



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง คุณสมบัติด้านการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูน โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

Permanent Deformation Resistance Properties of Lab-Made Asphalt Concrete Mixtures
Using Lime Stone Aggregates

นามผู้วิจัย นายณภัทรพี อนันตชัยพงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์พิพัฒน์ สอนวงษ์, วศ.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศิบุญ เมธากุลชาติ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ธวัช สวัสดิ์สันต์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบอย่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูน
โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

Permanent Deformation Resistance Properties of Lab-Made Asphalt Concrete Mixtures
Using Lime Stone Aggregates

โดย

นายณภัทรพี อนันตชัยพงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2552

นภัทรทิ อนันตชัยพงศ์ 2552: คุณสมบัติด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูนโดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ พิพัฒน์ สอนวงษ์, วศ.ม. 124 หน้า

ในการศึกษาคุณสมบัติด้านทานการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูนโดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบ Dynamic Creep test โดยเครื่อง Simple Performance Tester เพื่อจำลองสภาพของถนนขณะรับน้ำหนักบรรทุกจราจรและมีแรงดันด้านข้าง ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆ ได้แก่ ค่าเสถียรภาพและค่าการไหล ,ดัชนีความแข็งแรง,ความไวต่อความชื้น,ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสคืนตัว โดยวัสดุรวมที่ใช้ในการศึกษานี้คือหินปูนจากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3 จังหวัดชลบุรี และวัสดุเชื่อมประสานได้แก่ ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ โพลีเมอร์ โมดิฟายด์แอสฟัลต์(PMA)

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ 5 อุณหภูมิพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 ในช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 60 องศาเซลเซียสและสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 ทุกอุณหภูมิ สำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่ 5 อุณหภูมิพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5-35 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่า ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำสุด

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของก้อนตัวอย่างในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 และ PMA มีคุณสมบัติที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 และจากการทดสอบ Dynamic Creep test ชี้ให้เห็นชัดว่า วัสดุประสานที่ใช้ยางชนิด PMA จะเกิดค่าการยุบตัวถาวรได้ช้ากว่าแอสฟัลต์ชนิดอื่นๆ

Naphatrapee Anantachaiyapong 2009: Permanent Deformation Resistance Properties of Lab-Made Asphalt Concrete Mixtures Using Lime Stone Aggregates. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Piphat Sornwong, M.Eng. 124 pages.

In this research, , the dynamic creep tests using Simple Performance tester were conducted to simulate the actual loading condition in the pavement with the vertical load from traffic and the horizontal confining stress. Further, several tests to determine engineering properties of asphalt concrete material namely stability and flow test, strength index, moisture-induced damage, indirect tensile strength test and resilient modulus test were also conducted in this research. The lime stone aggregates are in the highway number 3 contraction project in Chonburi. A asphalt binders penetration grade 40/50 and 60/70 (AC 40/50 and AC 60/70) and polymer modified asphalt (PMA) were used to produce asphalt concrete materials in this study.

Results of indirect tensile strength test at 5 temperatures indicated that in general asphalt concrete materials with PMA have the indirect tensile strength greater than those with AC 40/50 between 35°C – 60°C and AC 60/70 respectively. Results of resilient modulus test at 5 temperatures that asphalt concrete materials with AC 40/50 have the resilient modulus higher than those with PMA at 5-35 degree Celsius. At 50-60 degree celsius, asphalt concrete materials with PMA have higher Resilient modulus than those with AC 40/50. It is noted that, at any temperature, the asphalt concrete materials with AC 60/70 have the lowest Resilient modulus. Finally

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. Moreover the dynamic creep tests the showed that asphalt type PMA is Accumulates strain is slower than all other types.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์พัฒน์ สอนวงศ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ดิบุญ เมธากุลชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ชั้นวิน สวัสดิ์สานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนทำการตรวจสอบ และแก้ไขจนเสร็จได้ด้วยดี

ขอบขอบคุณอาจารย์ชั้นวิน สวัสดิ์สานต์ ที่ให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์ในการใช้วัสดุ สถานที่ อุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ขอบขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนาทางและเจ้าหน้าที่สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ที่ให้การช่วยเหลือในงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ชาย ญาติพี่น้อง ที่อุปการะเลี้ยงดูและเป็นกำลังใจให้จนทำวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ บิดา มารดาและคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

นภัสรพี อนันตชัยพงศ์

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	7
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	63
สรุปและข้อเสนอแนะ	78
สรุป	78
ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	80
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก	82
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	124

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 40/50	4
2	ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC60/70	5
3	ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA)	6
4	ระดับในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ	9
5	แรงพยายามบดอัดของการหมุนที่ออกแบบตามระบบซูเปอร์เพฟ	13
6	ข้อกำหนดความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ	15
7	ข้อกำหนดความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด	16
8	ข้อกำหนดสำหรับอนุภาคแบนและยาวของมวลรวมหยาบ	18
9	ข้อกำหนดปริมาณดินเหนียว	19
10	หลักเกณฑ์สำหรับ VMA ที่ยอมรับได้	49
11	หลักเกณฑ์สำหรับ VFA ที่ยอมรับได้	50
12	การจัดขนาดกะของมวลรวมที่ใช้ทดสอบ	64
13	ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ร้อยละ 4.89	67
14	ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ร้อยละ 4.7	68
15	ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ร้อยละ 5.2	68
16	ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ร้อยละ 5.7	69
17	ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)	71
18	ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง(Strength Index)	72
19	ผลการทดสอบการหาค่าความไวต่อความชื้น	72
20	กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	73
21	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	74
22	ผลการทดสอบค่า Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ผลการจัดขนาดกละของหินแกรนิต (Bin 1)	84
ก2	ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินปูน (Retained #200)	85
ก3	ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินปูน (Passing #200)	86
ก4	ผลการทดสอบ Sand equivalent test ของหินปูน	87
ก5	ผลการทดสอบ Abrasion test of coarse aggregate by Los Angeles Machine	87
ก6	ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Coarse Aggregate) ของหินปูน	88
ก7	ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Fine Aggregate) ของหินปูน	89
ก8	ผลการทดสอบ Uncompacted void content of Fine aggregate ของหินปูน	90
ก9	ผลการทดสอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบกับความแบน และความยาวของอนุภาค ของหินปูน	91
ก10	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 40/50(4.89%)	92
ก11	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 40/50 (4.7 %)	92
ก12	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 40/50 (5.2 %)	93
ก13	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 40/50 (5.7 %)	93
ก14	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 60/70(4.89 %)	94
ก15	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 60/70 (4.7 %)	94
ก16	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 60/70 (5.2 %)	95
ก17	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง AC 60/70 (5.7 %)	95
ก18	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง PMA(4.89 %)	96
ก19	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง PMA (4.7 %)	96
ก20	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง PMA (5.2 %)	97
ก21	การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(G_{mm}) ยาง PMA (5.7 %)	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก22 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	98
ก23 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	99
ก24 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA	100
ก25 ผลการทดสอบ Marshall ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	101
ก26 ผลการทดสอบ Marshall ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	102
ก27 ผลการทดสอบ Marshall ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA	103
ก28 ผลการทดสอบ Strength Index ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50	104
ก29 ผลการทดสอบ Strength Index ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70	106
ก30 ผลการทดสอบ Strength Index ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA	108
ก31 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 , 60/70 และ PMA	110
ก32 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	111
ก33 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 , 60/70 และ PMA	112
ก34 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของยาง AC 40/50, AC 60/70 และ PMA	113
ก35 ผลการทดสอบ Indirect tensile strength ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 , 60/70 และ PMA	114
ก36 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	115
ก37 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	116
ก38 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	117

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก39 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	118
ก40 ผลการทดสอบ Indirect resilient tensile modulus test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	119
ก41 ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	120
ก42 ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	121
ก43 ผลการทดสอบวัสดุของมวลรวมของหินปูนในงานวิจัยเปรียบเทียบกับผล การทดสอบของกรมทางหลวง	122
ก44 ผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสานยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50, 60/70 และ PMA	123

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyratory Compactor	10
2 กลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับเครื่อง SCG	11
3 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด	12
4 เครื่องมือวัดความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด	16
5 การวัดความแบนและความยาวของอนุกรมมวลรวมหยาบ	17
6 การทดสอบสมมูลทราย	17
7 การจัดขนาดกละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับขนาดใหญ่สุด 19 mm	22
8 จัดก้ำกัลดการจัดขนาดกละระบบซูเปอร์เพล์	24
9 แสดงความถ่วงจำเพาะแบบทั้งก้อน ปรากฏ และประสิทธิภาพ	26
10 แผนผังส่วนประกอบของก้อนตัวอย่างที่บดอัดแล้วของ HMA	27
11 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง	30
12 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Stress-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM D 4123	32
13 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Strain-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM DD 213:1993	33
14 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Strain-Control Test ในงานวิจัยนี้	33
15 รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1	35
16 รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ในงานวิจัยนี้	36
17 เครื่อง Gyratory Compactor	45
18 การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ indirect tensile strength test	56
19 การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ Indirect resilient modulus test	57
20 การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากโปรแกรม UTM 16 V2.05 Indirect tensile resilient modulus test	58
21 แสดงวิธีการวัดก้อนตัวอย่าง	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	แสดงวิธีการใส่ถุงยางเพื่อจะให้เกิดแรงดันด้านข้าง (Confining stress)	60
23	การติดตั้งก่อนตัวอย่างในการทำ Dynamic Creep test	61
24	การทดสอบ Dynamic creep test ที่ได้จากโปรแกรม UTS005 1.30 Simple performance flow test	61
25	แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	62
26	กราฟแสดงการจัดขนาดผลของมวลรวมที่ใช้ทดสอบ	66
27	กราฟแสดงช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เทียบกับปริมาณแอสฟัลต์	71
28	กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	74
29	กราฟแสดงความค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ ต่างๆ	75
30	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Accumulates strain ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	76
31	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Strain rate ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	76
32	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Accumulates strain ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	77
33	แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบ กับ Strain rate ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	77

คุณสมบัติด้านการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูน โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

Permanent Deformation Resistance Properties of Lab-Made Asphalt Concrete Mixtures Using Lime Stone Aggregates

คำนำ

ในปี พ.ศ.2530 (ค.ศ.1987) กองเกรสได้จัดตั้งโครงการ SHRP (The Strategic Highway Research Program) ขึ้นมา มีกำหนดระยะเวลา 5 ปี งบประมาณที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยมูลค่า 150 ล้านดอลลาร์สหรัฐอเมริกา เพื่อปรับปรุงสมรรถภาพและความทนทานในการใช้งานของถนนทั้งหลายของประเทศสหรัฐอเมริกา และเพื่อให้ถนนเหล่านั้นปลอดภัยมากขึ้นสำหรับทั้งผู้ขับขี่และผู้ทำงานเกี่ยวข้องกับทางหลวงทั้งหลาย

งบประมาณจำนวน 50 ล้านดอลลาร์สหรัฐอเมริกากองทุนวิจัย SHRP เป็นส่วนที่จะนำไปใช้สำหรับการพัฒนาข้อกำหนดของแอสฟัลต์ ที่ยึดถือตามสมรรถภาพของแอสฟัลต์ (Performance Based Asphalt) เพื่อให้การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการสัมพันธ์โดยตรงกับสมรรถภาพในสนาม

ระบบซูเปอร์เพฟเป็นระบบที่จัดการให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์ ซึ่งยึดถือตามสมรรถภาพมีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขตามสภาพแวดล้อมในการออกแบบ เพื่อที่จะทำให้มีการปรับปรุงสมรรถภาพได้ดีขึ้น โดยการควบคุมการเกิดร่องล้อ (Rutting) การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crecking) และการแตกร้าวเนื่องจากการล้า (Fatigue Crecking)

องค์ประกอบสำคัญ 3 ประการของระบบซูเปอร์เพฟ ได้แก่ 1) ข้อกำหนดของตัวเชื่อมประสานประเภทซูเปอร์เพฟ 2) การออกแบบส่วนผสมกับระบบการวิเคราะห์ และ 3) ระบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

ถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) เป็นผิวทางยึดหยุ่นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันอันเนื่องมาจากเป็นถนนที่สามารถรับรองรับปริมาณจราจรสูง มีความแข็งแรงทนทานผิวเรียบ แบนรับน้ำหนักได้สูง การบำรุงรักษาง่ายและถูกกว่าผิวทางคอนกรีต ประกอบด้วยมวลรวมที่มีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ดีและแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) นำมาผสมกันตามการออกแบบโดยวิธีต่าง ๆ กันให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติเฉพาะของผิวทาง ทำการผสมแบบชนิดร้อน(Hot Mix) แล้วทำการปูลาด ณ สถานที่ก่อสร้างทาง บดอัดความหนาแน่นตามการข้อกำหนด ผิวทางที่ได้จะสามารถรับน้ำหนักได้ตรงตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ

ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงวิธีการออกแบบโครงสร้างทางใหม่ โดยใช้วิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์ (Analytical Pavement Design) โดยวิธีการดังกล่าวจะสามารถออกแบบให้โครงสร้างถนนสามารถรองรับการจราจรปริมาณมาก และมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ทว่าการที่จะทำการปรับเปลี่ยนวิธีการที่ใช้อยู่เดิมมาเป็นวิธีการเชิงวิเคราะห์อย่างเต็มรูปแบบนั้น ยังคงมีข้อจำกัดอยู่เนื่องจากวิธีการเชิงวิเคราะห์ต้องทราบค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการทดสอบที่ซับซ้อนหลายค่าด้วยกัน เช่น คุณสมบัติค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Properties) ค่าความต้านทานต่อการล้า(Fatigue Resistance) และค่าความต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวร (Permanent Deformation Resistance) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์ ซึ่งในการวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Properties) และค่าความต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวร (Permanent Deformation Resistance) จากการทดสอบด้วยวิธีชูเปอร์เฟฟ โดยจะใช้วัสดุเชื่อมประสาน 3 ชนิด เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของแต่ละชนิดซึ่งได้แก่ วัสดุเชื่อมประสานประเภท PMA หรือ(Polymer Modified Asphalt) ชนิด SBS,แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 40/50

วัตถุประสงค์

ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์โดยวิธีทดสอบชูเปอร์เพฟ
2. เพื่อศึกษาคุณลักษณะค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูน โดยการเตรียมก้อนตัวอย่างด้วยวิธีชูเปอร์เพฟ

ขอบเขตของการศึกษา

1. มวลรวมที่ใช้ในการศึกษาจะใช้หินปูน (Limestone) เป็นวัสดุที่ใช้ในโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3 สายเลี้ยวเมืองชลบุรี ที่มีคุณสมบัติที่ทดสอบผ่านตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงและขนาดผลของมวลรวมเป็นไปตามข้อกำหนดของวิธีทดสอบชูเปอร์เพฟ
2. ชนิดของวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการศึกษาคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40/50 เกรด 60/70 และ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์หรือ (PMA) แบบ Styrene Butadiene Styrene (SBS) ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ตามตารางที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
3. เปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index), การทดสอบ (Tensile Strength) โดยวิธี Indirect Tensile Test ที่ 5⁰ซ 20⁰ซ 35⁰ซ 50⁰ซ และ 60 องศาเซลเซียส และการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยมีตัวแปรเป็นอุณหภูมิที่ 5⁰ซ 20⁰ซ 35⁰ซ 50⁰ซ และ 60⁰ซ ซึ่งทำการทดสอบวัสดุที่จัดเตรียมในห้องปฏิบัติการ
4. ทำการทดลองเพื่อหาคุณลักษณะค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูน โดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

รายการ ที่	คุณสมบัติ	หน่วย	ข้อกำหนด	วิธีการทดสอบ
			AC 40/50	
1	เพนิเตอร์ชันที่อุณหภูมิ 25 °ซ	0.1 มม.	40 – 50	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	การละลายในไตรโคโรเอธิลีน	%	Min 99	ทล.-ท.409/2520
	การทดสอบที่เหลือจากการอบ			
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

หมายเหตุ เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่ได้กำหนดคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์ชนิด AC 40/50 จึงใช้ข้อกำหนดคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์ชนิด AC 60/70

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	การละลายในไตรโคโรเอธิลีน	%	Min 99	ทล.-ท.409/2520
	การทดสอบที่เหลือจากการอบ			
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 ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิดโพลิเมอร์โมดิฟายด์
แอสฟัลต์ (PMA)

รายการที่	คุณสมบัติ	หน่วย	ข้อกำหนด	วิธีการทดสอบ
			PMA	
1	เพนิเตอร์ชันที่อุณหภูมิ 25 °ซ	0.1 มม.	60 – 70	DH-T 403
2	ดัชนีเพนิเตอร์ชัน	-	Min 3	NLT-181 ^a *
3	การยืดตัวที่อุณหภูมิ 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
	การทดสอบที่เหลือจากการอบ			
8	น้ำหนักที่หายไป	%	Max 0.5	ASTM D1754
9	ค่าเพนิเตอร์ชันที่เหลือ	%	Min 70	DH-T 403
10	การยืดตัวที่อุณหภูมิ 13 °ซ	ซม.	Min 40	DH-T 405

หมายเหตุ * = The National Laboratory of Transportation Madrid, Spain

ที่มา: มาตรฐานกรมทางหลวง (2536)

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวและทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆของหินปูนผสมยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 , 60/70 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (styrene-butadiene-styrene) โดยวิธีซูเปอร์เพฟ ซึ่งในส่วนนี้จะอธิบายถึงการทฤษฎีการออกแบบก้อนตัวอย่างและการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ ดังนี้

1. การออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟ (Superpave)

ความเป็นมาของวิธีซูเปอร์เพฟ (Superpave) ในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย กรมทางหลวงซึ่งเป็นหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบดูแลงานออกแบบและก่อสร้างถนนสายหลักของประเทศ ได้มีมาตรฐานในการออกแบบตั้งแต่การคัดเลือกวัสดุที่นำมาใช้ คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุมวลรวม ซึ่งแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยทั่วไปแล้วหากไม่มีการระบุที่เป็นพิเศษจะเลือกใช้ประเภท AC 60/70 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการแบ่งประเภทแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามค่า เพนิเตอร์ชัน สำหรับวัสดุมวลรวมนั้นต้องมีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆและมีขนาดละเอียดที่เหมาะสมกับงานแต่ละลักษณะแตกต่างกันไป จากนั้นวิธีที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมเพื่อหาว่าควรใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณเท่าใดนั้น จะใช้วิธีออกแบบส่วนผสมวิธีของมาร์แชลล์ (Marshall Mix Design) ซึ่งในอดีตเคยเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ

จนกระทั่งประมาณปี พ.ศ. 2530 รัฐบาลกลางของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวจากการรายงานของคณะกรรมการวิจัยงานด้านการออกแบบและก่อสร้างถนนของประเทศสหรัฐอเมริกา จึงได้จัดสรรงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยมูลค่า 150 ล้านดอลลาร์ และได้ก่อตั้งหน่วยงานเฉพาะกิจขึ้นดูแลโครงการนี้ภายใต้ชื่อว่า Strategic Highway Research Program หรือที่เรียกกันโดยย่อว่า SHRP โดย 1 ใน 3 ของเงินงบประมาณดังกล่าวของโครงการคือ 50 ล้านดอลลาร์ ได้รับการจัดสรรเพื่อการศึกษาแก้ไขวิธีการออกแบบและควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างถนนชนิดแอสฟัลต์คอนกรีตโดยเฉพาะด้วยเหตุผลที่ถนนชนิดดังกล่าวเป็น

ชนิดที่มีใช้งานอยู่ถึงกว่าร้อยละ 80 ของถนนในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ยังมีข้อสงสัยถึงคุณภาพของวิธีการออกแบบและควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง ดังนั้นในโครงการดังกล่าวจึงมีจุดมุ่งหมายที่กำหนดให้ทำการศึกษาถึงข้อเสียต่างๆของวิธีการออกแบบและก่อสร้างถนนชนิดแอสฟัลต์คอนกรีตตลอดจนข้อกำหนดมาตรฐาน และวิธีการทดสอบ เพื่อควบคุมคุณภาพวัสดุที่เกี่ยวกับการก่อสร้างผิวถนนชนิดแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้งานกันอยู่ขณะนั้น รวมไปถึงการศึกษาต่อเนื่องถึงแนวทางการแก้ปัญหาเพื่อนำวิธีการใหม่ที่เกิดขึ้นในโครงการไปใช้ในการออกแบบ และควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างจริงต่อไป โดยโครงการดังกล่าวเป็นการร่วมกันศึกษาของมหาวิทยาลัยที่มีชื่อเสียงของสหรัฐอเมริกาหลายแห่ง ภายใต้การควบคุมดูแลของ SHRP โดยมีกำหนดระยะเวลาในการดำเนินการศึกษา 5 ปี ดังนั้นในปี พ.ศ. 2535 SHRP ได้แนะนำผลงานที่ได้รับจากการศึกษาของโครงการในชื่อว่าซูเปอร์เพฟ (SUPERPAVE™ ย่อมาจาก Superior Performing Asphalt Pavements) ซึ่งเป็นลักษณะของแพคเกจที่รวบรวมข้อกำหนดการเลือกวัสดุ วิธีการทดสอบวัสดุ วิธีการออกแบบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้างถนนที่มีผิวชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมุ่งเน้นคุณภาพในการใช้งานในสนามเป็นหลัก ซึ่งจุดหนึ่งของผลการสรุปในเบื้องต้นของการศึกษาของคณะผู้เชี่ยวชาญและคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยที่มีชื่อเสียงของสหรัฐอเมริกา ถึงข้อเสียในวิธีการออกแบบส่วนผสมและควบคุมคุณภาพของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้งานอยู่ในขณะนั้น ที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขปรับปรุงเป็นอันดับต้น ได้แก่ เครื่องมือและวิธีการบดอัดก้อนตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่ใช้อยู่ขณะนั้น ที่จากการศึกษาพบว่าให้ผลที่แตกต่างจากความเป็นจริงและมีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้ค่อนข้างมาก (ชยธวัช, 2542: 91-100) ดังนั้นในขั้นตอนการบดอัดก้อนตัวอย่างในวิธีทดสอบซูเปอร์เพฟ จึงได้ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Superpave Gyratory Compactor ซึ่งมีลักษณะการเตรียมก้อนตัวอย่างโดยพยายามเลียนแบบการบดอัดจริงที่เกิดขึ้นจริงในสนามโดยรถบดถนน

ลักษณะใหม่ที่สำคัญ 2 ประการ ในระบบซูเปอร์เพฟ คือ การบดอัดเชิงห้องปฏิบัติการและการทดสอบสมรรถภาพ การบดอัดเชิงห้องปฏิบัติการสามารถบรรลุความสำเร็จได้ด้วยการใช้เครื่องบดอัดโรตารีซูเปอร์เพฟ ที่เรียกกันย่อๆว่า SGC (Superpave Gyratory Compactor)

จุดประสงค์การวิจัยของ SHRP ที่ต้องการพัฒนาวิธีบดอัดตัวอย่างในห้องปฏิบัติการทดลอง โดยเลียนแบบสภาพการบดอัดที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ซึ่งเครื่องมือบดอัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถตอบสนองจุดประสงค์นี้ได้ เครื่อง Superpave Gyratory Compactor (SGC) จึงถูกสร้างขึ้นตามจุดประสงค์ดังกล่าว

เครื่องมือ SGC มีคุณลักษณะบางอย่างเหมือนกับเครื่องบดอัดไจราตอร์ดั้งเดิม แต่มีคุณสมบัติการปฏิบัติงานใหม่ทั้งหมด ในขณะที่วัตถุประสงค์หลักคือการบดอัดตัวอย่างเครื่อง SGC ยังสามารถจัดเตรียมรายละเอียดเกี่ยวกับความสามารถบดอัดของส่วนผสมโดยการเก็บข้อมูลระหว่างการบดอัดได้ด้วย เครื่องมือ SGC สามารถนำมาใช้ออกแบบส่วนผสมที่ไม่แสดงพฤติกรรมส่วนผสมที่อ่อนนุ่มและไม่แน่นอน จนทำให้ช่องว่างอากาศน้อยมากถึงขั้นอันตรายภายใต้การกระทำของการจราจร

การออกแบบและการวิเคราะห์ส่วนผสมซูเปอร์เพฟขึ้นอยู่กับระดับของปริมาณการจราจรที่โครงสร้างถนนรองรับ สำหรับ HMA ที่จะต้องออกแบบดังตารางที่ 4 การออกแบบส่วนผสมระดับ 1 (Level 1 mix design) กำหนดเงื่อนไขการบดอัดตัวอย่างทดสอบด้วยการใช้เครื่องมือ SGC และการเลือกปริมาณแอสฟัลต์ที่ยึดถือข้อกำหนดการออกแบบเชิงปริมาตรเป็นหลัก การออกแบบส่วนผสมระดับ 2 (Level 2 mix design) ใช้การออกแบบส่วนผสมเชิงปริมาตรเป็นจุดเริ่มต้นและเพิ่มลำดับการทดสอบ IDT เพื่อให้ได้ชุดของการทำนายสมรรถภาพ การออกแบบส่วนผสมระดับ 3 (Level 3 mix design) รวมเกณฑ์กำหนดส่วนใหญ่ของระดับ 1 และระดับ 2 เข้าไว้ด้วยกัน การทดสอบ IDT ที่กระทำเพิ่มเป็นการปฏิบัติหน้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ กว้างขึ้นกว่าเดิม

ตารางที่ 4 ระดับในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ

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

หมายเหตุ ¹ = ปริมาณจราจรของน้ำหนักรถบรรทุกเพียงเท่า

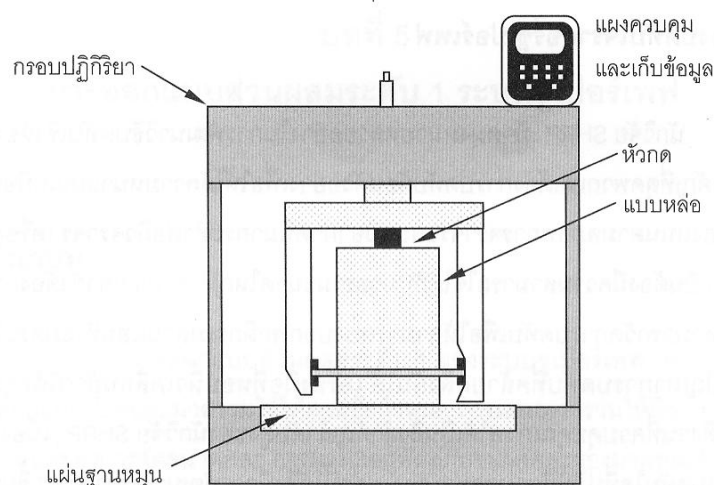
² = ในทุกกรณีใช้ AASHTO T283 ประเมินค่าความไวต่อความชื้น

ที่มา : Asphalt Institute (1996)

หลักพื้นฐานของเครื่อง SGC มาจากเครื่องบดอัดแบบหมุนเท็กซัส (Texas Gyrotory compactor) ซึ่งถูกดัดแปลงเพื่อใช้หลักการบดอัดแบบเครื่องบดอัดไจราตอรีเฟรนช์ (French Gyrotory Compactor) เครื่องบดอัดแบบหมุนเท็กซัสที่ถูกดัดแปลงนี้บดอัดก้อนตัวอย่างได้เสมือนจริงตรงตามวัตถุประสงค์เกี่ยวกับความหนาแน่นของตัวอย่างที่เหมือนสภาพจริงในสนาม และเครื่องมือนี้ขนย้ายพกพาได้อย่างสะดวก เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างมีขนาด 6 นิ้ว จึงเหมาะสมที่จะใช้บรรจุส่วนผสมที่มีขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดได้ถึง 50 มม. ผู้วิจัยของ SHRP จึงได้ดัดแปลงเครื่องบดอัดแบบหมุนเท็กซัสโดยทำมุมการหมุนให้ต่ำลง ลดความเร็วของการหมุนให้ช้าลงและเพิ่มความสามารถในการบันทึกความสูงของก้อนตัวอย่างให้ตรงกับเวลาที่เกิดขึ้นจริง

ส่วนประกอบของเครื่อง SGC แสดงในภาพที่ 1 ประกอบด้วย

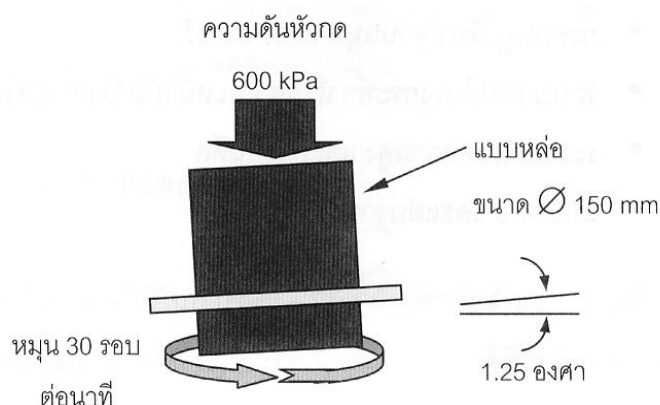
- กรอบปฏิบัติการ ฐานหมุน และมอเตอร์
- ระบบการให้แรงกระทำ หัวกด และน้ำปัดวัดความดัน
- ระบบการวัดความสูง และการบันทึก
- แบบหล่อ และแผ่นฐาน



ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

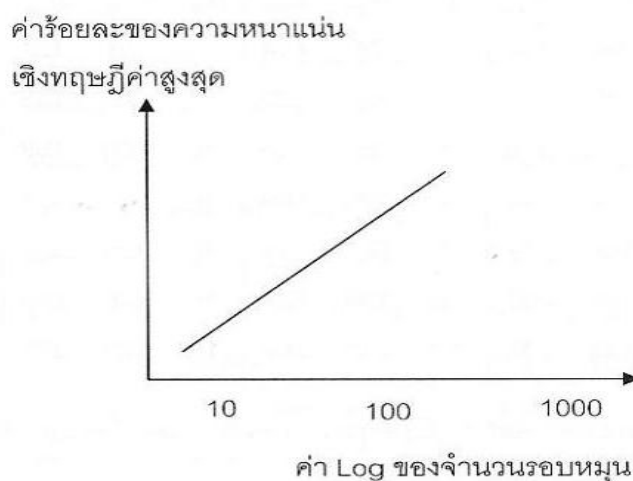
ระบบกลไกการให้แรงกระทำจะทำหน้าที่กดกรอบปฏิกิริยาและถ่ายแรงไปยังหัวกดเพื่อให้เกิดความดันในการบดอัดขนาด 600 kPa บนก้อนตัวอย่าง หน้าปัดวัดความดันจะทำหน้าที่วัดหัวกดให้รักษาความดันไว้คงที่ในช่วงระหว่างการบดอัดนั้น แบบหล่อของ SGC ดังแสดงในภาพที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 mm และมีแผ่นฐานไว้รองรับแบบหล่อเพื่อให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดในช่วงระหว่างการบดอัดฐานของ SGC หมุนด้วยความเร็วคงที่ขนาด 30 รอบต่อนาที ในช่วงระหว่างการบดอัดแบบหล่อซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุม 1.25 องศา



ภาพที่ 2 แสดงกลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับเครื่อง SGC

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

การวัดความสูงของก้อนตัวอย่างเป็นฟังก์ชันที่สำคัญของ SGC เมื่อทราบค่ามวลของวัสดุที่บรรจุอยู่ในแบบหล่อ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแบบหล่อ และความสูงของก้อนตัวอย่างก็สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างในช่วงระหว่างการบดอัดได้ การวัดความสูงของก้อนตัวอย่างกระทำได้โดยการบันทึกตำแหน่งของหัวกดตลอดช่วงเวลาการทดสอบนั้น จากการใช้ค่าที่วัดได้ต่าง ๆ เหล่านี้ก็สามารถพัฒนาค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของการบดอัดก้อนตัวอย่างได้ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนรอบการหมุน สำหรับกระบวนการออกแบบส่วนผสมอื่น ส่วนผสมจะได้รับการออกแบบที่ระดับจำเพาะของแรงพยายามบดอัด (Compactive effort) ในระบบซูเปอร์เพฟจะเป็นฟังก์ชันของจำนวนออกแบบของรอบหมุน (N_{design}) ซึ่งใช้แปรค่าแรงพยายามบดอัดของส่วนผสมออกแบบและเป็นฟังก์ชันของสภาพภูมิอากาศกับระดับจราจร ตัวแทนของสภาพภูมิอากาศใช้ค่าอุณหภูมิอากาศสูงออกแบบเฉลี่ย (The average design high air temperature) และหาค่าได้โดยซอฟต์แวร์ซูเปอร์เพฟซึ่งใช้ค่าอุณหภูมิอากาศสูงสุด 7 วันเฉลี่ย (The average seven-day maximum air temperature) สำหรับสภาพโครงการตัวแทนของการจราจรคือ ESALs ออกแบบ (Design ESALs) ช่วงของค่าต่าง ๆ สำหรับ (N_{design}) แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แรงพยายามบดอัดของการหมุนที่ออกแบบตามระบบซูเปอร์เพฟ

Design ESALs (millions)	Average Design High Air Temperature											
	<39°C			39-40°C			41-42°C			43-44°C		
	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	N _{ini}	N _{des}	N _{max}
< 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	228

ที่มา : Asphalt Institute (1996)

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่ามีการหมุนอีก 2 ระดับ คือ จำนวนรอบการหมุนเริ่มต้น (N_{initial}) และจำนวนรอบการหมุนมากที่สุด (N_{maximum}) ซึ่งสัมพันธ์กับระดับการหมุนของจำนวนรอบการหมุนออกแบบ (N_{design}) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Log } N_{\text{max}} = 1.1 \text{ Log } N_{\text{des}} \quad (1)$$

$$\text{Log } N_{\text{ini}} = 0.45 \text{ Log } N_{\text{des}} \quad (2)$$

จากตารางที่ 5 การหาคุณสมบัติทางด้านปริมาตร (Volumetric Mix Design) จะเป็นกระบวนการพื้นฐานที่ต้องทำไม่ว่าจะใช้กับปริมาณการจราจรเท่าไรก็ตาม ซึ่งจะประกอบด้วยการบดอัดก้อนตัวอย่างด้วย SGC แล้วทำการคำนวณคุณสมบัติทางด้านปริมาตรต่างๆของก้อนตัวอย่างที่มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์แตกต่างกันไป แล้วทำการคัดเลือกความเหมาะสมของขนาดกละที่ใช้และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติทางด้านปริมาตรตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้ เมื่อปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นก็จะเป็นการออกแบบในระดับ Intermediate Analysis ซึ่งก็ยังมีคุณสมบัติทางด้านปริมาตรเป็นพื้นฐานแต่จะเพิ่มการทดลองที่ใช้ Indirect Tensile Tester (IDT) เข้าไปด้วยเพื่อใช้ในการทดสอบหาสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อช่วยในการพิจารณาออกแบบ ในระดับ Complete Analysis เป็นระดับที่ใช้เมื่อต้องการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์

คอนกรีตของถนนที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรที่มีค่ามาก จะนำ IDT มาใช้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า เพื่อผลในการทำนายสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่น่าเชื่อถือมากขึ้น

2. การเลือกวัสดุมวลรวม

นักวิจัย SHRP สืบหาข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญโครงสร้างถนนเพื่อพิจารณาว่า คุณสมบัติของมวลรวมอย่างไรบ้างที่มีความสำคัญมาก และลงความเห็นว่าคุณสมบัติของมวลรวมมีบทบาทสำคัญในการเอาชนะการเสียดสีอย่างถาวร ส่วนการแตกร้าวเนื่องจากความล้าและการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติของมวลรมน้อยกว่าการเสียดสีอย่างถาวร นักวิจัย SHRP ใช้ผลการสำรวจนี้เพื่อบ่งบอกคุณสมบัติของมวลรวมสองประเภทที่จำเป็นต้องใช้ระบบซูเปอร์เพฟ ได้แก่ คุณสมบัติความสอดคล้องกัน (Consensus properties) และคุณสมบัติแหล่งที่มา (Source properties) นอกจากนี้ยังพัฒนาการจัดขนาดคละของมวลรวมที่ระบุด้วยวิธีใหม่ก็คือ โครงสร้างมวลรวมออกแบบ (Design aggregate structure)

2.1 คุณสมบัติความสอดคล้องกันของมวลรวม

คุณสมบัติความสอดคล้องกันของมวลรมนั้นแยกออกได้แก่ ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด ความแบนของอนุภาค และปริมาณดินเหนียว

หลักเกณฑ์สำหรับคุณสมบัติความสอดคล้องกันของมวลรวมจะยึดถือระดับการจราจรและตำแหน่งของโครงสร้างถนนเป็นหลัก วัสดุที่อยู่ใกล้ผิวโครงสร้างถนนซึ่งการกระทำจากระดับปริมาณจราจรสูงต้องการคุณสมบัติความสอดคล้องกันที่เข้มงวดกว่าหลักเกณฑ์ที่กำหนดมุ่งใช้กับการผสมมวลรวมที่เสนอมากกว่าที่จะใช้กับมวลรวมแต่ละชนิดที่เป็นส่วนผสม

2.1.1 ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ

คุณสมบัติความเป็นเหลี่ยมมุมหยาบเป็นคุณสมบัติที่เพิ่มระดับความเสียดทานภายในของมวลรวมและความต้านทานต่อการเกิดรอยร้าว ซึ่งกำหนดด้วยค่าร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวมขนาดใหญ่กว่า 4.75 mm กับหน้าแตกหนึ่งหน้าหรือมากกว่า วิธีทดสอบที่แนะนำโดยวิธีซูเปอร์เพฟคือวิธี Pennsylvania DOT's Test Method No.621 ดังตารางที่ 6 แสดงค่าต่ำสุดที่

กำหนดสำหรับความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบเมื่อเป็นฟังก์ชันของระดับการจราจรและตำแหน่งภายในโครงสร้างถนน

ตารางที่ 6 ข้อกำหนดความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ

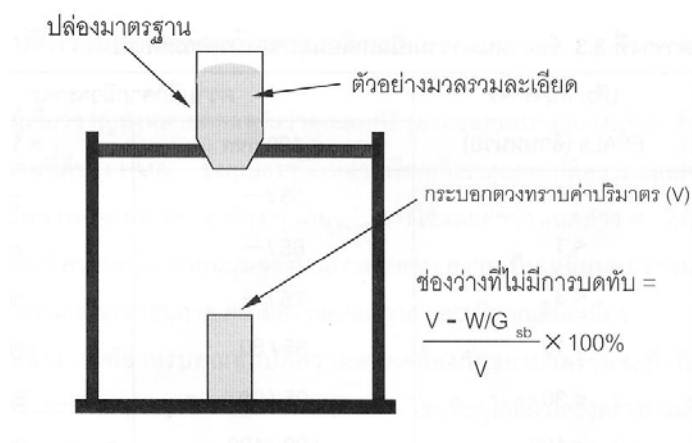
ปริมาณจราจร ESALs (ล้านหน่วย)	ความลึกจากผิวจราจร	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0.3	55 / -	- / -
< 1	65 / -	- / -
< 3	75 / -	50 / -
< 10	85 / 80	60 / -
< 30	95 / 90	80 / 75
< 100	100 / 100	95 / 90
≥ 100	100 / 100	100 / 100

หมายเหตุ : 85 / 80 หมายถึง 85 % ของมวลรวมมีหน้าแตกหนึ่งหน้า
หรือมากกว่า และ 80 % มีหน้าแตกสองหน้าหรือมากกว่า

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

2.1.2 ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด

คุณสมบัติความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียดเป็นคุณสมบัติที่เพิ่มระดับความเสียดทานภายในของมวลรวมละเอียดและความต้านทานต่อการเกิดรอยร้าว ซึ่งกำหนดด้วยค่าร้อยละของช่องว่างอากาศที่มีอยู่ระหว่างมวลรวมขนาดเล็กกว่า 2.36 mm บดอัดอย่างหลวม ๆ ซึ่งมีอิทธิพลจากรูปร่างอนุภาค ความหยาบละเอียดของผิวหน้า และขนาดคละ ถ้ามีปริมาณช่องว่างมากหมายถึงผิวหน้าแตกมาก ในกระบวนการทดสอบนำตัวอย่างของมวลรวมละเอียดเทผ่านปล่องมาตรฐานได้ลงในกระบอกตวงดังแสดงในภาพที่ 4 การวัดมวลของมวลรวมละเอียด (W) ในกระบอกตวงที่ทราบปริมาตร (V) ก็สามารถคำนวณหาปริมาณช่องว่างได้จากผลต่างระหว่างปริมาตรของกระบอกตวงกับปริมาตรของมวลรวมละเอียดที่อยู่ในกระบอกตวงนั้น ใช้ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อนของมวลรวมละเอียด (G_{sb}) คำนวณหาปริมาตรมวลรวมละเอียด



ภาพที่ 4 เครื่องมือวัดความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

ตารางที่ 7 แสดงค่าต่ำสุดที่กำหนดสำหรับความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียดเมื่อเป็นฟังก์ชันของระดับการจราจรและตำแหน่งภายในโครงสร้างถนน

ตารางที่ 7 ข้อกำหนดความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด

ปริมาณจราจร ESALs (ล้านหน่วย)	ความลึกจากผิวจราจร	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0.3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
> 100	45	45

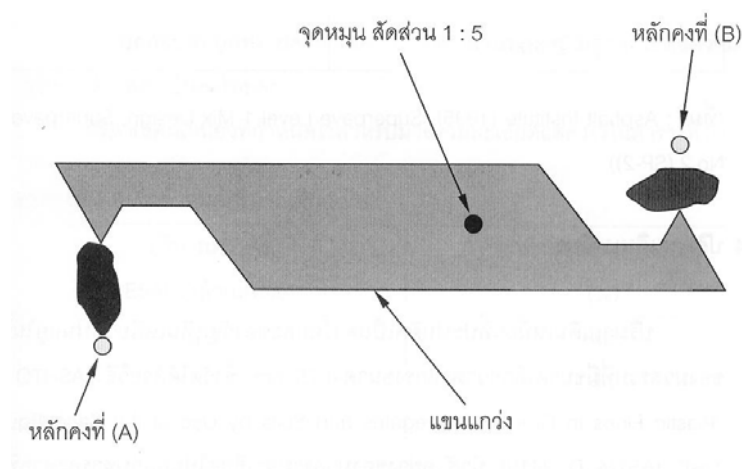
ข้อกำหนดคือค่าร้อยละของช่องว่างอากาศของมวลรวมละเอียดที่บดอัดอย่างหลวม ๆ

ที่มา : การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ, วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

2.1.3 ความแบนและความยาวของอนุภาค

คุณสมบัติความแบนและความยาวของอนุภาค คือ ค่าร้อยละโดยมวลของมวลรวมหยาบที่มีอัตราส่วนของด้านใหญ่สุดกับด้านเล็กสุดมีค่ามากกว่าห้า อนุภาคแบนและยาวไม่เป็นที่ต้องการเพราะว่ามีแนวโน้มที่จะแตกได้ง่ายระหว่างการก่อสร้างและภายใต้การจราจรกระบวนการทดสอบใช้วิธี ASTM D 4791, “Flat of Elongated Particle in Coarse Aggregate” และกระทำกับมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 mm

เครื่องมือที่ใช้ในวิธีการนี้ คือ เครื่องคาลิเปอร์ ดังแสดงในภาพที่ 5 เป็นเครื่องวัดอัตราส่วนมิติตามด้านของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของอนุภาคมวลรวมหยาบ โดยนำอนุภาคมวลรวมมาวางตามด้านที่ใหญ่ที่สุดให้อยู่ระหว่างแขนแกว่งกับหลักคงที่ A ดังภาพที่ 5 ยึดแขนแกว่งให้อยู่กับที่ในขณะที่นำมวลรวมไปวางให้ด้านเล็กสุดอยู่ระหว่างแขนแกว่งกับหลักคงที่ B ดังภาพที่ 5 ถ้าอนุภาคมวลรวมไม่เต็มช่องว่างให้ถือว่าเป็นอนุภาคที่แบนหรือยาว



ภาพที่ 5 การวัดความแบนและความยาวของอนุกรมมวลรวมหยาบ

ที่มา : วัชรินทร์ วิทย์กุล (2547)

ค่าสูงสุดที่กำหนดสำหรับอนุภาคแบนและยาวของมวลรวมหยาบแสดงในตารางที่ 8

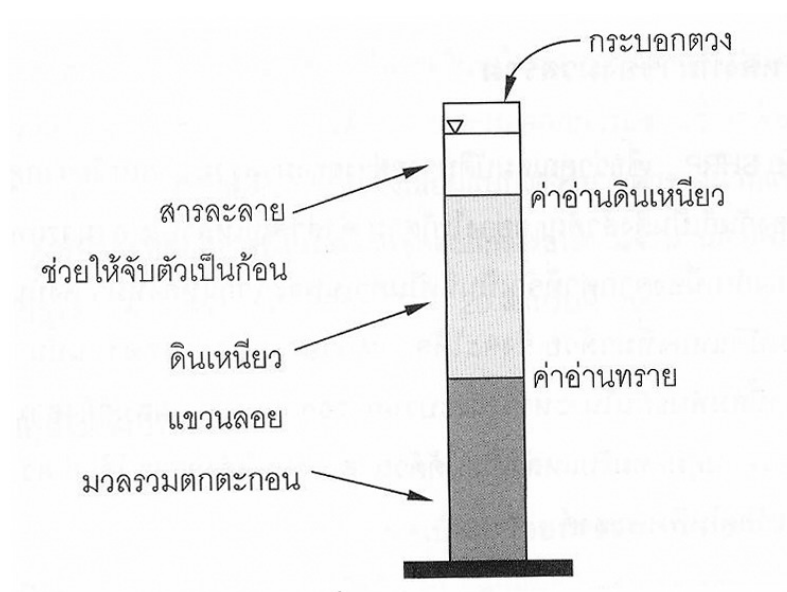
ตารางที่ 8 ข้อกำหนดสำหรับอนุภาคแบนและยาวของมวลรวมหยาบ

ปริมาณจราจร ESALs (ล้านหน่วย)	ค่าสูงสุด
< 0.3	-
< 1	-
< 3	10
< 10	10
< 30	10
< 100	10
> 100	10

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

2.1.4 ปริมาณดินเหนียว

ปริมาณดินเหนียวที่ปะปนคิดเป็นค่าร้อยละของวัสดุดินเหนียวที่ปนอยู่ในชั้นส่วน
ของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงขนาด 4.75 mm ซึ่งวัดได้ด้วยวิธี AASHTO T176,
“Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test”
(ASTM D 2419) นำตัวอย่างของมวลรวมละเอียดไปผสมกับสารละลายที่ช่วยให้ตะกอนจับตัว
เป็นก้อนภายในกระบอกตวง แล้วกวนให้ดินเหนียวละเอียดหลุดจากมวลรวมละเอียดซึ่งสารละลาย
ดังกล่าวจะช่วยให้อนุภาคดินเหนียวแขวนลอยขึ้นมาเหนือมวลรวมละเอียด หลังจากปล่อยให้
ตกตะกอนก็ทำการวัดความสูงของดินเหนียวแขวนลอยกับความสูงของทรายที่ตกตะกอน ดังแสดง
ในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การทดสอบสมมูลทราย

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

การทดสอบสมมูลทรายคำนวณค่าเป็นอัตราส่วนของความสูงทรายต่อความสูงดินเหนียว แล้วแสดงเป็นค่าร้อยละ ปริมาณดินเหนียวที่กำหนดไว้สำหรับมวลรวมละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ข้อกำหนดปริมาณดินเหนียว

ปริมาณจราจร ESALs (ล้านหน่วย)	ค่าสูงสุดของสมมูลทราย
< 0.3	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45
< 30	45
< 100	50
> 100	50

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

2.2 คุณสมบัติแหล่งที่มาของมวลรวม

นักวิจัย SHRP เชื่อว่าคุณสมบัติบางอย่างของมวลรวมนอกเหนือจากคุณสมบัติความสอดคล้องกันก็เป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตาม ค่าสำคัญเหล่านี้ไม่สามารถพบได้จากความสอดคล้องกันเนื่องจากค่าที่จำเป็นนี้เป็นค่าเฉพาะจากแหล่งที่มา ดังนั้นจึงมีการกำหนดคุณสมบัติแหล่งที่มาด้วย ซึ่งจะได้จากหน่วยงานประจำท้องถิ่นนั้นๆ ขณะที่คุณสมบัติเหล่านี้สัมพันธ์กันในระหว่างกระบวนการออกแบบส่วนผสมก็ยังสามารถที่จะนำมาใช้ในการควบคุมยอมรับแหล่งที่มาได้ด้วย คุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ ความบึกบึน ความถาวร และวัสดุไม่พึงประสงค์

2.2.1 ความสึกหรอ Toughness

ความสึกหรอกำหนดเป็นค่าร้อยละที่สูญหายของวัสดุจากการผสมมวลรวมระหว่างการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Los Angeles Abrasion test ตามที่ระบุใน AASHTO T 96 หรือ ASTM C 131 หรือ C 535 การทดสอบนี้เป็นการประเมินความต้านทานของมวลรวมหยาบที่มีต่อการสึกกร่อนและแตกหักเชิงกลในระหว่างการดำเนินงานขนส่ง การก่อสร้างและการให้บริการต่อการจราจร วิธีการทดสอบนี้กระทำโดยการนำมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่กว่า 2.36 mm มาบดอัดและย่อยด้วยลูกเหล็กกลมหลายๆ ลูก ผลจากการทดสอบคือ ค่าร้อยละของมวลที่สูญหายไปสูญหายไปของมวลรวมหยาบในช่วงระหว่างการทดสอบเนื่องจากมีการแตกหักเชิงกล ซึ่งกำหนดค่าสูญหายสูงสุดไว้ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 35 ถึง 45

2.2.2 ความคงทน Soundness

ความคงทนกำหนดเป็นค่าร้อยละที่สูญหายของวัสดุจากการผสมมวลรวมในการทดสอบความถาวรด้วยสารละลายโซเดียมหรือแมกนีเซียมซัลเฟตตามวิธีทดสอบของ AASHTO T 104 หรือ ASTM C 88 การทดสอบนี้ประเมินค่าความต้านทานของมวลรวมต่อสภาพภูมิอากาศที่ต้องให้บริการ ซึ่งสามารถกระทำได้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด วิธีการทดสอบกระทำโดยนำตัวอย่างมวลรวมไปแช่ในสารละลายโซเดียมหรือแมกนีเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัว ด้วยการอบแห้งในตู้อบกระทำซ้ำหลายครั้ง การแช่ในสารละลายแล้วอบแห้งแต่ละครั้งถือว่าเป็นหนึ่งรอบถาวร ในช่วงจังหวะอบแห้งเกลือจะตกตะกอนในช่องว่างที่ซึมได้ของมวลรวม จากการแช่จมน้ำเกลือจะดูดซึมน้ำอีกและพยายามออกแรงขยายตัวภายใน ซึ่งเลียนแบบแรงขยายตัวของน้ำที่

แข็งตัว ผลการทดสอบคือ ค่าร้อยละที่สูญหายทั้งหมดจากชุดตะแกรงร้อนตามจำนวนกำหนดของทุกรอบ ค่าสูญหายสูงสุดมีค่าในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 สำหรับห้ำรอบ

2.2.3 วัสดุที่ไม่พึงประสงค์

วัสดุที่ไม่พึงประสงค์กำหนดเป็นค่าร้อยละของมวลรวมที่ปนเปื้อน เช่น ก้อนดินเหนียว เซล ไม้ ไม้ก้ำ และถ่านหินในส่วนผสมของมวลรวม ตามที่ระบุใน AASHTO T 112 หรือ ASTM C 142 การวิเคราะห์กระทำได้ทั้งของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยการนำเอาตัวอย่างมาผ่านตะแกรงแบบเปียกเพื่อแยกขนาดบนชุดตะแกรงร้อนที่กำหนดจากนั้นรายงานค่าร้อยละของมวลรวมที่สูญหายจากการร่อนผ่านตะแกรงแบบเปียกโดยคิดเป็นค่าร้อยละของปริมาณดินเหนียวและอนุภาคที่ร่วนกรอบ ช่วงกำหนดกว้างๆ สำหรับค่าร้อยละสูงสุดที่ยอมได้ แบ่งเป็นค่าน้อยร้อยละ 0.2 ถึงค่ามากร้อยละ 10 ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่แยกได้ของสิ่งปนเปื้อน

2.3 การจัดขนาดผล

ประเภทของหินตามการกำเนิดทางธรณีวิทยา สามารถจำแนกได้ 3 จำพวก คือ

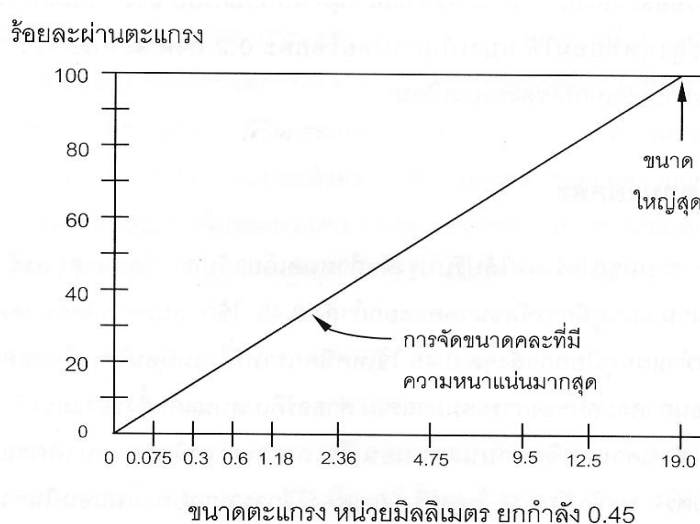
1) หินอัคนี (Igneous Rock) เกิดจากการเย็นตัวและแข็งตัวของวัสดุร้อนหลอมละลาย เรียกว่าหินหนืด (Magma) ซึ่งระเบิดพุ่งออกจากเปลือกโลก หรือขังตัวใต้เปลือกโลก ดังนั้นจึงแบ่งหินอัคนีออกเป็นหินที่เกิดจากแมกมาไหลออกมาจากเปลือกโลกแล้วแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง (Extrusive Rock) ส่วนมากมักเกิดจากภูเขาไฟ มีโครงสร้างใสเหมือนแก้ว เช่น แร่โอไลต์ (Rhyolite) แอนดีไซต์ (Andesite) บะซอลท์ (Basalt) เป็นต้น อีกประเภทหนึ่ง คือ หินที่เย็นตัวและแข็งตัวใต้เปลือกโลกเป็นหินแทรกตัวในชั้นหินใต้เปลือกโลก ลักษณะเนื้อหินเป็นผลึก เช่น แกรนิต (Granite) ไดโอไรท์ (Diorite) แกบโบ (Gabbro) เป็นต้น เนื่องจากการก่อตัวภายใต้ผิวโลก ดังนั้นจะพบเห็นโผล่ขึ้นมาจากผิวโลกต่อเมื่อมีการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหรือมีการกัดเซาะเปลือกโลก

2) หินตะกอน (Sedimentary Rock) เกิดจากการทับถมสะสมรวมตัวกันของตะกอน ซึ่งเคลื่อนที่พัดพาโดยทางน้ำ ธารน้ำแข็งหรือลม เป็นเวลานานๆ จนในที่สุดแข็งตัวกลายเป็นหินตะกอนที่ทับถมสะสมรวมกัน อาจเป็นชั้นส่วนเล็กๆ หรืออนุภาคขนาดต่างๆ ของทราย กรวด เศษหิน ดินโคลน ซากพืชซากสัตว์ ตลอดจนตะกอนจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือจากการ

ระเหยของน้ำ ลักษณะหินตะกอนจะมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า หินชั้น หินประเภทนี้ได้แก่ หินปูน (Limestone) หินทราย (Sandstone) เป็นต้น

3) หินแปร (Metamorphosed Rock) เกิดจากการแปรสภาพของหินอัคนีและหินตะกอน เนื่องจากความกดดันสูงจากการเคลื่อนตัวอย่างรุนแรงของโลก และจากความร้อนสูงหรือสารละลายปริมาณมาก ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นซับซ้อนและยุ่งยากมากที่จะกำหนดรูปแบบดั้งเดิมของหินที่เปลี่ยนแปลง ลักษณะเด่นที่พบบ่อยแยกชนิดหินแปรคือ ประเภทที่แร่ประกอบหินเรียงต่อกันเป็นระนาบขนาน การจัดเรียงตัวขนานกันนี้เรียกว่าโฟลเลชัน (Foliation) ซึ่งจะเป็นแนวหรือร่องรอยที่สามารถแยกเนื้อหินออกได้ง่ายกว่าแนวอื่นๆ ตัวอย่างหินประเภทนี้ได้แก่ ไนส์ (Gneisses) แปรสภาพมาจากหินอัคนี หินอ่อน (Marble) แปรสภาพมาจากหินปูน หินเขียวหนุมาน (Quartzite) แปรสภาพมาจากหินทราย เป็นต้น

หินปูนจัดเป็นหินตะกอน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า แร่คัลไซต์ (Calcite) เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในท้องทะเล ทั้งจากสารอนินทรีย์ และซากสิ่งมีชีวิต เช่น ปะการัง และกระดูกของสัตว์ทะเล ซึ่งทับถมภายใต้ความกดดันและตกผลึกใหม่เป็นแร่คัลไซต์ เนื้อแน่นละเอียดทึบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือดำ ซึ่งในงานวิจัยนี้หินปูนที่นำมาทดสอบได้มาจากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3 ถนนเลียบเมืองชลบุรี



ภาพที่ 7 การจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับขนาดใหญ่สุด 19 mm

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

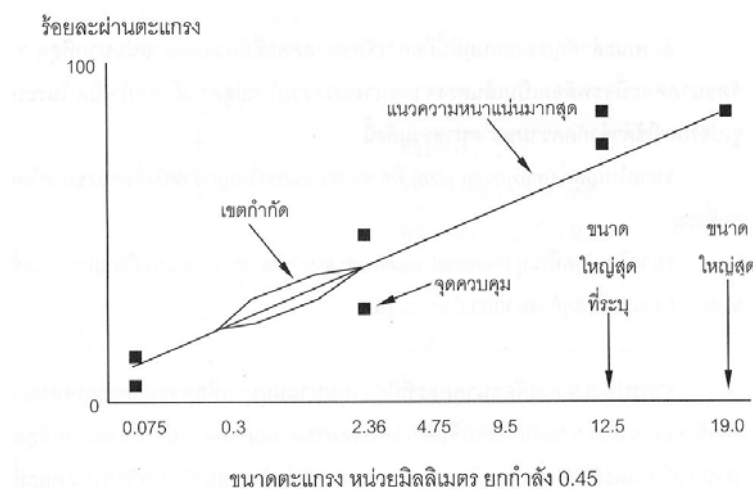
ลักษณะสำคัญของแผนภูมินี้คือการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุด การจัดขนาดคละนี้จะพล็อตเป็นเส้นตรงจากขนาดมวลรวมใหญ่สุดจนถึงจุดกำเนิด ในระบบซูเปอร์เพฟใช้ค่าจำกัดความขนาดมวลรวมดังนี้

ขนาดใหญ่สุด (Maximum size) คือขนาดตะแกรงใหญ่กว่าหนึ่งชั้นของขนาดใหญ่สุดที่ระบุ

ขนาดใหญ่สุดที่ระบุ (Nominal maximum size) คือ ขนาดตะแกรงใหญ่กว่าหนึ่งชั้นของตะแกรงแรกที่วัสดุข้างมากกว่าร้อยละ 10

จากภาพที่ 7 การจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดจะแสดงการจัดขนาดคละซึ่งอนุภาคต่าง ๆ ของมวลรวมจับตัวกันพอเหมาะตามสภาพความหนาแน่นมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ และยังแสดงแผนภูมิการจัดขนาดคละยกกำลัง 0.45 กับการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับมวลรวมขนาดใหญ่สุด 19.0 mm ด้วย

เขตจำกัดมีอาณาเขตอยู่ตามแนวการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดระหว่างตะแกรงขนาดกลางและตะแกรงขนาด 0.3 mm ภาพที่ 8 แสดงจุดควบคุมและเขตจำกัด สำหรับส่วนผสมซูเปอร์เพฟ 12.5 mm เขตจำกัดจะก่อให้เกิดแถบตลอดช่วงที่การจัดขนาดคละไม่ผ่านข้อกำหนด การจัดขนาดคละที่ผ่านเขตจำกัดมีชื่อเรียกว่า การจัดขนาดคละแบบตะโหงก (Humped Gradation) เพราะว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นตะโหงกในบริเวณนั้น ในกรณีส่วนมากการจัดขนาดคละแบบตะโหงกชี้ให้เห็นว่าเป็นส่วนผสมที่มีทรายมากเกินไปหรือเป็นส่วนผสมที่มีทรายละเอียดมากเกินไปเมื่อเทียบกับทรายทั้งหมด การจัดขนาดคละแบบนี้มักมีผลกับส่วนผสมในแง่ที่ว่าก่อให้เกิดปัญหาในการบดอัดยุ่งยากในช่วงระหว่างการก่อสร้างและมักลดความต้านทานต่อการเสียดรู่อย่างถาวรในช่วงอายุการใช้งานให้บริการแก่การจราจรด้วย



ภาพที่ 8 จำกัดการจัดขนาดระบบซูเปอร์เฟฟ

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

ในทำนองเดียวกัน เขตจำกัดกีดกันการจัดขนาดผลจากการตามแนวความหนาแน่นสูงสุดในตะแกรงมวลรวมละเอียด การจัดขนาดผลที่ตามการจัดขนาดผลที่มีความหนาแน่นสูงสุดนี้ มักจะมีค่า VMA ไม่เพียงพอที่จะยอมให้มีแอสฟัลต์มากพอสำหรับความทนทานที่ต้องการ การจัดขนาดผลเป็นสิ่งที่ไวต่อปริมาณแอสฟัลต์ และสามารถกลายสภาพเป็นพลาสติกได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอสฟัลต์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3. ปริมาตรส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

มวลรวมส่วนใหญ่มีรูพรุน ดูดซึมน้ำและแอสฟัลต์ได้ด้วยความสามารถที่ระดับแตกต่างกัน อัตราส่วนของการดูดซึมจะแปรเปลี่ยนไปแล้วแต่ชนิดของมวลรวม การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม มี 3 วิธี ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (Bulk Specific Gravity) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ (Effective Specific Gravity) ซึ่งทั้งสามวิธีก็ต้องคำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ด้วยในการพัฒนาค่า

3.1 ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน

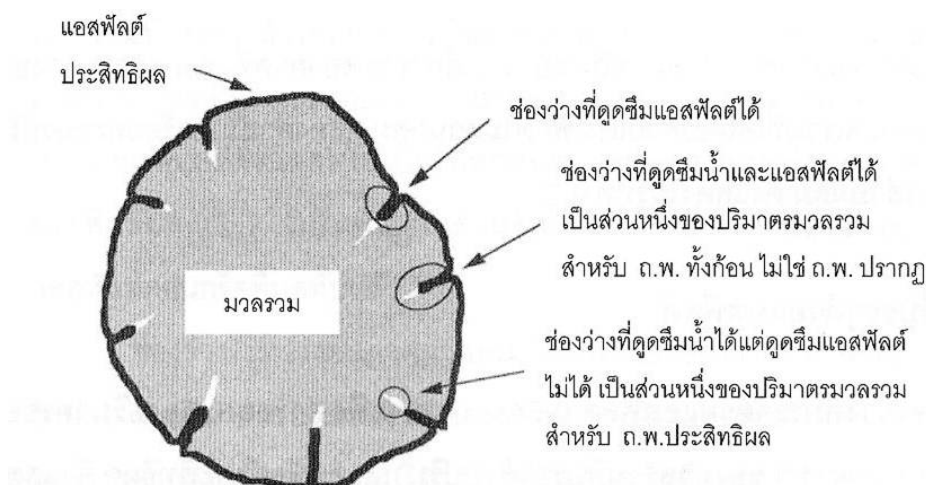
ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (G_{sb}) คือ อัตราส่วนของมวลรวมของวัสดุที่ดูดซึมปริมาตรหนึ่งหน่วยซึ่งรวมทั้งช่องว่างที่ดูดซึมและไม่ดูดซึม วัดในอากาศ ณ อุณหภูมิที่กำหนด ต่อมวลของน้ำกลั่นที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากัน วัดในอากาศที่มีความหนาแน่นเท่ากัน ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดูภาพที่ 10 ประกอบคำอธิบาย

3.2 ความถ่วงจำเพาะปรากฏ

ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (G_{sa}) คือ อัตราส่วนของมวลรวมของวัสดุที่ไม่ดูดซึมปริมาตรหนึ่งหน่วย วัดในอากาศ ณ อุณหภูมิที่กำหนดต่อมวลของน้ำกลั่นที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากัน วัดในอากาศที่มีความหนาแน่นเท่ากัน ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดูภาพที่ 10 ประกอบคำอธิบาย

3.3 ความถ่วงจำเพาะประสิทธิผล

ความถ่วงจำเพาะประสิทธิผล (G_{sc}) คือ อัตราส่วนของมวลรวมของวัสดุที่ดูดซึมปริมาตรหนึ่งหน่วย ซึ่งไม่รวมช่องว่างที่ดูดซึมแอสฟัลต์ วัดในอากาศ ณ อุณหภูมิที่กำหนดของมวลของน้ำกลั่นที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากัน วัดในอากาศที่มีความหนาแน่นเท่ากัน ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดูภาพที่ 9 ประกอบคำอธิบาย



ภาพที่ 9 แสดงความถ่วงจำเพาะแบบทั้งก้อน ปราภฏ และปฏิกิริยาผล รวมทั้งปริมาณแอสฟัลต์
ปฏิกิริยาผลในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

3.4 ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม

ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (VMA) หมายถึง ปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคแต่ละอนุภาคของมวลรวมที่มีอยู่ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งเป็นผลรวมของช่องว่างอากาศกับปริมาณแอสฟัลต์ปฏิกิริยาผล แสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสม ดังในภาพที่ 10

3.5 ปริมาณแอสฟัลต์ปฏิกิริยาผล

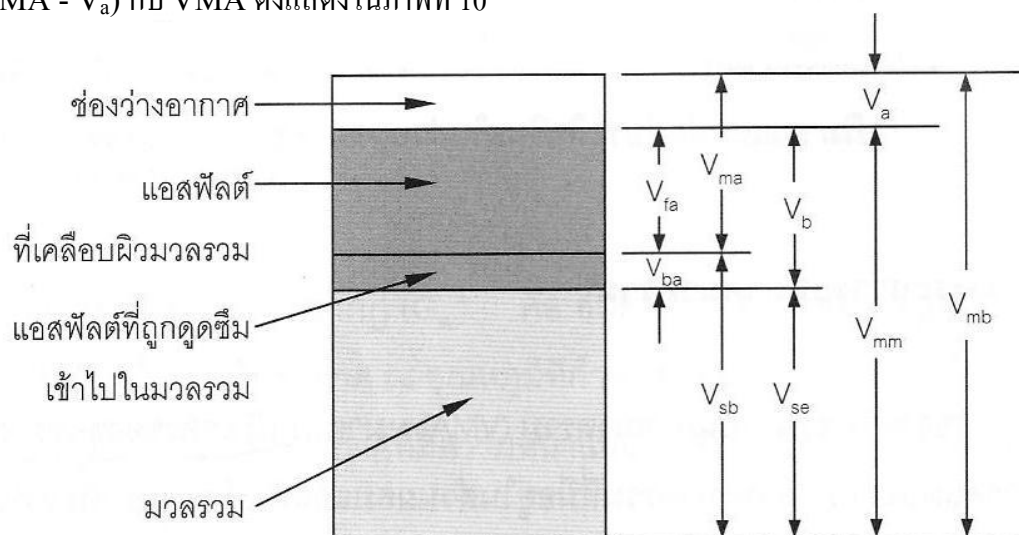
ปริมาณแอสฟัลต์ปฏิกิริยาผล (P_{bc}) หมายถึง ปริมาณแอสฟัลต์ที่ได้จากผลแตกต่างระหว่างปริมาณแอสฟัลต์ทั้งหมดของส่วนผสมกับปริมาณแอสฟัลต์ส่วนที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคทั้งหลายของมวลรวมในส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 10

3.6 ช่องว่างอากาศ

ช่องว่างอากาศ (V_a) หมายถึง ช่องว่างเล็ก ๆ ของอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคทั้งหลายของมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ในส่วนผสม แสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 10

3.7 ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์

ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ (VFA) หมายถึง ค่าร้อยละของปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ของมวลรวมที่บรรจุด้วยปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ จึงแสดงเป็นอัตราส่วนของ ($VMA - V_a$) กับ VMA ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนผังส่วนประกอบของก้อนตัวอย่างที่บดอัดแล้วของ HMA

ที่มา : วัชรินทร์ วิทยกุล (2547)

- V_{ma} = ปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม
- V_{mb} = ปริมาตรทั้งก้อนของส่วนผสมที่บดอัดแล้ว
- V_{mm} = ปริมาตรปราศจากช่องว่างของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- V_{fa} = ปริมาตรของช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์
- V_a = ปริมาตรของช่องว่างอากาศ
- V_b = ปริมาตรของแอสฟัลต์

$$\begin{aligned}
 V_{ba} &= \text{ปริมาตรของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม} \\
 V_{sb} &= \text{ปริมาตรของมวลรวมโดยความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน} \\
 V_{sc} &= \text{ปริมาตรของมวลรวมโดยความถ่วงจำเพาะประสิทธิผล}
 \end{aligned}$$

กระบวนการออกแบบส่วนผสมซูเปอร์เพฟจะทำการคำนวณหาค่า VMA สำหรับส่วนผสมที่บดอัดแล้วให้อยู่ในเทอมของความถ่วงจำเพาะทั้งก้อนของมวลรวม (G_{sb}) การใช้ค่าความถ่วงจำเพาะแบบอื่นของมวลรวมหาค่า VMA หมายความว่า ไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์และส่วนผสมไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ค่าความถ่วงจำเพาะประสิทธิผล (G_{sc}) ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการคำนวณหาค่าช่องว่างอากาศในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว

ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (VMA) และช่องว่างอากาศ (V_u) จะแสดงค่าเป็นร้อยละโดยปริมาตรของส่วนผสม ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ (VFA) จะแสดงค่าเป็นค่าร้อยละของ VMA โดยคิดจากปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล

ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผลอาจจะแสดงเป็นค่าร้อยละโดยมวลของมวลทั้งหมดในส่วนผสมหรือจะแสดงเป็นค่าร้อยละโดยมวลรวมของมวลรวมที่มีอยู่ในส่วนผสมก็ได้ ขึ้นอยู่กับการระบุปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ว่าเป็นแบบใด

เนื่องจากช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ต่างก็เป็นปริมาณเชิงปริมาตรซึ่งไม่สามารถชั่งน้ำหนักได้ ดังนั้นการออกแบบและวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจึงกระทำโดยยึดหลักการเชิงปริมาตรเป็นพื้นฐาน

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 การผลิตออกมาหลายเกรดเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศที่

แตกต่างกัน แอสฟัลต์ซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน เคลือบผิววัสดุมวลรวมและจับตัวเข้าด้วยกันทำให้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความแข็งแรง และมีความทนทาน

โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ คือแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมสารโพลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคนาขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องผสมชนิดแรงเฉือนเพื่อให้โพลิเมอร์กระจายตัวและคงสภาพอยู่ในแอสฟัลต์โพลิเมอร์ คือสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มวลโมเลกุลสูง เกิดจากการรวมตัวของสารโมเลกุลเล็กๆ ที่เรียกว่า โมโนเมอร์จำนวนมากมาเกิดพันธะเชื่อมต่อกัน โดยทั่วไปแล้วโพลิเมอร์สามารถที่จะแยกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

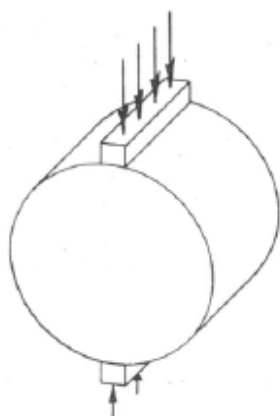
1 อีลาสโตเมอร์ (elastomers) หมายถึงวัสดุที่แสดงพฤติกรรมหยุ่นตัวได้ นั่นคือที่อุณหภูมิห้องวัสดุดังกล่าวสามารถรองรับการยืดตัวได้อย่างน้อยสองเท่าของความยาวเดิมด้วยแรงกระทำที่ต่ำและสามารถปรับตัวสู่สภาพเดิมได้เองเมื่อปลดปล่อยแรงกระทำ นอกจากนี้อีลาสโตเมอร์ยังมีประเภทย่อยๆ ไปอีกซึ่งรวมไปถึง homopolymers, random copolymers หรือ styrene butadiene rubber (SBR) และ block 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) หากได้รับการควบคุมองค์ประกอบต่างๆอย่างเหมาะสมแล้วผู้ผลิตสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ผสมโพลิเมอร์แอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เป็นที่ต้องการคือ มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำค่อนข้างคงที่และไม่สูงเกินค่าวิกฤติที่จะเกิดการแตกร้าว (Thermal cracking) ส่วนที่อุณหภูมิสูงก็มีความยืดหยุ่นเพียงพอที่สามารถป้องกันการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Permanent deformation)

2 Plastomers เป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่มีมวลโมเลกุลสูงที่สามารถได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ นอกจากนี้ Plastomers ยังสามารถก่อตัวโครงสร้างสามมิติที่แข็งแรงทนทานต่อการอ่อนตัวได้และมีกำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกภายใต้การรับน้ำหนัก

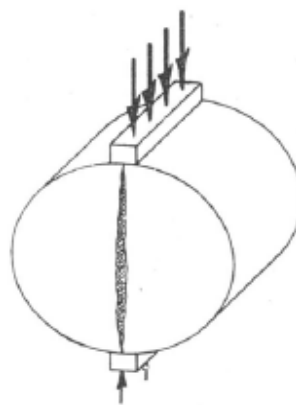
5. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

5.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength test)

การทดสอบแบบ Indirect Tensile Test นั้นกระทำโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression load) ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งแบบอัตราคงที่ (Static) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) ก็ได้แล้วแต่กรณี โดยที่ให้น้ำหนักกระทำในแนวนอนตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ตามที่แสดงในภาพที่ 11



(ก) แรงอัดกระทำบนก้อนตัวอย่าง



(ข) ก้อนตัวอย่างเสียหาย

ภาพที่ 11 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง

- (ก) การให้แรงอัดกระทำกับก้อนตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก
- (ข) ก้อนตัวอย่างชำรุดภายใต้แรงอัด

ที่มา: Anagnos. (1972)

ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างจากการทดสอบ Indirect Tensile สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$\sigma_T = 2P / \pi D T \quad (3)$$

เมื่อ	σ_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 ที่เกิดขึ้นของก้อนตัวอย่างจะแสดงไว้ในภาพที่ 9 โดยจะเห็นได้ว่าบริเวณที่กึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง Compression Stress ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งจะมีค่าประมาณ 3 เท่า ของ Tensile Stress ที่เกิดขึ้นในแนวราบ โดยในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Fatigue test ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำหนักกระทำค่าหนึ่งกระทำซ้ำไปเรื่อยๆจนกระทั่งก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า(เสกชัย และคณะ,2549)

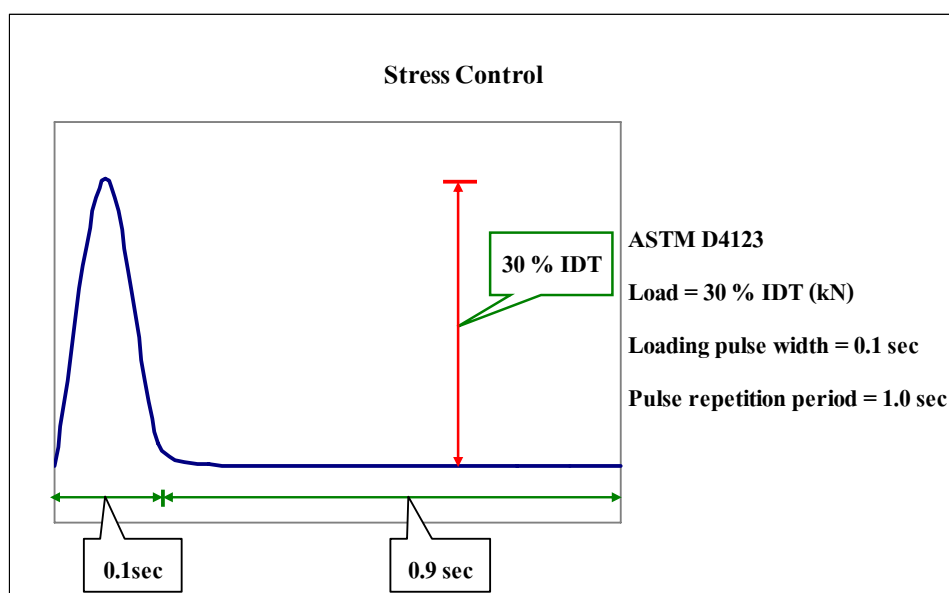
งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6931 - Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures

5.2 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

โดยการใช้วิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile) ในการทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ กับก้อนตัวอย่างที่ทดสอบ เพื่อให้น้ำหนักที่กระทำนั้นเป็นลักษณะรูปคลื่น Harversine น้ำหนักที่กระทำในแนวดิ่ง ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของก้อนตัวอย่าง จะทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวในแนวราบ และขณะช่วงเวลาหยุดพักการให้น้ำหนักกระทำ

ก่อนตัวอย่างจะมีการคืนตัวกลับเรียกว่าค่าการคืนตัว (Resilient Strain) เมื่อให้น้ำหนักกระทำซ้ำอีกตาม 50-200 ครั้งจนกระทั่งค่าการตัวมีค่าค่อนข้างคงที่แล้วทดสอบ 5 ค่าสุดท้ายแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย และการกำหนดค่า Poisson's Ratio โดยการประมาณของก้อนทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตจะทำให้ได้ค่าโมดูลัสการคืนตัว

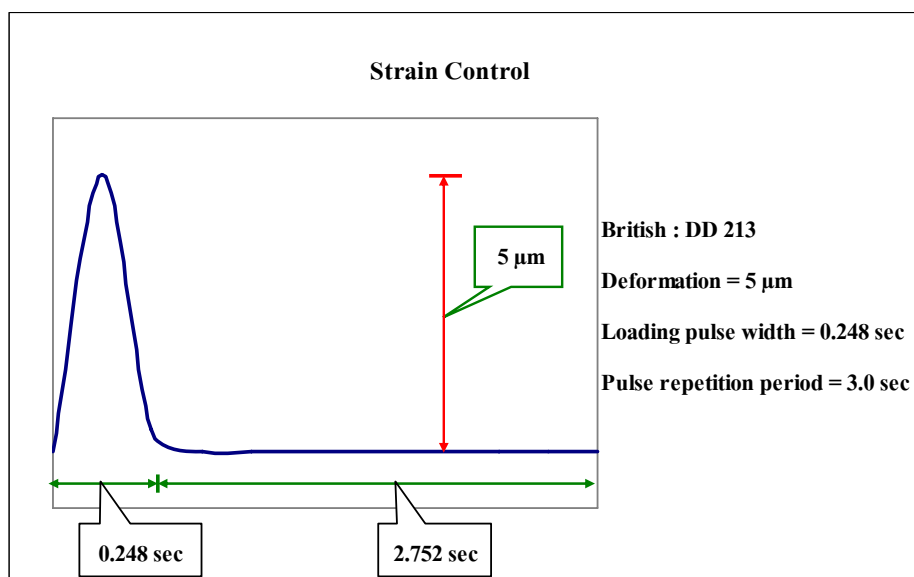
ตามมาตรฐาน ASTM D 4123-82(1995) Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures จะมีการให้น้ำหนักเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในรูปแบบ Haversine Wave ทุก ๆ 1 วินาที ซึ่งเวลาที่น้ำหนักกระทำก่อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที โดยให้น้ำหนักกระทำมีค่าเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Stress-Control Test

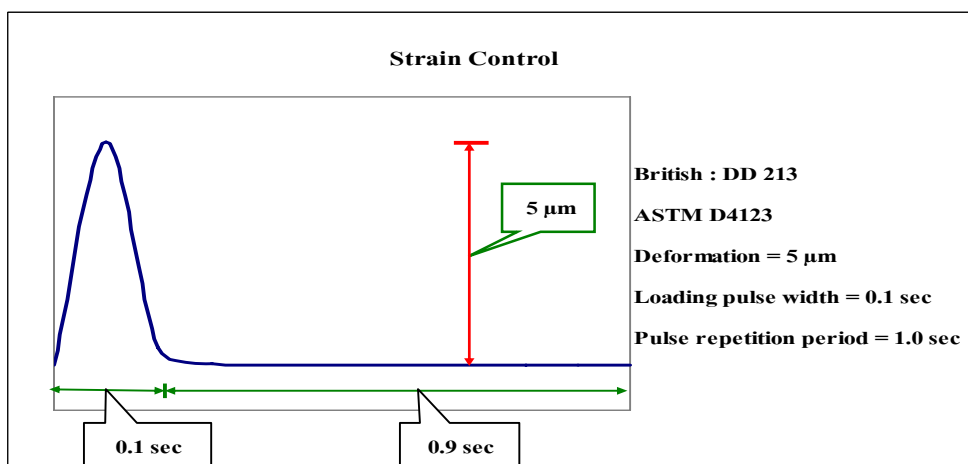
ตามมาตรฐาน ASTM D 4123

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 (μm) ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืบตัวแบบ Strain-Control Test
 ตามมาตรฐาน ASTM DD 213:1993

จากมาตรฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในวิจัยนี้จะให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (μm) ตามมาตรฐาน BS DD 213 แต่เปลี่ยนช่วงเวลาเวลาที่น้ำหนักกระทำก่อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาทีตามมาตรฐาน ASTM D 4123 เนื่องจากถนนของประเทศไทยมีความหนาที่ค่อนข้างบางและเป็นช่วงเวลาที่สามารถจำลองความถี่ที่เกิดจากปริมาณจราจรได้ใกล้เคียงได้มากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืบตัวแบบ Strain-Control Test ในงานวิจัยนี้

การทดสอบโมดูลัสกึ่งตัว จะใช้เครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM-5P) ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

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

$$E = P(V + 0.27) / h_c \times H \quad (4)$$

เมื่อ	E	=	ค่าโมดูลัสกึ่งตัวโดยประมาณ (MPa)
	P	=	น้ำหนักกระทำสูงสุด (N)
	V	=	ค่า Poisson's Ratio โดยประมาณ
	h_c	=	ความสูงของก้อนตัวอย่างโดยเฉลี่ย (mm)
	H	=	ระยะการกึ่งตัวทั้งหมด (mm)

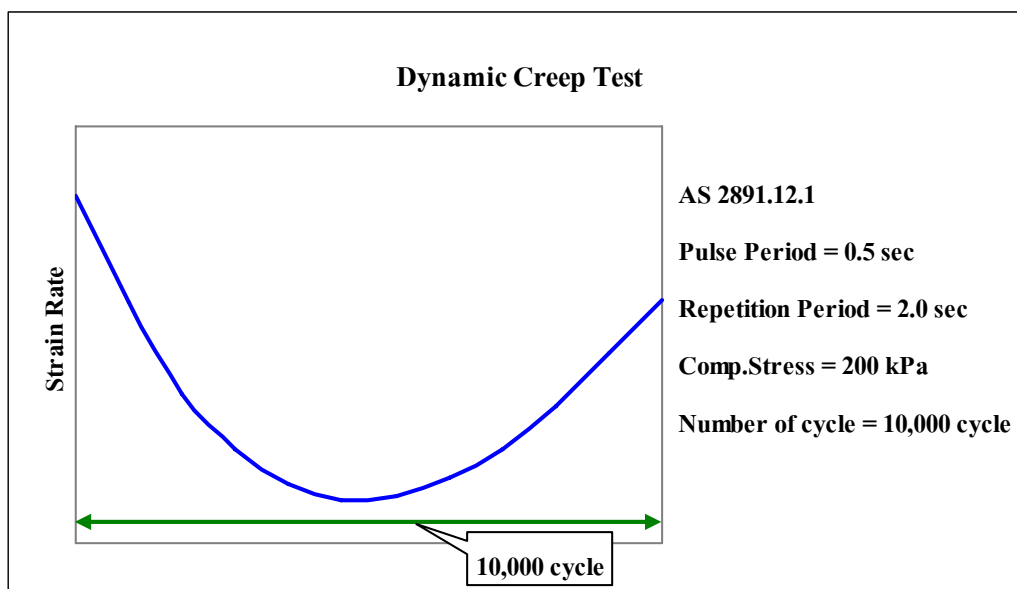
5.3 การทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test)

การเปลี่ยนรูปแบบถาวรของชั้นผิวทาง โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรรถทุก บนเส้นทางการจราจรการเปลี่ยนรูปแบบถาวรโดยทั่วไปจะพบอยู่ 2 ชนิดได้แก่ การยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรรถทุกขนานกับทิศทางของการจราจรเรียกว่า rutting และการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางของการจราจรและมักจะเกิดบริเวณที่มี การจราจรหยุดรอ

การทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่ในการศึกษานี้จะใช้การทดสอบแบบ Dynamic Creep test ที่มีการให้ Confining stress เนื่องจากการเลียนแบบสภาพถนนขณะรับน้ำหนักบรรทุกจราจรและมีแรงดันด้านข้าง

ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt – Dynamic Creep test ซึ่งได้กำหนดเงื่อนไขไว้ว่าปริมาณช่องว่างของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 4 % อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส หน่วยแรงที่ใช้ในการ

ทดสอบเท่ากับ 200 kPa ช่วงเวลาในการให้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 0.5 วินาที และช่วงเวลาที่หยุดเพื่อรอให้น้ำหนักกระทำ 1.5 วินาที ดังภาพที่ 15



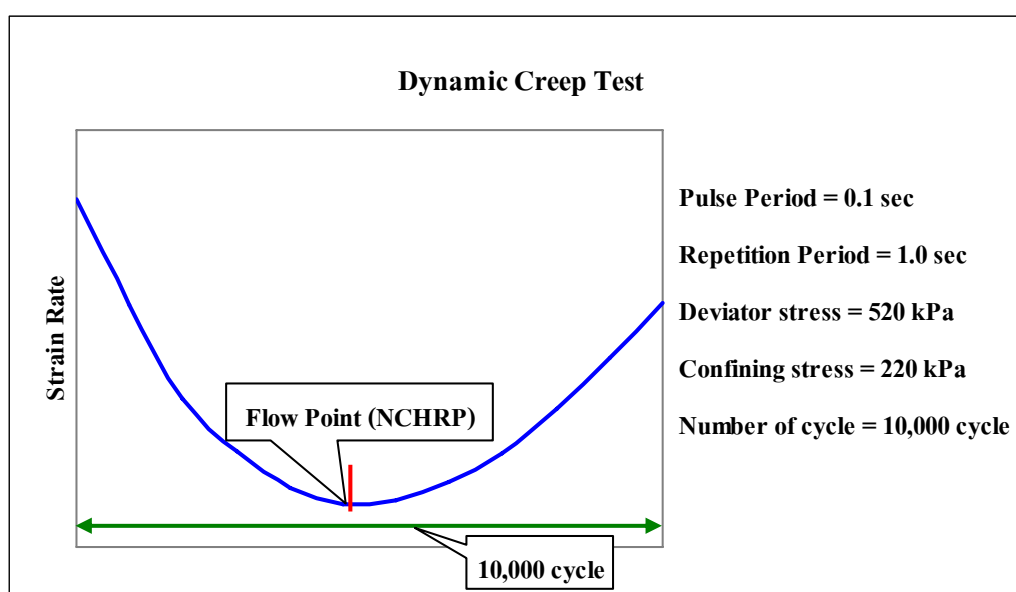
ภาพที่ 15 รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1

ชยธันว์ และคณะ(2546)ได้ทำการทดสอบตัวอย่างที่มีปริมาณช่องว่างของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 7 % อุนหภูมิที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 40 และ 60 องศาเซลเซียส หน่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 100 kPa ช่วงเวลาในการให้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 0.2 วินาที และช่วงเวลาที่หยุดเพื่อรอให้น้ำหนักกระทำ 0.8 วินาทีในการทดสอบจะทำการทดสอบให้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ ไปเรื่อยๆจนกระทั่งก้อนตัวอย่างมีค่า Accumulated Strain เท่ากับ 1 % จึงหยุดทำการทดสอบ

Murali Krishnan and Rajagopal (2003) ได้ทำการศึกษาเรื่อง Triaxial testing and stress relaxation of asphalt concrete ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ Model ของ Asphalt concrete และได้ทำการทดสอบ Creep และ Stress relaxation โดยทำการทดสอบ ที่ 3 อุนหภูมิ คือ 40(4.4) ,77(25) และ 140(60) องศาฟาเรนไฮต์(องศาเซลเซียส) โดยใช้แรงดันด้านข้าง (lateral pressures) 0,43.8 และ 250 Psi

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบโดยการเพิ่มลักษณะการพิจารณา Flow Point หรือ จุดที่ก้อนตัวอย่างเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวร ซึ่งในรายงานของ NCHRP (NCHRP, 2002) ได้อธิบายว่าเป็นจุดที่เกิด Tertiary Flow ซึ่งก็คือจุดที่มีค่า Strain rate มีค่าต่ำสุด ดังภาพที่ 12

และเพื่อจำลองสภาพอากาศร้อนของประเทศไทยและแรงกระทำที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างทาง จึงทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส และใช้แรงดันด้านข้าง (Confining Stress) เท่ากับ 220 kPa และแรงกระทำด้านบนเพื่อสร้างความเค้นเพิ่มในแนวดิ่ง (Deviator stress) เท่ากับ 520 kPa โดยค่าแรงดันและความเค้นดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยางเมื่อรับน้ำหนักเพลาดิยมาตรฐาน (ESAL) ที่มีแรงดันลมยาง 100 psi โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ChevronX ส่วนจำนวนรอบการทดสอบ (Number of cycle) ที่ 10,000 รอบหรือ 50,000 microstrain



ภาพที่ 16 รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ในงานวิจัยนี้

ความเครียดสะสม (Accumulated strain, ϵ_p) คือผลบวกสะสมของความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เมื่อวัสดุนั้นได้รับแรงกระทำซ้ำๆ สามารถหาได้จากสมการ(5)

$$\epsilon_p = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (5)$$

เมื่อ Δh = ระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรตามแนวก้น
 ของตัวอย่างตั้งแต่ครั้งแรกที่ได้รับแรงกระทำ (mm)
 h_0 = ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างที่ทดสอบ (mm)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 แอสฟัลต์ (Asphalt)

แอสฟัลต์ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็น ยางแอสฟัลต์ชนิด 4050, 60/70 และ โพลีเมอร์
โมดิฟายด์แอสฟัลต์เป็นวัสดุประสานโดยเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

แอสฟัลต์ (Asphalt) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มถึงดำ มีสภาพ
เป็นวัสดุที่แข็ง มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นปิโตรเลียม ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ หรือที่ได้จาก
กระบวนการกลั่นปิโตรเลียม (Asphalt Institute, 1995)

1.2 วัสดุมวลรวม

มวลรวม (Aggregate) หมายถึงวัสดุ แข็ง เหนียว เป็นอนุภาคของแร่ธาตุ เช่น ทราย กรวด
ตะกรัน หรือหินย่อย ใช้ในการผสมกับวัสดุเชื่อมประสาน ชนิดต่างๆ หรืออาจใช้มวลรวมเพียงอย่าง
เดียวในการทำเป็นชั้นพื้นทาง หรือการถม ตัวอย่างงานทั่วไปที่ใช้มวลรวมเป็นวัสดุก่อสร้างได้แก่
คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แอสฟัลต์คอนกรีต ผิวทางแอสฟัลต์ พื้นทาง หินโรย ทาง
รถไฟ

มวลรวม (Aggregate) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้นำมาได้จากโครงการก่อสร้างทาง
หลวงหมายเลข 3 สายเลียงเมืองชลบุรี โดยการตรวจสอบคุณสมบัติที่เป็นไปตามตามข้อกำหนดของ
กรมทางหลวงและขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามข้อกำหนดของวิธีทดสอบซูเปอร์เพฟ

วิธีการ

1. วิธีการตรวจสอบวัสดุมวลรวม

ในการตรวจสอบวัสดุมวลรวมนั้นแยกออกเป็น การตรวจสอบวัสดุมวลรวมละเอียด และ การตรวจสอบวัสดุมวลรวมหยาบ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1.1 วัสดุมวลรวมละเอียด ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด ดังนี้

ขนาดกะ (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 ขนาดกะ (Gradation) วิธีการนี้เป็นการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่าน หรือค้างตะแกรงขนาดต่างๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{R \times 100}{T} \quad (6)$$

เมื่อ P = เปอร์เซ็นต์รวมที่ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก

R = มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

T = มวลของตัวอย่างทั้งหมด

1.1.2 ความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ ในการทดสอบจะต้องทำการแยกวัสดุมวลรวมละเอียดนี้ออกเป็น 2 ส่วนที่ล้างตะแกรงเบอร์ 200 กับส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วทำการคำนวณจากสมการดังนี้

ความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่ (Bulk Specific Gravity)

$$GB (30^{\circ}C) = \frac{WD \times dt}{0.9957 \times (WS + W2 - W1)} \quad (7)$$

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

ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

$$GA (30^{\circ}C) = \frac{WD \times dt}{0.9957 \times (WD + W2 + W1)} \quad (8)$$

สำหรับวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นั้น ไม่สามารถจะหาความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่ได้ เพราะไม่สามารถทำให้ผิวนอกของมวลรวมแห้ง โดยที่ยังมีความชื้นอยู่ภายในได้ (เนื่องจากมวลรวมนั้นมีความเป็นพลาสติกมาก)

1.1.3 ค่าความคงทน (Soundness) วิธีการนี้ เป็นการทดสอบที่ครอบคลุมถึงการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อการแตก หรือการแยกของมวลรวมในสารละลายอิมมัวโซเดียมซัลเฟต หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อจะได้ใช้เป็นข้อมูลในการช่วยพิจารณาค่าความคงทนของมวลรวมที่ถูกกระทำโดยสภาพดินฟ้าอากาศ45

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

$$SE = \frac{\text{Sand Reading} \times 100}{\text{Clay Reading}} \quad (9)$$

เมื่อ SE = ทรายสมมูล (Sand Equivalent)

1.1.5 ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียดเป็นคุณสมบัติที่เพิ่มระดับความเสียดทานภายในอนุภาคของมวลรวมละเอียด

$$U = \frac{V - (F/G)}{V} \times 100 \quad (10)$$

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 ทำการ
ทดสอบตามการทดลองที่ 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 ขนาดกะสำหรับมวลรวมหยาบ จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ
โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ส้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่าน หรือค้างตะแกรง
ขนาดต่าง ๆ กับมวลทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (6)

1.2.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (ขนาดโตกว่า 4.75 มม.) แบบ
ส่วนใหญ่ (Bulk Specific Gravity) และแบบปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และปริมาณน้ำ
ที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Water Absorption) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

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

$$\text{Bulk Speoific Gravity (Sat)} = \frac{W_S}{W_S - W_W} \quad (12)$$

$$\text{Apparent Specifec Gravity} = \frac{W_D}{W_D - W_W} \quad (13)$$

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_S - W_D}{W_D} \quad (14)$$

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 (15)

$$FI = \frac{100 \times x}{x + y} \quad (15)$$

เมื่อ FI = ดัชนีความแบน
 x = มวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ลอดผ่านช่องวัดความหนาทุกช่อง; gm
 y = มวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ค้างช่องวัดความหนาทุกช่อง; gm

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

$$EI = \frac{100 \times x}{x + y} \quad (16)$$

เมื่อ EI = ดัชนีความยาว
 x = มวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ลอดผ่านช่องวัดความยาวทุกช่อง; gm
 y = มวลรวมของตัวอย่าง ส่วนที่ค้างช่องวัดความยาวทุกช่อง; gm

1.2.6 ความสึกหรอของมวลหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นการทดสอบหาค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบว่ามีความต้านทานต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัดความแน่นดีหรือไม่ โดยกรมทางหลวงยอมให้ค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมชั้นผิวทางไม่เกินร้อยละ 40 ในการคำนวณค่าการสึกหรอสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (17)

$$(\text{Abrasion}) = \frac{(M1 - M2) \times 100}{M1} \quad (17)$$

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)” โดยทำการออกแบบตามปริมาณน้ำหนักรถทุกเฟลาเดี่ยวมวล (ESALs) 10-30 ล้านหน่วยและค่าอุณหภูมิอากาศสูงออกแบบเฉลี่ย 44 องศาเซลเซียส มาทำการบดอัดในขั้นตอนนี้จะทำการผสม 1 ส่วนผสม หลังจากสิ้นสุดการออกแบบในขั้นตอนนี้จะได้ผลการออกแบบ 3 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 องศาเซลเซียสและแอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่ใช้ผสมมีอุณหภูมิ 170,160 และ 180 องศาเซลเซียสสำหรับยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50,60/70 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมก่อนที่จะทำการบดอัดด้วย

เครื่อง Gyratory Compactor คือ 165-170 องศาเซลเซียส เพื่อออกแบบหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมให้ได้เปอร์เซ็นต์โพรงอากาศ (Air Voids) 4 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 17 เครื่อง Gyratory Compactor

การทำการบดอัดครั้งแรกเป็นการบดอัดเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ยางที่จะใช้ในการผสมก่อน ตัวอย่างโดยสามารถหาได้จากการหาค่าความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพของมวลรวมที่ผสมกัน (G_{se}) หาได้จาก

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb}) \quad (18)$$

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

ปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในมวลรวม (V_{ba}) หาได้จาก

$$V_{ba} = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (19)$$

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

$$V_{be} = 0.176 - 0.675 \log(S_n) \quad (20)$$

เมื่อ S_n = ขนาดตะแกรงสูงสุดที่ระบุของมวลรวมที่ผสมในหน่วยมิลลิเมตร

และสำหรับปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้น (P_{bi}) หาได้จาก

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{[G_b \times (V_{be} + V_{ba})] + W_s} \times 100 \quad (21)$$

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

$$W_s = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right)} \quad (22)$$

จะทำการบดอัด 3 ก้อนโดยใช้เครื่อง Gyrotory Compactor และเตรียมตัวอย่าง 3 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 เกณฑ์การออกแบบปริมาตรส่วนผสมวีชี ชูเปอร์เพฟ (VMA, VFB, สัดส่วนฝุ่น) คือเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศมีค่าเท่ากับ 4 ที่จำนวนรอบการหมุนออกแบบ (N_{des})

ถ้าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่เปรียบเทียบบหาค่า ถือว่าเสร็จสมบูรณ์ แต่หากโพรงอากาศบรรจุที่จำนวนรอบการหมุนออกแบบ (N_{des}) เปลี่ยนแปลง ไปจาก 4 เปอร์เซ็นต์ ค่าประมาณการออกแบบแอสฟัลต์บรรจุเพื่อให้ได้ 4 เปอร์เซ็นต์โพรงอากาศที่ จำนวนรอบการหมุนออกแบบ (N_{des}) ต้องหาใหม่

การวิเคราะห์ข้อมูลและการคำนวณหาส่วนประกอบต่างๆของแอสฟัลต์คอนกรีต ข้อมูล การบดอัด Superpave แบบหมุนจะนำมาใช้หาค่าความถ่วงจำเพาะรวมโดยประมาณความถ่วง จำเพาะรวมที่ถูกต้องและเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของความถ่วงจำเพาะทางทฤษฎีสูงสุดในระหว่างการ บดอัด ความสูงของตัวอย่างจะถูกวัดและบันทึกไว้ในแต่ละรอบการหมุน G_{mb} ของตัวอย่างที่ ถูกบดอัดกับ G_{mm} ของตัวอย่างแบบหลวมจะถูกวัดการประมาณค่า G_{mb} คำนวณได้จากสมการ ที่ (23) ดังนี้

$$G_{mb} \text{ (estimated)} = \frac{W_m / V_{mx}}{\gamma_w} \quad (23)$$

เมื่อ

$$G_{mb} = \text{ความถ่วงจำเพาะรวมโดยประมาณของตัวอย่างช่วงที่บดอัด}$$

$$W_m = \text{น้ำหนักของตัวอย่าง, กรัม}$$

$$\gamma_w = \text{ความหนาแน่นของน้ำ} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$V_{mx} = \text{ปริมาตรของแบบหล่อในหน่วย cm}^3$$

ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (24)

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0.001 \text{ cm}^3 / \text{mm}^3 \quad (24)$$

เมื่อ

$$d = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อ 100 มิลลิเมตร}$$

$$h_x = \text{ความสูงของก้อนตัวอย่างที่อยู่ในแบบหล่อระหว่างบดอัด (mm)}$$

หาค่าร้อยละของช่องว่างอากาศที่ N_{des} จากสมการที่ (25)

$$V = 100 - \%G_{mm} @ N_{des} \quad (25)$$

เมื่อ

$$V_a = \text{ช่องว่างอากาศ @ } N_{des} \text{ คิดเป็นร้อยละของ}$$

$$\text{ปริมาตรทั้งหมด}$$

$$\%G_{mm} @ N_{des} = \text{ความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด @ } N_{des} \text{ คิด}$$

$$\text{เป็นร้อยละ}$$

หาค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาควรรวมคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งก้อน

$$\% \text{VMA} = 100 \left(\frac{\% G @ N_{\text{des}} \times G_{\text{mm}} \times P_s}{G_{\text{sb}}} \right) \quad (26)$$

เมื่อ VMA = ช่องว่างระหว่างอนุภาควรรวมคิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งก้อน

$\% G_{\text{mm}} @ N_{\text{des}}$ = ความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด @ N_{des} คิดเป็นร้อยละ

G_{mm} = ความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด

G_{sb} = ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อนของมวลรวมทั้งหมด

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

ปริมาณแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ที่ N_{des} เท่ากับ 4% สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_b = P_{bi} - [0.4 \times (4 - V_a)] \quad (27)$$

เมื่อ P_b ที่ประเมินได้ = ปริมาณแอสฟัลต์ที่ประเมินได้ คิดเป็นร้อยละโดยมวลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

P_{bi} = ปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้นคิดเป็นร้อยละโดยมวลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

V_a = ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศที่ N_{des} ที่ทดลอง

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

$$\%VMA \text{ ที่ประเมินได้} = \%VMA \text{ เริ่มต้น} + C \times (4 - V_a) \quad (28)$$

เมื่อ $\%VMA = \%VMA$ จากปริมาณแอสฟัลต์ที่ทดลองใช้

$$C = \text{ค่าคงที่} = 0.1 \text{ ถ้า } V_a < 4\%$$

$$= 0.2 \text{ ถ้า } V_a > 4\%$$

ค่าต่ำสุดที่ระบุสำหรับ VMA ที่ปริมาณช่องว่างอากาศออกแบบ 4% เป็นฟังก์ชันของขนาดมวลรวมใหญ่สุดที่ระบุและมีค่าดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 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)

สำหรับ VFA

$$\%VFA = 100 \times \frac{\%VMA - 4.0}{\%VMA} \quad (29)$$

ช่วงที่ยอมรับของ VFA ออกแบบที่ช่องว่างอากาศ 4% เป็นฟังก์ชันของระดับจรรยาณมีค่าแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 หลักเกณฑ์สำหรับ VFA ที่ยอมรับได้

Traffic Level (ESALs) , (10 ⁶)	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}

$$\%G_{mm} \text{ ที่ประเมินได้@}N_{ini} = \%G_{mm} \text{ ที่ทดลอง@}N_{ini} - (4.0 - V_a) \quad (30)$$

สำหรับ %G_{mm} ที่ N_{max}

$$\%G_{mm} \text{ ที่ประเมินได้@}N_{max} = \%G_{mm} \text{ ที่ทดลอง@}N_{max} - (4.0 - V_a) \quad (31)$$

ความหนาแน่นส่วนผสมที่ยอมรับได้ค่าสูงสุดที่ N_{max} คือ 220

สัดส่วนฝุ่น

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}} \quad (32)$$

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

P_{be} = ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ คิดเป็นร้อยละ
โดยมวลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

$$P_{be} = (P_s \times G_b) \times \frac{G_{se} \times G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} + P_b \text{ ที่ประเมินได้} \quad (33)$$

เมื่อ P_s = ปริมาณมวลรวม คิดเป็นร้อยละโดยมวลทั้งหมดของมวลรวม
 G_b = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์
 G_{se} = ความถ่วงจำเพาะประสิทธิผลของมวลรวม
 G_{sb} = ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อนของมวลรวม
 P_b = ปริมาณแอสฟัลต์ คิดเป็นร้อยละโดยมวลทั้งหมดของมวลรวม

สัดส่วนฝุ่นที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 0.6-1.2 สำหรับทุกส่วนผสม

3. การคำนวณหาค่าปริมาตรและองค์ประกอบของส่วนต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

ในการคำนวณส่วนต่าง ๆ ของก้อนตัวอย่างของแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ว่าจะเป็นการคำนวณหาน้ำหนักของส่วนประกอบ หรือปริมาตรของส่วนประกอบก็ตาม จะคิดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการนำค่าต่าง ๆ ไปใช้สามารถคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (Gag)

$$Gag = \frac{100}{\left[\frac{PF}{GF} + \frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \frac{P4}{G4} \right]} \quad (34)$$

เมื่อ PF = ปริมาณวัสดุอัดแทรกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมทั้งหมด
 Pn = ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมทั้งหมด
 GF = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุอัดแทรก
 Gn = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไปเนื่องจากการดูดซึมของมวลรวม (Asphalt Lost by Absorption Asphalt)

$$Ab = \frac{100 \times GV - Gag \times Gac}{GV \times Gag} \quad (35)$$

เมื่อ Ab = เปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไป เนื่องจากการดูดซึมของมวลรวม
 Gac = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์

$$GV = \frac{100 - b}{\frac{100}{Gm} - \frac{b}{Gac}} \quad (36)$$

เมื่อ GV = Virtual Specific Gravity
 Gm = Theoretical Maximum Specific Gravity
 b = ปริมาณแอสฟัลต์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทั้งหมดของส่วนผสม

ในการคำนวณหาถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด(Theoretical Maximum Specific Gravity ; Gmm) ค่าต่างๆ ที่จะใช้ในการคำนวณได้จาก การทดสอบตามวิธีการของ ASTM D2041 และคำนวณตามสมการ

$$Gm = \frac{D}{A + D - E} \quad (37)$$

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

การคำนวณหาความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง (Bulk Density)

$$DB = \frac{ACa}{ACs - ACw} \quad (38)$$

เมื่อ DB = ความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง
 ACa = น้ำหนักก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศ
 ACs = น้ำหนักก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศเมื่อ
 ความชื้น (สภาพ Saturated Surface Dry)
 ACw = น้ำหนักก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในน้ำ

4. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสม

4.1 ทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

ค่าเสถียรภาพคือค่ากำลังรับแรงสูงสุดของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบแบบ Marshall และค่าการไหลคือค่าการยุบตัวของก้อนตัวอย่างเมื่อรับกำลังสูงสุด โดยทั่วไปจึงถือว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าเสถียรภาพสูงมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าเสถียรภาพต่ำ

4.2 ทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index, SI)

การทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรงแบบ Marshall การทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงที่เหลืออยู่ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตภายหลังการจำลองสภาพความเสียหายเนื่องจากความชื้นโดยการกดก้อนตัวอย่างโดยวิธี Marshall วัสดุที่มีค่าดัชนีความแข็งแรง (ค่าสัดส่วนกำลังรับแรงของก้อนตัวอย่างที่จำลองความเสียหายเนื่องจากความชื้นต่อกำลังรับแรงของก้อนตัวอย่างปกติ) สูงแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่างหินและยางซึ่งจะช่วยต้านทานการเสื่อมสภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากความชื้นได้ดี ซึ่งตามมาตรฐานกรมทางหลวงวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องมีค่าดัชนีความแข็งแรงไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ค่าดัชนีความแข็งแรง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SI = \frac{\text{Soaked Sample} \times 100}{\text{Unsoaked Sample}} \quad (39)$$

Soaked Sample และ Unsoaked Sample คือ ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบหาเสถียรภาพของก้อนตัวอย่าง

4.3 ค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio)

การทดสอบหาค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio, TSR) เป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงที่เหลืออยู่ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการให้แรงกระทำแบบแรงดึงทางอ้อมภายหลังการจำลองสภาพความเสียหายเนื่องจากความชื้น การทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับการหาค่าดัชนีความแข็งแรงแต่มีวิธีการทดสอบที่ต่างกัน วัสดุที่มีค่า TSR (ค่าสัดส่วนกำลังรับแรงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างที่จำลองความเสียหายเนื่องจากความชื้นต่อกำลังรับแรงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างปกติ) สูงแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่างหินและยาง สามารถต้านทานความเสียหายจากความชื้นได้ดี ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องมีค่า TSR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 การทดสอบหาค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบ AASHTO T283 (Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage) ซึ่งจะเตรียมก้อนตัวอย่างโดยทำการบดอัดให้ได้ช่องว่างอากาศ (Air void) มีค่าประมาณร้อยละ 7 ทำการจัดชุดก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 3 ก้อน โดยชุดที่ 1 จะเป็นชุดตัวอย่างควบคุม (Control specimens) โดยจะทำการแช่น้ำ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปทดสอบ สำหรับชุดที่ 2 จะเป็นชุดตัวอย่างเงื่อนไข (conditioned specimens) โดยจะทำการดูดอากาศด้วยเครื่องสุญญากาศ (Vacuum) ที่ความดัน 40 cm. Hg โดยใช้เวลา 5 - 10 นาที หลังจากนั้นทำการต้มก้อนตัวอย่างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำก้อนตัวอย่างแช่น้ำ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปทดสอบ Indirect Tensile Strengths

4.4 การทดสอบการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength test)

แบ่งตัวอย่างแต่ละกลุ่มออกเป็น 3 ก้อน นำมาทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบจะต้องนำตัวอย่างเข้าไปในตู้ควบคุมอุณหภูมิอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อน แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยการทดสอบจะให้

นำหนักด้วยอัตราเร็ว 50.8 มิลลิเมตรต่อนาที (2 นิ้วต่อนาที) จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย บันทึกน้ำหนักสูงสุดแล้วทำการคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม

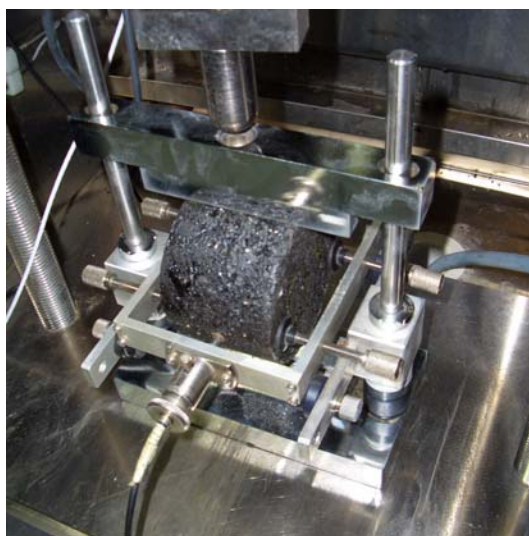
โดยอัตราการให้น้ำหนักนั้น อ้างอิงจากมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D 6931 - Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures การติดตั้งก่อนตัวอย่างจะทำการติดตั้งดังภาพที่ 18 และการคำนวณในสมการที่ (3)



ภาพที่ 18 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 19 และการคำนวณในสมการที่ (4)



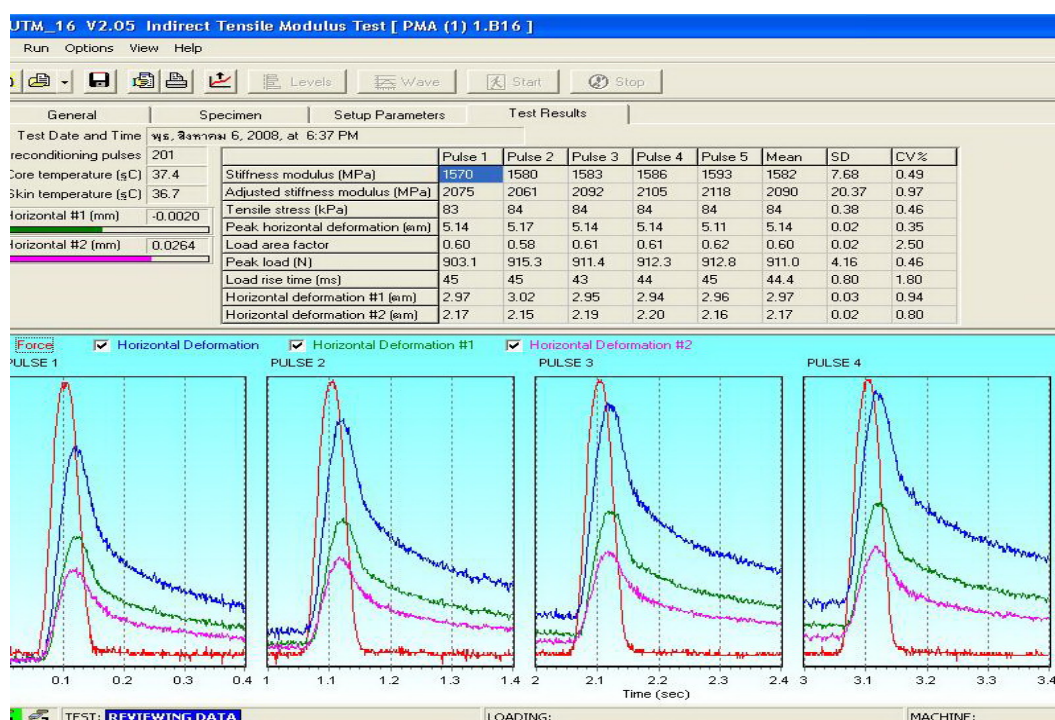
ภาพที่ 19 การติดตั้งก่อนตัวอย่างในการทำ Indirect resilient modulus test

การทดสอบจะทำการให้น้ำหนักกดในลักษณะกระทำซ้ำ โดยใช้การขยายตัวของก้อนตัวอย่าง (Target peak deformation) เท่ากับ $5\ \mu\text{m}$ และช่วงเวลาการให้น้ำหนัก (Loading pulse width) เท่ากับ 0.1 วินาที และช่วงเวลา (Pulse repetition period) 1 วินาที รูปร่างของการกดน้ำหนัก (Loading waveshape) จะกำหนดให้เป็นรูป Haversine ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D 4123-82 และ BS DD 213: 1993

การเก็บข้อมูลและการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของเครื่อง UTM-5P ทำการคำนวณ โดยค่าโมดูลัสคืนตัวที่ใช้จะทำการทดสอบที่ 200 รอบก่อน แล้วทำการเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายที่มีค่าการคืนตัวคงที่ 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

การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวได้จากโปรแกรมหาดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากโปรแกรม UTM 16 V2.05

Indirect tensile resilient modulus test

4.6 การทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test)

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ Dynamic creep test คือ

1. นำก้อนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของก้อนตัวอย่างด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ด้วยความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ครั้ง โดยวัดห่างกัน 180 องศา และความหนาทำการวัด 4 ครั้ง โดยวัดห่างกัน 90 องศา ตามภาพที่ 18 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ใส่ลงในโปรแกรม UTS005 1.30 Simple performance flow test เป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบ Dynamic creep test



ภาพที่ 21 แสดงวิธีการวัดก้อนตัวอย่าง

2. ก่อนการทดสอบจะทำการแช่ตัวอย่างไว้ในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบได้อุณหภูมิตามต้องการ

3. นำก้อนตัวอย่างใส่ถุงยางเพื่อจะให้เกิดแรงดันด้านข้าง (Confining stress) 100 % ทำการเปิดเครื่อง Simple performance test



ภาพที่ 22 แสดงวิธีการใส่ถุงยางเพื่อจะให้เกิดแรงดันด้านข้าง (Confining stress)

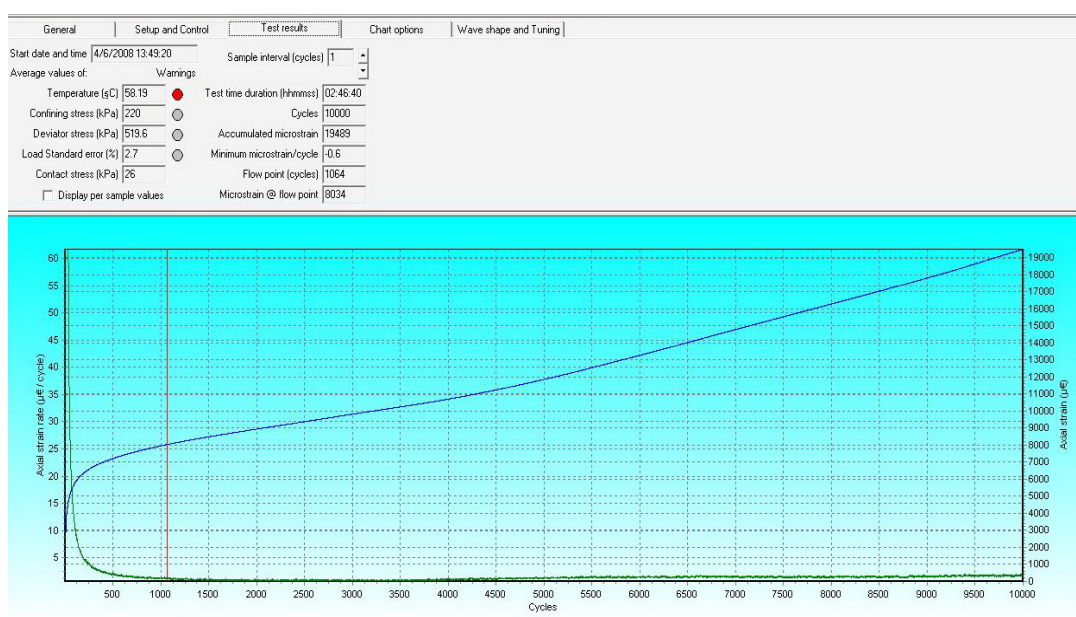
4. เปิดฝาเครื่องเพื่อทำการติดตั้งก้อนตัวอย่างในเครื่อง Simple performance test แล้ว ปิดฝาเครื่อง ก่อนทำการทดสอบรอบประมาณ 15 นาที เพื่อให้เครื่องทำการปรับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ

5. ทำการทดสอบและการทดสอบจะหยุดลงเมื่อ 10,000 cycles หรือ 50,000 microstrain เนื่องจากเป็นค่าที่กำหนดไว้ใน การทดสอบ

แต่ละตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 3 ก้อนที่จะนำมาทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ย ในการทดสอบ หาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร โดยวิธี Dynamic creep test



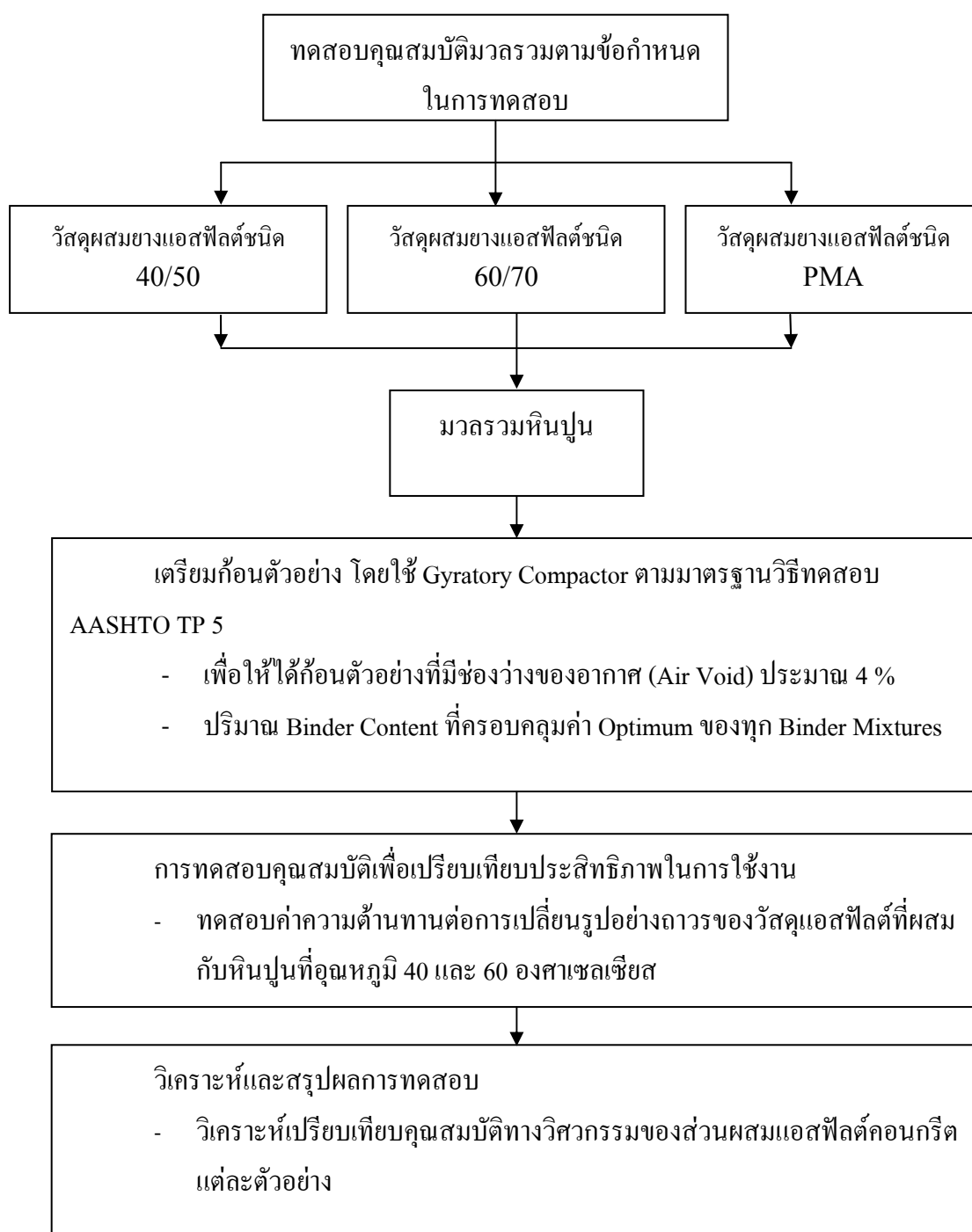
ภาพที่ 23 การติดตั้งก่อนตัวอย่างในการทำ Dynamic Creep test



ภาพที่ 24 การทดสอบ Dynamic creep test ที่ได้จากโปรแกรม UTS005 1.30 Simple performance flow test

หลังจากการทดสอบจบลงทำการอ่านค่า Strain rate ที่มีแนวโน้มต่ำที่สุดโดยถือว่าก่อนตัวอย่างเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวร

ขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 25 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ทราบว่าคุณสมบัติโมดูลส์กึ่งตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์ชนิดโพลิเมอร์ โมดิฟายด์และชนิดแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 ,AC 40/50 เพื่อให้ได้สมการพยากรณ์ค่า โมดูลส์กึ่งตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในการออกแบบก่อสร้างผิวทาง
2. เพื่อทราบถึงคุณลักษณะค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรและคุณสมบัติทาง วิศวกรรมอื่นๆของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูน

แหล่งทุนสนับสนุน

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้ทุนสนับสนุนส่วนตัวในการทดสอบวัสดุและทดสอบผลจากการวิจัย โดยใช้วัสดุและเครื่องมือในการทดสอบของกรมทางหลวง

ผลและวิจารณ์

การตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม

จากการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดของหินปูนที่ได้มาจากโครงการก่อสร้างถนนหมายเลข 3 สายเลี้ยวเมืองชลบุรี ซึ่งเป็นหินจากโรงโม่สุวดี มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

สำหรับการเรียงตัวการจัดขนาดผลของมวลรวมได้ทำการพิจารณาถึงเขตข้อจำกัด (Restricted Zone Boundary) ผ่านตะแกรงเพื่อไม่ให้ขนาดผลผ่านเข้าไปในช่วงเขตจำกัด (Restricted Zone Boundary) ซึ่งผลการจัดขนาดผลของมวลรวมอยู่ในข้อกำหนดเป็นไปตามตารางที่ 12 และภาพที่ 26 โดยอัตราส่วนที่เลือกใช้ในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอัตราส่วนผสมเป็น

Bin 1* : Bin 2 : Bin 3 : Bin 4 : Bin 5 : Bin 6 : Bin 7 : Bin 8 : Bin 9 : Bin 10
30 : 1.7 : 0.1 : 2.6 : 6.1 : 6.0 : 6.7 : 17.5 : 10.4 : 18.9

หมายเหตุ

* หมายถึง หิน cold bin

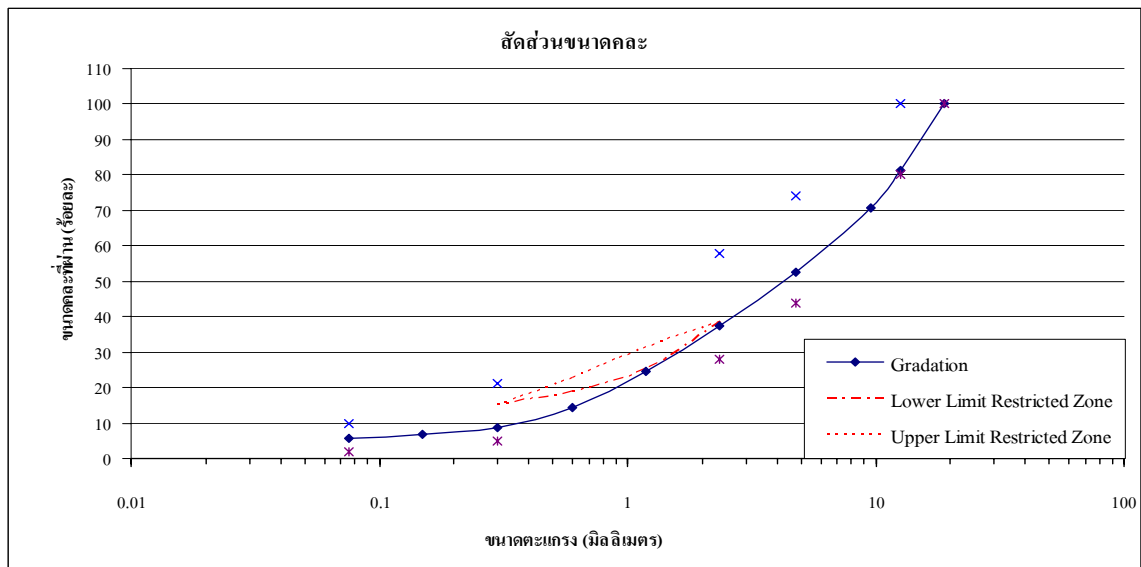
หิน ตั้งแต่ bin2 ถึง bin 10 เป็นหิน Single size ที่ล้างแต่ละเบอร์

ตารางที่ 12 การจัดขนาดกะของมวลรวมที่ใช้ในการทดสอบ

Sieve no.	%Passing										Combined	Desired	Tolerant Limit
	Bin1 ฝุ่น *	Bin2 pan	Bin3 #200	Bin4 #50	Bin5 #30	Bin6 #16	Bin7 #8	Bin8 #4	Bin9 3/8"	Bin10 1/2"			
3/4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/2	100	100	100	100	100	100	100	100	100		81.1	80-100	76-86
3/8	100	100	100	100	100	100	100	100			70.7	-	66-76
#4	97.5	100	100	100	100	100	100				52.4	44-74	47-57
#8	69.8	100	100	100	100	100					37.4	28-58	32-42
#16	46.9	100	100	100	100						24.6	-	21-29
#30	32.6	100	100	100							14.2	-	10-18
#50	22.8	100	100								8.6	5-21	7-12
#100	17.1	100	100								6.9	-	6-10
#200	13.4	100									5.7	2-10	5-7
Mix Proportion	30	1.7	0.1	2.6	6.1	6.0	6.7	17.5	10.4	18.9	100		

หมายเหตุ * หมายถึง หิน cold bin

หิน ตั้งแต่ bin2 ถึง bin 10 เป็นหิน Single size ที่ล้างแต่ละเบอร์



ภาพที่ 26 กราฟแสดงการจัดขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ทดสอบ

เมื่อพิจารณาถึงขนาดคละและการทดสอบวัสดุเบื้องต้นของมวลรวมที่ใช้แล้วจะเห็นได้ว่าเป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวงและข้อเสนอแนะของซูเปอร์เพฟที่ใช้ในการก่อสร้างถนน

ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1

สำหรับการออกแบบก่อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้เลือกใช้การจัดขนาดคละใกล้เคียงกับของกรมทางหลวงโดยกรมทางหลวงใช้ออกแบบถนนทางหลวงหมายเลข 3 สายเลียงเมืองชลบุรี และได้ทำการออกแบบหาเปอร์เซ็นต์ยางที่ใช้แอสฟัลต์ที่ใช้ได้โดย

หาความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ (G_{se}) ของส่วนผสมได้จากสมการที่ (18)

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

$$G_{se} = 2.682 + 0.8(2.736 - 2.682)$$

$$G_{se} = 2.725$$

หาปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในมวลรวม (V_{ba}) ได้จากสมการที่ (19)

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

$$V_{ba} = \frac{0.95 \times (1 - 0.04)}{\left(\frac{0.05}{1.02} + \frac{0.95}{2.725} \right)} \times \left(\frac{1}{2.682} - \frac{1}{2.725} \right)$$

$$V_{ba} = 0.0135 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$$

ปริมาณของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (V_{be}) หาได้จากสมการที่ (20)

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

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

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

สำหรับปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้น (P_{bi}) หาได้จากสมการที่ (21) และ (22)

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

$$W_s = \frac{0.95 \times (1 - 0.04)}{\left(\frac{0.05}{1.02} + \frac{0.95}{2.725} \right)}$$

$$W_s = 2.294 \text{ กรัม}$$

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

$$P_{bi} = \frac{1.02 \times (0.102 + 0.0119)}{[1.02 \times (0.102 + 0.0119)] + 2.294} \times 100$$

$$P_{bi} = 4.89 \% \text{ โดยน้ำหนักของมวลรวม}$$

ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ 4.89 %

ตารางที่ 13 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ 4.89 %

จำนวนที่บดอัด (รอบ)	AC40/50		AC60/70		PMA	
	135	220	135	220	135	220
ความสูงก้อนตัวอย่าง (mm)	68.20	67.12	67.82	66.82	68.02	67.00
Gmb ประเมินที่วัดได้(กก/ม)	2.383	2.421	2.39	2.426	2.389	2.424
Factor ปรับแก้	0.984	1.000	0.985	1.000	0.986	1.000
Gmm คำนวณได้	2.506		2.506		2.506	
Va (%)	4.93		4.63		4.67	
VMA (%)	15.30		15.04		15.08	
VFA (%)	67.82		69.20		69.00	
ปริมาณแอสฟัลต์ที่ควรใช้ (%)	5.26		5.14		5.16	

จากการทำนายหา % ของยางแอสฟัลต์ AC 40/50 ,AC 60/70 และ PMA ทำให้ได้ค่าคือ 5.26% , 5.14 % และ 5.16 % โดยน้ำหนักของมวลรวม ตามลำดับ โดยจากการพิจารณาค่า VMA ที่ยอมให้มีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 13 , VFA มีค่าร้อยละ 65 – 75 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ดังตารางที่ 13 เพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างแอสฟัลต์ AC 40/50 ,AC 60/70 และ PMA จึงทำการปรับค่าเป็น 5.2 % โดยน้ำหนักของมวลรวมและได้การผสมยางที่ 4.7 %,5.2 % และ 5.7 % โดยน้ำหนักของมวลรวม ได้ผลดังตารางที่ 14 , 15 และ 16

ตารางที่ 14 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ 4.7 %

จำนวนที่บดอัด (รอบ)	AC40/50			AC60/70			PMA		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
ความสูงก้อนตัวอย่าง (mm)	75.70	68.00	67.01	75.35	67.70	66.67	75.45	67.80	66.72
Gmb ประเมินที่วัดได้(กก/ม)	2.143	2.386	2.421	2.144	2.386	2.423	2.144	2.386	2.425
Factor ปรับแก้	0.885	0.985	1.000	0.885	0.985	1.000	0.884	0.984	1.000
Gmm คำนวณได้		2.513			2.513			2.513	
% Gmm	85.29	94.95	96.35	85.32	94.96	96.42	85.34	94.97	96.50
Va (%)		5.05			5.04			5.03	
VMA (%)		15.04			15.03			15.02	
VFA (%)		66.41			66.45			66.49	

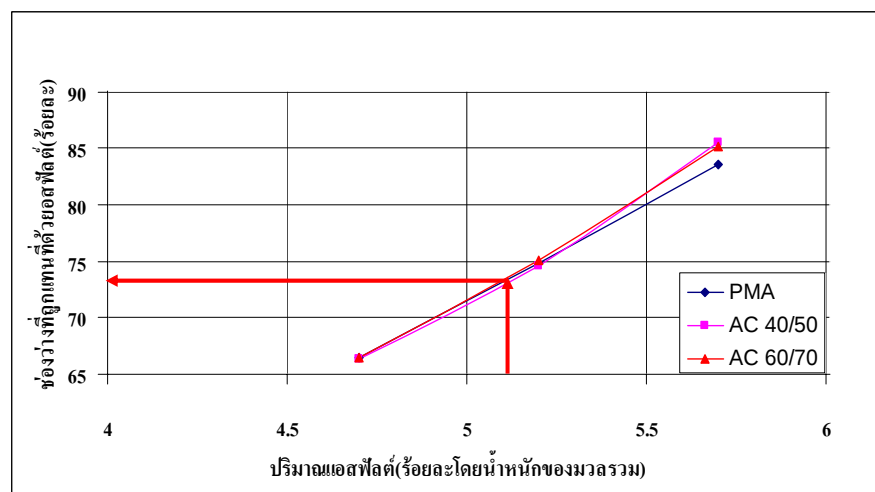
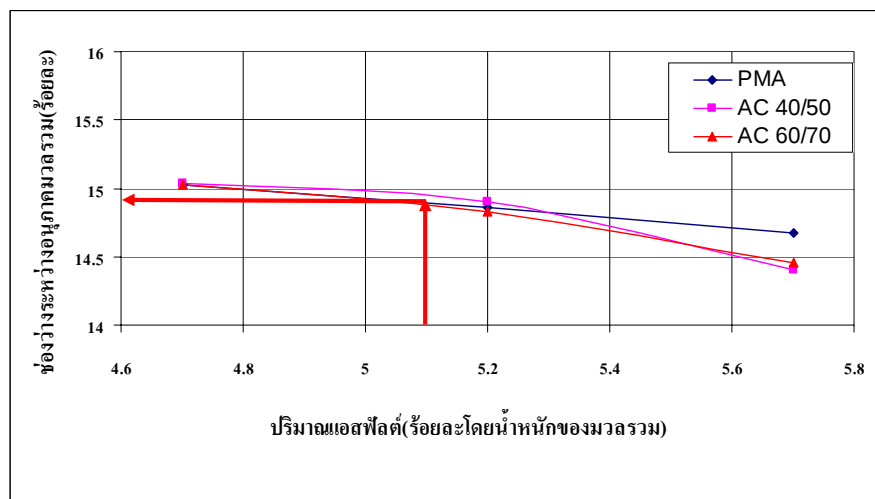
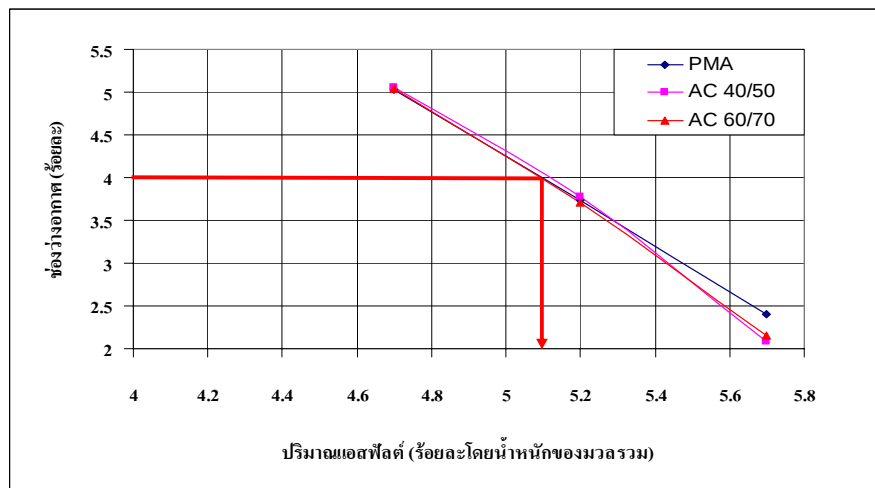
ตารางที่ 15 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ 5.2 %

จำนวนที่บดอัด (รอบ)	AC40/50			AC60/70			PMA		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
ความสูงก้อนตัวอย่าง (mm)	75.25	66.70	66.71	2.195	2.40	2.442	75.00	67.50	66.4
Gmb ประเมินที่วัดได้(กก/ม)	2.16	2.401	2.437	73.80	67.40	66.33	2.162	2.402	2.442
Factor ปรับแก้	0.887	0.985	1.000	0.899	0.984	1.000	0.885	0.984	1.000
Gmm คำนวณได้		2.495			2.495			2.495	
% Gmm	86.57	96.22	97.65	87.97	96.3	97.85	86.64	96.26	97.86
Va (%)		3.78			3.70			3.74	
VMA (%)		14.90			14.83			14.86	
VFA (%)		74.63			75.03			74.86	

ตารางที่ 16 ผลการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ยางแอสฟัลต์ 5.7 %

จำนวนที่บดอัด (รอบ)	AC40/50			AC60/70			PMA		
	9	135	220	9	135	220	9	135	220
ความสูงก้อนตัวอย่าง (mm)	75.70	68.00	67.01	73.95	67.50	66.55	74.40	67.35	66.41
Gmb ประเมินที่วัดได้(กก/ม)	2.18	2.427	2.462	2.21	2.425	2.459	2.19	2.419	2.453
Factor ปรับแก้	0.885	0.985	1.000	0.900	0.986	1.000	0.893	0.986	1.000
Gmm คำนวณได้		2.478			2.478			2.478	
% Gmm	87.95	97.91	99.36	89.34	97.85	99.23	88.35	97.60	98.98
Va (%)		2.09			2.15			2.40	
VMA (%)		14.40			14.46			14.67	
VFA (%)		85.49			85.12			83.64	

จากการบดอัดก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด AC60/70 , AC40/50 และ PMA ที่ร้อยละ 5.2 โดยน้ำหนักของมวลรวม จากการพิจารณาค่า VMA ที่ยอมให้มีค่า ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 13 , VFA มีค่าร้อยละ 65-75 , ร้อยละ ของ Gmm@9 รอบ มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 89 และ ร้อยละของ Gmm@220 รอบ มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 98 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ดังตารางที่ 15



ภาพที่ 27 กราฟแสดงช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เทียบกับปริมาณแอสฟัลต์

จากกราฟปริมาณการออกแบบช่องว่างอากาศ 4.0 % จะได้ปริมาณแอสฟัลต์ 5.1 % ซึ่งจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันตาม ภาพที่ 27 และจากการตรวจสอบคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดสัดส่วนฝุ่น

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

$$P_{0.075} = 5.7$$

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

$$P_{be} = -(94.9 \times 1.02) \times \left(\frac{2.725 - 2.682}{2.725 \times 2.682} \right) + 5.1$$

$$P_{be} = 4.82$$

$$DP = 1.18$$

จะเห็นว่าสัดส่วนฝุ่นที่ได้คือ 1.18 ซึ่งอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.2

ผลทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

เป็นค่าที่บอกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตจะคงทนต่อการพังทลาย การเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีน้ำหนักมากระทำตัวอย่าง เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน (Shear) องค์ประกอบที่จะต้านทานแรงเฉือนในส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตคือแรงยึดเกาะ (Cohesion) ระหว่างเม็ดวัสดุรวมรวม และแสดงค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 17 คู่มือละเอียดได้ในภาคผนวก

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow)

Type	Average Stability (lb)	Average Flows (in(1/100))	Avg. Stability/Flow
AC 40/50	3328.78	14.62	227.99
AC 60/70	3041.34	13.35	227.82
PMA	3590.44	15.28	234.97

ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)

เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน หลุดล่อน ของส่วนผสมเมื่อนำไปใช้ทำผิวทาง อันมีสาเหตุมาจากสภาวะแวดล้อมที่วิกฤต และอุณหภูมิของผิวทางที่สูง ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงสูง จะสามารถต้านทานการหลุดร่อนได้สูงกว่า ส่วนผสมที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่ำ ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรงของวัสดุเชื่อมประสานชนิด AC 40/50, 60/70 และ PMA ที่ใช้วัสดุรวมหินปูนพบว่า มีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนด ดังนี้และแสดงค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 18 รวบรวมละเอียดได้ในภาคผนวก

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)

Type	Strength Index (%)
AC 40/50	75.36
AC 60/70	75.17
PMA	76.96

โดยข้อกำหนดของกรมทางหลวงให้ค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 75 พบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

ผลความไวต่อความชื้น

จากการทดสอบหาค่าความไวต่อความชื้นของส่วนผสมที่ออกแบบไว้จะทำการทดสอบ ก่อนตัวอย่างโดยหนึ่งชุดตัวอย่างจะทำการทดสอบ 3 ก่อน โดยจะเห็นได้ว่ามีกำลังรับแรงดึงไม่น้อยกว่า 80 % ดังตารางที่ 19 และรวบรวมละเอียดได้ในภาคผนวก

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบการหาค่าความไวต่อความชื้น

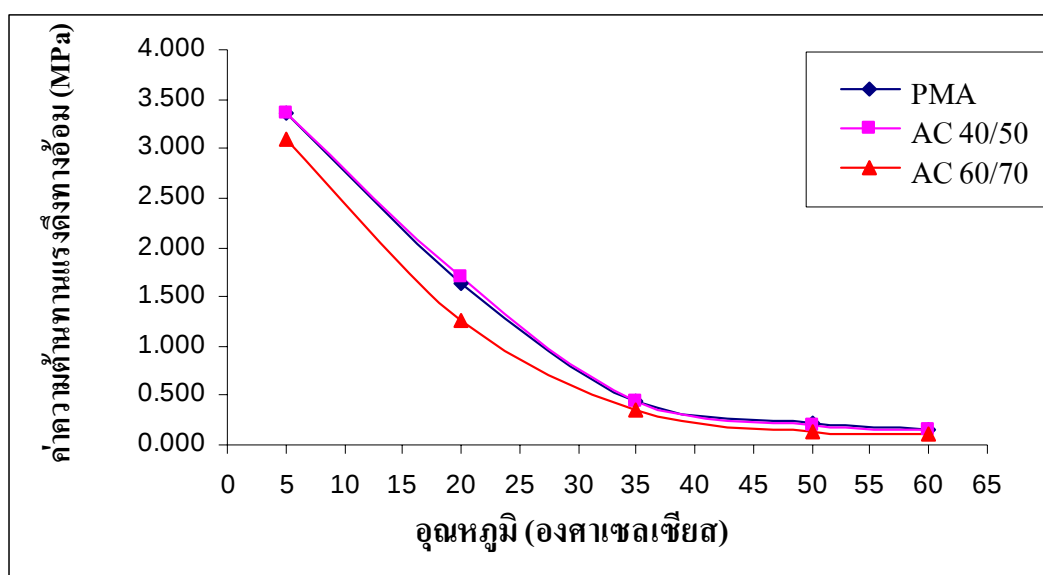
	AC 40/50	AC 60/70	PMA
Average Dry Strength (kPa)	933.52	585.33	824.04
Average Wet Strength (kPa)	772.18	494.10	677.84
Tensile Strength Ratio %	82.72	84.41	82.26

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านทานแรงดึงทางอ้อม

จากผลการทดสอบก่อนตัวอย่าง 3 ก้อนแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและทำการทดสอบที่ 5,20,35,50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้ดังตารางที่ 20 รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านทานแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิต่างๆ

Temp. C °	Average IDT (MPa)		
	40/50	60/70	PMA
5	3.366	3.100	3.361
20	1.701	1.268	1.632
35	0.431	0.361	0.440
50	0.193	0.140	0.214
60	0.146	0.102	0.157



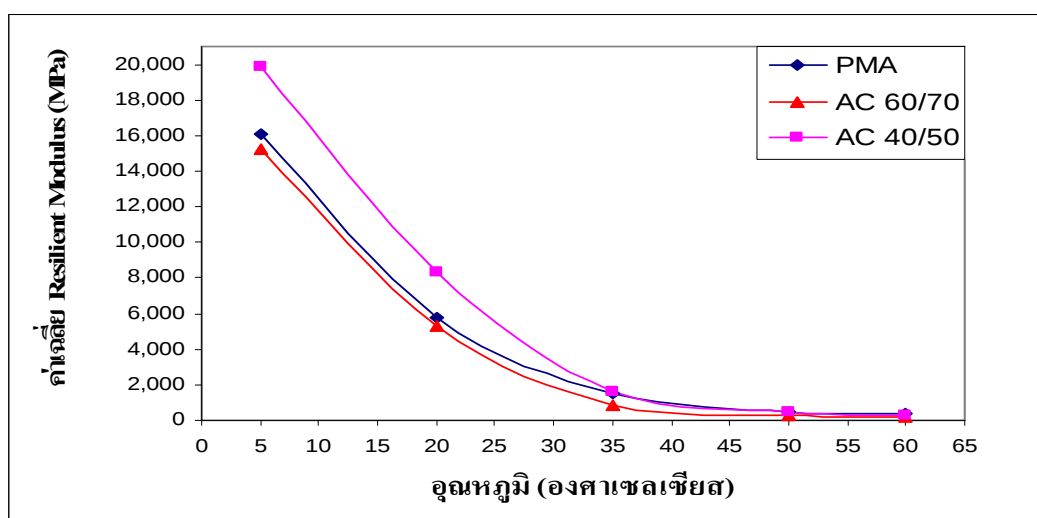
ภาพที่ 28 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 5,20,35,50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบทั้ง 2 ทิศทางแต่ละตัวอย่างจะได้ค่าร้อยละการกระจายตัวเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย (% CV) ไม่เกิน 10 % และตารางที่ 21 ได้แสดงค่าเฉลี่ยผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างและผลการทดสอบอยู่ในภาคผนวก

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 5,20,35,50 และ 60 องศาเซลเซียส

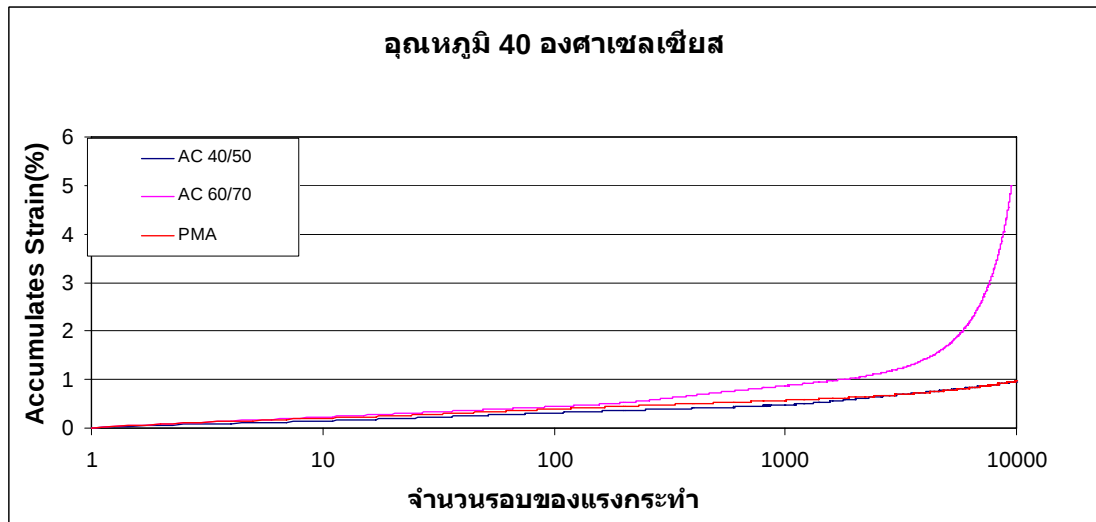
Temp. C °	Resilient Modulus (MPa)		
	40/50	60/70	PMA
5	19,902	15,264	16,112
20	8,310	5,267	5,737
35	1,566	872	1,488
50	429	301	456
60	249	152	358



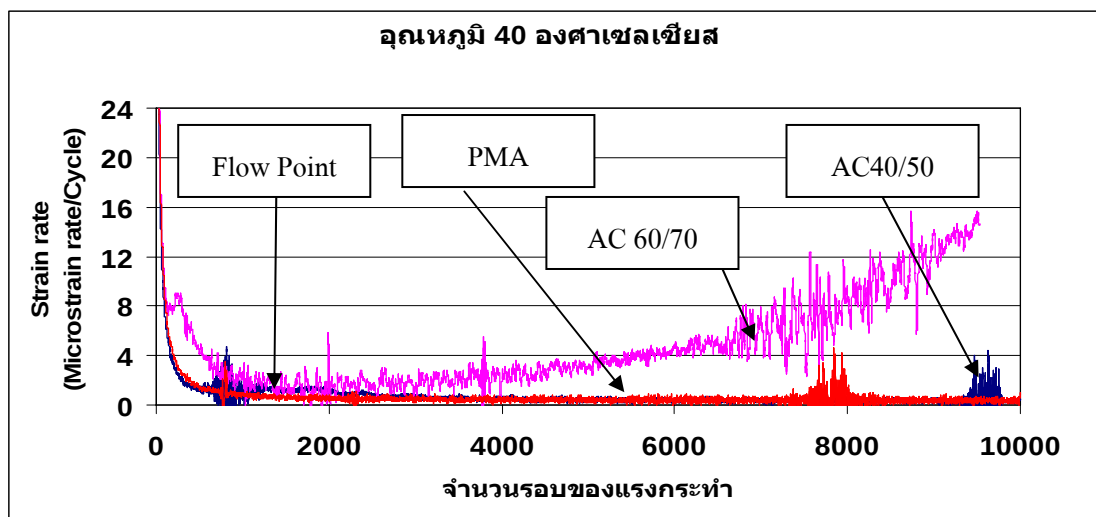
ภาพที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลการทดสอบ Dynamic creep test

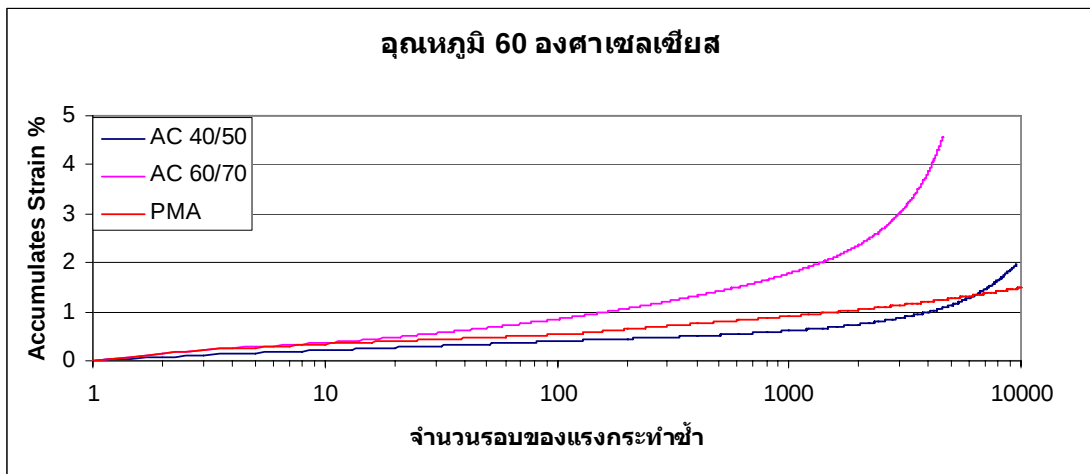
ตารางที่ 22 และภาพที่ 30, 31, 32, 33 ได้แสดงผลการทดสอบค่า Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สำหรับรายละเอียดของแต่ละตัวอย่างอยู่ในภาคผนวก



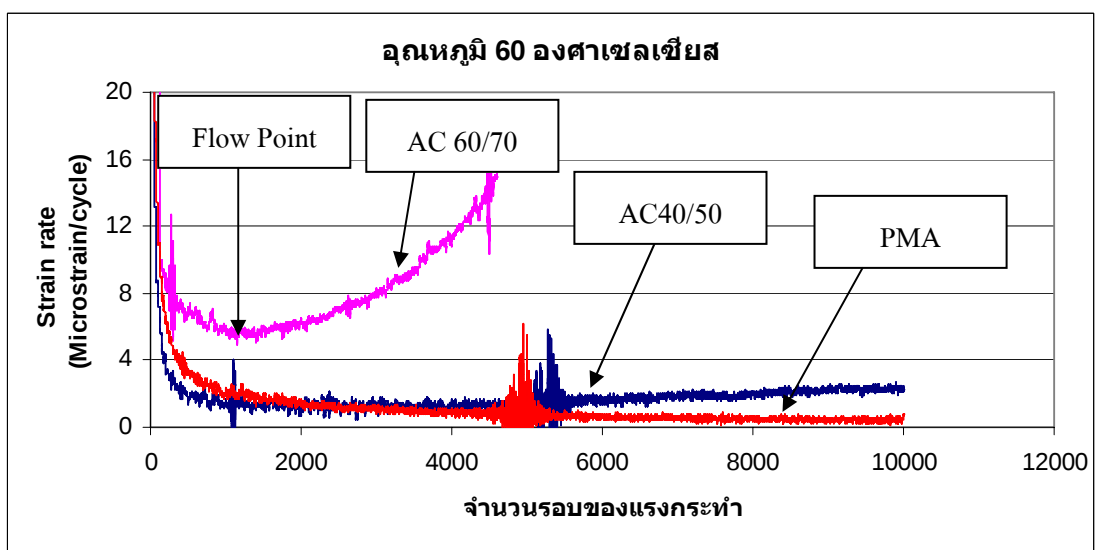
ภาพที่ 30 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบกับ Accumulate Strain ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 31 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบกับ Stain rate ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 32 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบกับ Accumulate Strain ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 33 แสดงผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบกับ Stain rate ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 22 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 40/50	1	-	1.72	1823	3.42
	2	-	1.52	1794	3.55
	3	-	1.82	1849	4.10
	Average	-	1.69	1822	3.69
AC 60/70	1	2321	5.42	1259	10.29
	2	2053	6.98	1196	10.31
	3	2230	5.96	1245	11.28
	Average	2201	6.12	1233	10.63
PMA	1	-	0.97	-	1.50
	2	-	1.79	-	1.74
	3	-	1.71	2971	4.97
	Average	-	1.49	-	2.74

จากตารางที่ 22 แสดงผลการทดสอบ Dynamic Creep Test โดยมีจำนวนรอบของการกระทำซ้ำเท่ากับ 10,000 รอบ ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ภาพที่ 30,31,32 และ 33 แสดงตัวอย่างกราฟผลการทดสอบ Dynamic Creep Test โดยเมื่อพิจารณาผลการทดสอบแล้วจะพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จะมีโอกาสเกิดร่องล้อสูงที่สุด เนื่องจากเกิด Flow Point ที่ 40 องศาเซลเซียส ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 และ PMA ไม่เกิด Flow Point ที่ 40 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาค่าการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งรอบแรงกระทำซ้ำจะพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จะมีค่าการยุบตัวถาวรมากกว่า แต่จากผลการทดสอบนี้ยังไม่สามารถเปรียบเทียบค่าการยุบตัวถาวรของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 กับยางชนิด PMA เนื่องจากผลการทดสอบยังไม่ชัดเจน และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสพบว่า แอสฟัลต์ที่ใช้ยางชนิด 40/50 จะเกิดค่าการยุบตัวถาวรมากกว่ายางแอสฟัลต์ชนิด PMA ได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 มีค่าการยุบตัวถาวรต่อหนึ่งรอบแรงกระทำมากที่สุดทั้งสองอุณหภูมิ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการนำวัสดุหินปูนที่ได้จากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3 สายเลี้ยวเมืองชลบุรี ผสมกับยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70, 40/50 และ PMA มาทำการทดสอบแล้วผลที่ได้จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การจัดขนาดกะของหินแกรนิตตาม Job Mix Formula ที่ใช้ในโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3 สายเลี้ยวเมืองชลบุรี เป็นไปตามสัดส่วนตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟและผลการทดสอบคุณสมบัติของหินปูนที่สำคัญ เช่น ความสึกหรอของมวลรวมหยาบ, ค่าทรายผสมมูลและความคงทน เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

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

3. ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) และผลการทดสอบสัดส่วนกำลังรับแรงดึงพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70, 40/50 และ PMA จะมีค่าดัชนีความแข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณร้อยละ 76 ซึ่งผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75) และค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength Ratio) มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณร้อยละ 83 ผ่านข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80)

4. ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength test) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5 และ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.15 % และ 4.05 % ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 35,50 และ 60 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

เท่ากับ 2.05 %, 9.81% และ 7.00% ตามลำดับ และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมต่ำสุด สำหรับทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ

5. ผลการทดสอบการค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5,20 และ 35 องศาเซลเซียส เท่ากับ 19.05%, 30.96% และ 4.98% ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 และ เท่ากับ 5.92%, 30.44% ตามลำดับ และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำสุด สำหรับทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ

6. ผลการทดสอบ Dynamic creep test พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA มีค่าการจะเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรช้ากว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 และ 60/70 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส การเริ่มเกิดการยุบตัวถาวรกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70 และบางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 ที่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวร สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA ยังไม่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรที่จำนวนรอบของการทดสอบที่ 10,000 รอบ

ข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบันอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยนั้นมีค่าอยู่ประมาณ 35-40 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดสอบ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA และ AC40/50 จะมีคุณสมบัติการรับแรงดึงทางอ้อมและผลการทดสอบของ ค่าโมดูลัสคืนตัว ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งผลไม่ต่างกันมากนัก และเมื่อทำการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเปรียบเทียบยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50 กับยางแอสฟัลต์ชนิด PMA แล้วจากผลการทดสอบซึ่งยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด แต่ในเบื้องต้นจากผลทดสอบนี้ ชี้ให้เห็นว่าค่าการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงควรจะมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของยางแอสฟัลต์ที่ใช้ในประเทศไทย จาก AC 60/70 มาเป็น ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 40/50 เพราะราคาของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA มีราคาสูงกว่าชนิด AC 40/50 มาก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กฤษณะ จันทโรจิติ. 2551. คุณสมบัติการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบอย่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินแกรนิตโดยการเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 122 น.
- ชยธันว์ พรหมสร. 2541. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี **Indirect Tensile Test** เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. รายงานฉบับที่ วพ.167 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- ชยธันว์ พรหมสร และคณะ. 2546. คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (**Indirect Tensile Strength**) และค่าโมดูลัสคืนตัว (**Resilient Modulus**) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย. รายงานฉบับที่ วพ. 204 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- ณรงค์ชัย นุ่มการณ์. 2545. การประเมินคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทยโดยใช้ข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 194 น.
- ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก และ สมักร สันทอง. 2541. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอีลาสติคโมดูลัสของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจากการทดสอบด้วย **FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)**. รายงานฉบับที่ วพ. 170 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- บุญพล มีไชโย. 2546. ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์กับวิธีซูเปอร์เพฟระดับ 1. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- พรชัย ศิลาธรรมย์. 2543. การเปรียบเทียบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีมาแชลและวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 126 น.

พาริส่า จันนุ้ย. 2546. อิทธิพลของวัสดุเชื่อมประสานในสโตนมาติกแอสฟัลต์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2547. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 154 น.

Asphalt Institute. 1996. **Superpave Mix Design. Superpave Series No.2 (SP-2).** U.S.A

Ayres, M. Jr. and Witzak, M.w. **“Resilient Modulus Properties of Asphalt Rubber Mixes
from Field Demonstration Projects in Maryland”**,
Transportation Research Record 1492, 1995

Kim, Y.R., Shah, K.A. and Khosla, N.P. **“Influence of Test Parameters in SHRP P07
Procedure on Resilient Modulus of Asphalt Concrete Field Cores”**
Transportation Research Record 1353, 1992

Mohammad, L.N. and Paul, H.R. **“Evaluation of Indirect Tensile Test for Determining
Structural Properties of Asphalt Mix”**, Transportation Research Record 1417

Tayebali, A. A., Deacon, J.A. and Monismith, C.L. **“Comparison of Axial and Diametral
Resilient Stiffness of Asphalt – Aggregate Mixes”**, Transportation Research
Record 1492, 1995

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติหินปูนและแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการจัดขนาดกะของหินปูน (Bin 1) โครงการก่อสร้างถนนหมายเลข 3 สายเลี่ยงเมืองชลบุรี

Sieve	1 Trial					2 Trial					3 Trial					Average Passing
	Mass of Sieve	Mass of Sieve and Sample	Retained	Passing	Passing	Mass of Sieve	Mass of Sieve and Sample	Retained	Passing	Passing	Mass of Sieve	Mass of Sieve and Sample	Retained	Passing	Passing	
Sizes	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)
3/8"	396	396	0	500	100.00	396	396	0	500	100.00	396	396	0	500	100.00	100.0
#4	403	413	10	490	98.00	403	415	12	488	97.60	403	419	16	484	96.80	97.5
#8	395	537	142	348	69.60	395	535	140	348	69.60	395	528	133	351	70.20	69.8
#16	490	603	113	235	47.00	490	601	111	237	47.40	492	612	120	231	46.20	46.9
#30	390	460	70	165	33.00	390	462	72	165	33.00	390	462	72	159	31.80	32.6
#50	331	381	50	115	23.00	331	384	53	112	22.40	331	375	44	115	23.00	22.8
#100	285	312	27	88	17.60	285	311	26	86	17.20	285	317	32	83	16.60	17.1
#200	303	323	20	68	13.60	303	326	23	63	12.60	303	316	13	70	14.00	13.4
Pan	270	338	68	0	0.00	270	333	63	0	0.00	270	340	70	0	0.00	0.00
Sum			500					500					500			0.0

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินปูน (Retained #200)

Determination No.			1	2	3
Mass Pycnometer + SSD Sample		g	-	-	-
Mass Pycnometer		g	-	-	-
Mass SSD Sample	(A)	g	416.90	416.90	416.90
Mass Container + Dry Sample		g	659.20	659.20	659.20
Mass Container		g	245.90	245.90	245.90
Mass Dry Sample	(B)	g	413.30	413.30	413.30
temperature	(t)	°C	45	40	35
Density of Water	(dt)	g/ml	0.9902	0.9922	0.9941
Mass Pycnometer + Water + Sample	(W1)	g	919.90	920.70	921.30
Mass Pycnometer + Water	(W2)	g	656.4	657.3	658.2
Apparent Specific Gravity					
$GA(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{(B + W2 - W1)}$			2.73197	2.73567	2.73543
$GA(30^{\circ}C) = \frac{GA * dt}{0.9957}$			2.717	2.726	2.731
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basis)					
$GB(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{(A + W2 - W1)}$			2.668	2.672	2.671
$GB(30^{\circ}C) = \frac{GB * dt}{0.9957}$			2.653	2.662	2.667

$$\text{Average GA } (30^{\circ}C) = 2.725$$

$$\text{Average GB } (30^{\circ}C) = 2.650$$

$$\% \text{water Absorption} = \frac{(B - A)}{A} \times 100 = 0.87$$

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบ Specific gravity test ของหินปูน (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)	-	-	-
Mass Container	(g)	233.00	233.00	233.00
Mass Dry Sample	(B) (g)	336.40	336.40	336.40
temperature	(t) (g)	45	40	35
Density of Water	(dt) (g)	0.9902	0.9922	0.9941
Mass Pycnometer + Water + Sample	(W1) (g)	869.90	870.70	871.60
Mass Pycnometer + Water	(W2) (g)	655.10	656.20	657.10
Apparent Specific Gravity				
$GA(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{(B + W2 - W1)}$		2.739	2.738	2.743
$GA(30^{\circ}C) = \frac{GA * dt}{0.9957}$		2.724	2.728	2.739

Average GA (30°C) = 2.731

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

$$\text{Total GB} = \frac{100}{(86.60/2.650) + (13.4/2.731)} = 2.661$$

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

$$\text{Total GA} = \frac{100}{(86.60/2.725) + (13.4/2.731)} = 2.726$$

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบ Sand equivalent test ของหินปูน

Sample No.	Sand Reading	Clay Reading	Sand Equivalent % = $\frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100$
1	2.5	3.4	73.5 %
2	2.3	3.5	65.7 %
3	2.4	3.4	70.6 %
	average		69.9 %

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบ Abrasion test of coarse aggregate by Los Angeles Machine

Sieve Size		Accumulative
Passing	Retained on	Mass of Sample, (g)
3/4"	1/2"	2504.3
1/2"	3/8"	2503.7
Original Mass of Sample (W1)		5008.0
Final Mass of Sample (W2)		3643.7
Loss (W1 - W2)		1364.3
Percentage of Wear = $\frac{(W1 - W2) \times 100}{W1}$		27.2

หมายเหตุ ค่าความสึกหรอ เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบหาความสึกหรอของมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) โดยใช้เครื่อง Los Angeles ไม่เกินร้อยละ 40

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Coarse Aggregate) ของหินปูน

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) = $\frac{(1) \times (5)}{100}$
37.5 - 19.0	51.28	1000	991.6	8.4	0.84	0.43
19.0 - 9.5	29.31	300	292.1	7.9	2.63	0.77
Minus 4.75						
		Total % Loss				1.20

หมายเหตุ ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตจำนวน 5 รอบ ไม่เกินร้อยละ 9

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบ Soundness test of aggregate (Fine Aggregate) ของหินปูน

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	100					
4.75 - 2.36	21.18	100	91.1	8.9	8.90	1.89
2.36 - 1.18	25.43	100	94.4	5.6	5.60	1.42
1.18 - 0.60	13.32	100	95.4	4.6	4.60	0.61
0.60 - 0.30	16.44	100	97.6	2.4	2.40	0.39
Minus 0.30						
		Total % Loss				4.32

หมายเหตุ ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม
โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตจำนวน 5 รอบ ไม่เกินร้อยละ 9

ตารางผนวกที่ ๘ ผลการทดสอบ Uncompacted void content of Fine aggregate ของหินปูน

Mass of cylinder		273.9	g
Mass of cylinder + water		373.9	g
Net mass of water	(M)	100	g
Temperature		26	°C
Density of water at temperature used	(D)	996.8	kg/m ³
Volume of cylinder	(V = 1000*M/D)	100.3	ml

Sample	Trial	Mass of cylinder + Sample (g)	Mass of cylinder (g)	Net mass of coarse aggregate in measure ; (g)	Bulk dry specific gravity of coarse aggregate	Uncompacted Voids in the material	
						$U = \frac{V - (F/G)}{V} \times 100$	Average
						%	%
Bin 1	1	420.5	273.9	146.6	2.66	45.06	45.1
	2	420.4	273.9	146.5		45.10	
	3	420.7	273.9	146.8		44.99	

หมายเหตุ ถ้า Uncompacted Voids in the material ไม่น้อยกว่า 45 %

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดสอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบกับความแบนและความยาวของอนุภาค ของหินปูน

Sample	Mass of Sample			ความแบนและความยาวของอนุภาค	
	Retained (g)	Passing (g)	Total (g)	% ความแบนและความยาว	หลักเกณฑ์
หิน 3/8"	169.2	1833.0	2002.2	8.45	สูงสุด 10%
หิน 1/2"	35.3	1963.8	1999.1	1.77	
หิน 3/4"	21.5	1977.4	1998.9	1.08	

ตารางผนวกที่ ก10 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ยางชนิด 40/50 (4.89 %)

Description	Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate	%	4.89	4.89	4.89
% AC by Mass of Total Mix (X)	%	4.662	4.662	4.662
Mass of Flask in Water (A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air (B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air C	gm.	5579.5	5588.1	5587.6
Mass of Sample in Air (D)	gm.	1340.4	1349	1348.5
Mass of Flask + Sample in Water (E)	gm.	1537.4	1540.3	1542.3
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.510	2.499	2.510
$G_m = D/(A+D-E)$				
Average Theoretical Maximum Specific Gravity			2.506	
Virtual Specific Gravity			2.698	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$				
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})			2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})			1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})				
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก11 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ยางชนิด 40/50 (4.7 %)

Description	Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate	%	4.7	4.7	4.7
% AC by Mass of Total Mix (X)	%	4.489	4.489	4.489
Mass of Flask in Water (A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air (B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air C	gm.	5580.5	5584.1	5585.2
Mass of Sample in Air (D)	gm.	1344.4	1349.4	1342.5
Mass of Flask + Sample in Water (E)	gm.	1540.4	1543.5	1539.3
Theoretical Maximum Specific Gravity		2.512	2.513	2.513
$G_m = D/(A+D-E)$				
Average Theoretical Maximum Specific Gravity			2.513	
Virtual Specific Gravity			2.698	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$				
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})			2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})			1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})				
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก12 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ยางชนิด 40/50 (5.2 %)

Description	Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate	%	5.2	5.2	5.2
% AC by Mass of Total Mix (X)	%	4.943	4.943	4.943
Mass of Flask in Water (A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air (B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air C	gm.	5583.1	5582.6	5584.4
Mass of Sample in Air (D)	gm.	1344.5	1348.3	1345.1
Mass of Flask + Sample in Water (E)	gm.	1536.4	1538.8	1537.7
Theoretical Maximum Specific Gravity $G_m = D/(A+D-E)$		2.494	2.494	2.498
Average Theoretical Maximum Specific Gravity			2.495	
Virtual Specific Gravity $G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$			2.698	
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})			2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})			1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})				
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก13 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ยางชนิด 40/50 (5.7 %)

Description	Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate	%	5.7	5.7	5.7
% AC by Mass of Total Mix (X)	%	5.393	5.393	5.393
Mass of Flask in Water (A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air (B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air C	gm.	5585.2	5584.6	5585.4
Mass of Sample in Air (D)	gm.	1345.6	1344.3	1345.7
Mass of Flask + Sample in Water (E)	gm.	1533.4	1532.9	1534.3
Theoretical Maximum Specific Gravity $G_m = D/(A+D-E)$		2.477	2.478	2.481
Average Theoretical Maximum Specific Gravity			2.478	
Virtual Specific Gravity $G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$			2.698	
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})			2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})			1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})				
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก14 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ขางชนิด 60/70 (4.89 %)

Description		Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate		%	4.89	4.89	4.89
% AC by Mass of Total Mix	(X)	%	4.662	4.662	4.662
Mass of Flask in Water	(A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm.	5582.1	5583.1	5584.6
Mass of Sample in Air	(D)	gm.	1343.1	1342.1	1344.2
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm.	1538.1	1537.9	1539.1
Theoretical Maximum Specific Gravity			2.505	2.507	2.507
$G_m = D/(A+D-E)$					
Average Theoretical Maximum Specific Gravity				2.506	
Virtual Specific Gravity				2.699	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$					
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})				2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})				1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})					
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$		%		0.24	

ตารางผนวกที่ 15 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ขางชนิด 60/70 (4.7 %)

Description		Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate		%	4.7	4.7	4.7
% AC by Mass of Total Mix	(X)	%	4.489	4.489	4.489
Mass of Flask in Water	(A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm.	5584.3	5584.7	5584.2
Mass of Sample in Air	(D)	gm.	1344.5	1344.8	1344.9
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm.	1540.8	1539.9	1541.6
Theoretical Maximum Specific Gravity			2.514	2.509	2.517
$G_m = D/(A+D-E)$					
Average Theoretical Maximum Specific Gravity				2.513	
Virtual Specific Gravity				2.699	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$					
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})				2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})				1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})					
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$		%		0.24	

ตารางผนวกที่ ก16 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ยางชนิด 60/70 (5.2 %)

Description		Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate		%	5.2	5.2	5.2
% AC by Mass of Total Mix	(X)	%	4.943	4.943	4.943
Mass of Flask in Water	(A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm.	5581.2	5582.3	5583.1
Mass of Sample in Air	(D)	gm.	1344.5	1344.9	1345.2
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm.	1536.5	1536.9	1537.7
Theoretical Maximum Specific Gravity			2.494	2.495	2.498
$G_m = D/(A+D-E)$					
Average Theoretical Maximum Specific Gravity				2.495	
Virtual Specific Gravity				2.689	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$					
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})				2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})				1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})					
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$		%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก17 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ยางชนิด 60/70 (5.7 %)

Description		Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate		%	5.7	5.7	5.7
% AC by Mass of Total Mix	(X)	%	5.393	5.393	5.393
Mass of Flask in Water	(A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm.	5581.2	5582.3	5583.1
Mass of Sample in Air	(D)	gm.	1257.5	1256.9	1256.2
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm.	1480.8	1480.9	1480.8
Theoretical Maximum Specific Gravity			2.476	2.479	2.480
$G_m = D/(A+D-E)$					
Average Theoretical Maximum Specific Gravity				2.478	
Virtual Specific Gravity				2.698	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$					
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})				2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})				1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})					
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$		%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก18 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ขางชนิด PMA (4.89 %)

Description		Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate		%	4.89	4.89	4.89
% AC by Mass of Total Mix	(X)	%	4.662	4.662	4.662
Mass of Flask in Water	(A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm.	5583.6	5584.1	5584.6
Mass of Sample in Air	(D)	gm.	1342.7	1342.8	1344.1
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm.	1538.4	1537.9	1538.8
Theoretical Maximum Specific Gravity			2.508	2.505	2.506
$G_m = D/(A+D-E)$					
Average Theoretical Maximum Specific Gravity				2.506	
Virtual Specific Gravity				2.699	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$					
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})				2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})				1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})					
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$		%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก19 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ขางชนิด PMA (4.7 %)

Description		Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate		%	4.7	4.7	4.7
% AC by Mass of Total Mix	(X)	%	4.489	4.489	4.489
Mass of Flask in Water	(A)	gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B)	gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C	gm.	5584.3	5584.7	5584.2
Mass of Sample in Air	(D)	gm.	1345.2	1345.7	1344.4
Mass of Flask + Sample in Water	(E)	gm.	1540.9	1540.2	1541.7
Theoretical Maximum Specific Gravity			2.513	2.508	2.519
$G_m = D/(A+D-E)$					
Average Theoretical Maximum Specific Gravity				2.513	
Virtual Specific Gravity				2.699	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$					
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})				2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})				1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})					
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$		%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก20 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ขางชนิด PMA (5.2 %)

Description	Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate	%	5.2	5.2	5.2
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	4.943	4.943	4.943
Mass of Flask in Water	(A) gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5581.2	5582.3	5583.1
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1254.5	1244.9	1246.2
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1482.5	1477.4	1477.8
Theoretical Maximum Specific Gravity $G_m = D/(A+D-E)$		2.494	2.497	2.495
Average Theoretical Maximum Specific Gravity			2.495	
Virtual Specific Gravity $G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$			2.689	
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})			2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})			1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})				
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก21 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ขางชนิด PMA (5.5 %)

Description	Unit	1	2	3
% AC by Mass of Aggregate	%	5.7	5.7	5.7
% AC by Mass of Total Mix	(X) %	5.393	5.393	5.393
Mass of Flask in Water	(A) gm.	731.1	731.1	731.1
Mass of Flask in Air	(B) gm.	4239.1	4239.1	4239.1
Mass of Flask + Sample in Air	C gm.	5581.2	5582.3	5583.1
Mass of Sample in Air	(D) gm.	1255.5	1256.7	1257.3
Mass of Flask + Sample in Water	(E) gm.	1479.8	1480.9	1481.2
Theoretical Maximum Specific Gravity $G_m = D/(A+D-E)$		2.477	2.479	2.479
Average Theoretical Maximum Specific Gravity			2.478	
$G_v = (100-X)/((100/G_m)-(X/G_{ac}))$			2.698	
Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate (G_{ag})			2.682	
Specific Gravity of Asphalt Cement (G_{ac})			1.02	
Asphalt Absorption (A_{ac})				
$A_{ac} = (100 * (G_v - G_{ag}) * G_{ac}) / (G_v * G_{ag})$	%		0.23	

ตารางผนวกที่ ก22 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

Sample		1	2	3	4	5	6
Diameter,mm	D	100	100	100	100	100	100
Thickness, mm	t	72.0	72.5	73.3	71.9	70.7	72.0
Dry mass, g	A	1230.1	1231.5	1227.4	1235.3	1240.8	1228.4
SSD mass, g	B	1237.7	1239.9	1235.2	1250.4	1250.6	1236.6
Mass in Water, g	C	710.1	711.5	707.9	718.4	718.3	709.7
Volume, cc (B-C)	E	527.6	528.4	527.3	532.0	532.3	526.9
Bulk Sp Gravity (A/E)	F	2.332	2.331	2.328	2.322	2.331	2.331
Max Sp Gravity	G	2.499	2.499	2.499	2.499	2.499	2.499
% Air Voids (100(G-F)/G)	H	6.70	6.74	6.85	7.08	6.72	6.71
Vol Air Voids (HE/100)	I	35.36	35.60	36.14	37.68	35.78	35.34
Load,N	P	-	-	-	9708.00	11039.00	10710.00
Conditioned							
SSD mass, g	B'	1255.70	1257.60	1254.80	-	-	-
Mass in Water, g	C'	727.2	728.50	723.50	-	-	-
Volume, cc (B'-C')	E'	528.50	529.10	531.30	-	-	-
Vol Abs Water, cc (B'-A)	J'	25.60	26.10	27.40	-	-	-
% Saturation (100J'/I)		72.39183274	73.30867378	75.80884982	-	-	-
% Swell (100(E'-E)/E)		0.17	0.13	0.76	-	-	-
Load, KN	P'	8531	8659.00	9233.00	-	-	-
Dry Str. (2000P'/(tDp))	Std	-	-	-	859.57	994.01	946.97
Wet Str. (2000P'/(tDp))	Stm	754.31	760.34	801.90	-	-	-
Average Dry Strength (kPa)				933.52			
Average Wet Strength (kPa)				772.18			
Tensile Strength Ratio, %				0.8272			

ตารางผนวกที่ ก23 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

Sample		1	2	3	4	5	6
Diameter,mm	D	100	100	100	100	100	100
Thickness, mm	t	69.4	69.3	68.4	69.4	69.4	69.3
Dry mass, g	A	1232.5	1230.1	1215.0	1231.4	1234.5	1218.6
SSD mass, g	B	1238.7	1236.7	1223.0	1241.2	1241.3	1227.2
Mass in Water, g	C	710.1	708.3	698.9	713.1	709.7	701.2
Volume, cc (B-C)	E	528.6	528.4	524.1	528.1	531.6	526.0
Bulk Sp Gravity (A/E)	F	2.332	2.328	2.318	2.332	2.322	2.317
Max Sp Gravity	G	2.499	2.499	2.499	2.499	2.499	2.499
% Air Voids (100(G-F)/G)	H	6.70	6.84	7.23	6.69	7.07	7.29
Vol Air Voids (HE/100)	I	35.40	36.16	37.91	35.34	37.60	38.36
Load, N	P	-	-	-	6633.00	6405.00	6089.00
Conditioned							
SSD mass, g	B'	1259.50	1256.90	1242.40	-	-	-
Mass in Water, g	C'	717.2	724.2	714.60	-	-	-
Volume, cc (B'-C')	E'	542.30	532.70	527.80	-	-	-
Vol Abs Water, cc (B'-A)	J'	27.00	26.80	27.40	-	-	-
% Saturation (100J'/I)		76.27	74.11	72.28	-	-	-
% Swell (100(E'-E)/E)		2.59	0.81	0.71	-	-	-
Load, N	P'	5585	5726	4751	-	-	-
Dry Str. (2000P/(tDp))	Std	-	-	-	608.28	588.59	559.12
Wet Str. (2000P'/(tDp))	Stm	513.65	527.09	441.57	-	-	-
Average Dry Strength (kPa)				585.33			
Average Wet Strength (kPa)				494.10			
Tensile Strength Ratio, %				0.8441			

ตารางผนวกที่ ก24 ผลการทดสอบการหาความไวต่อความชื้น ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

Sample		1	2	3	4	5	6
Diameter,mm	D	100	100	100	100	100	100
Thickness, mm	t	73.2	71.9	73.5	72.2	70.9	70.8
Dry mass, g	A	1232.0	1240.9	1239.9	1234.4	1236.4	1242.3
SSD mass, g	B	1240.8	1247.3	1248.3	1244.0	1244.6	1250.0
Mass in Water, g	C	712.4	715.0	715.7	714.5	714.0	715.1
Volume, cc (B-C)	E	528.4	532.3	532.6	529.5	530.6	534.9
Bulk Sp Gravity (A/E)	F	2.332	2.331	2.328	2.331	2.330	2.322
Max Sp Gravity	G	2.499	2.499	2.499	2.499	2.499	2.499
% Air Voids (100(G-F)/G)	H	6.70	6.71	6.84	6.71	6.76	7.06
Vol Air Voids (HE/100)	I	35.40	35.74	36.44	35.54	35.84	37.78
Load, N	P	-	-	-	9951.000	8438.000	9309.00
Conditioned							
SSD mass, g	B'	1259.00	1268.00	1266.30	-	-	-
Mass in Water, g	C'	723.1	724.6	726.9	-	-	-
Volume, cc (B'-C')	E'	535.90	543.40	539.40	-	-	-
Vol Abs Water, cc (B'-A)	J'	27.00	27.10	26.40	-	-	-
% Saturation (100J'/I)		76.3	75.8	72.4	-	-	-
% Swell (100(E'-E)/E)		1.4	2.1	1.3	-	-	-
Load,N	P'	7735	7863	7673	-	-	-
Dry Str. (2000P/(tDp))	Std	-	-	-	877.42	757.66	837.05
Wet Str. (2000P'/(tDp))	Stm	672.71	696.21	664.60	-	-	-
Average Dry Strength (kPa)					824.04		
Average Wet Strength (kPa)					677.84		
Tensile Strength Ratio, %					0.8226		

ตารางผนวกที่ ก25 ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

Mis proportion Hot Bin

Pen. Grade AC. 40/ 50

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler (Gag) = 2.682

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end

Asphalt Absorption = 0.23 %

No. of Specimen			1	2	3	Average
% Ac by Mass of Agg		(a)		5.1		
% Ac by Mass of Mix		(b)		4.85		
%Eff Ac by Mass of Mix		(c) = $b-x(10-b)/100$		4.62		
Specimen Height (cm)		(d)	66.5	67.0	66.2	66.6
Density						
Mass in Air	gm.	(e)	1242.7	1249.1	1225.2	1239.0
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1245.5	1252.3	1229.2	1242.3
Mass in water	gm.	(g)	726.4	730.9	719.1	725.5
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	519.1	521.4	510.1	516.9
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.394	2.396	2.402	2.397
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	10.26			10.89
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	85.57	10.25	10.26	85.04
VMA	%	(l) = $100-k$	14.43	85.56	85.58	14.96
Air Voids	%	(m) = $1-j$	4.17	14.44	14.42	4.07
VFB	%	(n) = $100*j/l$	71.09	4.18	4.16	72.81
Stability						
Meas		lb	3731.03	3663.98	3316.82	3570.61
Adjust	lb	3488.51	3380.02	3117.81	3597.59	3328.78
Flow						
Meas	in(1/100)		15.90	14.13	14.06	14.70

ตารางผนวกที่ ก26 ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

Mis proportion Hot Bin

Pen. Grade AC. 60/ 70

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler (Gag) = 2.682

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end

Asphalt Absorption = 0.24 %

No. of Specimen			1	2	3	Average
% Ac by Mass of Agg		(a)		5.1		
% Ac by Mass of Mix		(b)		4.85		
%Eff Ac by Mass of Mix		(c) = $b-x(10-b)/100$		4.62		
Specimen Height (cm)		(d)	67.1	67.5	67.3	67.3
Density						
Mass in Air	gm.	(e)	1239.4	1240.5	1235.3	1238.4
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1244.6	1246.6	1242	1244.4
Mass in water	gm.	(g)	727.7	728.8	727.7	728.1
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	516.9	517.8	514.3	516.3
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.398	2.396	2.402	2.398
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	10.89	10.88	10.91	10.90
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	85.06	84.99	85.21	85.09
VMA	%	(l) = $100-k$	14.94	15.01	14.79	14.91
Air Voids	%	(m) = $1-j$	4.04	4.13	3.88	4.02
VFB	%	(n) = $100*j/l$	72.93	72.51	73.78	73.07
Stability						
Meas		lb	3383.43	3288.56	3299.10	3323.70
Adjust	lb	3112.75	3112.75	2992.59	3018.68	3041.34
Flow						
Meas	in(1/100)		13.24	12.92	13.13	13.10

ตารางผนวกที่ ก27 ผลการทดสอบ Marshall ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

Mis proportion Hot Bin

Pen. Grade PMA

Avg. Sp.Gr.Agg. And Filler (Gag) = 2.682

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end

Asphalt Absorption = 0.23 %

No. of Specimen			1	2	3	Average
% Ac by Mass of Agg		(a)		5.1		
% Ac by Mass of Mix		(b)		4.85		
%Eff Ac by Mass of Mix		(c) = $b-x(10-b)/100$		4.62		
Specimen Height (cm)		(d)	66.4	66.0	65.9	65.92
Density						
Mass in Air	gm.	(e)	1245.7	1247.1	1242.1	1245.0
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1248.7	1251.3	1246.4	1248.8
Mass in water	gm.	(g)	730.3	730.5	727.8	729.5
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	518.4	520.8	518.6	519.3
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.403	2.395	2.395	2.398
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	10.92	10.88	10.88	10.89
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	85.25	84.95	84.97	85.06
VMA	%	(l) = $100-k$	14.75	15.05	15.03	14.94
Air Voids	%	(m) = $1-j$	3.84	4.17	4.15	4.05
VFB	%	(n) = $100*j/l$	74.00	72.29	72.39	72.89
Stability						
Meas		lb	3783.96	3855.94	3818.94	3819.61
Adjust	lb	3556.92	3556.92	3624.59	3589.80	3590.44
Flow						
Meas	in(1/100)		14.79	15.96	15.08	15.28

ตารางผนวกที่ ก28 ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด 40/50

Mix proportion Hot Bin

Pen. Grade AC 40/50

Average. Sp.Gr. Aggregate and Filler (Gag) = 2.682

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end

Asphalt Absorption = 0.23 %

No. of Specimen			Soaked Sample				Unsoaked Sample			
			1	2	3	4	1	2	3	4
% Ac by Mass of Aggregate		(a)			5.1				5.1	
% Ac by Mass of Mix		(b)			4.85				4.85	
%Effect Ac by Mass of Mix		(c) = $b-x(10-b)/100$			4.62				4.62	
Specimen Height (cm)		(d)	65.54	65.500	65.700	65.710	66.330	65.157	66.080	65.770
Density										
Mass in Air	gm.	(e)	1256.4	1256.2	1252.6	1254.8	1256.3	1255	1254.7	1256
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1259.0	1262.1	1258.3	1259	1262.2	1261.5	1259.8	1261
Mass in water	gm.	(g)	720.1	721.4	718.7	718.4	721.6	721.2	719.1	719.5
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	538.9	540.7	539.6	540.6	540.6	540.3	540.7	541.5
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.331	2.323	2.321	2.321	2.324	2.323	2.321	2.319
Average Density				2.324				2.323		

ตารางผนวกที่ ก28 (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	10.59	10.55	10.55	10.54	10.56	10.55	10.54	10.54
Volume Aggregate	% Total	(k) = (100-b)*i/Gag	82.71	82.42	82.35	82.34	82.44	82.40	82.32	82.29
VMA	%	(l) = 100-k	17.29	17.58	17.65	17.66	17.56	17.60	17.68	17.71
Air Voids	%	(m) = l-j	6.70	7.02	7.10	7.11	7.00	7.04	7.14	7.18
VFB	%	(n) = 100*j/l	61.26	60.04	59.76	59.72	60.13	59.97	59.64	59.49
Stability										
Meas	lb		7,981	7,857	7,947	7,938	10,359	10,481	10,337	10,966
Adjust	lb		7,503	7,385	7,471	7,462	9,737	9,852	9,717	10,308
Average Stability	lb		7,455				9,904			
Flow										
Meas	in(1/100)		50	48	47	48	27	31	27	26
Average Flows	in(1/100)		48				28			

Strength Index (%) =

$$= \frac{\text{Soaked Stability} * 100}{\text{Unsoaked Stability}} = \frac{7,455 \times 100}{9,904} = 75.27 \%$$

ตารางผนวกที่ ก29 ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด 60/70

Mix proportion Hot Bin

Pen. Grade AC 60/70

Average. Sp.Gr. Aggregate and Filler (Gag) = 2.682

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end

Asphalt Absorption = 0.24%

No. of Specimen			Soaked Sample				Unsoaked Sample			
			1	2	3	4	1	2	3	4
% Ac by Mass of Aggregate		(a)		5.1				5.1		
% Ac by Mass of Mix		(b)		4.85				4.85		
%Effect Ac by Mass of Mix		(c) = $b-x(10-b)/100$		4.62				4.62		
Specimen Height (cm)		(d)	65.4	66.1	65.6	65.7	6.83	6.83	6.83	6.83
Density										
Mass in Air	gm.	(e)	1248.0	1255.2	1253.3	1249	1249.9	1256.5	1253.2	1255
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1255.3	1261.2	1258.2	1255	1255.8	1261	1260.3	1260.8
Mass in water	gm.	(g)	719.5	721.7	719.4	717	718.7	720.9	721.4	720.2
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	535.8	539.5	538.8	538	537.1	540.1	538.9	540.6
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.329	2.327	2.326	2.322	2.327	2.326	2.325	2.321
Average Density				2.326				2.326		

ตารางผนวกที่ ก29 (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	10.56	10.55	10.55	10.52	9.93	9.99	9.97	9.97
Volume Aggregate	% Total	(k) = (100-b)*i/Gag	82.63	82.54	82.52	82.36	82.89	83.40	83.20	83.22
VMA	%	(l) = 100-k	17.37	17.46	17.48	17.64	17.11	16.60	16.80	16.78
Air Voids	%	(m) = l-j	6.81	6.91	6.93	7.11	7.18	6.61	6.83	6.80
VFB	%	(n) = 100*j/l	60.80	60.41	60.33	59.67	58.05	60.20	59.35	59.45
Stability										
Meas	lb		5,307	5,318	5,470	5,364	6,557	7,595	7,409	7,393
Adjust	lb		5,042	5,052	5,197	5,096	6,098	7,063	6,890	6,875
Average Stability	lb		5,020				6,620			
Flow										
Meas	in(1/100)		50	51	45	48	30	32	29	29
Average Flows	in(1/100)		48				30			
Strength Index (%) =										
Soaked Stability *100 Unsoaked Stability			= 5,020x100 6,620 = 75.83 %							

ตารางผนวกที่ ก30 ผลการทดสอบ Strength Index ของยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

Mix proportion Hot Bin

Pen. Grade PMA

Average. Sp.Gr. Aggregate and Filler (Gag) = 2.682

Sp. Gr. Of AC (Gac) = 1.02

Compaction , number of blows each end

Asphalt Absorption = 0.23%

No. of Specimen			Soaked Sample				Unsoaked Sample			
			1	2	3	4	1	2	3	4
% Ac by Mass of Aggregate		(a)			5.1				5.1	
% Ac by Mass of Mix		(b)			4.85				4.85	
%Effect Ac by Mass of Mix		(c) = b-x(10-b)/100			4.62				4.62	
Specimen Height (mm)		(d)	65.908	65.370	66.098	65.855	65.643	65.030	65.678	65.638
Density										
Mass in Air	gm.	(e)	1246.8	1244.2	1252.1	1250.3	1248.6	1248.9	1252.3	1255.7
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1252.9	1252.2	1258.6	1258.6	1255	1254.7	1255.8	1261
Mass in water	gm.	(g)	718.1	718.1	719.2	719.2	719.3	718.8	717.5	719.2
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	534.8	534.1	539.4	539.4	535.7	535.9	538.3	541.8
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.331	2.330	2.321	2.318	2.331	2.330	2.326	2.318
Average Density				2.325				2.326		

ตารางผนวกที่ ก30 (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	10.59	10.58	10.55	10.53	10.59	10.59	10.57	10.53
Volume Aggregate	% Total	(k) = (100-b)*i/Gag	82.71	82.64	82.35	82.23	82.69	82.68	82.53	82.22
VMA	%	(l) = 100-k	17.29	17.36	17.65	17.77	17.31	17.32	17.47	17.78
Air Voids	%	(m) = l-j	6.70	6.77	7.10	7.24	6.72	6.74	6.90	7.25
VFB	%	(n) = 100*j/l	61.24	60.97	59.75	59.26	61.16	61.11	60.50	59.22
Stability										
Meas	lb		8,151	7,991	8,190	8,122	9,849	10,647	11,209	10,558
Adjust	lb		7,254	7,112	7,289	7,229	8,766	9,475	9,976	9,397
Average Stability	lb		7,221				9,403			
Flow										
Meas	in(1/100)		49	46	48	47	27	29	27	27
Average Flows	in(1/100)		48				28			
Strength Index (%) =		Soaked Stability *100			= 7,221x100					
		Unsoaked Stability			9,403				76.79 %	

ตารางผนวกที่ ก31 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	101.04	99.68	99.62	99.55	99.66	99.73	99.85	99.87	99.91
	2	100.67	99.72	99.71	99.51	99.72	99.83	99.81	99.81	99.89
Average Diameter	(mm)	100.86	99.70	99.67	99.53	99.69	99.78	99.83	99.84	99.90
Height (mm)	1	67.45	67.43	67.52	67.66	67.54	67.62	67.48	67.11	66.96
	2	66.89	67.33	67.65	67.35	67.51	67.51	67.64	67.56	66.93
	3	66.92	67.48	67.77	67.41	67.63	67.45	67.86	67.42	67.04
	4	67.21	67.44	67.41	67.48	67.73	67.37	67.57	67.31	67.12
Average Height	(mm)	67.12	67.42	67.59	67.48	67.60	67.49	67.64	67.35	67.01
Dry mass	(gm)	1244.30	1246.10	1241.70	1238.50	1234.70	1243.20	1241.50	1242.70	1245.30
Saturate surface dry mass	(gm)	1245.70	1247.20	1243.10	1240.20	1235.30	1244.60	1242.70	1244.20	1245.30
Mass in water	(gm)	728.30	728.50	725.40	725.10	720.20	725.70	724.50	725.70	725.50
Bulk Specific Gravity		2.405	2.402	2.398	2.404	2.397	2.396	2.396	2.397	2.396
Ultimate load	(KN)	35.836	35.544	35.562	32.698	33.377	32.235	35.412	35.572	35.511
Indirect Tensile Strength	(MPa)	3.370	3.366	3.361	3.100	3.153	3.047	3.339	3.368	3.377
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		3.366			3.100			3.361	

ตารางผนวกที่ ก32 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	101.24	100.21	99.86	99.67	99.73	100.04	101.20	102.97	100.34
	2	100.87	100.11	100.02	99.85	99.65	99.92	100.80	102.36	100.54
Average Diameter	(mm)	101.06	100.16	99.94	99.76	99.69	99.98	101.00	102.67	100.44
Height (mm)	1	65.79	66.43	66.83	67.23	67.15	66.89	65.82	65.99	66.12
	2	66.21	66.54	66.91	67.14	67.53	66.92	66.63	66.16	66.31
	3	66.89	66.43	66.85	67.31	67.44	67.12	66.82	66.19	66.22
	4	65.56	66.82	67.03	67.41	67.31	67.04	66.03	66.12	66.05
Average Height	(mm)	66.11	66.56	66.91	67.27	67.36	66.99	66.33	66.12	66.18
Dry mass	(gm)	1254.30	1256.30	1254.50	1256.30	1257.70	1255.30	1252.40	1255.00	1253.40
Saturate surface dry mass	(gm)	1255.10	1257.20	1255.30	1256.40	1258.50	1256.10	1253.30	1256.10	1255.80
Mass in water	(gm)	732.30	732.70	733.10	734.10	733.20	732.80	730.40	733.30	732.70
Bulk Specific Gravity		2.399	2.395	2.402	2.405	2.394	2.399	2.395	2.401	2.396
Ultimate load	(KN)	17.819	17.511	18.213	13.291	13.654	13.122	16.920	17.443	17.233
Indirect Tensile Strength	(MPa)	1.698	1.672	1.734	1.261	1.295	1.247	1.608	1.636	1.651
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		1.710			1.268			1.632	

ตารางผนวกที่ ก33 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	99.81	99.7	99.7	99.69	99.74	99.83	99.85	99.97	99.91
	2	99.88	99.72	99.78	99.73	99.85	99.89	99.64	99.87	99.78
Average Diameter	(mm)	99.85	99.70	99.75	99.71	99.80	99.86	99.75	99.92	99.85
Height (mm)	1	67.46	67.46	67.67	67.45	66.82	67.13	67.27	67.05	66.68
	2	67.68	67.53	67.64	67.22	66.91	67.25	67.25	67.08	66.85
	3	67.66	67.65	67.63	67.51	67.21	67.34	67.33	67.11	66.82
	4	67.67	67.66	67.68	67.43	66.98	67.21	67.24	67.03	66.89
Average Height	(mm)	67.62	67.58	67.66	67.40	66.98	67.23	67.27	67.07	66.81
Dry mass	(gm)	1239.0	1245.7	1244.5	1252.70	1249.00	1246.90	1243.20	1252.90	1249.30
Saturate surface dry mass	(gm)	1241.20	1248.10	1246.30	1254.20	1250.80	1248.50	1244.50	1254.10	1251.90
Mass in water	(gm)	725.20	729.40	728.40	731.20	730.40	730.10	726.50	731.30	732.20
Bulk Specific Gravity		2.401	2.402	2.403	2.395	2.400	2.405	2.400	2.397	2.404
Ultimate load	(KN)	4.471	4.514	4.723	3.546	4.085	3.763	4.684	4.396	4.798
Indirect Tensile Strength	(MPa)	0.422	0.427	0.446	0.336	0.389	0.357	0.444	0.418	0.458
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		0.431			0.361			0.440	

ตารางผนวกที่ ก34 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	99.93	99.87	99.91	99.61	99.67	99.90	99.67	99.79	99.82
	2	99.87	99.92	99.89	99.75	99.76	99.92	99.81	99.89	99.68
Average Diameter	(mm)	99.90	99.90	99.90	99.68	99.72	99.91	99.74	99.84	99.75
Height (mm)	1	67.50	67.46	67.23	66.93	67.40	67.49	66.92	67.12	67.03
	2	67.50	67.35	67.26	67.05	67.55	67.45	66.84	67.18	67.09
	3	67.48	67.51	67.31	67.31	67.41	67.52	66.89	67.16	67.12
	4	67.47	67.43	67.22	66.95	67.63	67.34	66.86	67.22	67.07
Average Height	(mm)	67.49	67.44	67.26	67.06	67.50	67.45	66.88	67.17	67.08
Dry mass	(gm)	1255.10	1255.80	1253.70	1250.20	1254.30	1254.60	1254.40	1253.20	1256.30
Saturate surface dry mass	(gm)	1257.20	1257.30	1255.10	1252.40	1255.70	1255.90	1255.10	1254.60	1258.40
Mass in water	(gm)	733.30	734.50	733.60	732.20	732.10	733.10	732.10	733.20	734.40
Bulk Specific Gravity		2.396	2.402	2.404	2.403	2.396	2.400	2.398	2.404	2.398
Ultimate load	(KN)	2.060	2.053	2.024	1.395	1.569	1.478	2.241	2.260	2.235
Indirect Tensile Strength	(MPa)	0.195	0.194	0.192	0.133	0.148	0.140	0.214	0.215	0.213
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		0.193			0.140		0.214		

ตารางผนวกที่ ก35 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	99.93	99.87	99.91	99.61	99.67	99.90	99.67	99.79	99.82
	2	99.87	99.92	99.89	99.75	99.76	99.92	99.81	99.89	99.68
Average Diameter	(mm)	99.90	99.90	99.90	99.68	99.72	99.91	99.74	99.84	99.75
Height (mm)	1	67.50	67.46	67.23	66.93	67.40	67.49	66.92	67.12	67.03
	2	67.50	67.35	67.26	67.05	67.55	67.45	66.84	67.18	67.09
	3	67.48	67.51	67.31	67.31	67.41	67.52	66.89	67.16	67.12
	4	67.47	67.43	67.22	66.95	67.63	67.34	66.86	67.22	67.07
Average Height	(mm)	67.49	67.44	67.26	67.06	67.50	67.45	66.88	67.17	67.08
Dry mass	(gm)	1255.10	1255.80	1253.70	1250.20	1254.30	1254.60	1254.40	1253.20	1256.30
Saturate surface dry mass	(gm)	1256.50	1257.40	1254.90	1252.40	1256.20	1256.30	1256.10	1255.70	1257.60
Mass in water	(gm)	734.10	733.30	733.50	732.60	733.70	733.20	732.70	733.30	733.20
Bulk Specific Gravity		2.403	2.396	2.404	2.405	2.401	2.398	2.397	2.399	2.396
Ultimate load	(KN)	2.060	2.053	2.024	1.395	1.569	1.478	2.241	2.260	2.235
Indirect Tensile Strength	(MPa)	0.195	0.194	0.192	0.133	0.148	0.140	0.214	0.215	0.213
Average Indirect Tensile Strength	(MPa)		0.193			0.140		0.214		

ตารางผนวกที่ ก36 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)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)
Diameter (mm)	1	99.8		99.8		99.9		99.7		99.6		100.0		99.9		100.0		99.9	
	2	99.9		99.8		99.7		99.7		99.6		99.9		99.6		99.9		99.8	
Average Diameter	(mm)	99.9		99.8		99.8		99.7		99.6		99.9		99.7		99.9		99.9	
Height (mm)	1	68.0		67.3		67.5		67.4		67.5		67.7		67.2		67.1		66.9	
	2	67.8		67.2		67.4		67.4		67.5		67.7		67.3		67.1		66.7	
	3	67.9		67.2		67.3		67.1		67.6		67.6		67.3		67.1		66.9	
	4	67.8		67.2		67.4		67.4		67.8		67.7		67.3		67.1		66.8	
Average Height	(mm.)	67.9		67.2		67.4		67.3		67.6		67.7		67.3		67.1		66.8	
Bulk Specific Gravity		2.398		2.401		2.395		2.440		2.393		2.395		2.400		2.399		2.406	
Pulse 1	(MPa)	17718	19886	21066	21156	20713	20163	15804	16195	14606	14970	16340	15691	16664	15834	15675	17883	16546	15485
Pulse 2	(MPa)	18007	18679	19842	20047	19955	22023	15847	16169	14900	15131	15689	16201	16884	16349	15707	16198	15651	15850
Pulse 3	(MPa)	18577	18964	19945	20798	19482	20958	15240	15823	14644	14561	15157	15674	16627	15762	14788	16381	16001	15907
Pulse 4	(MPa)	18767	20274	19966	20103	20015	20762	15930	15915	14418	14803	16129	15445	17053	16012	15214	16340	16200	15440
Pulse 5	(MPa)	18478	19462	20462	19612	20111	21074	15682	16140	14429	15018	15546	15937	16817	15559	16014	16424	16158	15943
Mean	(MPa)	18309	19453	20256	20343	20055	20996	15701	16048	14599	14897	15772	15789	16809	15903	15480	16645	16111	15725
CV	(%)	6.06		0.43		4.58		2.19		2.02		0.11		5.54		7.25		2.42	
Resilient Modulus	(MPa)	18,881		20,300		20,526		15,875		14,748		15,781		16,356		16,063		15,918	
Average Resilient Modulus	(MPa)			8,803						19,902						15,264			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	5.13		2.00		3.13		4.00		3.38		3.38		1.51		0.31		1.21	

ตารางผนวกที่ ก37 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	99.8		99.8		99.9		99.7		99.6		100.0		99.9		100.0		99.9	
	2	99.9		99.8		99.7		99.7		99.6		99.9		99.6		99.9		99.8	
Average Diameter	(mm)	99.9		99.8		99.8		99.7		99.6		99.9		99.7		99.9		99.9	
Height (mm)	1	68.0		67.3		67.5		67.4		67.5		67.7		67.2		67.1		66.9	
	2	67.8		67.2		67.4		67.4		67.5		67.7		67.3		67.1		66.7	
	3	67.9		67.2		67.3		67.1		67.6		67.6		67.3		67.1		66.9	
	4	67.8		67.2		67.4		67.4		67.8		67.7		67.3		67.1		66.8	
Average Height	(mm.)	67.9		67.2		67.4		67.3		67.6		67.7		67.3		67.1		66.8	
Bulk Specific Gravity		2.398		2.401		2.395		2.440		2.393		2.395		2.400		2.399		2.406	
Pulse 1	(MPa)	8487	8351	8315	8350	8041	8513	5361	5348	5239	4590	6726	4590	5757	5861	5672	5730	5858	5987
Pulse 2	(MPa)	8386	8317	8368	8326	8071	8195	5425	5367	5300	4325	6977	4325	5780	5695	5608	5668	5539	5825
Pulse 3	(MPa)	8448	8386	8162	8575	8099	8217	5306	5121	5336	4439	7155	4439	5822	5797	5302	5552	5530	5936
Pulse 4	(MPa)	8526	8476	8130	8264	8199	8060	5325	5322	5130	4383	6744	4383	5916	5953	5440	5650	5740	5709
Pulse 5	(MPa)	8306	8423	8341	8607	8082	8279	5324	5172	5132	4347	7016	4347	6005	5934	5543	5756	5697	5844
Mean	(MPa)	8431	8391	8263	8424	8098	8253	5348	5266	5227	4417	6924	4417	5856	5848	5513	5671	5673	5860
CV	(%)	0.48		1.93		1.90		1.55		16.80		44.21		0.14		2.83		3.24	
Resilient Modulus	(MPa)	8,411		8,344		8,176		5,307		4,822		5,671		5,852		5,592		5,767	
Average Resilient Modulus	(MPa)			8,310						5,267						5,737			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	1.22		0.40		1.62		0.77		8.44		7.67		2.01		2.52		0.52	

ตารางผนวกที่ ก38 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	99.8		99.8		99.9		99.7		99.6		100.0		99.9		100.0		99.9	
	2	99.9		99.8		99.7		99.7		99.6		99.9		99.6		99.9		99.8	
Average Diameter	(mm)	99.9		99.8		99.8		99.7		99.6		99.9		99.7		99.9		99.9	
Height (mm)	1	68.0		67.3		67.5		67.4		67.5		67.7		67.2		67.1		66.9	
	2	67.8		67.2		67.4		67.4		67.5		67.7		67.3		67.1		66.7	
	3	67.9		67.2		67.3		67.1		67.6		67.6		67.3		67.1		66.9	
	4	67.8		67.2		67.4		67.4		67.8		67.7		67.3		67.1		66.8	
Average Height	(mm.)	67.9		67.2		67.4		67.3		67.6		67.7		67.3		67.1		66.8	
Bulk Specific Gravity		2.398		2.401		2.395		2.440		2.393		2.395		2.400		2.399		2.406	
Pulse 1	(MPa)	1599	1264	1702	1512	1603	1496	917	811	815	752	970	885	1536	1425	1501	1470	1446	1510
Pulse 2	(MPa)	1593	1323	1759	1565	1703	1515	929	826	845	756	997	890	1567	1466	1475	1488	1492	1484
Pulse 3	(MPa)	1537	1286	1800	1543	1719	1487	932	813	852	746	1003	915	1585	1439	1449	1503	1483	1502
Pulse 4	(MPa)	1512	1342	1735	1565	1723	1534	930	798	861	758	1026	921	1507	1467	1490	1513	1462	1470
Pulse 5	(MPa)	1595	1349	1771	1548	1728	1557	905	778	875	742	1055	865	1571	1469	1487	1497	1403	1477
Mean	(MPa)	1567	1313	1753	1547	1695	1518	922	805	850	751	1010	895	1553	1453	1480	1494	1457	1488
CV	(%)	17.64		12.48		11.02		13.55		12.37		12.07		6.65		0.94		2.11	
Resilient Modulus	(MPa)	1,440		1,650		1,607		864		801		953		1,503		1,487		1,473	
Average Resilient Modulus	(MPa)			1,566						872						1,488			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	8.02		5.40		2.62		0.99		8.22		9.21		1.04		0.03		1.01	

ตารางผนวกที่ ก39 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	99.8		99.8		99.9		99.7		99.6		100.0		99.9		100.0		99.9	
	2	99.9		99.8		99.7		99.7		99.6		99.9		99.6		99.9		99.8	
Average Diameter	(mm)	99.9		99.8		99.8		99.7		99.6		99.9		99.7		99.9		99.9	
Height (mm)	1	68.0		67.3		67.5		67.4		67.5		67.7		67.2		67.1		66.9	
	2	67.8		67.2		67.4		67.4		67.5		67.7		67.3		67.1		66.7	
	3	67.9		67.2		67.3		67.1		67.6		67.6		67.3		67.1		66.9	
	4	67.8		67.2		67.4		67.4		67.8		67.7		67.3		67.1		66.8	
Average Height	(mm.)	67.9		67.2		67.4		67.3		67.6		67.7		67.3		67.1		66.8	
Bulk Specific Gravity		2.398		2.401		2.395		2.440		2.393		2.395		2.400		2.399		2.406	
Pulse 1	(MPa)	477	397	404	405	397	402	285	345	278	288	300	284	453	435	410	425	466	477
Pulse 2	(MPa)	507	379	408	461	425	421	286	340	294	276	313	278	476	457	430	424	491	470
Pulse 3	(MPa)	537	404	428	429	423	428	318	355	288	291	311	278	488	458	428	441	462	437
Pulse 4	(MPa)	507	377	419	425	421	429	316	382	301	295	328	279	492	448	424	435	527	490
Pulse 5	(MPa)	541	373	407	410	423	390	283	334	298	291	311	278	484	448	423	428	464	487
Mean	(MPa)	514	386	413	426	418	414	297	351	292	272	313	279	479	449	423	431	482	472
CV	(%)	28.44		3.10		0.96		16.67		7.09		11.49		6.47		1.87		2.10	
Resilient Modulus	(MPa)	450		420		416		324		282		296		464		427		477	
Average Resilient Modulus	(MPa)			429						301						456			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	5.02		2.10		2.92		7.76		6.21		1.55		1.75		6.36		4.61	

ตารางผนวกที่ ก40 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	99.8		99.8		99.9		99.7		99.6		100.0		99.9		100.0		99.9	
	2	99.9		99.8		99.7		99.7		99.6		99.9		99.6		99.9		99.8	
Average Diameter	(mm)	99.9		99.8		99.8		99.7		99.6		99.9		99.7		99.9		99.9	
Height (mm)	1	68.0		67.3		67.5		67.4		67.5		67.7		67.2		67.1		66.9	
	2	67.8		67.2		67.4		67.4		67.5		67.7		67.3		67.1		66.7	
	3	67.9		67.2		67.3		67.1		67.6		67.6		67.3		67.1		66.9	
	4	67.8		67.2		67.4		67.4		67.8		67.7		67.3		67.1		66.8	
Average Height	(mm.)	67.9		67.2		67.4		67.3		67.6		67.7		67.3		67.1		66.8	
Bulk Specific Gravity		2.398		2.401		2.395		2.440		2.393		2.395		2.400		2.399		2.406	
Pulse 1	(MPa)	255	243	244	215	257	260	159	177	151	130	163	145	321	301	340	342	355	342
Pulse 2	(MPa)	266	247	248	226	263	260	133	150	151	143	168	171	332	310	431	425	358	335
Pulse 3	(MPa)	273	248	219	225	288	259	143	163	126	138	152	162	346	330	359	364	371	385
Pulse 4	(MPa)	269	255	238	213	271	262	139	156	157	140	174	165	364	321	400	403	367	357
Pulse 5	(MPa)	275	229	220	223	258	268	151	153	135	158	152	139	331	343	373	397	369	369
Mean	(MPa)	267	245	234	220	268	262	145	160	144	142	162	156	339	321	380	385	364	358
CV	(%)	8.59		6.17		2.26		9.84		1.40		3.77		5.45		1.31		1.66	
Resilient Modulus	(MPa)	256		227		265		153		143		159		330		383		361	
Average Resilient Modulus	(MPa)			249						152						358			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	2.67		8.96		6.28		0.66		5.61		4.95		7.78		6.89		0.88	

ตารางผนวกที่ ก41 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	100.0	100.1	99.9	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9
	2	100.1	100.1	100.1	100.0	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1
Average Diameter (mm.)		100.0	100.0	100.1	100.0	100.0	99.9	100.0	100.0	100.0
Height (mm.)	1	67.46	67.46	67.67	67.45	66.82	67.13	67.27	67.05	66.68
	2	67.68	67.53	67.64	67.22	66.91	67.25	67.25	67.08	66.85
	3	67.66	67.65	67.63	67.51	67.21	67.34	67.33	67.11	66.82
	4	67.67	67.66	67.68	67.43	66.98	67.21	67.24	67.03	66.89
Average Height (mm.)		67.6	67.6	67.7	67.4	67.0	67.2	67.3	67.1	66.8
Bulk Specific Gravity		2.397	2.399	2.396	2.403	2.396	2.404	2.405	2.401	2.398
Termination cycle		10,000	10,000	10,000	9,225	7,162	8,392	10,000	10,000	10,000
Accumulated microstain		17,210	15,151	18,218	50,000	50,002	50,000	9,691	17,927	17,132
Flow point (cycle)		-	-	-	2,321	2,053	2,230	-	-	-
Microstrain @ flow point		9,581	7,657	9,458	9,925	16,266	16,570	9,156	10,904	11,640
Permanent microstrain per cycle		1.72	1.52	1.82	5.42	6.98	5.96	0.97	1.79	1.71
Average permanent microstrain per cycle			1.69			6.12			1.49	

ตารางผนวกที่ ก42 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	99.8	99.8	100.1	99.8	99.8	99.6	100.1	99.8	99.7
	2	99.8	99.8	100.1	99.8	99.8	99.6	100.1	99.8	99.7
Average Diameter (mm.)		99.83	99.8	100.1	100.1	100.0	100.0	100.5	100.0	100.2
Height (mm.)	1	99.8	100.0	100.1	99.9	99.9	100.1	100.0	100.0	100.0
	2	67.27	67.05	66.68	67.46	67.46	67.67	67.45	66.82	67.13
	3	67.25	67.08	66.85	67.68	67.53	67.64	67.22	66.91	67.25
	4	67.33	67.11	66.82	67.66	67.65	67.63	67.51	67.21	67.34
Average Height (mm.)		67.3	67.1	66.8	67.6	67.6	67.7	67.4	67.0	67.2
Bulk Specific Gravity		2.400	2.397	2.404	2.401	2.402	2.403	2.395	2.400	2.405
Termination cycle		10,000	10,000	10,000	4,860	4,851	4,431	10,000	10,000	10,000
Accumulated microstain		34,184	35,479	41,006	50,000	50,000	50,000	14,951	17,405	49,709
Flow point (cycle)		1,823	1,794	1,849	1,259	1,196	1,245	-	-	2,971
Microstrain @ flow point		6,983	9,817	13,648	10,522	9,125	21,833	14,608	13,339	33,472
Permanent microstrain per cycle		3.42	3.55	4.10	10.29	10.31	11.28	1.50	1.74	4.97
Average permanent microstrain per cycle			3.69			10.63			2.74	

ตารางผนวกที่ ก43 ผลการทดสอบวัสดุมวลรวมของหินปูนในงานวิจัยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกรมทางหลวง

Description	Hot Bin 1						Hot Bin						Total	
	Passing #200		Retained #200		Total		Bin 2		Bin 3		Bin 4			
	งานวิจัย	ผลเดิม	งานวิจัย	ผลเดิม	งานวิจัย	ผลเดิม	งานวิจัย	ผลเดิม	งานวิจัย	ผลเดิม	งานวิจัย	ผลเดิม	งานวิจัย	ผลเดิม
Mix Proportion (%)	-	-	-	-	45	45	13	11	19	20	23	24	100	100
Bulk Specific Gravity	-		2.606	2.608	2.612	2.614	2.610	2.622	2.611	2.628	2.615	2.629	2.612	2.621
Apparent Specific Gravity	2.680	2.671	2.665	2.668	2.666	2.668	2.657	2.665	2.651	2.663	2.650	2.661	2.658	2.665
Water Absorption (%)	-	-	0.80	0.86		-	0.68	0.61	0.58	0.50	0.50	0.46	-	-
เหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด (%) ไม่น้อยกว่า 45 %	-	-	-	-	44.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
เหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ (%) ไม่น้อยกว่า 90 %			-				100	-	100	-	100	-	-	-
ความแบนและความยาวของอนุภาค (%) ไม่เกิน 10 %			-				10.1	-	2.1	-	0.8	-	-	-
Flakiness Index (%)	มาตรฐาน	ไม่เกินร้อยละ 35					45	47	12	14	11	10	18	17
Elongation Index (%)	มาตรฐาน	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5					5	5	25	25	27	27	22	20
Asphalt Absorption (%)				งานวิจัย	AC 40/50 = 0.328, AC 60/70 = 0.321, PMA =					ผลเดิม	AC 60/70 = 0.320			
Los Angeles Abrasion (%)	มาตรฐาน	ไม่เกินร้อยละ 40		งานวิจัย	23%					ผลเดิม	21%			
Soundness (% Wt.Loss)	มาตรฐาน	ไม่เกินร้อยละ 9		งานวิจัย	Coarse Aggregate 3/4" =2.05 %,Fine Aggregate = 3.90%									
				ผลเดิม	Coarse Aggregate 3/4" =0.60 %,Fine Aggregate = 3.70%									
Sand Equivalent (%)	มาตรฐาน	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50		งานวิจัย	78%					ผลเดิม	80 %			

หมายเหตุ ผลเดิมคือผลการทดสอบของกรมทางหลวง

ตารางผนวกที่ ก44 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 –นามสกุล	นาย นภัทรพี อนันตชัยพงศ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	19 ตุลาคม 2525
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. โยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรขนส่ง
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัทกรุงเทพเอ็นอีเนียริงคอนซัลแตนท์ จำกัด