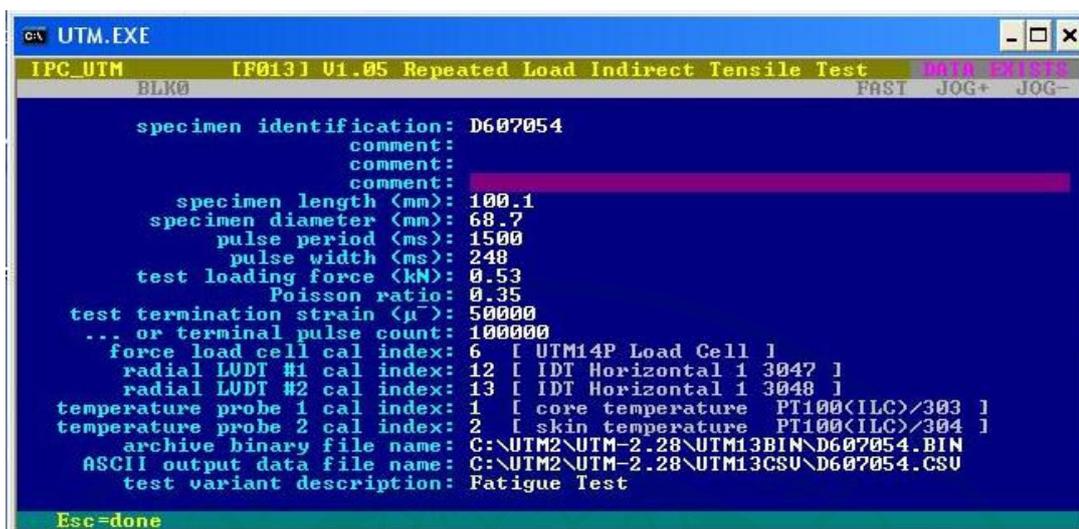
1. นำก้อนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของก้อนตัวอย่างด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ ด้วยความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 26 โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ครั้ง โดยวัดห่างกัน 180 องศา และความหนาทำการวัด 4 ครั้ง โดยวัด

ห่างกัน 90 องศาแล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของก้อนตัวอย่าง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ใส่ลง โปรแกรม UTM V1.05 Repeated Load Indirect Tensile Test

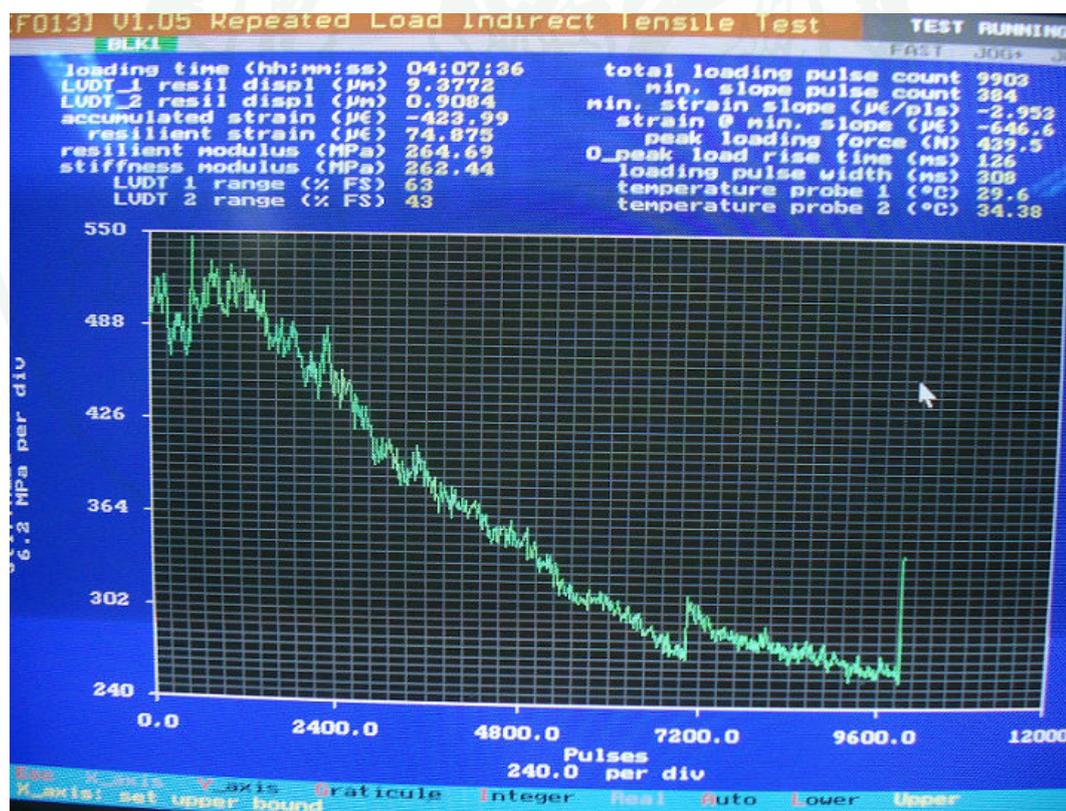


ภาพที่ 26 แสดงวิธีการวัดก้อนตัวอย่าง

2. ก่อนการทดสอบจะทำการแช่ตัวอย่างไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบได้อุณหภูมิตามต้องการ
3. นำก้อนตัวอย่างใส่เครื่องทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบ Indirect Resilient Modulus Test เปิดโปรแกรมและกรอกข้อมูลของก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 27 โดยหน่วยแรงเริ่มต้นจะคำนวณจากค่า Resilient Modulus และค่า Strain 100 Microstrain (จะทำการทดสอบก้อนตัวอย่างที่ค่า Strain 100, 200, 300, 400 และ 500 Microstrain แต่ละค่าจำนวน 3 ก้อนตัวอย่าง) เปิดเครื่องทดสอบค่าโมดูลัสเริ่มต้นที่แท้จริงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าหน่วยแรงที่ใช้ทดสอบที่ถูกต้องใหม่
4. ทำการทดสอบจนกระทั่งค่าโมดูลัสลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่าโมดูลัสเริ่มต้น จึงถือว่าก้อนตัวอย่างวิบัติเนื่องจากความล้าและบันทึกค่าจำนวนครั้งที่กระทำพร้อมทั้งค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นการสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการทำงาน และเก็บข้อมูลผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง UTM-14P ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 27 แสดงโปรแกรมการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากการล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม



ภาพที่ 28 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม

#### 4.7 การทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test)

เพื่อหาค่าการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบ Dynamic Creep Test คือ

1. นำก้อนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของก้อนตัวอย่างด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ด้วยความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ครั้ง โดยวัดห่างกัน 180 องศา และความหนาทำการวัด 4 ครั้ง โดยวัดห่างกัน 90 องศา เพื่อนำข้อมูลที่ได้ใส่ลงในโปรแกรม UTS005 1.30 Simple Performance Flow Test เป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบ Dynamic Creep Test
2. ก่อนการทดสอบจะทำการแช่ตัวอย่างไว้ในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบได้อุณหภูมิตามต้องการ
3. นำก้อนตัวอย่างใส่ถุงยางเพื่อจะให้เกิดแรงดันด้านข้าง (Confining Stress) 100 % ทำการเปิดเครื่อง Simple Performance Test



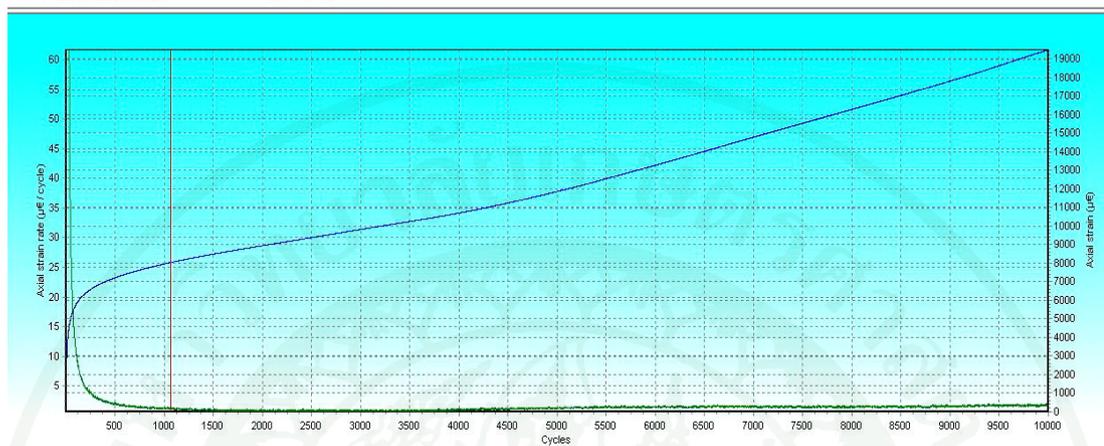
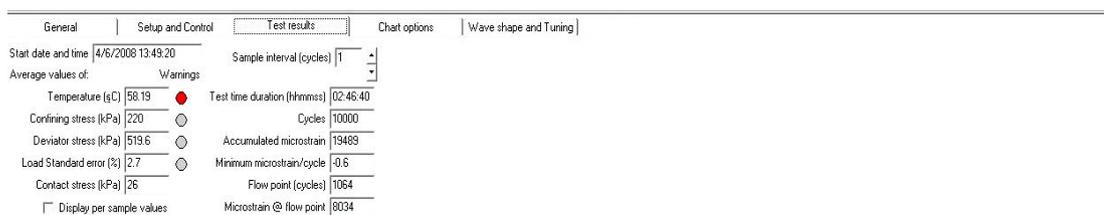
ภาพที่ 29 แสดงวิธีการใส่ถุงยางเพื่อจะให้เกิดแรงดันด้านข้าง (Confining Stress)

4. เปิดฝาเครื่องเพื่อทำการติดตั้งก้อนตัวอย่างในเครื่อง Simple Performance Test แล้ว ปิดฝาเครื่อง ก่อนทำการทดสอบรอบประมาณ 15 นาที เพื่อให้เครื่องทำการปรับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ

5. ทำการทดสอบและการทดสอบจะหยุดลงเมื่อครบ 10,000 Cycles หรือ 50,000 Microstrain เนื่องจากเป็นค่าที่กำหนดไว้ในการทดสอบ จะทำการทดสอบ 3 ก้อนตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย ในการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยวบตัวถาวร โดยวิธี Dynamic Creep Test



ภาพที่ 30 การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ Dynamic Creep Test



ภาพที่ 31 การทดสอบ Dynamic Creep Test ที่ได้จากโปรแกรม UTS005 1.30 Simple Performance Flow Test

หลังจากการทดสอบจบลงทำการอ่านค่า Strain Rate ที่มีแนวโน้มต่ำที่สุดโดยถือว่่าก่อน ตัวอย่างเริ่มเกิดความเสียหายจากการขูดตัวถาวร

## ผลและวิจารณ์

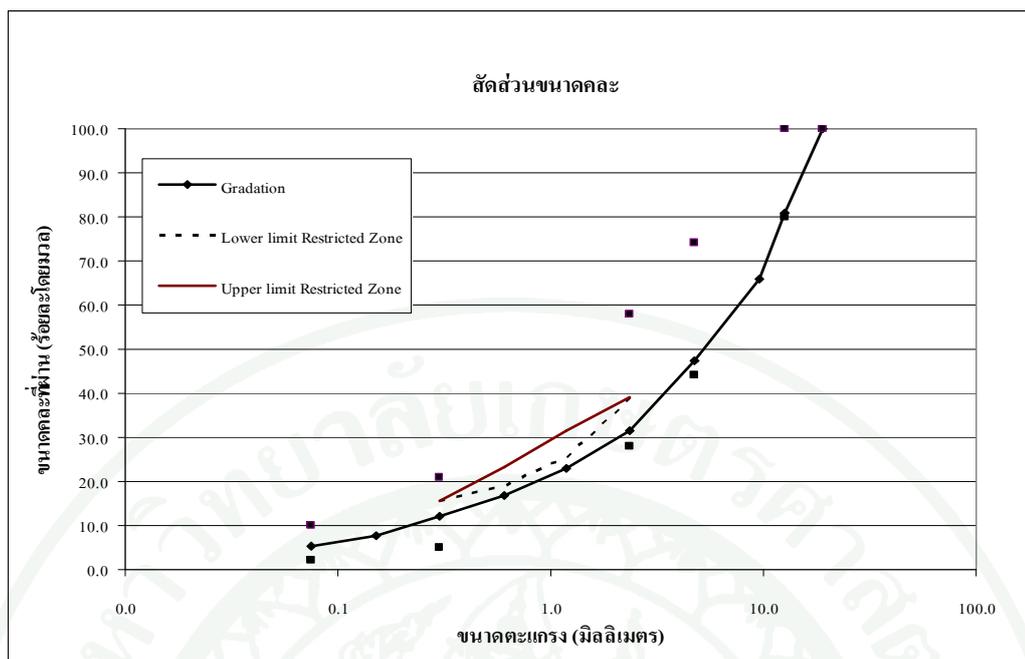
### ผลการตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม

จากการทดสอบคุณสมบัติของหินบะซอลท์ที่ได้มาจากโครงการก่อสร้างสายทางหลวง หมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย ถึง อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

สำหรับการเรียงตัวการจัดขนาดผลของมวลรวมได้ทำการพิจารณาถึงเขตข้อจำกัด (Restricted Zone Boundary) ผ่านตะแกรงเพื่อไม่ให้ขนาดผลผ่านเข้าไปในช่วงเขตจำกัด ซึ่งผลการจัดขนาดผลของมวลรวมอยู่ในข้อกำหนด เป็นไปตามตารางที่ 15 และภาพที่ 32 โดยอัตราส่วนที่เลือกใช้ในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอัตราส่วนผสมเป็น Bin 1: Bin 2: Bin 3: Bin 4= 40:18:20:22

### ตารางที่ 15 การจัดขนาดผลของมวลรวมที่ใช้ทดสอบ

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณการผ่านตะแกรง(ร้อยละ โดยมวล)						
	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	ใช้	มาตรฐาน	เกณฑ์
19 (3/4)			100.0	100.0	100.0	100	100
12.5 (1/2)			86.2	25.8	80.9	80-100	76-86
9.5 (3/8)		100.0	37.7	1.0	65.8	-	61-71
4.75 (#4)	100.0	39.2	1.2	0.0	47.3	44-74	42-52
2.36 (#8)	78.2	0.9	0.2		31.5	28-58	27-37
1.18 (#16)	57.4	0.0	0.0		23.0	-	19-27
0.600 (#30)	42.1				16.8	-	13-21
0.300 (#50)	30.4				12.2	5-21	8-16
0.150 (#100)	19.0				7.6	-	5-11
0.075 (#200)	13.3				5.3	2-10	4-6
อัตราส่วนผสม	40	18	20	22			



ภาพที่ 32 กราฟแสดงการจัดขนาดละเอียดของมวลรวมที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบวัสดุหินบะซอลท์ที่ใช้ออกแบบก้อนตัวอย่าง

Description	Bin 1			Bin			Total
	Passing	Retained	Total	2	3	4	
Mix Proportion (%)	-		40	18	20	22	100
Bulk Specific Gravity	-	2.651	2.683	2.687	2.693	2.689	2.687
Apparent Specific Gravity	2.908	2.901	2.902	2.936	2.929	2.921	2.918
Effective Specific Gravity	-	-	-	-	-	-	-
Water Absorption (%)	-	3.21	-	3.16	2.99	2.95	-
เหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด (%) ไม่น้อยกว่า 45 %		45.20		-	-	-	-
เหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ (%) ไม่น้อยกว่า 90 %		-		100	100	100	-
ความแบนและความยาว ของอนุภาค (%) ไม่นเกิน 10 %		-		8.09	3.63	2.95	-
Flakiness Index (%) ไม่นเกิน 35 %				42	24	12	23
Elongation Index (%) ไม่น้อยกว่า 5 %				10	18	13	15
Asphalt Absorption (%)		AC 40-50=0.43		AC 60-70=0.43		PMA=0.43	
Los Angeles Abrasion (%) ไม่นเกิน 40 %					18.3%		
Soundness (%) ไม่นเกิน 9 %					Coarse Agg 3/4" =1.9 %, Fine Agg = 3.4 %		
Sand Equivalent (%) ไม่น้อยกว่า 50 %					72%		

เมื่อพิจารณาถึงขนาดคละและการทดสอบวัสดุเบื้องต้นของมวลรวมที่ใช้แล้วจะเห็นได้ว่าเป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวงและข้อเสนอแนะของซูเปอร์เพฟที่ใช้ในการก่อสร้างถนน

### ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

สำหรับการออกแบบก่อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้ใช้การจัดขนาดคละของกรมทางหลวง โดยกรมทางหลวงใช้ออกแบบโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย ถึง อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา และได้ทำการออกแบบเพื่อทำนายหาเปอร์เซ็นต์ยางแอสฟัลต์ที่จะใช้ในการผสมก่อนตัวอย่างได้โดย

หาความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ ( $G_{se}$ ) ของส่วนผสมได้จากสมการที่ (16)

$$G_{se} = 2.687 + 0.8(2.918 - 2.687)$$

$$G_{se} = 2.872$$

หาปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในมวลรวม ( $V_{ba}$ ) ได้จากสมการที่ (17)

$$V_{ba} = \frac{0.95 \times (1 - 0.04)}{\left(\frac{0.05}{1.02} + \frac{0.95}{2.872}\right)} \times \left(\frac{1}{2.687} - \frac{1}{2.872}\right)$$

$$V_{ba} = 0.0574 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

หาปริมาณของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ ( $V_{be}$ ) ได้จากสมการที่ (18)

$$V_{be} = 0.176 - 0.675 \log(12.5)$$

$$V_{be} = 0.102 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

สำหรับปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้น ( $P_{bi}$ ) หาได้จากสมการที่ (19) และ (20)

$$W_s = \frac{0.95 \times (1 - 0.04)}{\left(\frac{0.05}{1.02} + \frac{0.95}{2.872}\right)}$$

$$W_s = 2.401 \text{ กรัม}$$

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{[G_b \times (V_{be} + V_{ba})] + W_s} \times 100$$

$$P_{bi} = \frac{1.02 \times (0.102 + 0.0574)}{[1.02 \times (0.102 + 0.0574)] + 2.401} \times 100$$

$P_{bi}$  = ร้อยละ 6.34 โดยน้ำหนักของมวลรวม

ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้วัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 6.34 ตามค่าปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้นดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ร้อยละ 6.34

จำนวนที่บดอัด (รอบ)	AC 60/70			AC 40/50			PMA		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
Gmb ที่ประเมินได้	2.074	2.331	2.369	2.109	2.371	2.410	2.099	2.344	2.380
Gmb ที่วัดได้		2.453			2.467			2.462	
Factor		1.036			1.024			1.034	
Gmb ปรับแก้	2.148	2.414	2.453	2.159	2.427	2.467	2.171	2.425	2.462
Gmm ที่วัดได้		2.473			2.472			2.472	
% Gmm	87.0	97.5	99.1	87.4	98.0	99.5	87.6	98.0	99.5
Va(%)	13.0	2.5	0.9	12.6	2.0	0.5	12.4	2.0	0.5
VMA (%)		16.0			15.5			15.5	
% ยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้		5.75			5.53			5.53	

จากการทำนายได้ค่าร้อยละของใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด AC 40/50, 60/70 และ PMA คือ ร้อยละ 5.53, 5.75 และ 5.53 โดยน้ำหนักของมวลรวมตามลำดับ จากนั้นหาค่าคุณสมบัติของ ส่วนผสมเพื่อกำหนดปริมาณแอสฟัลต์ออกแบบ โดยบดทับที่ปริมาณแอสฟัลต์ 4 ค่า ได้แก่ ที่ ปริมาณแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ ที่ปริมาณแอสฟัลต์ที่ประเมินได้  $\pm 0.5\%$  และที่ปริมาณแอสฟัลต์ที่ ประเมินได้  $+1.0\%$  ได้ผลดังตารางที่ 18, 19, 20 และ 21

ตารางที่ 18 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ -0.5%

ชนิดยาง (%ยางที่ใช้)	AC 60/70 (5.25%)			AC 40/50 (5.03%)			PMA (5.03%)		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
จำนวนที่บดอัด (รอบ)									
Gmb ที่ประเมินได้	2.046	2.290	2.326	2.023	2.281	2.314	2.073	2.317	2.354
Gmb ที่วัดได้		2.423			2.420			2.425	
Factor		1.042			1.046			1.030	
Gmb ปรับแก้	2.132	2.385	2.423	2.115	2.385	2.420	2.136	2.387	2.425
Gmm ที่วัดได้		2.509			2.518			2.517	
% Gmm	84.6	95.1	96.6	84.6	94.7	96.1	84.7	94.8	96.4
Va(%)	15.4	4.9	3.4	15.4	5.3	3.9	15.3	5.2	3.6
VMA (%)		15.9			15.7			15.7	
VFA (%)		69.2			66.2			66.7	

ตารางที่ 19 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้

ชนิดยาง (%ยางที่ใช้)	AC 60/70 (5.75%)			AC 40/50 (5.53%)			PMA (5.53%)		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
จำนวนที่บดอัด (รอบ)									
Gmb ที่ประเมินได้	2.089	2.350	2.388	2.062	2.297	2.333	2.026	2.271	2.300
Gmb ที่วัดได้		2.444			2.434			2.442	
Factor		1.023			1.043			1.062	
Gmb ปรับแก้	2.137	2.405	2.444	2.151	2.397	2.434	2.151	2.411	2.442
Gmm ที่วัดได้		2.492			2.500				
% Gmm	85.6	96.5	98.0	86.1	95.9	97.4	86.2	96.3	97.7
Va(%)	12.78	3.5	3.03	13.9	4.1	2.6	13.8	3.7	2.3
VMA (%)		15.7			15.7			15.4	
VFA (%)		77.5			74.1			75.8	

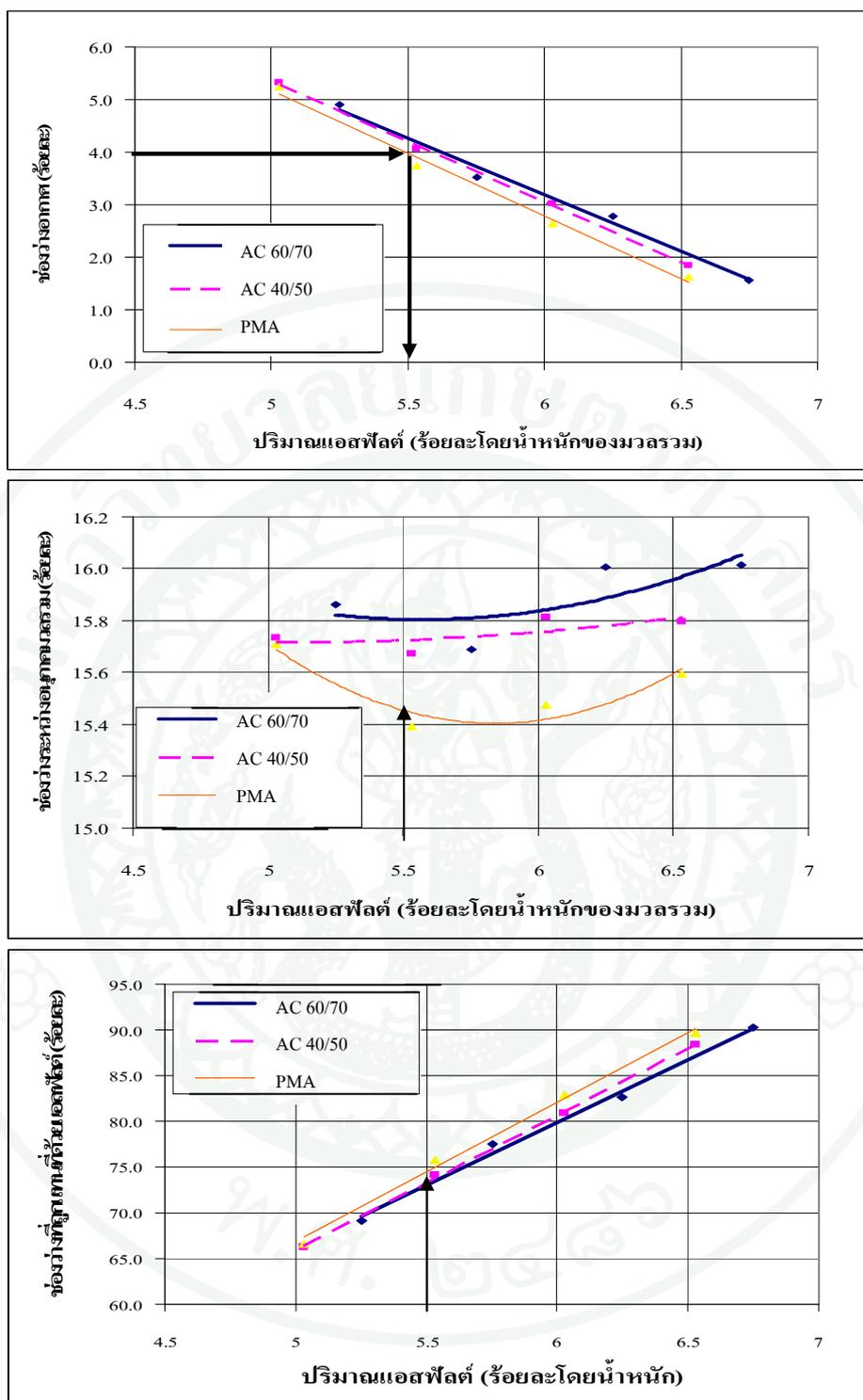
ตารางที่ 20 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ +0.5%

ชนิดยาง (%ยางที่ใช้)	AC 60/70 (6.25%)			AC 40/50 (6.03%)			PMA (6.03%)		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
จำนวนที่บดอัด (รอบ)									
Gmb ที่ประเมินได้	2.061	2.336	2.380	2.067	2.311	2.345	2.050	2.291	2.328
Gmb ที่วัดได้		2.450			2.443			2.455	
Factor		1.030			1.042			1.055	
Gmb ปรับแก้	2.122	2.405	2.450	2.153	2.408	2.443	2.162	2.417	2.455
Gmm ที่วัดได้		2.476			2.482			2.483	
% Gmm	86.0	97.2	98.9	86.6	97.0	98.5	87.1	97.4	98.8
Va(%)	14.0	2.8	1.1	13.4	3.0	1.5	12.9	2.6	1.2
VMA (%)		16.0			15.8			15.5	
VFA (%)		82.7			80.9			82.9	

ตารางที่ 21 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ +1%

ชนิดยาง (%ยางที่ใช้)	AC 60/70 (6.75%)			AC 40/50 (6.53%)			PMA (6.53%)		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
จำนวนที่บดอัด (รอบ)									
Gmb ที่ประเมินได้	2.082	2.340	2.374	2.052	2.286	2.317	2.036	2.278	2.309
Gmb ที่วัดได้		2.457			2.456			2.460	
Factor		1.035			1.060			1.066	
Gmb ปรับแก้	2.155	2.421	2.457	2.175	2.423	2.456	2.169	2.427	2.460
Gmm ที่วัดได้		2.458			2.466			2.466	
% Gmm	87.3	98.4	100.0	87.9	98.2	99.6	87.8	98.4	99.8
Va(%)	12.7	1.6	0.0	12.1	1.8	0.4	12.2	1.6	0.2
VMA (%)		16.0			15.8			15.6	
VFA (%)		90.2			88.3			89.7	

จากข้อมูลข้างต้นนี้สามารถสร้างกราฟของช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เทียบกับปริมาณแอสฟัลต์ ดังแสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 กราฟแสดงช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เทียบกับปริมาณแอสฟัลต์

จากภาพที่ 33 กำหนดปริมาณแอสฟัลต์ออกแบบที่ช่องว่างอากาศ 4% ได้คุณสมบัติของ ส่วนผสมออกแบบดังตารางที่ 22 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนฝุ่นที่ได้คือ 1.6 และ 1.7 ซึ่งเกินข้อกำหนดคือ 1.2 ตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟจึงต้องทำการเปลี่ยนสัดส่วนขนาดละเอียดใหม่ แต่เนื่องจากว่าการ จัดขนาดละเอียดของมวลรวมอ้างอิงจากโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย ถึง อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา จึงไม่มีการปรับเปลี่ยนขนาดละเอียดใหม่ โดยใช้ขนาด ละเอียดเดิมคือ Bin 1: Bin 2: Bin 3: Bin 4= 40:18:20:22 และคุณสมบัติส่วนผสมอื่นๆ เป็นไปตาม ข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ เพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างแอสฟัลต์ AC 40/50, AC 60/70 และ PMA จึงทำการปรับค่าแอสฟัลต์ออกแบบเป็นร้อยละ 5.5 เท่ากันทั้งสามชนิด

ตารางที่ 22 คุณสมบัติส่วนผสมออกแบบ

คุณสมบัติส่วนผสม	ผลการทดลอง			ข้อกำหนด
	AC 60/70	AC 40/50	PMA	
Va, %	4.0	4.0	4.0	4.0
ปริมาณแอสฟัลต์, %	5.6	5.6	5.5	-
VMA%	15.9	15.7	15.5	ต่ำสุด 13.0
VFA%	74.0	74.0	74.0	65 -75
สัดส่วนฝุ่น	1.6	1.6	1.7	0.6- 1.2
%Gmm@N <sub>mi</sub> = 9	85.1	86.1	86.1	< 89
%Gmm@N <sub>max</sub> =220	97.3	97.5	97.6	<98
เมื่อทำการปรับค่าแล้ว				
Va, %	4.2	4.2	4.0	4.0
ปริมาณแอสฟัลต์, %	5.5	5.5	5.5	-
VMA%	15.8	15.7	15.5	ต่ำสุด 13.0
VFA%	73.0	73.0	74.0	65 -75

## ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

### ผลทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

เป็นค่าที่บ่งบอกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตจะคงทนต่อการพังทลาย การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีน้ำหนักมากระทำต่อก่อนตัวอย่าง เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (Shear) องค์ประกอบที่จะต้านทานแรงเฉือนในส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตคือแรงยึดเกาะ (Cohesion) ระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมและแสดงค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 23 คูรายละเอียดได้ในภาคผนวก พบว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 จะมีค่าเสถียรภาพสูงที่สุด ตามด้วยยาง PMA และยางเกรด 60/70 ตามลำดับ

### ตารางที่ 23 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

Type	Average Stability (lb)	Average Flows (in( 1/100))
AC 60/70	2,971	13
AC 40/50	3,797	14
PMA	3,617	15

โดยข้อกำหนดของกรมทางหลวงให้ค่าเสถียรภาพ (Stability) ไม่น้อยกว่า 2,400 lb และค่าการไหล (Flow) อยู่ระหว่าง 8-16 (1/100 in) พบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

### ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)

เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน หลุดล่อน ของส่วนผสมเมื่อนำไปใช้ทำผิวทาง อันมีสาเหตุมาจากสภาวะแวดล้อมที่วิกฤต และอุณหภูมิของผิวทางที่สูง ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงสูง จะสามารถต้านทานการหลุดร่อนได้สูงกว่าส่วนผสมที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่ำผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรงของวัสดุเชื่อมประสานชนิด AC 40/50,60/70 และ PMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินบะซอลท์พบว่ามีความสัมพันธ์ผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดดังนี้และแสดงค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 24 คูรายละเอียดได้ในภาคผนวก

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)

Type	Strength Index (ร้อยละ)
AC 60/70	86.90
AC 40/50	87.40
PMA	88.80

โดยข้อกำหนดของกรมทางหลวงให้ค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 75 พบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

#### ผลค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio, TSR)

เป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงที่เหลืออยู่ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการให้แรงกระทำแบบแรงดึงทางอ้อมภายหลังการจำลองสภาพความเสียหายเนื่องจากความชื้น จากการทดสอบหาค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึงของส่วนผสมที่ออกแบบไว้จะทำการทดสอบก้อนตัวอย่างโดยหนึ่งชุดตัวอย่างจะทำการทดสอบ 3 ก้อน ซึ่งจากผลการทดสอบในตารางที่ 25 พบว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ข้างทั้ง 3 ชนิดมีค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึงใกล้เคียงกัน และดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก

ตารางที่ 25 ผลการทดสอบการหาสัดส่วนกำลังรับแรงดึง

	AC 60/70	AC 40/50	PMA
Average Dry Strength (kPa)	843	893	957
Average Wet Strength (kPa)	768	819	885
Tensile Strength Ratio %	91.1	91.6	92.5

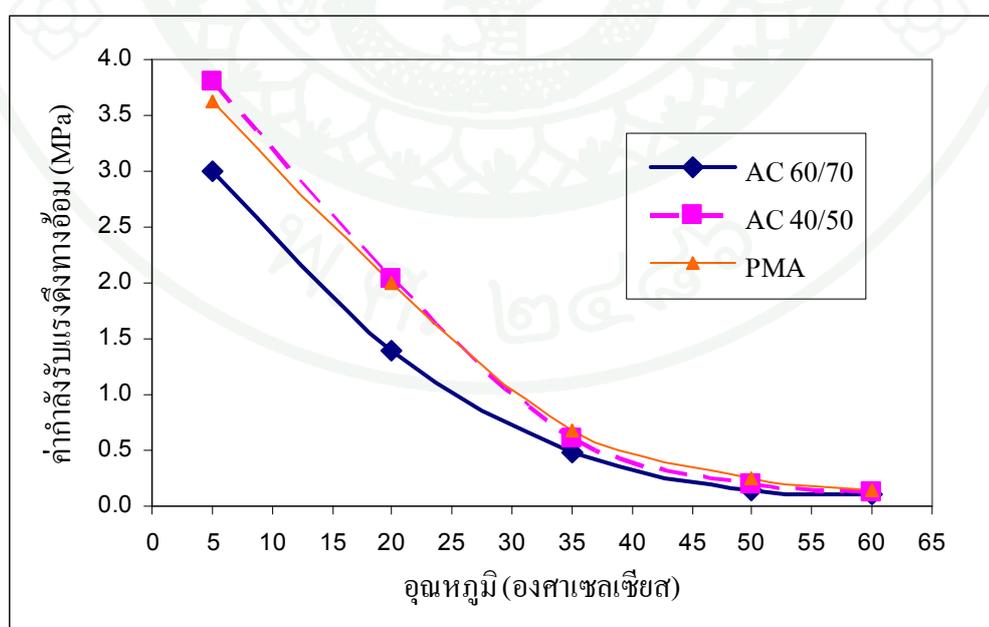
โดยข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟให้ค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio) ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 80 พบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ

### ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test, ITS)

เป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต จากผลการทดสอบก่อนตัวอย่าง 3 ก่อนแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 5,20,35,50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้ดังตารางที่ 26 และภาพที่ 34 รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก โดยเมื่อพิจารณาผลการทดสอบจะพบว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 มีค่า ITS ต่ำที่สุดในทุกอุณหภูมิ ในขณะที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 และ PMA มีค่า ITS ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 26 กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ °C	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (MPa)		
	AC 60/70	AC 40/50	PMA
5	3.005	3.809	3.621
20	1.399	2.040	1.993
35	0.482	0.603	0.680
50	0.148	0.190	0.251
60	0.106	0.126	0.142



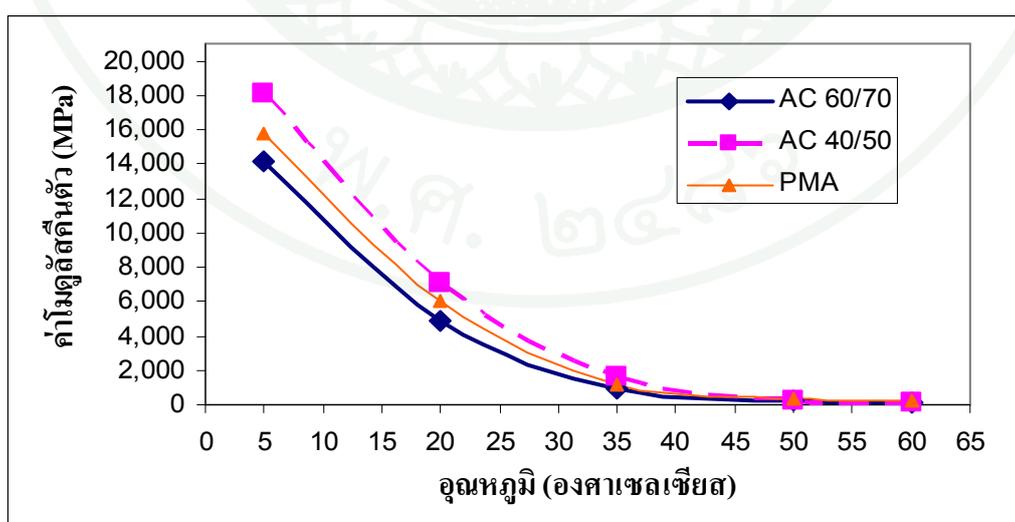
ภาพที่ 34 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ

### ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test, MR)

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 5,20,35,50 และ 60 องศาเซลเซียสโดยการทดสอบทั้ง 2 ทิศทางแต่ละตัวอย่างจะได้ค่าร้อยละการกระจายตัวเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย (% CV) ไม่เกิน 10 % ตารางที่ 27 และภาพที่ 35 ได้แสดงค่าเฉลี่ยผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างและผลการทดสอบอยู่ในภาคผนวก พบว่าแนวโน้มของผลการทดสอบค่า MR ไกล่เคียงกับค่า ITS กล่าวคือวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 มีค่า MR ต่ำที่สุดในทุกอุณหภูมิ ในขณะที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 และ PMA มีค่า MR ไกล่เคียงกัน

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ° C	Resilient Modulus (MPa)		
	60/70	40/50	PMA
5	14,172	18,152	15,792
20	4,914	7,023	6,086
35	973	1,680	1,184
50	205	280	302
60	127	164	222



ภาพที่ 35 กราฟแสดงความค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ ต่างๆ

### ผลการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)

ตารางที่ 28 สรุปผลการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม และได้นำผลการทดสอบไปสร้างกราฟและสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่กระทำ (Stress) หรือค่าความเครียดที่เกิดขึ้น (Strain) กับจำนวนรอบที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะรับแรงกระทำก่อนจะเกิดการเสียหาย (Fatigue Life) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 36 และ 37 ตามลำดับ ตารางที่ 29 แสดงจำนวนรอบของการกระทำซ้ำที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะรับได้เมื่อถูกแรงกระทำจนเกิดความเค้น 100 kPa และความเครียด 200 $\mu$  (microstrain) ที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ที่มาจาก การทดสอบ สำหรับรายละเอียดของแต่ละตัวอย่างอยู่ในภาคผนวก

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบดังที่แสดงในตารางที่ 28 และ 29 และภาพที่ 36 และ 37 แล้วจะพบว่า ก้อนตัวอย่างที่ถูกกระทำด้วยค่า  $\epsilon_{mi}$  สูงกว่าจะมีค่า  $N_f$  ที่ต่ำกว่าซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีด้านความล้า และวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 มีความต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำที่สุด กล่าวคือ เมื่อที่ระดับความเค้น 100 kPa และความเครียด 200 $\mu$  วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 จะเกิดความเสียหายเป็นชนิดแรก ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ระดับความเค้นที่เท่ากัน (100 kPa) วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 จะมี Fatigue Life มากกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ระดับความเครียดที่เท่ากัน (200 $\mu$ ) วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA จะมี Fatigue Life มากกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\epsilon_{mi}$  และ  $N_f$  เมื่อค่า  $R^2$  ที่ได้ประมาณ 0.96 ดังนี้

#### งานวิจัยนี้

$$\text{AC 60/70} \quad \log \epsilon_{mi} = 3.708 - 0.355 \log N_f$$

$$\text{AC 40/50} \quad \log \epsilon_{mi} = 3.956 - 0.418 \log N_f$$

$$\text{PMA} \quad \log \epsilon_{mi} = 3.801 - 0.364 \log N_f$$

#### ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

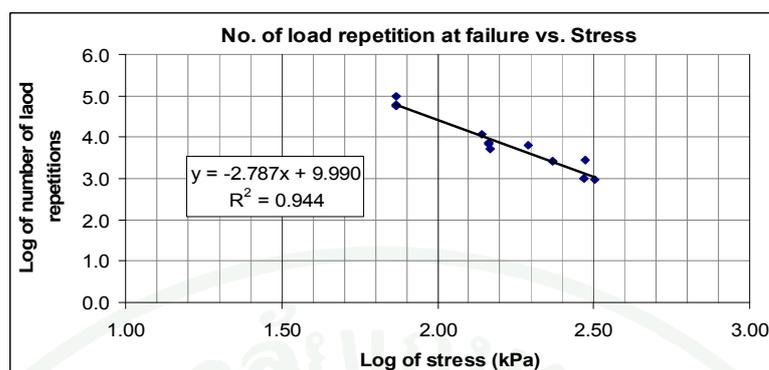
$$\text{เสกชัยและคณะ} \quad \log \epsilon_{mi} = 3.405 - 0.159 \log N_f$$

จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของคุณเสกชัยและคณะ ซึ่งได้ทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความต้านทานความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนาม ดังตารางที่ 28 พบว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีจำนวนรอบกระทำซ้ำที่คำนวณได้ต่ำ

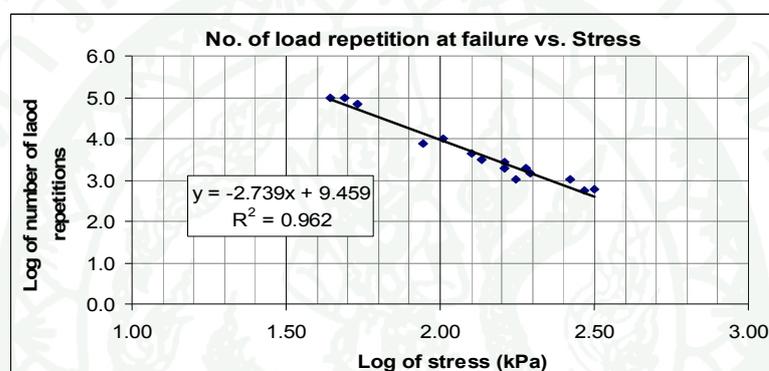
กว่าผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความต้านทานความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนามเมื่อพิจารณาที่ระดับความเครียดที่เท่ากัน (200 $\mu$ ) เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนามได้รับแรงกระทำจากน้ำหนักการจราจรมาบ้างแล้ว และยังมีความแตกต่างกันในรายละเอียดของการทดสอบ เช่น ขนาดผลและคุณสมบัติของวัสดุรวมรวม ชนิดและปริมาณของยางแอสฟัลต์ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 28 จำนวนรอบกระทำซ้ำที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์โดยระบุค่าความเครียดและความเค้น

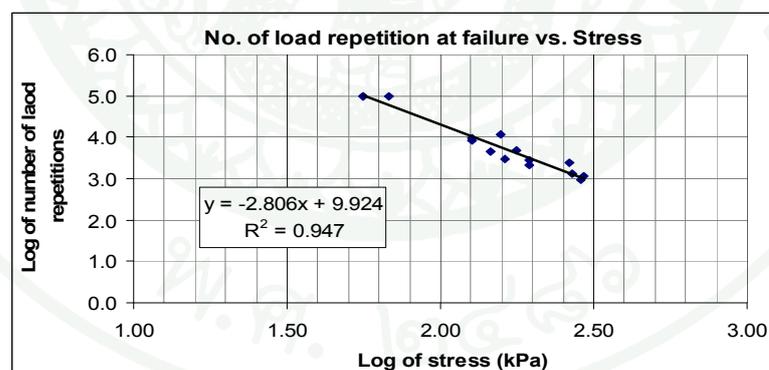
Type	$\epsilon_x$ (200 microstrain)	$\sigma_x$ (100 kPa)
AC 60/70	8,895	9,572
AC 40/50	9,072	26,062
PMA	13,120	20,512
เสกชัยและคณะ	8,774,201	-



ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log of number of load repetitions กับ Log of stress ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50

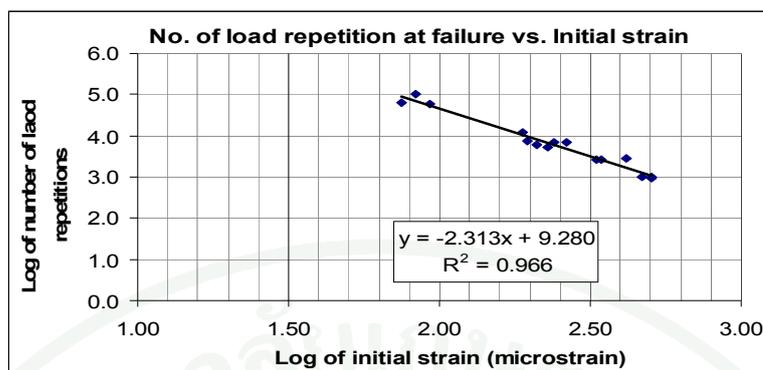


ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log of number of load repetitions กับ Log of stress ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70

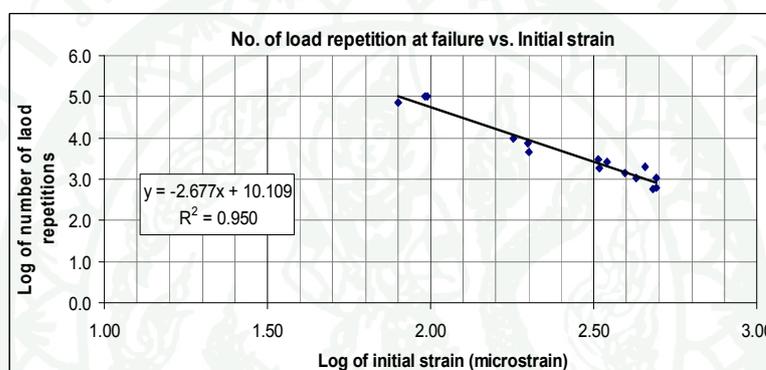


ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log of number of load repetitions กับ Log of stress ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ PMA

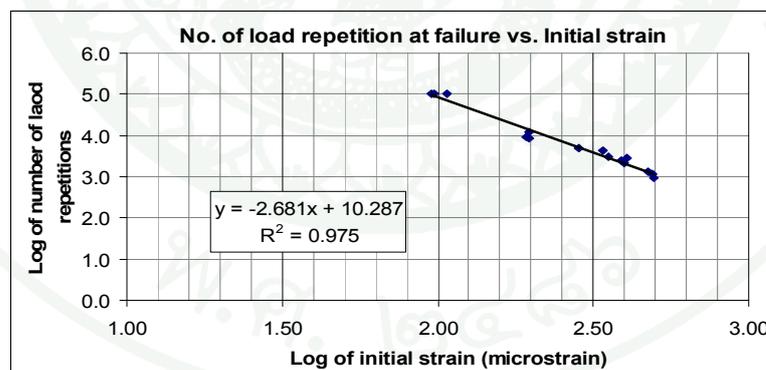
**ภาพที่ 36** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) กับค่าลอการิทึมของค่าความเค้น (Log of stress) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ PMA



ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log of number of load repetitions กับ Log of initial strain ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50



ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log of number of load repetitions กับ Log of initial strain ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70



ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log of number of load repetitions กับ Log of initial strain ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด PMA

ภาพที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกการริ้วของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) กับค่าลอกการริ้วของค่าความเครียดเริ่มต้น (Log of initial strain) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ PMA

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบการแตกร้าวจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์  
คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70 เกรด 40/50 และ PMA

ยางแอสฟัลต์	ก้อนตัวอย่าง	Initial stiffness modulus (MPa)	$\epsilon_x$	$\sigma_x$	จำนวนรอบของการกระทำซ้ำจนเกิด ความเสียหายจากความล้า
AC 60/70	1	1,100	490	263	1,056
	2	1,248	481	293	566
	3	1,322	491	317	606
	4	1,015	394	195	1,450
	5	847	426	176	1,050
	6	728	456	162	1,988
	7	1,184	329	190	1,908
	8	952	347	161	2,660
	9	855	327	136	3,028
	10	1,167	179	102	9,664
	11	902	199	88	7,368
	12	1,296	200	127	4,536
	13	935	97	44	ไม่เสียหาย
	14	1,029	98	49	ไม่เสียหาย
	15	1,394	79	54	70,912
AC 40/50	1	1,624	93	74	58,304
	2	1,805	83	73	ไม่เสียหาย
	3	2,017	75	74	60,992
	4	1,891	211	195	6,216
	5	1,504	189	139	12,000
	6	1,531	196	146	7,168
	7	1,138	263	146	7,032
	8	1,319	228	147	5,160
	9	1,256	239	146	7,008
	10	1,400	343	234	2,624
	11	1,465	415	297	2,828
	12	1,453	330	234	2,612
	13	1,196	502	293	1,010
	14	1,280	469	293	990
	15	1,291	504	317	928
PMA	1	1,197	493	288	960
	2	1,159	474	268	1,300
	3	1,225	490	293	1,112
	4	1,006	397	195	2,144
	5	1,385	389	263	2,452
	6	985	406	195	2,832
	7	880	341	146	4,368
	8	1,278	283	176	4,792
	9	937	354	162	3,068

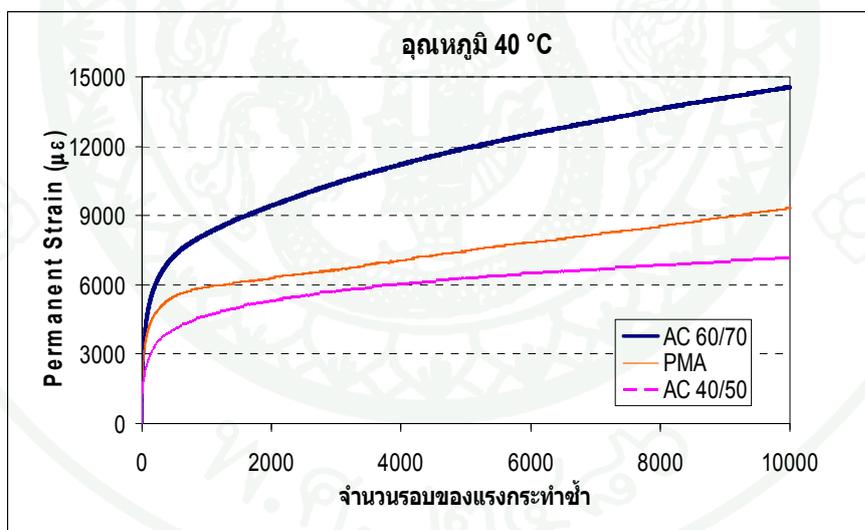
ตารางที่ 29 (ต่อ)

PMA	10	1,637	196	156	11,776
	11	1,323	197	127	8,304
	12	1,343	193	126	9,408
	13	1,428	98	68	ไม่เสียหาย
	14	1,197	96	56	ไม่เสียหาย
	15	1,071	107	56	ไม่เสียหาย

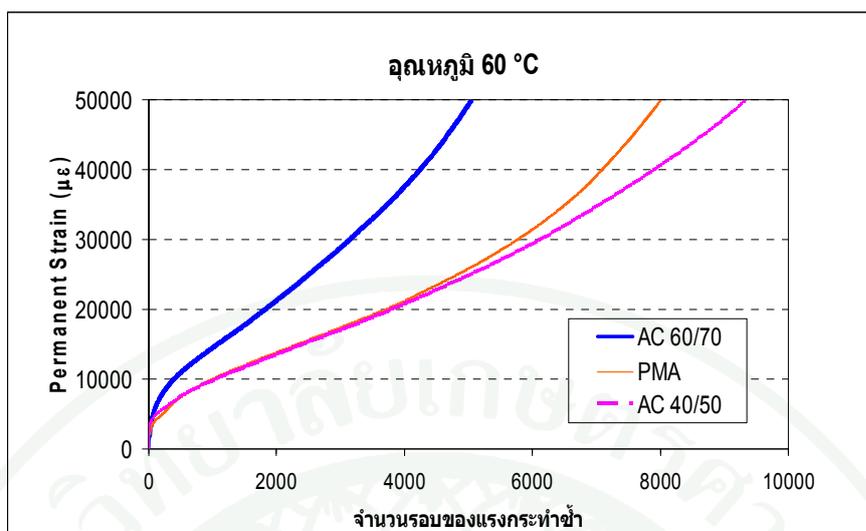
หมายเหตุ “ไม่เสียหาย” = ไม่เกิดความเสียหายเมื่อทดสอบครบ 100,000 รอบ

ผลการทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test)

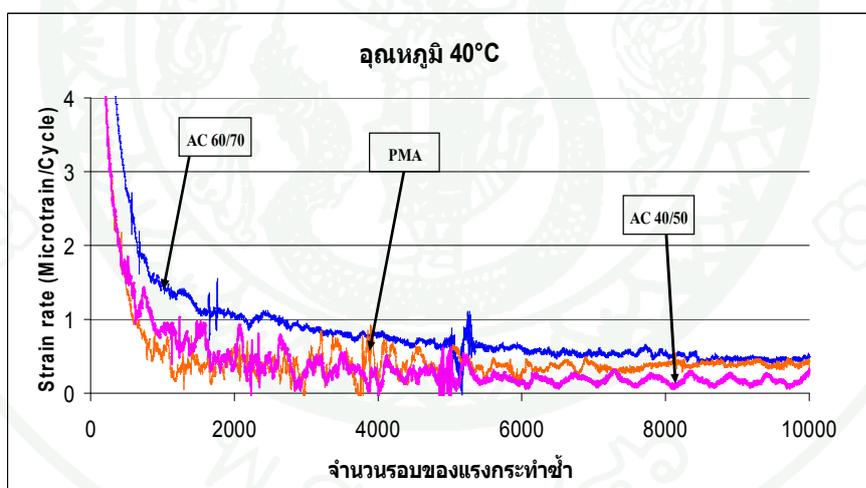
ภาพที่ 38, 39, 40, 41 ตารางที่ 30 ได้แสดงผลการทดสอบค่า Dynamic Creep Test ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส สำหรับรายละเอียดของแต่ละตัวอย่างอยู่ในภาคผนวก



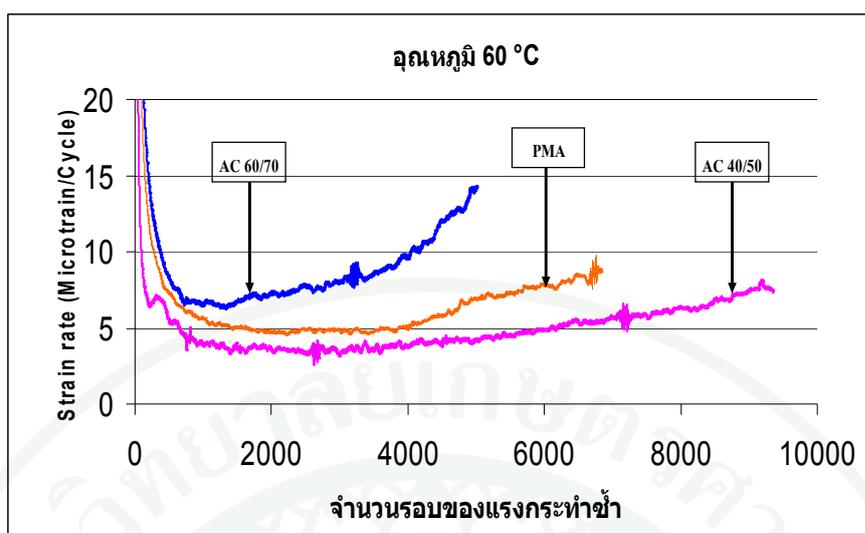
ภาพที่ 38 แสดงผลการทดสอบการคืบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Accumulates Strain ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 39 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Accumulates Strain ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 40 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Strain Rate ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 41 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Strain Rate ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

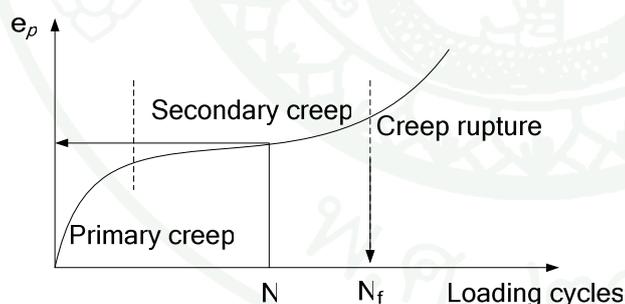
ตารางที่ 30 ผลการทดสอบค่า Dynamic Creep Test ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส

Temp.°C		40		60	
Type	Sample	Flow point (cycle)	Permanent microstrain per cycle	Flow point (cycle)	Permanent microstrain per cycle
AC 60/70	1	5063	1.22	1,226	8.39
	2	5126	1.46	1,335	9.92
	3	4052	1.42	1,271	8.91
	Average	4747	1.37	1,277	9.07
AC 40/50	1	-	0.72	2,350	5.34
	2	-	0.87	2,135	5.19
	3	-	0.80	1,995	5.78
	Average	-	0.80	2,160	5.44
PMA	1	-	0.92	1,215	7.04
	2	-	0.93	2,226	7.31
	3	-	0.85	2,338	6.25
	Average	-	0.90	1,926	6.86

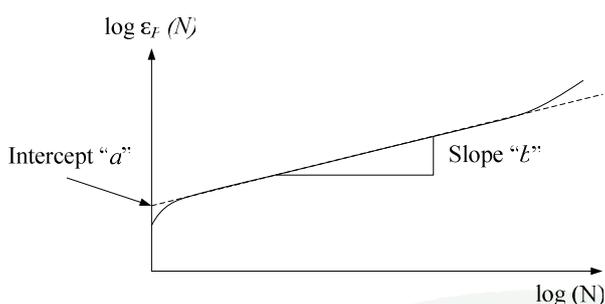
ตารางที่ 30 แสดงผลการทดสอบ Dynamic Creep Test โดยมีจำนวนรอบของการกระทำซ้ำเท่ากับ 10,000 รอบ ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ภาพที่ 38, 39, 40 และ 41 แสดง

ตัวอย่างกราฟผลการทดสอบ Dynamic Creep Test โดยเมื่อพิจารณาผลการทดสอบแล้วจะพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จะมีโอกาสเกิดร่องลือสูงที่สุด เนื่องจากเกิด Flow Point ที่ 40 องศาเซลเซียส ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 และ PMA ไม่เกิด Flow ที่ 40 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาค่าการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งรอบแรงกระทำ จะพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จะมีค่าการยุบตัวถาวรสูงที่สุด ตามด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA และวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 มีค่าการยุบตัวถาวรต่ำที่สุด ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส

อ้างอิงถึงผลงานวิจัยของคุณชนกร ได้กล่าวไว้ว่า ผลการทดสอบที่แสดงอยู่ในรูปของ ผลรวมความเครียดถาวร ( $\epsilon_p$ ) เทียบกับจำนวนครั้งของการให้แรง (Number of Cycle) ดังแสดงใน ภาพที่ 42 โดยค่าความเครียดถาวรภายใต้แรงกระทำคงที่แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ การคืบช่วง เริ่มต้น (Primary Creep) ซึ่งช่วงนี้จะเกิดความเครียดถาวรมากที่จำนวนรอบของการให้แรงน้อย สำหรับการคืบช่วงที่สอง (Secondary Creep) ความเครียดที่เกิดขึ้นจะคงที่เมื่อมีแรงมากระทำ จนกระทั่งการคืบช่วงที่สาม (Creep Rupture) วัสดุจะเกิดความเสียหาย โดยจุดเปลี่ยนความชันของ ช่วงที่สองและช่วงที่สามจะแสดงค่าจำนวนครั้งของการให้แรง ณ จุดเสียหาย (Number of Cycle at Failure,  $N_f$ ) จากการทดสอบจะทำให้สามารถหาค่าความเครียดคืบตัวได้ จากสมการเลขยกกำลัง (Power Model) ได้คือ  $\epsilon_p = aN^b$  เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่จากการทดสอบ (ดูภาพที่ 43)

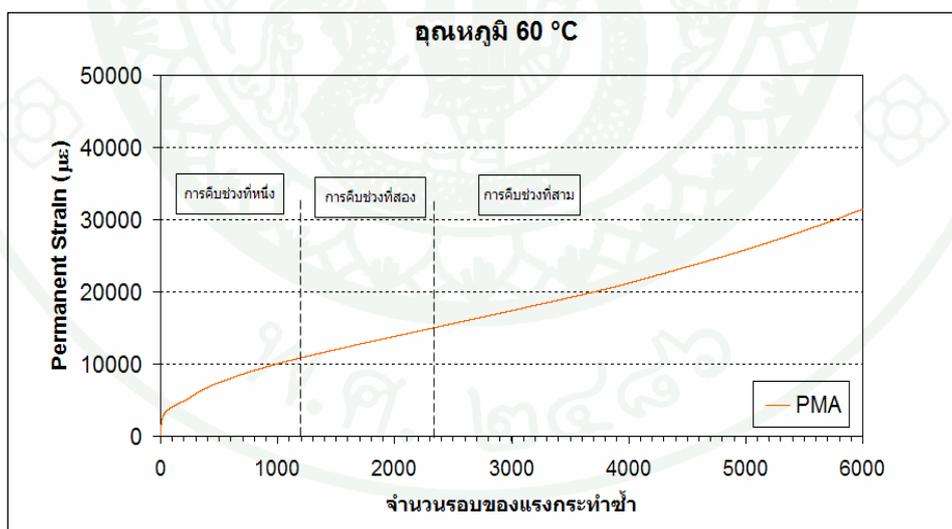


ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมความเครียดถาวรกับจำนวนครั้งของการให้แรง

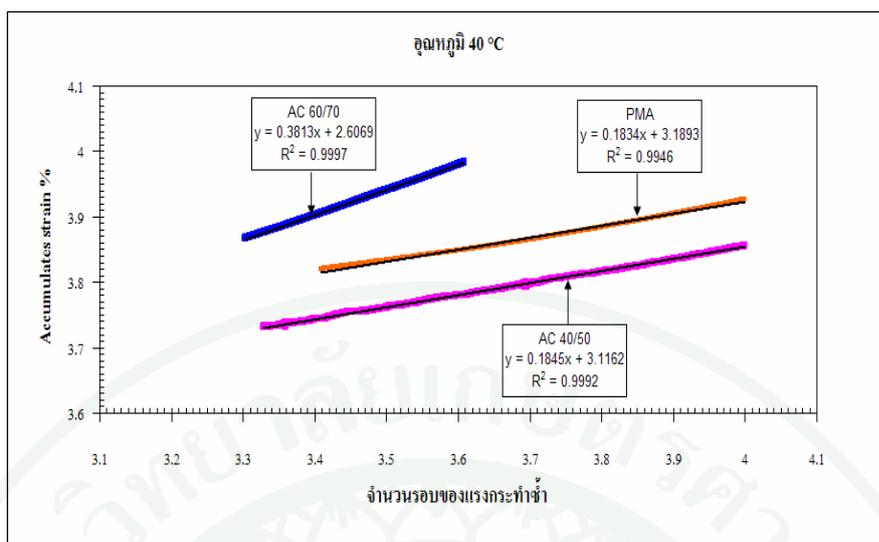


ภาพที่ 43 ความหมายของค่าคงที่  $a$  และ  $b$

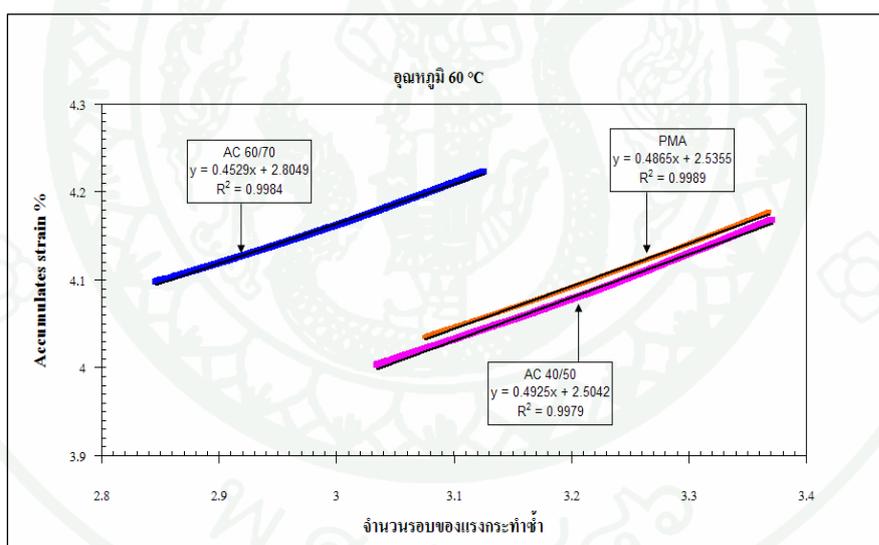
ทางผู้วิจัยจึงได้ลองหาค่า Power Model ของผลการทดสอบซึ่งมีขั้นตอนคือได้เปลี่ยนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมความเครียดถาวรกับจำนวนครั้งของการให้แรงให้อยู่ในรูปลอการิทึม โดยจะพล็อตกราฟเฉพาะช่วงการคืบที่สอง ซึ่งจะหาจุดเริ่มต้นของการคืบช่วงที่สองได้จากการหาค่าเฉลี่ยของค่า Strain Rate ที่คงที่แล้วหาจำนวนรอบเริ่มต้นที่ตรงกับค่าเฉลี่ยของค่า Strain Rate นั้น และจุดปลายของช่วงการคืบที่สองคือจุด Flow Point ดังตัวอย่างภาพที่ 44 จากนั้นหาสมการเส้นตรงของกราฟดังตัวอย่างภาพที่ 45 และ 46 จะได้ Power Model ดังตารางที่ 31



ภาพที่ 44 แสดงตัวอย่างการหาการคืบช่วงที่สอง



ภาพที่ 45 แสดงตัวอย่างการหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$  ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 46 แสดงตัวอย่างการหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$  ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 31 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Power model ที่ทดสอบ

Temp. °C	sample	Type					
		AC 60/70		AC 40/50		PMA	
		a	b	a	b	a	b
40°C	1	3.0893	0.2667	3.1162	0.1845	3.0173	0.2337
	2	2.5790	0.3676	3.3102	0.1576	3.1893	0.1834
	3	2.6069	0.3813	3.2015	0.1760	2.7111	0.3124
60°C	1	2.8049	0.4529	2.5042	0.4925	2.5355	0.4865
	2	3.1099	0.3103	2.2196	0.5422	3.0569	0.3542
	3	2.9009	0.4178	1.8701	0.5853	2.8746	0.4331

จากสมการเลขยกกำลัง (Power Model) ที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการเลขยกกำลังของผลงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 32 โดยการแทนค่าด้วยจำนวนรอบที่เท่ากันพบว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่า Strain สูงกว่าผลการทดสอบของคุณชนกรทั้ง 2 อุณหภูมิ และสูงกว่า Raabira ที่ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ 5.5% และช่องว่างอากาศ 4% แต่ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลได้เนื่องจากมีความแตกต่างกันในรายละเอียดของการทดสอบเช่น ขนาดผลและคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ชนิดและปริมาณของยางแอสฟัลต์ ขนาดและความสูงของก้อนตัวอย่างทดสอบ รวมทั้งรายละเอียดและวิธีการในการทดสอบ เช่น แรงกระทำ และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 32 สมการเลขยกกำลังผลงานวิจัยที่ผ่านมา

ค่าคงที่		a	b	
ชนกร	Temperature	40°C	0.032	0.456
		60°C	0.022	0.604
Raabira	Binder content (%)	4	2.0305	0.1617
		4.7	2.9806	0.1663
		5.4	4.5185	0.1806
	Void level(%)	3	1.6485	0.1836
		5	2.9806	0.1663

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการนำวัสดุหินบะซอลท์ที่ได้จากโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย ถึง อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา ผสมกับยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70, 40/50 และ PMA มาทำการทดสอบแล้วผลที่ได้จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การจัดขนาดกะของหินบะซอลท์ตามสูตรส่วนผสมเฉพาะงาน ( Job Mix Formula) ที่ใช้ในโครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข 224 สาย อ.โชคชัย ถึง อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา เป็นไปตามสัดส่วนตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟและผลการทดสอบคุณสมบัติของหินบะซอลท์ที่สำคัญ เช่น ความสึกหรอของมวลรวมหยาบ, ค่าทรายสมมูลและความคงทน เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

2. ผลการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง และพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 จะมีค่าเสถียรภาพสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) และผลการทดสอบสัดส่วนกำลังรับแรงดึงพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA จะมีค่าดัชนีความแข็งแรง ร้อยละ 87.40, 86.90 และ 88.80 ซึ่งผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75) และค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio) มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณร้อยละ 91 ผ่านข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80)

4. ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) พบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต กล่าวคือความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และพบว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 มีค่า ITS ต่ำที่สุดในทุกอุณหภูมิ ในขณะที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 และ PMA มีค่า ITS ใกล้เคียงกัน โดยที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 จะมีค่า ITS สูงกว่าเล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA จะมีค่า ITS สูงกว่าที่อุณหภูมิสูง

5. ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR) พบว่าอุณหภูมิมีผลอย่างยิ่งต่อความแข็งแรงของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต กล่าวคือความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ทดสอบได้ในแต่ละช่วงอุณหภูมิตดสอบ มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้น และพบว่าแนวโน้มของผลการทดสอบค่า MR ใกล้เคียงกับค่า ITS กล่าวคือ วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 และ PMA มีค่า MR ใกล้เคียงกัน โดยที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 จะมีค่า MR สูงกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด PMA ที่อุณหภูมิ 5-35 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียสวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด PMA จะมีค่า MR สูงกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 และวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 จะมีค่า MR ต่ำสุดสำหรับทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ

6. ผลการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test) จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\epsilon_{mi}$  และ  $N_f$  ของก้อนตัวอย่างพบว่าความสัมพันธ์เป็นไปตามทฤษฎี คือ โดยทั่วไปเมื่อค่า  $\epsilon_{mi}$  เพิ่มขึ้นค่า  $N_f$  จะลดลง และพบว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 มีความต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำที่สุดกล่าวคือ เมื่อที่ระดับความเค้น 100 kPa และความเครียด 200 $\mu$  วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 60/70 จะเกิดความเสียหายเป็นชนิดแรก ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ระดับความเค้นที่เท่ากัน (100 kPa) วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 จะมี Fatigue life มากกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ระดับความเครียดที่เท่ากัน (200 $\mu$ ) วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA จะมี Fatigue life มากกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50

7. ผลการทดสอบ Dynamic Creep Test พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนครั้งของการให้แรงเป็นไปตามทฤษฎี โดยค่าความเครียดถาวรภายใต้แรงกระทำคงที่แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการคืบเริ่มต้น (Primary Creep) ซึ่งช่วงนี้จะเกิดความเครียดถาวรมากที่สุด จำนวนรอบของการให้แรงน้อย สำหรับการคืบช่วงที่สอง (Secondary Creep) ความเครียดที่เกิดขึ้นจะคงที่เมื่อมีแรงกระทำ จนกระทั่งการคืบช่วงที่สาม (Creep Rupture) วัสดุจะเกิดความเสียหายจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิมีผลกระทบบ่อยอย่างมากต่อค่าการยุบตัวถาวร โดยค่าจำนวนรอบของแรงกระทำที่จุดเสียหายจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น และพบว่าที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 มีค่าจำนวนรอบที่จะเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรช้ากว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA และ 60/70 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส การเริ่มเกิดการยุบตัวถาวรมีเพียงแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้

ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 ที่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวร สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA กับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 ยังไม่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรที่จำนวนรอบของการทดสอบที่ 10,000 รอบ และเมื่อพิจารณาค่าการยุบตัวถาวรต่อรอบ (Permanent Microstrain per Cycle) ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียสจะพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 ดีกว่าเพราะมีค่าต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA และ 60/70 ตามลำดับ

8. เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 33 ของหินบะซอลท์ พบว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50 มีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70 อย่างชัดเจน โดยทั่วไปวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 จะมีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA ที่อุณหภูมิต่ำ แต่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA จะมีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 40/50 ที่อุณหภูมิสูงซึ่งผลทดสอบใกล้เคียงผลทดสอบของหินแกรนิตในงานวิจัยของ ชันวิน สวัสดิ์สานต์และกฤษณะ จันทร โชติ จากกรมทางหลวง

9. เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานจากความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในสภาพการใช้งานจริงจะพบว่า เนื่องจากค่าโมดูลัสกินตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50 และ PMA ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในโครงสร้างถนนจริงผิวทางทั้ง 2 ชนิดน่าจะยุบตัวและโก่งตัวใกล้เคียงกัน กล่าวคือน่าจะเกิดความเครียด (Strain) ในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นหากพิจารณาจากกรณีดังกล่าวจึงอาจกล่าวได้ว่าในการใช้งานจริงวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA จะมีอายุการใช้งานจากการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Life) มากกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40/50

ตารางที่ 33 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง  
แอสฟัลต์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ PMA

คุณสมบัติ	อุณหภูมิ (°C) /เงื่อนไขการ ทดสอบ	หินบะซอลท์			หินแกรนิต			หมายเหตุ
		40/50	60/70	PMA	40/50	60/70	PMA	
ค่าเสถียรภาพแบบ Marshall	60	1	3	2	2	3	1	คุณสมบัติ ด้านความ แข็งแรง และกำลัง รับ น้ำหนัก
ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม	< 35	1	3	2	1	3	2	
	≥ 35	2	3	1	2	3	1	
ค่าดัชนีความแข็งแรง และ ค่าสัดส่วนกำลังรับดึง	25	ใกล้เคียงกัน			ใกล้เคียงกัน			
ค่าโมดูลัสคืนตัวแบบให้ แรงดึงทางอ้อม	≤ 35	1*	3	2*	1*	3	2*	
	> 35	2*	3	1*	2*	3	1*	
การต้านทานการเปลี่ยนแปลง รูปร่างอย่างถาวรแบบให้ น้ำหนักกระทำซ้ำ	40	1	3	2	1	3	2	คุณสมบัติ ด้าน สมรรถนะ การใช้งาน
	60	1	3	2	2	3	1	
การต้านทานการแตกร้าว จากความล้าแบบให้แรงดึง ทางอ้อม	$\sigma_x$ (100 kPa)	1	3	2	1	3	2	
	$\epsilon_x$ (200 $\mu$ )	2	3	1	2	3	1	

หมายเหตุ: 1 = คุณสมบัติดีที่สุด/สูงที่สุด 2 = คุณสมบัติปานกลาง 3 = คุณสมบัติด้อยที่สุด/ต่ำที่สุด  
\* = ค่าโมดูลัสคืนตัวของทั้ง 2 วัสดุมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก

### ข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันประเทศไทยใช้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จากผลการศึกษาที่ได้สำหรับในงานวิจัยนี้ น่าจะมีการเปลี่ยนเป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 เพราะมีราคาที่ไม่แตกต่างกันมากนัก น่าจะทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมทั่วไปและสมรรถนะในการใช้งานดีขึ้น อันจะส่งผลให้ช่วยยืดอายุการใช้งานของถนนลาดยาง โดยใช้ต้นทุนในการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับต้นทุนเดิม สำหรับการใช้อย่างแอสฟัลต์เกรด 60/70 อาจเหมาะสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรน้อยที่ไม่ต้องการความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมากก็สามารถมีอายุการใช้งานยาวนาน ซึ่งการใช้อย่างแอสฟัลต์เกรด 60/70 ที่อ่อนกว่าจะช่วยยืดอายุการใช้งานในระยะยาวจากการเกิด Ageing ของยางได้ ในขณะที่การใช้อย่าง PMA ที่ทำให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณสมบัติโดยทั่วไปที่อุณหภูมิสูงและมีการต้านทานความล้าดีกว่าการใช้อย่างแอสฟัลต์เกรด 40/50 นั้นอาจเลือกใช้ในสายทางที่มีความสำคัญและจำเป็น เนื่องจากยาง PMA มีราคาสูงกว่ายางแอสฟัลต์ 60/70 และ 40/50 มาก

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชยธันว์ พรหมศร. 2541. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของยางแอสฟัลต์และวัสดุผสม  
แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลีเมอร์. รายงานฉบับที่วพ.166  
ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- ธนกร ชมพู่รัตน์. 2552. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนศักดิ์ ไฟกระโทก, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศีลารมย์ และ ณรงค์ชัย นุ่มกรรณ์. 2546.  
การประเมินคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทยโดยใช้  
ข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ. รายงานฉบับที่ วพ. 205 สำนักงานวิจัยและพัฒนางานทาง กรม  
ทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- ธันวิน สวัสดิศานต์และกฤษณะ จันทร โชติ. 2552. โครงการวิจัย “การเปรียบเทียบคุณสมบัติทาง  
วิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70 เกรด 40/50 และยางโพลี  
เมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์”. บทความทางวิชาการ การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และ  
ตรวจสอบ กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- บุญพล มีไชโย. 2546. ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์กับวิธีซูเปอร์เพฟ  
ระดับ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- พรชัย ศีลารมย์. 2543. การศึกษาเปรียบเทียบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการออกแบบ  
ส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์และวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1. รายงานฉบับที่วพ.184 สำนักงานวิจัย  
และพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- พาริส่า จันนุ้ย. 2546. อิทธิพลของวัสดุเชื่อมประสานในสโตนมาสติกแอสฟัลต์.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2547. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, ชันวิน สวัสดิ์สานต์และชนศักดิ์ ใฝ่กระโทก. 2549. คุณสมบัติด้านการต้านทานความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนาม. รายงานฉบับที่ วพ. 227 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

สมักร สนทอง. 2539. โพลีเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุรพล สงวนแก้ว, ปรีชา จีวรรรณวาสนาและลลิต สวัสดิ์มงคล. 2547. การทดสอบและค่ากลสมบัติของหินที่เหมาะสม. ส่วนธรณีวิศวกรรม สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2541. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี INDIRECT TENSILE TEST เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. รายงานฉบับที่วพ.167 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

Braz, D., Lopes, R.T and Motta, L.M.G. 2004. **Research on Fatigue Cracking Growth Parameters in Asphaltic Mixtures Using Computed Tomography.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 213 pp.498–502. Brazil.

Castro, M. and Sanchez, J.A. 2007. **Estimation of Asphalt Concrete Fatigue Curves A damage theory approach.** Construction and Building Materials xxx (2007) xxx–xxx. Spain.

Garba, R. 2002. **Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures.** Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Norway.

- He, G.P. and Wong, W.G. 2006. **Effects of Moisture on Strength and Permanent Deformation of Foamed Asphalt Mix Incorporating RAP Materials** . Construction and Building Materials xxx (2006) xxx–xxx. China.
- Hyun, J.L., Lee, J.H. and Park, H.M. 2007. **Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Life Asphalt Pavements**. Construction and Building Materials 21 pp.1079–1087, Republic of Korea.
- Insoo, Y., Suh, Y. and Mun, S. 2007. **Development of Remaining Fatigue Life Model for Asphalt Black Base Through Accelerated Pavement Testing** . Construction and Building Materials xxx (2007) xxx–xxx. South Korea.
- Khodaii, A. and Mehrara, A. 2009. **Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test**. Construction and Building Materials 23 pp.2586–2592.
- Murali, J.K. and Rajagopal, K.R. 2003. **Triaxial testing and stress relaxation of asphalt concrete**. Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University. College Station
- Saad, A.Q. and Shatnawi, I. 2007. **Prediction of Bituminous Mixture Fatigue Life Base on Accumulated Strain**. Construction and Building Materials 21 pp.1370–1376.
- Shen, D.H., Kuo, M.F. and Du, J.C. 2004. **Properties of Gap-aggregate Gradation Asphalt Mixture and Permanent Deformation**. Construction and Building Materials 19 pp.147–153.
- Zhi, S. and Wong, W.G. 2009. **Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in Asphalt Concrete Material in Wearing Course**. Construction and Building Materials 23 (2009) pp.462–468.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติของหินปะชอลท์และแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการจัดขนาดคละของหินบะซอลท์ โครงการก่อสร้างสายทางหลวงหมายเลข  
224 สาย อ.โชคชัย – อ.ครบุรี ต.ทุ่งอรุณ อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา

Hot Bin								
เบอร์ Sieve (นิ้ว)	ขนาด ตะแกรง (มม.)	% Passing				Combined	Desired	Tolerant Limit
		Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4			
3/4"	19.0			100	100	100	100	100
1/2"	12.5			86.2	25.8	80.9	80-100	76-86
3/8"	9.5		100	37.7	1.0	65.8	-	61-71
#4	4.75	100	39.2	1.2		47.3	44-74	42-52
#8	2.36	78.2	0.9	0.2		31.5	28-58	27-37
#16	1.18	57.4				23.0	-	19-27
#30	0.600	42.1				16.8	-	13-21
#50	0.300	30.4				12.2	5-21	8-16
#100	0.150	19.0				7.6	-	5-11
#200	0.075	13.3				5.3	2-10	4-6
Mix Proportion		40	18	20	22			

**ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบ Flakiness index ของหินบะซอลท์ (Bin 2)**

Sieve Size		Width of Slot Sieve		Mass of Aggregate (g)			Flakiness Index
(mm)	(in)	(mm)	(in)	Retained A	Passing B	Total A+B	%
63.50 - 50.80	(2 1/2 - 2)	34.29	(1.350)	-	-	-	
50.80 - 38.10	(2 - 1 1/2)	26.67	(1.050)	-	-	-	
38.10 - 25.40	(1 1/2 - 1)	19.05	(0.750)	-	-	-	
25.40 - 19.05	(1 - 3/4)	13.34	(0.525)	-	-	-	
19.05 - 12.70	(3/4 - 1/2)	9.53	(0.375)	-	-	-	
12.70 - 9.52	(1/2 - 3/8)	6.68	(0.263)	-	-	-	
9.52 - 4.76	(3/8 - #4)	4.29	(0.169)	917	663	1580	
Total				917	663	1580	≈ 42%

$$F.I. = \frac{\text{Total Mass of Passing Slot Sieve}}{\text{Total Mass of Aggregate}} \times 100 = \frac{B}{(A+B)} \times 100 = \frac{663}{1580} \times 100 = 42\%$$

**ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบ Elongation index ของหินบะซอลท์ (Bin 2)**

Sieve Size		Gage Length		Mass of Aggregate (g)			Elongation Index
(mm)	(in)	(mm)	(in)	Retained C	Passing D	Total C+D	%
63.50 - 50.80	(2 1/2 - 2)	102.87	(4.050)	-	-	-	
50.80 - 38.10	(2 - 1 1/2)	80.01	(3.150)	-	-	-	
38.10 - 25.40	(1 1/2 - 1)	57.15	(2.250)	-	-	-	
25.40 - 19.05	(1 - 3/4)	40.01	(1.575)	-	-	-	
19.05 - 12.70	(3/4 - 1/2)	28.58	(1.125)	-	-	-	
12.70 - 9.52	(1/2 - 3/8)	20.02	(0.788)	-	-	-	
9.52 - 4.76	(3/8 - #4)	12.85	(0.506)	165	1415	1580	
Total				165	1415	1580	≈ 10%

$$E.I. = \frac{\text{Total Mass of Retained}}{\text{Total Mass of Aggregate}} \times 100 = \frac{C}{(C+D)} \times 100 = \frac{165}{1580} \times 100 = 10.4\%$$

**ตารางผนวกที่ ก4** ผลการทดสอบ Flakiness index ของหินบะซอลท์ (Bin 3)

Sieve Size		Width of Slot Sieve		Mass of Aggregate (g)			Flakiness Index
(mm)	(in)	(mm)	(in)	Retained A	Passing B	Total A+B	%
63.50 - 50.80	(2 1/2 - 2)	34.29	(1.350)	-	-	-	
50.80 - 38.10	(2 - 1 1/2)	26.67	(1.050)	-	-	-	
38.10 - 25.40	(1 1/2 - 1)	19.05	(0.750)	-	-	-	
25.40 - 19.05	(1 - 3/4)	13.34	(0.525)	-	-	-	
19.05 - 12.70	(3/4 - 1/2)	9.53	(0.375)	1163	341	1504	
12.70 - 9.52	(1/2 - 3/8)	6.68	(0.263)	733	192	925	
9.52 - 4.76	(3/8 - #4)	4.29	(0.169)	469	193	662	
Total				2365	726	3091	≈ 24%

$$F.I. = \frac{\text{Total Mass of Passing Slot Sieve}}{\text{Total Mass of Aggregate}} \times 100 = \frac{B}{(A + B)} \times 100 = \frac{726}{3091} \times 100 = 23.5\%$$

**ตารางผนวกที่ ก5** ผลการทดสอบ Elongation index ของหินบะซอลท์ (Bin 3)

Sieve Size		Gage Length		Mass of Aggregate (g)			Elongation Index
(mm)	(in)	(mm)	(in)	Retained C	Passing D	Total C+D	%
63.50 - 50.80	(2 1/2 - 2)	102.87	(4.050)	-	-	-	
50.80 - 38.10	(2 - 1 1/2)	80.01	(3.150)	-	-	-	
38.10 - 25.40	(1 1/2 - 1)	57.15	(2.250)	-	-	-	
25.40 - 19.05	(1 - 3/4)	40.01	(1.575)	-	-	-	
19.05 - 12.70	(3/4 - 1/2)	28.58	(1.125)	263	1241	1504	
12.70 - 9.52	(1/2 - 3/8)	20.02	(0.788)	146	779	925	
9.52 - 4.76	(3/8 - #4)	12.85	(0.506)	137	525	662	
Total				546	2545	3091	≈ 18%

$$E.I. = \frac{\text{Total Mass of Retained}}{\text{Total Mass of Aggregate}} \times 100 = \frac{C}{(C + D)} \times 100 = \frac{546}{3091} \times 100 = 17.7\%$$

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการทดสอบ Flakiness index ของหินบะซอลท์ (Bin 4)

Sieve Size		Width of Slot Sieve		Mass of Aggregate (g)			Flakiness Index
(mm)	(in)	(mm)	(in)	Retained A	Passing B	Total A+B	%
63.50 - 50.80	(2 1/2 - 2)	34.29	(1.350)	-	-	-	
50.80 - 38.10	(2 - 1 1/2)	26.67	(1.050)	-	-	-	
38.10 - 25.40	(1 1/2 - 1)	19.05	(0.750)	-	-	-	
25.40 - 19.05	(1 - 3/4)	13.34	(0.525)	-	-	-	
19.05 - 12.70	(3/4 - 1/2)	9.53	(0.375)	4163	590	4753	
12.70 - 9.52	(1/2 - 3/8)	6.68	(0.263)	340	48	388	
9.52 - 4.76	(3/8 - #4)	4.29	(0.169)	34	1	35	
Total				4537	639	5176	≈ 12%

$$F.I. = \frac{\text{Total Mass of Passing Slot Sieve}}{\text{Total Mass of Aggregate}} \times 100 = \frac{B}{(A+B)} \times 100 = \frac{639}{5176} \times 100 = 12.3\%$$

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบ Elongation index ของหินบะซอลท์ (Bin 4)

Sieve Size		Gage Length		Mass of Aggregate (g)			Elongation Index
(mm)	(in)	(mm)	(in)	Retained C	Passing D	Total C+D	%
63.50 - 50.80	(2 1/2 - 2)	102.87	(4.050)	-	-	-	
50.80 - 38.10	(2 - 1 1/2)	80.01	(3.150)	-	-	-	
38.10 - 25.40	(1 1/2 - 1)	57.15	(2.250)	-	-	-	
25.40 - 19.05	(1 - 3/4)	40.01	(1.575)	-	-	-	
19.05 - 12.70	(3/4 - 1/2)	28.58	(1.125)	514	4239	4753	
12.70 - 9.52	(1/2 - 3/8)	20.02	(0.788)	124	264	388	
9.52 - 4.76	(3/8 - #4)	12.85	(0.506)	25	10	35	
Total				663	4513	5176	≈ 13%

$$E.I. = \frac{\text{Total Mass of Retained}}{\text{Total Mass of Aggregate}} \times 100 = \frac{C}{(C+D)} \times 100 = \frac{663}{5176} \times 100 = 12.8\%$$

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดสอบ Specific gravity and absorption of coarse aggregate ของหินปะชอลท์ (Bin2, Bin 3 และ Bin 4)

SAMPLE	Mass of sample			GB	GA	%ABS	
	In Oven-Dry	In SSD	Immersed	$\frac{A}{(B - C)}$	$\frac{A}{(A - C)}$	$\frac{(B - A)}{A} \times 100$	
	Condition ( A )	Condition ( B )	in Water ( C )				
Bin 2	No.1	899.8	927.5	592.3	2.684	2.926	3.08
	No.2	897.9	926.4	592.7	2.691	2.942	3.17
	No.3	898.5	927.6	593.0	2.685	2.941	3.24
Average	Total	2696.2	2781.5	1778.0	2.687	2.936	3.16
Bin 3	No.1	957.1	985.0	630.3	2.698	2.929	2.92
	No.2	958.3	987.1	631.1	2.692	2.929	3.01
	No.3	956.3	985.4	629.7	2.689	2.928	3.04
Average	Total	2871.7	2957.5	1891.1	2.693	2.929	2.99
Bin 4	No.1	1112.4	1145.2	731.1	2.686	2.917	2.95
	No.2	1112.8	1145.4	732.3	2.694	2.925	2.93
	No.3	1113.2	1146.4	732.1	2.687	2.921	2.98
Average	Total	3338.4	3437.0	2195.5	2.689	2.921	2.95

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินบะซอลท์ (Retained #200)

Determination No.		1	2	3
Mass Pycnometer + SSD Sample	g	678.2	678.2	678.2
Mass Pycnometer	g	159.8	159.8	159.8
Mass SSD Sample	(A) g	518.4	518.4	518.4
Mass Container + Dry Sample	g	748.4	748.4	748.4
Mass Container	g	246.1	246.1	246.1
Mass Dry Sample	(B) g	502.3	502.3	502.3
temperature	(t) °C	45	40	35
Density of Water	(dt) g/ml	0.9902	0.9922	0.9941
Mass Pycnometer + Water + Sample	(W1) g	986.9	987.1	987.7
Mass Pycnometer + Water	(W2) g	655.2	656.1	657.0
Apparent Specific Gravity				
	$GA(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{(B + W2 - W1)}$	2.915	2.909	2.909
	$GA(30^{\circ}C) = \frac{GA * dt}{0.9957}$	2.899	2.899	2.904
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basis)				
	$GB(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{(A + W2 - W1)}$	2.664	2.659	2.660
	$GB(30^{\circ}C) = \frac{GB * dt}{0.9957}$	2.649	2.650	2.655

Average GA (30°C) = 2.901

Average GB (30°C) = 2.651

$$\% \text{water Absorption} = \frac{(A - B)}{B} \times 100 = 3.21$$

ตารางผนวกที่ ก10 ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินปะชอลท์ (Passing #200)

Determination No.		1	2	3
Mass Pycnometer + SSD Sample	(g)	-	-	-
Mass Pycnometer	(g)	-	-	-
Mass SSD Sample	(A) (g)	-	-	-
Mass Container + Dry Sample	(g)	536.1	536.1	536.1
Mass Container	(g)	219.2	219.2	219.2
Mass Dry Sample	(B) (g)	316.9	316.9	316.9
temperature	(t) (g)	45	40	35
Density of Water	(dt) (g)	0.9902	0.9922	0.9941
Mass Pycnometer + Water + Sample	(W1) (g)	864.4	865.3	866.0
Mass Pycnometer + Water	(W2) (g)	655.2	656.1	657.0
Apparent Specific Gravity				
$GA(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{(B + W2 - W1)}$		2.941	2.920	2.920
$GA(30^{\circ}C) = \frac{GA * dt}{0.9957}$		2.898	2.910	2.915

Average GA (30°C) = 2.908

$$\text{Total GB} = \frac{100}{(\% \text{Retained \#200} / \text{GB Retained \#200}) + (\% \text{Passing \#200} / \text{GA Passing \#200})}$$

$$\text{Total GB} = \frac{100}{(86.7 / 2.651) + (13.3 / 2.908)} = 2.683$$

$$\text{Total GA} = \frac{100}{(\% \text{Retained \#200} / \text{GA Retained \#200}) + (\% \text{Passing \#200} / \text{GA Passing \#200})}$$

$$\text{Total GA} = \frac{100}{(86.7 / 2.901) + (13.3 / 2.908)} = 2.902$$

**ตารางผนวกที่ ก11** ผลการทดสอบ Sand equivalent test ของหินบะซอลต์

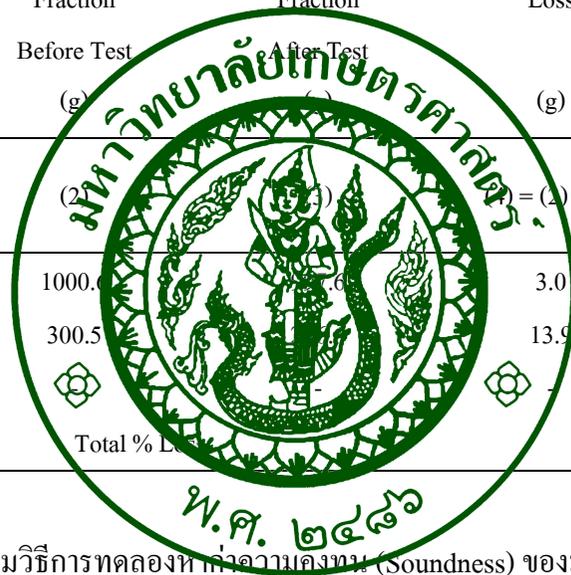
Sample No.	Sand Reading	Clay Reading	Sand Equivalent % = $\frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100$
1	3.2	4.5	71.1 $\approx$ 72 %
2	3.3	4.6	71.7 $\approx$ 72 %
3	3.2	4.5	71.1 $\approx$ 72 %
	average		72 %

**ตารางผนวกที่ ก12** ผลการทดสอบ Abrasion test of coarse aggregate by Los Angeles Machine

Sieve Size		Accumulative
Passing	Retained on	Mass of Sample, (g)
3/4"	1/2"	2500.1
1/2"	3/8"	2500.0
Original Mass of Sample (W1)		5000.1
Final Mass of Sample (W2)		4086.1
Loss (W1 - W2)		914.0
Percentage of Wear = $\frac{(W1 - W2) \times 100}{W1}$		18.3

ตารางผนวกที่ ก13 ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Coarse Aggregate) ของหินบะซอลท์

Sieve Size	Retained of Original Sample (%)	Mass of Test Fraction Before Test (g)	Mass of Test Fraction After Test (g)	Actual Loss (g)	Actual % Loss	Weighted % Loss
(mm)	(1)	(2)	(3)	(4) = (2) - (3)	(5) = $\frac{(4) \times 100}{(2)}$	(6) = $\frac{(1) \times (5)}{100}$
19.0 - 9.5	62.3	1000.0	997.0	3.0	0.3	0.2
9.5 - 4.75	36.5	300.5	286.6	13.9	4.6	1.7
Minus 4.75	1.0				4.6	0.0
						Total % Loss = 1.9



หมายเหตุ ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม

โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตจำนวน 5 รอบ ไม่เกินร้อยละ 9

สิงสิทธิ์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก14 ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Fine Aggregate) ของหินปะชอลท์

Sieve Size	Retained of Original Sample (%)	Mass of Test Fraction Before Test (g)	Mass of Test Fraction After Test (g)	Actual Loss (g)	Actual % Loss	Weighted % Loss
(mm)	(1)	(2)	(3)	(4) = (2) - (3)	(5) = $\frac{(4) \times 100}{(2)}$	(6) = $\frac{(1) \times (5)}{100}$
9.5 - 4.25						
4.75 - 2.36	21.8	100	93.4	6.6	6.6	1.4
2.36 - 1.18	20.8	100	97.9	2.1	2.1	0.4
1.18 - 0.60	15.3	100	95.9	4.1	4.1	0.6
0.60 - 0.30	11.7	100	97.8	2.2	2.2	0.3
Minus 0.30	30.4	-	-	-	2.2	0.7
		Total % Loss				3.4



สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมายเหตุ ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม

โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตจำนวน 5 รอบ ไม่เกินร้อยละ 9

ตารางผนวกที่ ก15 ผลการทดสอบ Uncompacted void content of Fine aggregate ของหินบะซอลท์

Mass of cylinder	273.9	g
Mass of cylinder + water	373.9	g
Net mass of water	100	g
Temperature	28	°C
Density of water at temperature used	996.3	kg/m <sup>3</sup>
Volume of cylinder	100.4	ml



Sample	Trial	Mass of cylinder + Sample (g)	Mass of cylinder (g)	Net mass of coarse aggregate in the sample (g)	dry specific gravity of coarse aggregate (G)	Uncompacted Voids in the material	
						Average	Average
						$U = \frac{V - (F/G)}{V} \times 100$	
						%	%
Bin 1	1	418.4	273.9	144.5		45.2	
	2	418.2	273.9	144.3	2.628	45.3	45.2
	3	418.5	273.9	144.6		45.2	

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมายเหตุ ถ้า Uncompacted Voids in the material ไม่น้อยกว่า 45 %

ตารางผนวกที่ ก16 ผลการทดสอบ Determining Fractured Particles in Coarse aggregate ของหินบะชอลท์ (Bin 2)

Sample	Total	Uncrushed particles		Particles with 1 crushed face		Particles with $\geq 2$ crushed faces		Crushed Particles
	Weight (g)	Weight (g)	(%)	Weight (g)	(%)	Weight (g)	(%)	(%)
1	502.5	0	0	0	0	502.5	100.0	
2	507.2	0	0	0	0	507.2	100.0	100.0
3	513.7	0	0	0	0	513.7	100.0	

ตารางผนวกที่ ก17 ผลการทดสอบ Determining Fractured Particles in Coarse aggregate ของหินบะชอลท์ (Bin 3)

Sample	Total	Uncrushed particles		Particles with 1 crushed face		Particles with $\geq 2$ crushed faces		Crushed Particles
	Weight (g)	Weight (g)	(%)	Weight (g)	(%)	Weight (g)	(%)	(%)
1	508.1	0	0	0	0	508.1	100.0	
2	515.3	0	0	0	0	515.3	100.0	100.0
3	518.2	0	0	0	0	518.2	100.0	



ตารางผนวกที่ ก18 ผลการทดสอบ Determining Fractured Particles in Coarse aggregate ของหินบะซอลท์ (Bin 4)

Sample	Total	Uncrushed particles		Particles with 1 crushed face		Particles with $\geq 2$ crushed faces		Crushed Particles
	Weight (g)	Weight (g)	(%)	Weight (g)	(%)	Weight (g)	(%)	(%)
1	1505.5	0	0	0	0	1505.5	100.0	
2	1513.7	0	0	0	0	1513.7	100.0	100.0
3	1515.2	0	0	0	0	1515.2	100.0	

ตารางผนวกที่ ก19 ผลการทดสอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหินบะซอลท์ และผลของการบดสีของอนุภาค ของหินบะซอลท์

Sample	Mass of Sample			ความแบนและความยาวของอนุภาค		หลักเกณฑ์
	Retained (g)	Passing (g)	Total (g)	% ความแบนและความยาว		
Bin 2	81.6	927.4	1009	8.09		
Bin 3	72.6	1927.4	2000	3.63		สูงสุด 10%
Bin 4	59.0	1941.0	2000	2.95		

สิงสิงห์ มด วิชชาลัยเกษรศาสตร์

**ตารางผนวกที่ ก20** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50 (6.34 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	6.34
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.96
Mass of Flask in Water	(A) gm.	735.2
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4258.0
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5622.7
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1364.7
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1547.9
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.472
$G_m = D/(A+D-E)$		2.472
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.472
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		2.718
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.43
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.43

**ตารางผนวกที่ ก21** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50 (5.03%)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	5.03
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	4.79
Mass of Flask in Water	(A) gm.	732.5
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4274.7
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5603.4
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1355.7
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1549.8
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.518
$G_m = D/(A+D-E)$		2.518
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.518
Virtual Specific Gravity		2.719
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		2.719
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.44
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.44

**ตารางผนวกที่ ก22** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50 (5.53 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	5.53
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.24
Mass of Flask in Water	(A) gm.	732.5
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4247.7
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5568.4
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1320.7
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1524.9
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.500
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.500
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.43

**ตารางผนวกที่ ก23** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50 (6.03 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	6.03
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.69
Mass of Flask in Water	(A) gm.	732.5
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4247.7
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5572.1
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1324.4
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1523.4
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.482
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.482
Virtual Specific Gravity		2.717
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.42

**ตารางผนวกที่ ก24** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 40/50 (6.53 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	6.53
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	6.13
Mass of Flask in Water	(A) gm.	732.5
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4247.7
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5572.2
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1327.5
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1521.7
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.466
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.466
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.43
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%	

**ตารางผนวกที่ ก25** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70 (6.34 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	6.34
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.96
Mass of Flask in Water	(A) gm.	735.5
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4248.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5613.8
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1365.2
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1548.7
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.473
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.473
Virtual Specific Gravity		2.719
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.44
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%	

**ตารางผนวกที่ ก26** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70 (5.25 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	5.25
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	4.99
Mass of Flask in Water	(A) gm.	733.3
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5602.1
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1349.5
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1544.9
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.509
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.509
Virtual Specific Gravity		2.717
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.42

**ตารางผนวกที่ ก27** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70 (5.75 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	5.75
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.44
Mass of Flask in Water	(A) gm.	733.3
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5618.2
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1365.6
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1550.8
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.492
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.492
Virtual Specific Gravity		2.717
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.42

**ตารางผนวกที่ ก28** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70 (6.25 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	6.25
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.88
Mass of Flask in Water	(A) gm.	733.3
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5617.4
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1368.8
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1546.9
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.476
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.476
Virtual Specific Gravity		2.719
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.44
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	

**ตารางผนวกที่ ก29** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70 (6.75 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	6.75
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	6.32
Mass of Flask in Water	(A) gm.	733.3
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5615.1
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1362.5
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1541.6
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.458
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.458
Virtual Specific Gravity		2.717
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.42
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	

**ตารางผนวกที่ ก30** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด 60/70 (5.5 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	5.5
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.21
Mass of Flask in Water	(A) gm.	735.2
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4250.8
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5479.5
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1228.7
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1472.6
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.501
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.501
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.43
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%	

**ตารางผนวกที่ ก31** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA (6.34 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	6.34
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.96
Mass of Flask in Water	(A) gm.	735.5
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4248.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5612.6
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1364.0
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1547.8
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.472
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.472
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.43
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%	

**ตารางผนวกที่ ก32** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA (5.03 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	5.03
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	4.79
Mass of Flask in Water	(A) gm.	733.3
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5592.2
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1339.6
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1540.6
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.517
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.517
Virtual Specific Gravity		2.717
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.42

**ตารางผนวกที่ ก33** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA (5.53 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate	%	5.53
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.24
Mass of Flask in Water	(A) gm.	733.3
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5602.5
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1349.9
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1543.2
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.500
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.500
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ac})$	%	0.43

**ตารางผนวกที่ ก34** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA (6.03 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate		6.03
% AC by Mass of Total Mix	(X)	5.69
Mass of Flask in Water	(A)	gm. 733.3
Mass of Flask in Air	(B)	gm. 4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm. 5595.5
Mass of Sample in Air	(D)	gm. 1342.9
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm. 1535.3
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.483
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.483
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.43
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%	

**ตารางผนวกที่ ก35** การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด ( $G_{mm}$ ) ยางชนิด PMA (6.53 %)

Description	Unit	1
% AC by Mass of Aggregate		6.53
% AC by Mass of Total Mix	(X)	6.13
Mass of Flask in Water	(A)	gm. 733.3
Mass of Flask in Air	(B)	gm. 4252.6
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm. 5592.7
Mass of Sample in Air	(D)	gm. 1340.1
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm. 1530.0
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.466
$G_m = D/(A+D-E)$		
Average Theoretical Maximum Specific Gravity		2.466
Virtual Specific Gravity		2.718
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$		
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate ( $G_{ag}$ )		2.687
Specific Gravity of Asphalt Cement ( $G_{ac}$ )		1.02
Asphalt Absorption ( $A_{ac}$ )		0.43
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%	

ตารางผนวกที่ ก36 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

Sample		1	2	3	4	5	6
Diameter,mm	D	99.93	99.84	99.92	99.91	99.95	99.77
Thickness, mm	t	75.46	73.70	73.87	74.07	74.41	74.27
Dry mass, g	A	1228.2	1228.9	1229.9	1228.6	1232.1	1231.1
SSD mass, g	B	1239.5	1241.3	1239.9	1239.3	1241.6	1242.8
Mass in Water, g	C	714.3	713.4	713.8	712.7	713.4	713.4
Volume, cc (B-C)	E	525.2	527.9	526.1	526.6	528.2	529.4
Bulk Sp Gravity (A/E)	F	2.339	2.328	2.338	2.333	2.333	2.325
Max Sp Gravity	G	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
% Air Voids (100(G-F)/G)	H	6.5	6.9	6.5	6.7	6.7	7.0
Vol Air Voids (HE/100)	I	33.9	36.3	34.1	35.1	35.3	36.9
Load,N	P	-	-	-	10065	10803	10354
Conditioned							
SSD mass, g	B'	1253.4	1255.4	1255.7	-	-	-
Mass in Water, g	C'	722.4	723.0	725.3	-	-	-
Volume, cc (B'-C')	E'	531.0	532.4	530.4	-	-	-
Vol Abs Water, cc (B'-A)	J'	25.2	26.5	25.8	-	-	-
% Saturation (100J'/I)		74.3	73.0	75.6	-	-	-
% Swell (100(E'-E)/E)		1.1	0.9	0.8	-	-	-
Load, KN	P'	9484	9720	9441	-	-	-
Dry Str. (2000P/(tDp))	Std	-	-	-	866	925	890
Wet Str. (2000P'/(tDp))	Stm	801	841	814	-	-	-
Average Dry Strength (kPa)					893		
Average Wet Strength (kPa)					819		
Tensile Strength Ratio, %					91.6		

ตารางผนวกที่ ก37 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

Sample		1	2	3	4	5	6
Diameter,mm	D	100.0	100.2	100.1	100.1	100.0	100.2
Thickness, mm	t	68.1	68.8	68.8	68.7	68.1	68.8
Dry mass, g	A	1229.3	1232.9	1230.6	1230.7	1225.8	1228.0
SSD mass, g	B	1241.1	1244.5	1243.6	1243.9	1239.0	1240.4
Mass in Water, g	C	711.8	712.1	713.5	714.1	711.2	711.1
Volume, cc (B-C)	E	529.3	523.4	530.1	529.8	527.8	529.3
Bulk Sp Gravity (A/E)	F	2.323	2.316	2.321	2.323	2.322	2.320
Max Sp Gravity	G	2.501	2.501	2.501	2.501	2.501	2.501
% Air Voids (100(G-F)/G)	H	7.1	7.4	7.2	7.1	7.1	7.2
Vol Air Voids (HE/100)	I	37.8	39.4	38.1	37.7	37.7	38.3
Load, N	P	-	-	-	9426	8885	8926
Conditioned							
SSD mass, g	B'	1257.2	1261.5	1259.2	-	-	-
Mass in Water, g	C'	723.2	724.9	724.8	-	-	-
Volume, cc (B'-C')	E'	534.0	536.6	534.4	-	-	-
Vol Abs Water, cc (B'-A)	J'	27.9	28.6	28.6	-	-	-
% Saturation (100J'/I)		73.9	72.5	75.2	-	-	-
% Swell (100(E'-E)/E)		0.9	0.8	0.8	-	-	-
Load, N	P'	8299	8171	8376	-	-	-
Dry Str. (2000P'/(tDp))	Std	-	-	-	873	830	824
Wet Str. (2000P'/(tDp))	Stm	775	754	774	-	-	-
Average Dry Strength (kPa)					843		
Average Wet Strength (kPa)					768		
Tensile Strength Ratio, %					91.1		

ตารางผนวกที่ ก38 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

Sample		1	2	3	4	5	6
Diameter,mm	D	100.1	100.1	100.0	100.2	100.1	100.1
Thickness, mm	t	68.2	68.8	68.4	68.7	69.7	68.7
Dry mass, g	A	1233.2	1234.2	1229.8	1228.5	1229.7	1229.9
SSD mass, g	B	1246.3	1247.7	1241.4	1241.8	1242.1	1242.8
Mass in Water, g	C	714.8	714.9	710.8	713.2	712.0	712.3
Volume, cc (B-C)	E	531.5	532.8	530.6	528.6	530.1	530.5
Bulk Sp Gravity (A/E)	F	2.320	2.316	2.318	2.324	2.320	2.318
Max Sp Gravity	G	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
% Air Voids (100(G-F)/G)	H	7.2	7.3	7.3	7.0	7.2	7.3
Vol Air Voids (HE/100)	I	38.2	39.1	38.7	37.2	38.2	38.5
Load, N	P	-	-	-	10211	10614	10337
Conditioned							
SSD mass, g	B'	1261.3	1262.6	1257.2	-	-	-
Mass in Water, g	C'	724.6	725.2	722.4	-	-	-
Volume, cc (B'-C')	E'	536.7	537.4	534.8	-	-	-
Vol Abs Water, cc (B'-A)	J'	28.1	28.4	27.4	-	-	-
% Saturation (100J'/I)		73.5	72.6	70.8	-	-	-
% Swell (100(E'-E)/E)		1.0	0.9	0.8	-	-	-
Load,N	P'	9632	9449	9496	-	-	-
Dry Str. (2000P'/(tDp))	Std	-	-	-	945	968	957
Wet Str. (2000P'/(tDp))	Stm	899	874	883	-	-	-
Average Dry Strength (kPa)					957		
Average Wet Strength (kPa)					885		
Tensile Strength Ratio, %					92.5		

**ตารางผนวกที่ ก39** ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 40:18:20:22

Pen. Grade AC. 40/ 50

Avg. Sp.Gr.of Agg. And Filler (Gag) = 2.687

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end = 75

Asphalt Absorption (x) = 0.43 %

No. of Specimen			1	2	3
% Ac by Mass of Agg	(a)			5.50	
% Ac by Mass of Mix	(b)			5.21	
%Eff Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$			4.81	
Specimen Height (cm)	(d)		6.6	6.7	6.6
Density					
Mass in Air	gm.	(e)	1214.2	1218.7	1212.1
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1217.7	1222.0	1215.6
Mass in water	gm.	(g)	710.7	713.4	710.5
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	507.0	508.6	505.1
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.395	2.396	2.400
Average Density				2.397	
VOIDS ANALYSIS					
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	11.3	11.3	11.4
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	84.5	84.7	85.0
VMA	%	(l) = 100-k	15.5	15.3	15.0
Air Voids	%	(m) = l-j	4.2	4.0	3.6
VFB	%	(n) = $100*j/l$	72.9	73.9	76
Stability					
Meas	lb		4230	4074	3959
Adjust	lb		3979	3734	3677
Average Stability	lb			3797	
Flow					
Meas	in( 1/100)		15	14	14
Average Flows	in( 1/100)			14	

**ตารางผนวกที่ ก40** ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 40:18:20:22

Pen. Grade AC. 60/70

Avg. Sp.Gr.of Agg. And Filler (Gag) = 2.687

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end = 75

Asphalt Absorption (x) = 0.43 %

No. of Specimen			1	2	3
% Ac by Mass of Agg		(a)		5.50	
% Ac by Mass of Mix		(b)		5.21	
%Eff Ac by Mass of Mix		(c) = $b-x(10-b)/100$		4.81	
Specimen Height (cm)		(d)	6.43	6.45	6.45
Density					
Mass in Air	gm.	(e)	1227.9	1221.9	1226.4
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1229.7	1224.0	1227.1
Mass in water	gm.	(g)	714.9	712.7	714.9
Bulk Volume	gm.	(h) = $f-g$	514.8	511.3	512.2
Bulk Density	gm./ml.	(i) = $e/h$	2.385	2.390	2.394
Average Density				2.390	
VOIDS ANALYSIS					
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	11.2	11.3	11.3
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	84.1	84.3	84.5
VMA	%	(l) = $100-k$	15.9	15.7	15.5
Air Voids	%	(m) = $1-j$	4.7	4.4	4.2
VFB	%	(n) = $100*j/l$	70.4	72.0	73.0
Stability					
Meas	lb		3056	3086	2952
Adjust	lb		2995	3024	2893
Average Stability	lb			2971	
Flow					
Meas	in( 1/100)		12	13	12
Average Flows	in( 1/100)			13	

ตารางผนวกที่ ก41 ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 40:18:20:228

Pen. Grade PMA

Avg. Sp.Gr.of Agg. And Filler (Gag) = 2.687

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end = 75

Asphalt Absorption (x) = 0.43 %

No. of Specimen			1	2	3
% Ac by Mass of Agg		(a)		5.50	
% Ac by Mass of Mix		(b)		5.21	
%Eff Ac by Mass of Mix		(c) = $b-x(10-b)/100$		4.81	
Specimen Height (cm)		(d)	6.42	6.45	6.43
Density					
Mass in Air	gm.	(e)	1227.3	1227.4	1221.7
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1228.3	1229.8	1224.0
Mass in water	gm.	(g)	719.1	719.5	716.6
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	509.2	510.3	507.4
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.410	2.405	2.408
Average Density				2.408	
VOIDS ANALYSIS					
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	11.4	11.3	11.4
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	85.0	84.8	84.9
VMA	%	(l) = 100-k	15.0	15.2	15.1
Air Voids	%	(m) = l-j	3.6	3.9	3.7
VFB	%	(n) = $100*j/l$	76.0	74.3	75.5
Stability					
Meas	lb		3638	3809	3627
Adjust	lb		3565	3732	3555
Average Stability	lb			3617	
Flow					
Meas	in( 1/100)		15	15	15
Average Flows	in( 1/100)			15	

ตารางผนวกที่ ก42 ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 40:18:20:22

Pen. Grade AC 40/50

Average. Sp.of Gr. Aggregate and Filler (Gag) = 2.687

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , Double Plungers 20.7 MPa (3000 psi)

Asphalt Absorption = 0.43 %

	No. of Specimen	Soaked Sample				Unsoaked Sample			
		1	2	3	4	1	2	3	4
% Ac by Mass of Aggregate	(a)			5.50			5.50		
% Ac by Mass of Mix	(b)			5.21			5.21		
%Effect Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$			4.81			4.81		
Specimen Height (cm)	(d)	6.56	6.63	6.55	6.68	6.59	6.71	6.55	6.63
Density									
Mass in Air	gm. (e)	1229.3	1226.8	1220.9	1223.6	1226.9	1228.6	1222.4	1224.5
Mass Sat. Surface Dry	gm. (f)	1240.5	1243.4	1233.1	1235.9	1238.4	1241.4	1235.1	1239.8
Mass in water	gm. (g)	711.2	713.2	706.3	707.3	706.9	711.3	707.6	711.1
Bulk Volume	gm. (h) = f-g	529.3	530.2	526.8	528.6	531.5	530.1	527.5	528.7
Bulk Density	gm./ml. (i) = e/h	2.323	2.314	2.318	2.315	2.308	2.318	2.317	2.316
Average Density				2.318				2.315	

ตารางผนวกที่ 42 (ต่อ)

	No. of Specimen	Soaked Sample				Unsoaked Sample				
		1	2	3	4	1	2	3	4	
VOIDS ANALYSIS										
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	11.0	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
Volume Aggregate	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	81.9	81.6	81.8	81.7	81.4	81.8	81.7	81.7
VMA	%	(l) = $100-k$	18.1	18.4	18.2	18.3	18.6	18.2	18.3	18.3
Air Voids	%	(m) = $1-j$	7.1	7.5	7.3	7.4	7.7	7.3	7.4	7.4
VFB	%	(n) = $100*j/l$	60.8	59.2	59.9	59.6	58.6	59.9	59.6	59.6
Stability										
Meas	lb		7155	7168	6747	7133	8055	8536	8232	7901
Adjust	lb		6797	6738	6275	6705	7491	7854	7655	7348
Average Stability	lb				6629				7587	
Flow										
Meas	in( 1/100)		40	42	43	42	28	28	29	29
Average Flows	in( 1/100)				42				29	

$$\text{Strength Index (\%)} = \frac{\text{Soaked Stability} * 100}{\text{Unsoaked Stability}} = \frac{6,629 * 100}{7,587} = 87.4 \%$$

ตารางผนวกที่ ก43 ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 40:18:20:22

Pen. Grade AC 60/70

Average. Sp.of Gr. Aggregate and Filler (Gag) = 2.687

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , Double Plungers 20.7 MPa (3000 psi)

Asphalt Absorption = 0.43 %

	No. of Specimen	Soaked Sample				Unsoaked Sample			
		1	2	3	4	1	2	3	4
% Ac by Mass of Aggregate	(a)			5.50			5.50		
% Ac by Mass of Mix	(b)			5.21			5.21		
%Effect Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$			4.81			4.81		
Specimen Height (cm)	(d)	6.44	6.46	6.51	6.49	6.51	6.55	6.51	6.52
Density									
Mass in Air	gm. (e)	1265.0	1257.6	1263.4	1264.7	1263.6	1265.4	1266.7	1258.4
Mass Sat. Surface Dry	gm. (f)	1272.9	1267.8	1276.7	1271.6	1268.4	1268.6	1271.7	1268.5
Mass in water	gm. (g)	728.8	726.0	723.7	728.2	724.2	723.7	726.8	727.4
Bulk Volume	gm. (h) = f-g	544.1	541.8	544.0	543.4	544.2	544.9	544.9	541.1
Bulk Density	gm./ml. (i) = e/h	2.325	2.321	2.322	2.327	2.322	2.322	2.325	2.326
Average Density			2.324				2.324		

ตารางผนวกที่ ก43 (ต่อ)

	No. of Specimen	Soaked Sample				Unsoaked Sample				
		1	2	3	4	1	2	3	4	
VOIDS ANALYSIS										
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	11.0	10.9	11.0	11.0	10.9	11.0	11.0	11.0
Volume Aggregate	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	82.0	81.9	81.9	82.1	81.9	81.9	82.0	82.0
VMA	%	(l) = $100-k$	18.0	18.1	18.1	17.9	18.1	18.1	18.0	18.0
Air Voids	%	(m) = $l-j$	7.0	7.2	7.1	6.9	7.1	7.1	7.0	7.0
VFB	%	(n) = $100*j/l$	61.0	60.4	60.6	61.3	60.5	60.6	60.9	61.1
Stability										
Meas	lb		5602	5342	6315	6510	6726	7288	6943	6748
Adjust	lb		5322	5021	5873	6120	6255	6705	6457	6276
Average Stability	lb				5584				6423	
Flow										
Meas	in( 1/100)		37	42	40	42	27	27	27	29
Average Flows	in( 1/100)				40				28	
Strength Index (%) =										
		Soaked Stability *100			5,584x100					
		Unsoaked Stability			6,423					86.9 %

ตารางผนวกที่ ก44 ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

Mix proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 40:18:20:22

Pen. Grade PMA

Average. Sp.of Gr. Aggregate and Filler (Gag) = 2.687

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , Double Plungers 20.7 MPa (3000 psi)

Asphalt Absorption = 0.43 %

	No. of Specimen	Soaked Sample				Unsoaked Sample			
		1	2	3	4	1	2	3	4
% Ac by Mass of Aggregate	(a)			5.50			5.50		
% Ac by Mass of Mix	(b)			5.21			5.21		
%Effect Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$			4.81			4.81		
Specimen Height (cm)	(d)	6.51	6.55	6.54	6.60	6.53	6.53	6.52	6.52
Density									
Mass in Air	gm. (e)	1263.7	1264.9	1267.2	1265.4	1266.3	1266.1	1263.3	1267.8
Mass Sat. Surface Dry	gm. (f)	1267.9	1268.6	1272.1	1269.9	1269.6	1270.4	1267.7	1271.4
Mass in water	gm. (g)	723.9	724.2	727.2	725.3	725.5	725.6	723.8	726.0
Bulk Volume	gm. (h) = f-g	544.0	544.4	544.9	544.6	544.1	544.8	543.9	545.4
Bulk Density	gm./ml. (i) = e/h	2.323	2.323	2.326	2.324	2.327	2.324	2.323	2.325
Average Density			2.324				2.325		

ตารางผนวกที่ ก44 (ต่อ)

	No. of Specimen	Soaked Sample				Unsoaked Sample				
		1	2	1	2	1	2	1	2	
VOIDS ANALYSIS										
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
Volume Aggregate	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	81.9	82.0	82.0	82.0	82.1	82.0	81.9	82.0
VMA	%	(l) = $100-k$	18.1	18.0	18.0	18.0	17.9	18.0	18.1	18.0
Air Voids	%	(m) = $l-j$	7.1	7.1	7.0	7.1	6.9	7.1	7.1	7.0
VFB	%	(n) = $100*j/l$	60.7	60.8	61.1	60.8	61.3	60.8	60.6	60.9
Stability										
Meas	lb		7246	7461	7288	6963	8650	7829	7699	8089
Adjust	lb		6739	6864	6705	6337	8044	7281	7160	7523
Average Stability	lb			6661				7502		
Flow										
Meas	in( 1/100)		44	45	43	45	29	28	29	31
Average Flows	in( 1/100)			44				29		

$$\text{Strength Index (\%)} = \frac{\text{Soaked Stability} * 100}{\text{Unsoaked Stability}} = \frac{6,661 \times 100}{7,502} = 88.8 \%$$

ตารางผนวกที่ ก45 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	No.	AC 40/50			AC 60/70			PMA		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm)	1	99.94	99.77	99.75	100.32	100.17	100.02	100.22	100.10	100.00
	2	100.03	100.04	100.03	100.31	99.98	100.11	100.16	100.13	99.89
Average Diameter	(mm)	99.99	99.91	99.89	100.32	100.08	100.07	100.19	100.12	99.95
Height (mm)	1	67.74	67.27	67.29	68.33	68.89	68.07	68.15	67.86	68.11
	2	67.96	67.29	67.66	68.25	68.92	68.00	68.14	67.74	68.41
	3	67.94	67.76	67.42	68.14	68.77	67.90	68.14	67.77	68.37
	4	67.94	67.49	67.69	68.09	69.06	68.05	68.31	68.19	68.52
Average Height	(mm)	67.90	67.45	67.52	68.20	68.91	68.01	68.19	67.89	68.35
Dry mass	(gm)	1218.3	1218.6	1217.7	1237.4	1229.1	1231.7	1234.1	1233.2	1240.0
Saturate surface dry mass	(gm)	1222.8	1223.4	1221.7	1240.1	1231.9	1233.8	1236.2	1236.1	1241.8
Mass in water	(gm)	715.3	716.2	714.5	722.6	717.6	718.7	723.6	723.8	726.6
Bulk Specific Gravity		2.401	2.403	2.401	2.391	2.390	2.391	2.408	2.407	2.407
Ultimate load	(KN)	40.220	40.671	40.400	32.358	32.459	32.152	39.499	38.881	37.990
Indirect Tensile Strength	(MPa)	3.772	3.842	3.814	3.011	2.996	3.008	3.681	3.642	3.540
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		3.809			3.005		3.621		

ตารางผนวกที่ ก46 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	No.	AC 40/50			AC 60/70			PMA		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm)	1	100.70	100.18	100.22	100.18	100.05	100.05	100.03	100.09	100.09
	2	100.18	100.06	100.25	100.06	100.08	100.65	100.11	100.00	100.04
Average Diameter	(mm)	100.44	100.12	100.24	100.12	100.07	100.35	100.07	100.05	100.07
Height (mm)	1	66.40	65.60	65.62	69.21	68.29	69.29	68.39	69.04	68.76
	2	66.43	66.32	65.85	69.26	68.49	68.22	68.38	68.68	68.80
	3	66.48	65.34	65.73	69.06	68.46	68.40	68.60	68.75	68.78
	4	66.47	65.58	65.25	69.22	68.49	68.18	68.56	68.86	68.78
Average Height	(mm)	66.45	65.71	65.61	69.19	68.43	68.52	68.48	68.83	68.78
Dry mass	(gm)	1211.7	1203.9	1212.0	1241.2	1230.0	1229.9	1240.2	1236.3	1239.2
Saturate surface dry mass	(gm)	1214.9	1209.7	1217.7	1243.7	1232.3	1232.3	1241.8	1238.5	1240.5
Mass in Water	(gm)	711.2	709.0	713.5	724.8	718.0	717.5	727.9	725.4	726.6
Bulk Specific Gravity		2.406	2.404	2.404	2.392	2.392	2.389	2.413	2.409	2.411
Ultimate Load	(KN)	21.080	20.468	21.995	15.319	15.839	14.233	21.080	21.495	21.984
Indirect tensile strength	(MPa)	2.011	1.981	2.129	1.408	1.473	1.318	1.958	1.987	2.033
Average Indirect tensile strength	(MPa)		2.040			1.399			1.993	

ตารางผนวกที่ 47 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	No.	AC 40/50			AC 60/70			PMA		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm)	1	99.96	100.12	99.94	100.03	100.12	100.20	100.18	100.03	99.91
	2	100.03	100.10	100.18	100.04	100.07	100.13	100.16	99.75	100.13
Average Diameter	(mm)	100.00	100.11	100.06	100.04	100.10	100.17	100.17	99.89	100.02
Height (mm)	1	67.35	66.15	67.33	68.11	68.04	67.64	69.20	67.06	68.20
	2	67.27	65.77	67.39	68.13	68.11	67.58	69.09	67.13	68.12
	3	67.40	66.03	67.40	68.09	68.16	67.61	69.02	67.15	68.19
	4	67.34	66.27	67.32	68.10	68.10	67.66	68.91	67.18	68.14
Average Height	(mm)	67.34	66.06	67.36	68.11	68.10	67.62	69.06	67.13	68.16
Dry mass	(gm)	1217.2	1218.7	1215.5	1225.8	1228.9	1228.8	1232.2	1229.0	1236.7
Saturate surface dry mass	(gm)	1224.4	1225.8	1221.0	1229.0	1230.8	1231.0	1233.8	1231.6	1237.5
Mass in water	(gm)	717.7	719.1	714.0	716.2	716.8	716.8	722.3	721.7	724.7
Bulk Specific Gravity		2.402	2.405	2.397	2.390	2.391	2.390	2.409	2.410	2.412
Ultimate load	(KN)	6.578	6.412	6.032	5.114	5.271	5.071	7.159	7.115	7.567
Indirect Tensile Strength	(MPa)	0.622	0.617	0.570	0.478	0.492	0.477	0.659	0.675	0.707
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		0.603			0.482		0.680		

ตารางผนวกที่ 48 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	No.	AC 40/50			AC 60/70			PMA		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm)	1	99.92	100.16	100.15	100.44	100.06	100.24	100.12	100.07	100.11
	2	100.40	100.10	100.08	100.38	100.12	100.14	100.01	100.11	100.12
Average Diameter	(mm)	100.16	100.13	100.12	100.41	100.09	100.19	100.07	100.09	100.12
Height (mm)	1	66.91	67.82	66.67	68.47	68.01	67.86	68.19	67.50	68.36
	2	67.26	68.17	65.95	68.68	68.08	67.85	68.28	67.60	68.28
	3	67.24	67.69	65.61	68.87	67.96	67.87	67.99	67.86	68.53
	4	67.79	67.73	65.72	68.77	68.03	67.62	68.15	67.65	68.35
Average Height	(mm)	67.30	67.85	65.99	68.70	68.02	67.80	68.15	67.65	68.38
Dry mass	(gm)	1208.7	1210.5	1202.5	1230.8	1227.5	1231.7	1240.0	1234.5	1238.2
Saturate surface dry mass	(gm)	1212.9	1217.4	1209.4	1233.3	1230.2	1234.3	1241.6	1236.5	1239.6
Mass in water	(gm)	707.5	711.8	707.9	718.3	716.2	718.8	726.9	724.3	726.2
Bulk Specific Gravity		2.392	2.394	2.398	2.390	2.388	2.389	2.409	2.410	2.412
Ultimate load	(KN)	2.052	2.118	1.840	1.662	1.509	1.606	2.454	2.866	2.750
Indirect Tensile Strength	(MPa)	0.194	0.198	0.177	0.153	0.141	0.151	0.229	0.269	0.256
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		0.190			0.148			0.251	

ตารางผนวกที่ 49 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	No.	AC 40/50			AC 60/70			PMA		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm)	1	100.23	100.20	100.26	100.86	100.93	100.26	100.10	100.13	100.13
	2	100.30	100.14	100.20	100.24	100.18	100.21	100.04	100.02	100.12
Average Diameter	(mm)	100.27	100.17	100.23	100.55	100.56	100.24	100.07	100.08	100.13
Height (mm)	1	67.44	67.51	66.79	69.35	68.30	68.94	68.04	67.53	69.10
	2	67.41	67.52	66.82	68.88	68.20	68.80	68.19	67.69	69.12
	3	67.48	67.34	66.76	69.51	68.89	69.09	68.38	67.62	69.08
	4	67.36	67.60	66.72	69.25	68.04	68.88	67.99	67.44	68.92
Average Height	(mm)	67.42	67.49	66.77	69.25	68.36	68.93	68.15	67.57	69.06
Dry mass	(gm)	1215.4	1215.5	1217.8	1234.4	1237.7	1236.2	1230.1	1237.9	1237.6
Saturate surface dry mass	(gm)	1220.2	1222.2	1220.6	1236.8	1240.2	1239.4	1232.9	1240.2	1238.6
Mass in water	(gm)	714.5	715.2	713.9	720.3	722.6	721.6	722.8	726.3	724.7
Bulk Specific Gravity		2.403	2.397	2.403	2.390	2.391	2.387	2.411	2.409	2.408
Ultimate load	(KN)	1.360	1.301	1.325	1.107	1.217	1.115	1.527	1.479	1.581
Indirect Tensile Strength	(MPa)	0.128	0.123	0.126	0.101	0.113	0.103	0.143	0.139	0.146
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		0.126			0.106			0.142	

ตารางผนวกที่ 50 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	Type	AC 40/50				AC 60/70				PMA									
		No.	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)					
Diameter (mm)	1		99.9		99.5		99.9		100.1		100.2		100.1		100.1		100.1		100.1
	2		100.0		99.5		99.5		100.0		100.1		100.1		100.0		100.1		100.1
Average Diameter	(mm)		99.9		99.5		99.7		100.0		100.2		100.1		100.1		100.1		100.1
Height (mm)	1		66.2		66.8		66.9		68.2		68.8		68.9		68.8		68.7		67.4
	2		66.1		66.8		66.9		68.0		68.8		69.0		68.8		68.7		67.5
	3		66.1		66.6		66.8		68.3		68.9		68.7		69.0		68.6		67.6
	4		66.2		66.8		66.5		68.1		68.8		68.8		68.8		68.5		67.5
Average Height	(mm.)		66.2		66.7		66.8		68.1		68.8		68.8		68.9		68.6		67.5
Bulk Specific Gravity			2.399		2.393		2.394		2.390		2.389		2.389		2.407		2.406		2.405
Pulse 1	(MPa)	189	1818	177	1855	173	17	140	1548	145	1379	135	14	167	1640	156	1551	159	149
Pulse 2	(MPa)	179	1846	185	1916	179	18	145	1470	143	1362	137	14	160	1655	157	1558	159	149
Pulse 3	(MPa)	187	1845	186	1796	165	17	144	1344	139	1368	136	14	154	1655	156	1565	161	151
Pulse 4	(MPa)	186	1838	180	1934	168	17	146	1489	142	1374	137	14	161	1627	156	1568	160	151
Pulse 5	(MPa)	183	1781	188	1820	172	18	146	1454	142	1379	137	14	161	1605	154	1559	158	149
Mean	(MPa)	185	1826	183	1864	171	17	144	1461	143	1372	136	14	161	1636	156	1560	159	150
CV	(%)		1.47		1.62		4.31		1.01		4.09		3.73		1.50		0.11		6.18
Resilient Modulus	(MPa)		18,396		18,497		17,564		14,541		14,016		13,959		16,247		15,617		15,513
Average Resilient	(MPa)				18,152						14,172						15,792		
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)		1.34		1.90		3.24		2.60		1.10		1.50		2.88		1.11		1.77

ตารางผนวกที่ ก51 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	Type	AC 40/50						AC 60/70						PMA						
	No.	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	
Diameter (mm)	1	99.9		99.5		99.9		100.1		100.2		100.1		100.1		100.1		100.1		100.1
	2	100.0		99.5		99.5		100.0		100.1		100.1		100.0		100.1		100.1		100.1
Average Diameter	(mm)	99.9		99.5		99.7		100.0		100.2		100.1		100.1		100.1		100.1		100.1
Height (mm)	1	66.2		66.8		66.9		68.2		68.8		68.9		68.8		68.7		68.7		67.4
	2	66.1		66.8		66.9		68.0		68.8		69.0		68.8		68.7		68.7		67.5
	3	66.1		66.6		66.8		68.3		68.9		68.7		69.0		68.6		68.6		67.6
	4	66.2		66.8		66.5		68.1		68.8		68.8		68.8		68.5		68.5		67.5
Average Height	(mm.)	66.2		66.7		66.8		68.1		68.8		68.8		68.9		68.6		68.6		67.5
Bulk Specific Gravity		2.399		2.393		2.394		2.390		2.389		2.389		2.407		2.406		2.405		2.405
Pulse 1	(MPa)	716	734	669	626	745	747	511	486	482	474	504	496	604	544	624	595	653	652	652
Pulse 2	(MPa)	701	744	642	631	764	752	514	483	481	475	495	500	608	567	616	592	652	613	613
Pulse 3	(MPa)	694	731	653	623	756	754	513	483	480	472	490	498	606	573	623	587	641	598	598
Pulse 4	(MPa)	687	713	619	625	766	777	511	484	483	472	492	500	603	562	616	591	646	604	604
Pulse 5	(MPa)	688	712	646	631	746	762	513	480	483	475	499	499	601	573	617	586	641	602	602
Mean	(MPa)	697	727	646	627	755	758	513	483	482	474	496	499	604	564	619	590	647	614	614
CV	(%)	4.17		2.89		0.40		5.92		1.67		0.54		6.91		4.78		5.19		5.19
Resilient Modulus	(MPa)	7,125		6,370		7,574		4,984		4,781		4,977		5,846		6,052		6,307		6,307
Average Resilient	(MPa)			7,023						4,914						6,068				
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	1.45		9.30		7.85		1.42		2.70		1.28		3.66		0.27		3.93		3.93

ตารางผนวกที่ ก52 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	Type	AC 40/50						AC 60/70						PMA							
		No.	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	
Diameter (mm)	1		99.9		99.5		99.9		100.1		100.2		100.1		100.1		100.1		100.1		100.1
	2		100.0		99.5		99.5		100.1		100.1		100.1		100.0		100.1		100.1		100.1
Average Diameter	(mm)		99.9		99.5		99.7		100.1		100.2		100.1		100.1		100.1		100.1		100.1
Height (mm)	1		66.2		66.8		66.9		67.4		68.8		68.9		68.8		68.7		68.7		67.4
	2		66.1		66.8		66.9		67.3		68.8		69.0		68.8		68.7		68.7		67.5
	3		66.1		66.6		66.8		67.4		68.9		68.7		69.0		68.6		68.6		67.6
	4		66.2		66.8		66.5		67.5		68.8		68.8		68.8		68.5		68.5		67.5
Average Height	(mm.)		66.2		66.7		66.8		67.4		68.8		68.8		68.9		68.6		68.6		67.5
Bulk Specific Gravity			2.399		2.393		2.394		2.387		2.389		2.389		2.407		2.406		2.406		2.405
Pulse 1	(MPa	1728	1647	1679	1588	1676	1590	930	909	978	995	957	929	113	106	124	121	108	1149		
Pulse 2	(MPa	1768	1671	1692	1601	1678	1651	944	922	102	101	959	962	114	112	128	124	112	1183		
Pulse 3	(MPa	1777	1648	1728	1543	1777	1642	957	949	100	100	101	971	114	111	129	126	113	1188		
Pulse 4	(MPa	1746	1680	1722	1558	1791	1668	952	949	101	994	978	971	115	110	131	126	114	1210		
Pulse 5	(MPa	1764	1684	1712	1573	1749	1669	982	947	102	996	986	969	116	111	131	125	113	1209		
Mean	(MPa	1757	1666	1707	1573	1734	1644	953	935	100	100	978	960	114	110	128	124	112	1188		
CV	(%)		5.32		8.17		5.33		1.91		0.80		1.86		3.72		3.23		5.71		
Resilient Modulus	(MPa		1,712		1,640		1,689		944		1,005		969		1,128		1,269		1,155		
Average Resilient	(MPa				1,680						973						1,184				
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)		1.86		2.39		0.53		2.95		3.32		0.38		4.72		7.15		2.44		

ตารางผนวกที่ ก53 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	Type	AC 40/50						AC 60/70						PMA					
	No.	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)
Diameter (mm)	1	99.9		99.5		99.9		100.1		100.2		100.1		100.1		100.1		100.2	
	2	100.0		99.5		99.5		100.1		100.1		100.0		100.0		100.1		100.2	
Average Diameter	(mm)	99.9		99.5		99.7		100.1		100.2		100.0		100.1		100.1		100.2	
Height (mm)	1	66.2		66.8		66.9		67.4		68.8		68.7		68.8		68.7		69.2	
	2	66.1		66.8		66.9		67.3		68.8		68.8		68.8		68.7		69.1	
	3	66.1		66.6		66.8		67.4		68.9		68.6		69.0		68.6		69.0	
	4	66.2		66.8		66.5		67.5		68.8		68.6		68.8		68.5		68.9	
Average Height	(mm.)	66.2		66.7		66.8		67.4		68.8		68.7		68.9		68.6		69.1	
Bulk Specific Gravity		2.399		2.393		2.394		2.390		2.389		2.387		2.407		2.406		2.404	
Pulse 1	(MPa)	268	265	249	288	300	264	201	204	187	184	191	217	297	271	281	286	316	310
Pulse 2	(MPa)	272	302	269	275	307	282	209	213	210	214	215	230	342	307	320	314	305	309
Pulse 3	(MPa)	285	266	270	271	328	292	217	193	210	155	212	194	302	275	289	311	307	296
Pulse 4	(MPa)	255	279	270	275	306	284	246	185	210	186	204	211	303	311	290	308	313	302
Pulse 5	(MPa)	250	285	272	258	320	296	216	212	212	227	182	191	283	294	297	309	308	319
Mean	(MPa)	266	279	266	273	312	284	218	201	206	193	201	209	305	291	295	306	310	307
CV	(%)	4.77		2.60		9.40		8.11		6.52		3.90		4.70		3.66		0.97	
Resilient Modulus	(MPa)	273		270		298		210		200		205		298		301		309	
Average Resilient Modulus	(MPa)			280						205						302			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	2.68		3.75		6.43		2.36		2.52		0.16		1.43		0.61		2.04	

ตารางผนวกที่ ก54 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Specimen	Type	AC 40/50						AC 60/70						PMA					
	No.	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)
Diameter (mm)	1	99.9		99.5		99.9		100.1		100.2		100.1		100.1		100.1		100.2	
	2	100.0		99.5		99.5		100.1		100.1		100.0		100.0		100.1		100.2	
Average Diameter	(mm)	99.9		99.5		99.7		100.1		100.2		100.0		100.1		100.1		100.2	
Height (mm)	1	66.2		66.8		66.9		67.4		68.8		68.7		68.8		68.7		69.2	
	2	66.1		66.8		66.9		67.3		68.8		68.8		68.8		68.7		69.1	
	3	66.1		66.6		66.8		67.4		68.9		68.6		69.0		68.6		69.0	
	4	66.2		66.8		66.5		67.5		68.8		68.6		68.8		68.5		68.9	
Average Height	(mm.)	66.2		66.7		66.8		67.4		68.8		68.7		68.9		68.6		69.1	
Bulk Specific Gravity		2.399		2.393		2.394		2.390		2.389		2.387		2.407		2.406		2.404	
Pulse 1	(MPa)	162	137	174	153	151	168	131	133	127	113	128	114	217	221	224	217	213	199
Pulse 2	(MPa)	176	161	188	158	149	142	133	160	128	118	130	114	232	237	230	231	245	223
Pulse 3	(MPa)	173	176	167	155	154	144	129	145	144	114	121	106	225	241	229	229	219	199
Pulse 4	(MPa)	188	173	177	159	147	176	119	135	127	155	109	113	229	234	226	214	215	204
Pulse 5	(MPa)	163	159	179	189	152	159	129	115	138	134	124	126	209	240	225	208	207	199
Mean	(MPa)	172	161	177	163	151	158	128	138	133	127	122	114	223	235	227	220	220	205
CV	(%)	6.61		8.24		4.53		7.52		4.62		6.78		5.24		3.13		7.06	
Resilient Modulus	(MPa)	167		170		155		133		130		118		229		224		213	
Average Resilient Modulus	(MPa)			164						127						222			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	1.73		3.87		5.60		4.72		2.36		7.09		3.31		0.83		4.14	

ตารางผนวกที่ ก55 ผลการทดสอบ Fatigue test ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Diameter (mm)	100.1	99.8	99.6	99.7	99.7	99.9	99.8	100.1	99.9	100.1	99.9	100.0	100.1	100.0	100.2
Height (mm)	66.6	66.1	68.6	68.8	68.7	69.4	66.4	65.4	66.6	66.1	67.9	67.7	67.5	68.3	67.1
Bulk specific gravity	2.401	2.405	2.408	2.408	2.398	2.392	2.402	2.402	2.401	2.405	2.412	2.393	2.401	2.399	2.401
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Loading force (kN)	0.770	0.760	0.790	2.100	1.490	1.590	1.520	1.510	1.530	2.430	3.160	2.490	3.110	3.140	3.350
Initial Stiffness modulus (MPa)	1,624	1,805	2,017	1,891	1,504	1,531	1,138	1,319	1,256	1,400	1,465	1,453	1,196	1,280	1,291
Initial strain ( $\epsilon_x$ , Microstrain)	92.9	83.3	74.8	211.3	188.8	195.6	263.1	228.3	239.0	342.6	415.3	330.5	502.0	469.0	503.6
Log of $\epsilon_x$	1.97	1.92	1.87	2.32	2.28	2.29	2.42	2.36	2.38	2.53	2.62	2.52	2.70	2.67	2.70
Indirect tensile stress ( $\sigma_x$ ,kPa)	74	73	74	195	139	146	146	147	146	234	297	234	293	293	317
Log of $\sigma_x$	1.87	1.87	1.87	2.29	2.14	2.16	2.16	2.17	2.17	2.37	2.47	2.37	2.47	2.35	2.50
Horizontal deformation ( $\mu\text{m}$ )	3.45	12.15	5.70	21.70	8.08	7.89	6.17	3.20	12.80	6.64	3.96	25.38	12.36	7.91	23.67

ตารางผนวกที่ ก55 (ต่อ)

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Stiffness modulus at failure (MPa)	744	1,410	1,008	1,009	744	753	791	653	776	674	672	683	625	635	638
No. of repetitions at failure	58,304	100,000	60,992	6,216	12,000	7,168	7,032	5,160	7,008	2,624	2,828	2,612	1,010	990	928
Log of No. of repetitions at failure	4.77	5.00	4.79	3.79	4.08	3.86	3.85	3.71	3.85	3.42	3.45	3.42	3.00	3.00	2.97

NA = Unavailable results due to machine error

Loading Waveshape : Haversine

Loading pulse width : 250 ms

Pulse repetition period : 1500 ms

ตารางผนวกที่ ก56 ผลการทดสอบ Fatigue test ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Diameter (mm)	100.2	100.2	100.2	100.0	100.0	100.1	100.1	100.0	100.0	100.0	100.1	100.2	100.2	100.0	100.0
Height (mm)	68.8	69.3	69.8	68.5	68.7	69.1	68.3	68.3	69.2	68.5	68.9	69.3	67.9	68.9	68.5
Bulk specific gravity	2.388	2.387	2.388	2.390	2.388	2.386	2.394	2.387	2.394	2.390	2.393	2.390	2.385	2.387	2.388
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Loading force (kN)	2.850	3.190	3.480	2.100	1.900	1.760	2.040	1.730	1.480	1.100	0.950	1.380	0.470	0.530	0.580
Initial Stiffness modulus (MPa)	1,100	1,248	1,322	1,015	847	728	1,184	952	855	1,167	902	1,296	935	1,029	1,394
Initial strain ( $\epsilon_x$ , Microstrain)	490.3	480.6	491.2	394.2	425.9	456.1	329.0	347.4	326.5	179.4	199.3	200.2	96.5	97.6	79.3
Log of $\epsilon_x$	2.69	2.68	2.69	2.60	2.63	2.66	2.52	2.54	2.51	2.25	2.30	2.30	1.98	1.99	1.90
Indirect tensile stress ( $\sigma_x$ , kPa)	263	293	317	195	176	162	190	161	136	102	88	127	44	49	54
Log of $\sigma_x$	2.42	2.47	2.50	2.29	2.25	2.21	2.28	2.21	2.13	2.01	1.94	2.10	1.64	1.69	1.73
Horizontal deformation ( $\mu\text{m}$ )	21.50	21.00	21.50	17.20	18.60	19.90	14.40	15.20	14.30	7.80	8.70	8.80	4.20	4.30	3.50

ตารางผนวกที่ ก56 (ต่อ)

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Stiffness modulus at failure (MPa)	546	625	662	508	423	365	597	476	431	584	451	646	742	535	695
No. of repetitions at failure															70,9
	1,056	566	606	1,450	1,050	1,988	1,908	2,660	3,028	9,664	7,368	4,536	NA	NA	12
Log of No. of repetitions at failure	3.02	2.75	2.78	3.16	3.02	3.30	3.28	3.42	3.48	4.00	3.87	3.66	NA	NA	4.85

NA = Unavailable results due to machine error

Loading Waveshape : Haversine

Loading pulse width : 250 ms

Pulse repetition period : 1500 ms

ตารางผนวกที่ ก57 ผลการทดสอบ Fatigue test ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Diameter (mm)	100.1	100.1	100.1	100.1	100.2	100.2	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1	100.0	100.1	100.1	100.0
Height (mm)	69.3	69.3	69.7	69.5	69.1	68.1	69.5	68.3	68.9	68.7	68.7	68.0	69.2	69.3	68.6
Bulk specific gravity	2.409	2.403	2.406	2.407	2.405	2.402	2.401	2.408	2.401	2.404	2.409	2.411	2.407	2.401	2.402
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Loading force (kN)	3.140	2.920	3.210	2.130	2.860	2.090	1.600	1.890	1.750	1.690	1.370	1.350	0.740	0.610	0.600
Initial Stiffness modulus (MPa)	1,197	1,159	1,225	1,006	1,385	985	880	1,278	937	1,637	1,323	1,343	1,428	1,197	1,071
Initial strain ( $\epsilon_x$ , Microstrain)	493.2	474.3	490.1	397.1	389.0	405.5	340.8	282.6	353.5	195.8	196.7	192.8	97.9	95.8	106.6
Log of $\epsilon_x$	2.69	2.68	2.69	2.60	2.59	2.61	2.53	2.45	2.55	2.29	2.29	2.29	1.99	1.98	2.03
Indirect tensile stress ( $\sigma_x$ , kPa)	288	268	293	195	263	195	146	176	162	156	127	126	68	56	56
Log of $\sigma_x$	2.46	2.43	2.47	2.29	2.42	2.29	2.17	2.25	2.21	2.19	2.10	2.10	1.83	1.75	1.75
Horizontal deformation ( $\mu\text{m}$ )	21.60	20.70	21.40	17.40	17.00	17.70	14.90	12.30	15.50	8.60	8.60	8.40	4.30	4.20	4.70

ตารางผนวกที่ ก57 (ต่อ)

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Stiffness modulus															
at failure (MPa)	596	579	613	501	711	493	444	639	466	820	662	671	1,005	888	741
No. of repetitions															
at failure	960	1,300	1,112	2,144	2,452	2,832	4,368	4,792	3,068	11,776	8,304	9,408	NA	NA	NA
Log of No. of repetitions at failure	2.98	3.11	3.05	3.33	3.39	3.45	3.64	3.68	3.49	4.00	3.92	3.97	NA	NA	NA

NA = Unavailable results due to machine error

Loading Waveshape : Haversine

Loading pulse width : 250 ms

Pulse repetition period : 1500 ms

ตารางผนวกที่ ก58 ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Target temperature (°C)	40	Target confining Stress (kPa)						220		
Target contact Stress (kPa)	26	Target deviator Stress (kPa)						520		
Termination microstrain	50,000	Termination cycle						10,000		
Specimen	Type	AC 40/50			AC 60/70			PMA		
	No.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm.)	1	99.9	99.9	100.0	100.0	99.9	100.1	100.1	99.8	100.0
	2	100.1	99.9	100.1	100.0	100.1	100.1	100.0	100.0	100.0
Average Diameter (mm.)		100.0	99.9	100.0	100.0	100.0	100.1	100.0	99.9	100.0
Height (mm.)	1	67.9	68.0	68.3	67.1	68.0	67.5	68.4	67.1	66.4
	2	67.9	68.1	68.5	67.2	67.8	67.2	68.7	67.1	66.7
	3	68.9	68.3	68.7	67.1	67.8	67.8	67.7	67.1	66.5
	4	68.7	68.4	68.1	67.3	67.6	67.4	68.6	67.3	66.5
Average Height (mm.)		68.4	68.2	68.4	67.2	67.8	67.5	68.6	67.1	66.5
Bulk Specific Gravity		2.396	2.402	2.404	2.394	2.389	2.392	2.408	2.403	2.410
Termination cycle		10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Accumulated microstrain		7,186	8,735	8,019	12,224	14,559	14,186	9,221	9,323	8,458
Flow point (cycle)		-	-	-	5,063	5,126	4,052	-	-	-
Microstrain @ flow point		6,222	6,461	9,873	8,795	12,001	9,580	7,642	6,955	8,119
Permanent microstrain per cycle		0.72	0.87	0.80	1.22	1.46	1.42	0.92	0.93	0.85
Average permanent microstrain per cycle			0.80			1.37			0.90	

ตารางผนวกที่ 59 ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Target temperature (°C)	60	Target confining Stress (kPa)	220
Target contact Stress (kPa)	26	Target deviator Stress (kPa)	520
Termination microstrain	50000	Termination cycle	10,000

Specimen	Type	AC 40/50			AC 60/70			PMA		
	No.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm.)	1	99.9	100.0	98.8	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	100.1
	2	100.0	100.0	99.9	100.1	100.0	100.0	100.1	100.1	100.1
Average Diameter (mm.)		100.0	100.0	99.3	100.0	99.9	100.0	100.1	100.1	100.1
Height (mm.)	1	67.9	68.4	78.4	67.4	67.1	66.6	66.4	66.6	67.1
	2	67.9	68.5	78.1	67.2	67.0	66.5	66.5	67.0	67.3
	3	68.0	68.4	78.0	67.5	66.9	66.6	66.5	67.1	67.2
	4	67.9	68.7	78.1	67.5	67.0	66.6	66.7	66.8	67.3
Average Height (mm.)		67.9	68.5	78.2	67.4	67.0	66.6	66.5	66.9	67.2
Bulk Specific Gravity		2.395	2.405	2.404	2.394	2.392	2.391	2.407	2.410	2.410
Termination cycle		9,358	9,630	8,649	5,958	5,043	5,614	7,103	6,844	8,004
Accumulated microstrain		50,001	50,001	50,012	50,002	50,010	50,012	50,002	50,005	50,009
Flow point (cycle)		2,350	2,135	1,995	1,226	1,335	1,271	1,215	2,226	2,338
Microstrain @ flow point		35,715	15,009	12,642	24,671	30,872	15,757	49,675	49,088	45,427
Permanent microstrain per cycle		5.34	5.19	5.78	8.39	9.92	8.91	7.04	7.31	6.25
Average permanent microstrain per cycle			5.44			9.07			6.86	

ตารางผนวกที่ ก60 ผลการทดสอบวัสดุรวมของหินบะซอลท์ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกรมทางหลวง

Description	Hot Bin 1				Hot Bin								Total		
	Passing #200		Retained #200		Total		Bin 2		Bin 3		Bin 4		Total		
	งานวิจัย	กรัม	งานวิจัย	กรัม	งานวิจัย	กรัม	งานวิจัย	กรัม	งานวิจัย	กรัม	งานวิจัย	กรัม	งานวิจัย	กรัม	
Mix Proportion (%)	-	-	-	-	40	40	18	18	20	20	22	22	100	100	
Bulk Specific Gravity	-	-	2.651	2.624	2.683	2.662	2.687	2.664	2.693	2.677	2.689	2.686	2.687	2.671	
Apparent Specific Gravity	2.908	2.938	2.901	2.935	2.902	2.935	2.936	2.934	2.929	2.933	2.921	2.938	2.918	2.935	
Water Absorption (%)	-	-	3.21	4.01	-	-	3.16	3.42	2.99	3.26	2.95	3.19	-	-	
เหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด (%) ไม่น้อยกว่า 45 %	-	-	-	-	45.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
เหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ (%) ไม่น้อยกว่า 90 %	-	-	-	-	-	-	100	-	100	-	100	-	-	-	
ความแบนและความยาวของอนุภาค (%) ไม่เกิน 10 %	-	-	-	-	-	-	8.09	-	3.63	-	2.95	-	-	-	
Flakiness Index (%)	มาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 35						42	44	24	23	12	13	23	23	
Elongation Index (%)	มาตรฐาน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5						10	9	18	18	13	16	15	15	
Asphalt Absorption (%)			งานวิจัย	AC 40/50 = 0.43, AC 60/70 = 0.43, PMA = 0.43						กรัม	AC 60/70 = 0.44				
Los Angeles Abrasion (%)	มาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 40		งานวิจัย	18.3 %						กรัม	19.3 %				
Soundness (% Wt.Loss)	มาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 9		งานวิจัย	Coarse Aggregate 3/4" =1.90 %,Fine Aggregate = 3.40 %											
			กรัม	Coarse Aggregate 3/4" =0.70 %,Fine Aggregate =3.7 %											
Sand Equivalent (%)	มาตรฐาน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50		งานวิจัย	72 %						กรัม	67 %				

หมายเหตุ กรัมคือผลการทดสอบของกรมทางหลวง

ตารางผนวกที่ ก61 ผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสานยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA

Test	Unit	Type		
		AC 60/70	AC 40/50	PMA
Original Binder				
Penetration Test (25° C)	Pen.	69	45	60
Softening Point	° C	46.2	51.2	-
Viscosity (135°C, 20 rpm, spindle 21)	cP	392.5	527.5	1230
Ductility (25° C)	cm	> 150	> 150	> 150
Thin Film Oven				
Penetration Test (25° C)	Pen.	46	30	45
Softening Point	° C	52.2	56.1	-
Viscosity (135°C, 20 rpm, spindle 21)	cP	517.5	725	-
Ductility (25° C)	cm	> 150	> 150	> 150
Change in Weight	%	0.02	0.213	-

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายวิฑูร ไร่ห้วย
เกิดวันที่	5 กรกฎาคม 2525
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดแพร่
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (โยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ฐัญบุรี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทรงวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

