



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การนำวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40-50 มาใช้งานใน
สายทางรถบรรทุกหนัก

Application of Asphalt Concrete Mixture using AC 40-50 in Truck Route

นามผู้วิจัย นายธีรยุทธ อุดมสินประเสริฐ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล, วศ.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ธันวิน สวัสดิ์สานต์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุขใจ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การนำวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40-50 มาใช้งาน
ในสายทางรถบรรทุกหนัก

Application of Asphalt Concrete Mixture using AC 40-50 in Truck Route

โดย

นายธีรยุทธ อุดมสินประเสริฐ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ธีรยุทธ อุดมสินประเสริฐ 2555: การนำวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40-50 มาใช้งานในสายทางรถบรรทุกหนัก ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล, วศ.ม. 173 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ (ยาง) เกรด 40-50 (AC 40-50) ที่ใช้ในงานก่อสร้างจริง โดยตัวอย่างที่ใช้ศึกษาทั้งหมดประกอบด้วยตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต (loose-mix) จากโรงผสม และ ตัวอย่างที่เจาะจากงานก่อสร้าง ซึ่งเก็บมาระหว่างการก่อสร้างแปลงทดสอบทางหลวงหมายเลข 352 ซึ่งเป็นโครงการบูรณะทางโดยนำวัสดุกลับมาใช้ซ้ำ โดยใช้ยาง Polymer Modified Asphalt (PMA) ในชั้นผิวทาง (Wearing Course) และใช้ยาง AC 40-50 และ AC 60-70 ในชั้นรองผิวทาง (Binder Course) ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการหลายวิธีประกอบไปด้วย การทดสอบโมดูลัสคืนตัว การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม และการทดสอบการยุบตัวแบบไดนามิก นอกจากนี้ยังมีการติดตามพฤติกรรมในสนาม และสภาพผิวทาง ตามระยะเวลาที่กำหนดโดยใช้เครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) และสำรวจสภาพผิวทางด้วยวิธีประเมินด้วยสายตา

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่นที่ทดสอบโดยกรมทางหลวง และจากผลการติดตามพฤติกรรมในสนามด้วยเครื่อง FWD ก็กับการสำรวจสภาพผิวทางด้วยวิธีประเมินด้วยสายตา ทำให้ทราบว่าช่วงของแปลงทดสอบที่ชั้น Binder Course เป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 มีความแข็งแรงสูงกว่า AC 60-70 เนื่องจากในชั้น Binder Course ที่เป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC40-50 มีการแอนตัวและความเสียหายที่ต่ำกว่า AC 60-70 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของกรมทางหลวง โดยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 มีค่าโมดูลัสที่สูงกว่า และมีสมรรถภาพที่ดีกว่า AC 60-70 นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างด้วยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางทั้งสองชนิดยังใกล้เคียงกัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความเห็นสอดคล้องกับข้อสรุปจากงานวิจัยของกรมทางหลวงที่แนะนำว่าในถนนที่มีปริมาณการจราจรระดับปานกลางถึงสูง ควรมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของยางที่ใช้จาก AC 60-70 มาเป็น AC 40-50

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Theerayut Udomsinprasert 2012: Application of Asphalt Concrete Mixture using AC 40-50 in Truck Route. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Watcharin Witayakul, M.Eng. 173 pages.

The objective of this research is to study the engineering properties of asphalt concrete mixtures using asphalt binder penetration grade 40-50 (AC 40-50) that are used in a real construction. All samples for this study, including loose-mix samples from mixing plant and cored samples from the construction site, were obtained during construction of the test section on highway No. 352. The test section was a rehabilitated flexible pavement with asphalt concrete mixture using Polymer Modified Asphalt (PMA) as the asphalt wearing course and asphalt concrete mixture using AC 40-50 and AC 60-70 as the asphalt binder course. Various laboratory tests were conducted in this study including indirect tensile resilient modulus test, indirect tensile fatigue test, and SPT dynamic creep test. In addition, field performance and conditions of the test section were regularly monitored by Falling Weight Deflectometer (FWD) machine and visual condition survey.

The engineering properties of the asphalt concrete mixture using AC 40-50 obtained in this study were found to be in the same ranges as those obtained from the other studies conducted by the Department of Highway (DOH). Further, the result of the FWD test and visual condition survey of the test section also showed that the part of the test section having asphalt concrete mixture using AC 40-50 as the asphalt binder courses had lower surface deflections and less pavement distresses than the other parts such findings were in correspondent with the laboratory test results of prior studies of DOH that the asphalt concrete mixture using AC 40-50 have higher modulus and better performance than those using AC 60-70. Finally, since the construction costs of two asphalt mixtures were almost the same, the author agrees with the prior conclusions of DOH that for flexible pavements with medium to medium-high amount of traffic, DOH should consider changing the asphalt binder from AC 60-70 to AC 40-50.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ธันวิน สวัสดิ์สถานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำและคำปรึกษา อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนทำการตรวจสอบและแก้ไขจนเสร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นายเสกขัย อนุเวชศิริเกียรติ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือทางด้านวัสดุอุปกรณ์ตลอดจนถึงอำนวยความสะดวกที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำห้องทดลอง ได้ช่วยเหลือทำงานวิจัยนี้

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่อุปการะเลี้ยงดูและเป็นกำลังใจให้จนทำวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ บิดา มารดาและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

ธีรยุทธ อุดมสินประเสริฐ

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	59
อุปกรณ์	59
วิธีการ	62
ผลและวิจารณ์	98
สรุปและข้อเสนอแนะ	114
สรุป	114
ข้อเสนอแนะ	118
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	119
ภาคผนวก	122
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการก่อสร้างผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ ยาง AC 40-50	123
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต	130
ภาคผนวก ค ผลการติดตามพฤติกรรมบนแปลงทดสอบ	145
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	173

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC40/50	8
2	ความเร็วสูงสุดของรถบดในการบดทับ (กม./ชม.)	26
3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความถี่ และจำนวนครั้งการกระแทก	27
4	สรุปอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการก่อสร้าง	27
5	สรุปผลการออกแบบตาม Job Mix Formula ของถนนสายต่างๆ	39
6	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและสนาม	40
7	เปรียบเทียบผลการออกแบบระหว่าง วิธีมาร์แชลล์ และวิธีซูเปอร์เพฟ	41
8	ผลการทดสอบระหว่างวิธี Indirect Tensile Strength มาร์แชลล์และวิธีซูเปอร์เพฟ	41
9	ผลการทดสอบจากการบดอัดวิธีซูเปอร์เพฟที่มุมต่างๆ	42
10	คุณสมบัติเชิงปริมาตรจากตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตของชั้นผิวทาง	42
11	คุณสมบัติเชิงปริมาตรจากตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตของชั้นรองผิวทาง	43
12	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความล้าจากการทดสอบ	45
13	แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในสมการ	47
14	สรุปผลการทดสอบ	49
15	ค่าความต้านทานต่อการยุบตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	50
16	ค่า Plastic Strain ที่ได้จากการทดสอบตาม ขนาดคละ แรงกระทำ และอุณหภูมิต่างๆ	54
17	ร้อยละของปริมาณยาง และ คุณสมบัติเชิงปริมาตรของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามส่วนผสม และยางที่ต่างกัน	55
18	รายละเอียดปริมาณงานในการก่อสร้าง	67
19	คุณสมบัติส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง (Job Mix Formula)	68
20	ข้อกำหนดในการควบคุมขนาดคละของผิวทางแต่ละชนิด	69
21	ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้างของก้อนตัวอย่างที่เตรียมจากโรงผสม	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้างของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนาม	70
23	ปริมาณรถบรรทุกหนัก ณ บริเวณจุดสำรวจ	73
24	สรุปรายละเอียดการทดสอบก้อนตัวอย่าง	78
25	ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ที่ใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวที่ อุณหภูมิต่างๆ	83
26	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 5 20 35 50 และ 60 องศา เซลเซียส	99
27	ผลการทดสอบการแตกร้าวจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อมของวัสดุผสม แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50	101
28	จำนวนรอบกระทำซ้ำที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์โดยระบุค่า ความเครียดและความเค้น	103
29	ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	105
30	ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่จำนวนรอบการทดสอบ 1,800 รอบ	107
31	ค่าการแอ่นตัวของผิวทาง ที่จุดทำการทดสอบต่างๆ	107
32	ความลึกของร่องล้อในแต่ละช่วง	109
33	สรุปลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ฝั่ง LT	112
34	สรุปลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ฝั่ง RT	113
35	ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ขนส่ง และก่อสร้าง วัสดุ ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ยาง AC 60-70 และค่าที่แนะนำ สำหรับวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50	117
ตารางผนวกที่		
ข1	ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 11 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง	131

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข2	ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 12 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง	132
ข3	ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 13 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง	133
ข4	ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 14 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง	134
ข5	ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 16 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง	135
ข6	ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 17 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง	136
ข7	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ เจาะจากสนาม และนักรพี	137
ข8	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ เจาะจากสนาม และนักรพี	138
ข9	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ เจาะจากสนาม และนักรพี	139
ข10	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ เจาะจากสนาม และนักรพี	140
ข11	ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ เจาะจากสนาม และนักรพี	141

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข12	ผลการทดสอบ Indirect tensile Fatigue test ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ	142
ข13	ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ เจาะจากสนาม และ นกัสรพี	144
ค1	ผลการเก็บข้อมูลค่าการแอ่นตัวสูงสุดตามจุดทดสอบต่างๆ ด้วยเครื่อง FWD	146
ค2	ผลการเก็บข้อมูลลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวทางฝั่ง LT	147
ค3	ผลการเก็บข้อมูลลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวทางฝั่ง RT	160

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับขนาดใหญ่สุด 19 mm	5
2	ขีดจำกัดการจัดขนาดคละระบบซูเปอร์เพฟ	6
3	การทดสอบเพนิเตรชัน	8
4	แผนผังส่วนประกอบของก้อนตัวอย่างที่บดอัดแล้วของ HMA	10
5	ส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor	12
6	แสดงกลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor	13
7	ความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด	13
8	รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Stress-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM D 4123	15
9	รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Strain-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM DD 213:1993	15
10	รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคืนตัวแบบ Strain Control Test ในงานวิจัยนี้	16
11	รูปแสดงการให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง	18
12	รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1	20
13	รายละเอียดของโรงงานผสมแบบชุด	21
14	ภาพตัดขวางของเตาเผา (Dryer)	21
15	ตะแกรงคัดแยกขนาดหิน	22
16	ถังเก็บยาง	22
17	ห้องผสม	22
18	แผงวงจรควบคุม	23
19	รถบรรทุกพ่วงที่คลุมผ้าใบแล้ว	23
20	เครื่องปูขณะดำเนินการก่อสร้าง	24
21	รถบดอัดล้อเหล็ก	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	รถบดอัดสันสะท้อน	25
23	รถบดอัดล้อยาง	26
24	ก่อนนำหนักและโครงสร้างของเครื่องมือ FWD	28
25	ตำแหน่ง Sensor และการทำงานของเครื่องมือ FWD	29
26	ร่องล้อ	32
27	การยุบตัวเป็นแอ่ง	33
28	การบวมตัว	34
29	รอยแตกหนังจระเข้	35
30	หลุมบ่อ	36
31	รอยปะซ่อม	37
32	ผลการทดสอบความล้าของส่วนผสม Conventional Mixture and HMAM	46
33	ผลการทดสอบ Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)	47
34	กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa	52
35	กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างตามปริมาณของ SBS ที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa	52
36	กราฟแสดงการทดสอบของส่วนผสมที่ Modified และ Unmodified	53
37	ค่าของ E_p ที่ได้จาก Stress level ของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดที่อุณหภูมิต่างๆ	56
38	เครื่องเจาะก้อนตัวอย่างจากสนาม	60
39	เครื่องบดอัด Superpave Gyratory Compactor	60
40	เครื่องทดสอบ UTM – 5P	61
41	เครื่องทดสอบ Simple Performance Tester	61
42	แผนที่แสดงที่ตั้งของโครงการ	63
43	แผนผังแสดงตำแหน่งของวัสดุผิวทางชั้นรองผิวทางที่ใช้ยาง AC 40-50 และ AC 60-70	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	รูปตัดของถนนทั้งก่อนและหลังการบ่มผิวทางแอสฟัลต์	66
45	ภาพรวมของโรงงานผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตประเภท Batch Type	71
46	การเก็บตัวอย่างจากท้ายรถบรรทุกใส่ถาดก่อนนำไปบรรจุลงถัง	74
47	การเจาะ (Coring) ก่อนตัวอย่างโดยใช้เครื่องเจาะ	75
48	เครื่องบดอัด Superpave Gyrotory Compactor หลังจากใส่ mold แล้ว	76
49	ก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตขณะติดตั้งกับเครื่องตัดตัวอย่าง	77
50	การวัดขนาดก่อนตัวอย่างในการทดสอบ Indirect Resilient Modulus Test	79
51	แสดงวิธีการติดตั้งก่อนตัวอย่างกับเครื่องมือทดสอบ	80
52	แสดงการนำแกนเหล็กมาวางด้านบนก่อนตัวอย่าง	81
53	แสดงการเลื่อน Load Sell	81
54	แสดงการปรับค่า LVDT 1	81
55	ค่า LVDT ที่แสดงในโปรแกรมทดสอบ	82
56	การคำนวณค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ได้จากโปรแกรม UTM 16 V2.05 Indirect Tensile Resilient Modulus Test	83
57	แสดงอุณหภูมิที่แสดงบนเครื่อง UTM-5P	84
58	แสดงโปรแกรมการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากการล้าแบบให้แรงดึง ทางอ้อม	85
59	แสดงค่าของ LVDT 1 และ LVDT 2	86
60	แสดงการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม	87
61	รายละเอียดของตัวแปรที่แสดงในโปรแกรม	88
62	แสดงวิธีการใส่ถุงยาง	88
63	การติดตั้งก่อนตัวอย่างในการทำ Dynamic Creep Test	89
64	ผลการทดสอบ Dynamic Creep Test ที่ได้จากโปรแกรม UTS005 1.30 Simple Performance Flow Test	90
65	ตัวอย่างหินที่ได้จากยูนิตหินร้อน	91
66	เครื่องเขย่าและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดคละ	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

67	การวัดอุณหภูมิที่ทำยรถบรรทุก ณ โรงงานผสม	92
68	การวัดอุณหภูมิที่ทำยรถบรรทุก ณ พื้นที่ก่อสร้าง	92
69	การใช้เครื่องเลเซอร์วัดอุณหภูมิผิวทางที่อยู่ระหว่างการบดอัด	93
70	การทดสอบความแข็งแรงของถนนด้วยเครื่อง FWD	94
71	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ	100
72	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของค่าความเครียดเริ่มต้น (Log of initial strain) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40-50 กับ ค่าลอการิทึมของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ	102
73	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของค่าความเครียดเริ่มต้น (Log of initial strain) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40-50 กับ ค่าลอการิทึมของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยอื่น	104
74	ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบกับ Accumulate Strain	104
75	แสดงความลึกของร่องล้อที่เกิดขึ้นหลังจากการเปิดใช้งานตามช่วงเวลาต่างๆ ในฝั่ง LT	110
76	แสดงความลึกของร่องล้อที่เกิดขึ้นหลังจากการเปิดใช้งานตามช่วงเวลาต่างๆ ในฝั่ง RT	111

ภาพผนวกที่

ก1	หินที่ถูกเก็บใน Cold Bin	124
ก2	หินที่ลำเลียงผ่านสายพานไปยัง Dryer	124
ก3	Sensor วัดอุณหภูมิบริเวณปาก Dryer	125
ก4	ถังเก็บยาง และค่าอุณหภูมิของยาง	126
ก5	เครื่องมือควบคุมปริมาณหินและยางที่ใช้ในการผสมแบบหน้าจอ Digital	126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก6	ภาพภายหลังจากปล่อยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใส่ท้ายรถบรรทุกแล้ว	127
ก7	แสดงการบดทับชั้นต้น	128
ก8	แสดงอุณหภูมิขณะการบดทับชั้นต้น	128
ก9	ภาพแสดงการบดทับชั้นกลาง	129
ก10	ภาพแสดงการบดทับชั้นสุดท้าย	129

การนำวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40-50
มาใช้งานในสายทางรถบรรทุกหนัก

Application of Asphalt Concrete Mixture using AC 40-50 in Truck Route

คำนำ

ถนนของประเทศไทยในปัจจุบันมีแนวโน้มต้องรองรับปริมาณจราจรที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตรงปัญหาความชำรุดเสียหายของถนนทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง โดยปัญหาหลักที่พบมากที่สุดคือ ความเสียหายอันเนื่องมาจากการยุบตัวอย่างถาวร ตามด้วยความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าที่เกิดขึ้นในชั้นผิวทาง

จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ กรมทางหลวงจึงได้ทดลองนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ยาง) เกรด 40-50 มาใช้ในงานก่อสร้างชั้นรองผิวทาง (Binder Course) ในบางช่วง ของทางหลวงหมายเลข 352 ตอน รัษฎบุรี - บรรจบทางหลวงหมายเลข 309 ระหว่าง กม. 2+480 – กม. 7+000 และ กม. 11+800 – กม. 13+700 ทั้งฝั่งขาเข้าและขาออก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้สูงขึ้น ดังผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา อันจะนำไปสู่ถนนที่มีความแข็งแรง สามารถรองรับปริมาณการจราจรที่สูงขึ้น ความเสียหายที่ลดลง อายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นการทดลองนำยางชนิด AC 40-50 มาใช้ในวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยนำมาบดทับในชั้นรองผิวทาง (Binder Course) เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของถนน
2. เพื่อเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในชั้น Binder Course ที่ใช้ยางชนิด AC 40-50
3. เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในงานก่อสร้างถนน ตั้งแต่กระบวนการผลิต กระบวนการขนส่ง และกระบวนการก่อสร้าง โดยทำเป็นตารางคำแนะนำอุณหภูมิที่ควรใช้ในงานก่อสร้าง

ขอบเขตการศึกษา

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดได้จากงานบูรณะก่อสร้างทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 352 ตอน รัชบุรี – บรรจบทางหลวงหมายเลข 309 ในช่วง กม. 2+480 – 7+000 และกม. 11+800 – 13+700 โดยจะแบ่งตัวอย่างที่ใช้การทดสอบดังนี้ ตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการได้มาจากจากโรงผสม และตัวอย่างที่เจาะในสนาม
2. ทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากโรงงานกับตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการเจาะในสนาม โดยวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้ การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Indirect Tensile Resilient Modulus), การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue) และการทดสอบการยุบตัวแบบไดนามิก (SPT Dynamic Creep)
3. การตรวจวัดพฤติกรรมด้านความแข็งแรงของโครงสร้างถนนโดยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) และสำรวจความเสียหายที่เกิดขึ้น

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ และตัวอย่างวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนาม ซึ่งจะอธิบายตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมก่อนตัวอย่าง การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ขั้นตอนการก่อสร้าง และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นดังนี้

1. ก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

ก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นมีส่วนประกอบหลักได้แก่ มวลรวม (หิน) และแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ยาง) ที่เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ผ่านการบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyratory Compactor (SGC) จนได้เป็นก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่กรมทางหลวงได้ออกแบบไว้

1.1 วัสดุมวลรวม

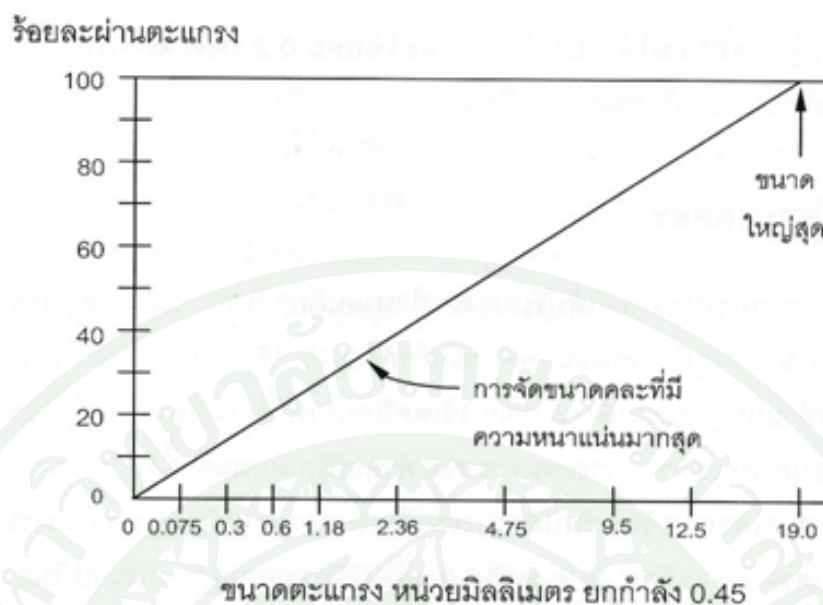
ประเภทของหินตามการกำเนิดทางธรณีวิทยา สามารถจำแนกได้ 3 ชนิด คือ

1) หินอัคนี (Igneous Rock) เกิดจากการเย็นตัวและแข็งตัวของวัสดุร้อนหลอมละลาย เรียกว่าหินหนืด (Magma) ซึ่งระเบิดพุ่งออกจากเปลือกโลก หรือขังตัวใต้เปลือกโลก ดังนั้นจึงแบ่งหินอัคนีออกเป็นหินที่เกิดจากแมกมาไหลออกมาจากเปลือกโลกแล้วแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง (Extrusive Rock) ส่วนมากมักเกิดจากภูเขาไฟและมีโครงสร้างใสเหมือนแก้ว เช่น แร่โอไลต์ (Rhyolite) แอนดีไซต์ (Andesite) บะซอลท์ (Basalt) เป็นต้น อีกประเภทหนึ่ง คือ หินที่เย็นตัวและแข็งตัวใต้เปลือกโลกเป็นหินแทรกตัวในชั้นหินใต้เปลือกโลก ลักษณะเนื้อหินเป็นผลึก เช่น หินแกรนิต (Granite) หินไดออไรท์ (Diorite) หินแกบโบร (Gabbro) เป็นต้น เนื่องจากมีการก่อตัวภายใต้ผิวโลก ดังนั้นจะพบเห็นโผล่ขึ้นมาจากผิวโลกต่อเมื่อมีการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหรือมีการกัดเซาะเปลือกโลก

2) หินตะกอน (Sedimentary Rock) เกิดจากการทับถมสะสมรวมตัวกันของตะกอน ซึ่งเคลื่อนที่พัดพาโดยทางน้ำ ธารน้ำแข็งหรือลม เป็นเวลานานๆ จนในที่สุดแข็งตัวกลายเป็นหิน ตะกอนที่ทับถมสะสมรวมกัน อาจเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ หรืออนุภาคขนาดต่างๆ ทรายกรวด เศษหิน ดิน โคลน ซากพืชซากสัตว์ ตลอดจนตะกอนจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือจากการระเหยของน้ำ ลักษณะ หินตะกอนจะมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า หินชั้น หินประเภทนี้ได้แก่ หินปูน (Limestone) หินทราย (Sandstone)

3) หินแปร (Metamorphosed Rock) เกิดจากการแปรสภาพของหินอัคนี และหิน ตะกอน เนื่องจากความกดดันสูงจากการเคลื่อนตัวอย่างรุนแรงของโลก และจากความร้อนสูงหรือ สารละลายปริมาณมาก โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นซับซ้อนและยุ่งยากมากเกินกว่าที่จะกำหนดรูปแบบดั้งเดิมของหินที่เปลี่ยนแปลง ลักษณะเด่นที่พบบ่อยแยกชนิดหินแปรคือ ประเภท ที่แร่ประกอบหินเรียงต่อกันเป็นระนาบขนาน การจัดเรียงตัวขนานกันนี้เรียกว่าโฟลเลชัน (Foliation) ซึ่งจะเป็นแนวหรือร่องรอยที่สามารถแยกเนื้อหินออกได้ง่ายกว่าแนวอื่นๆ ตัวอย่างหิน ประเภทนี้ได้แก่ ไนส์ (Gneisses) แปรสภาพมาจากหินอัคนี หินอ่อน (Marble) แปรสภาพมาจาก หินปูน หินเขียวหนุมาน(Quartzite) แปรสภาพมาจากหินทราย เป็นต้น

หินปูนจัดเป็นหินตะกอน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า แร่คัลไซต์ (Calcite) เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในท้องทะเล ทั้งจากสารอนินทรีย์ และซากสิ่งมีชีวิต เช่น ปะการัง และ กระดองของสัตว์ทะเล ซึ่งทับถมภายใต้ความกดดันและตผลึกใหม่เป็นแร่คัลไซต์ เนื้อแน่น ละเอียดหีบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือดำ ซึ่งในงานวิจัยนี้หินปูนที่นำมาทดสอบได้มาจากโครงการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 352 ตอน รัษฎบุรี - บรรจบทางหลวงหมายเลข 309



ภาพที่ 1 การจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับขนาดใหญ่ที่สุด 19 มิลลิเมตร

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

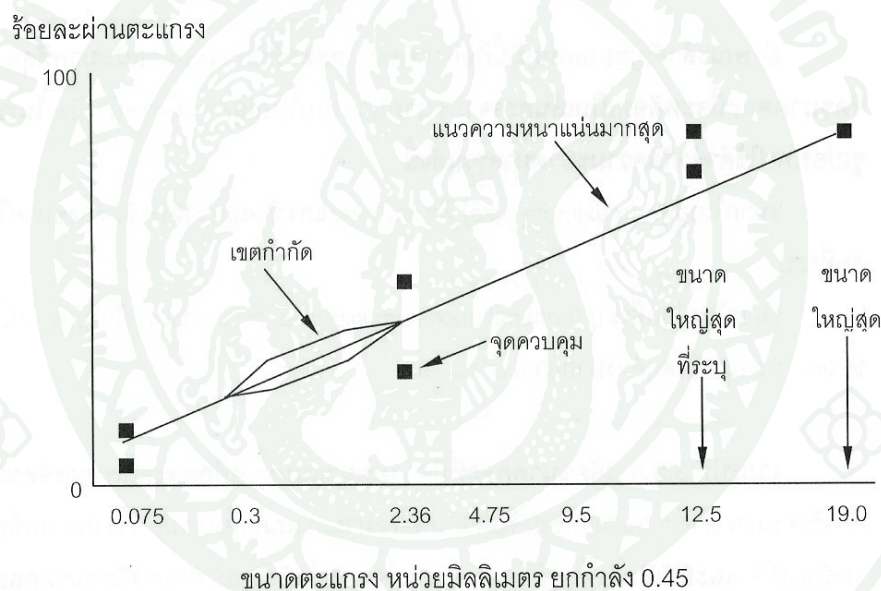
ลักษณะของแผนภูมินี้คือการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุด การจัดขนาดคละนี้จะพล็อตเป็นเส้นตรงจากขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดจนถึงจุดกำเนิด ในระบบซูเปอร์เพฟใช้จำกัดความขนาดมวลรวมดังนี้

ขนาดใหญ่สุด (Maximum size) คือขนาดตะแกรงใหญ่กว่าหนึ่งชั้นของขนาดใหญ่สุดที่ระบุ

ขนาดใหญ่สุดที่ระบุ (Nominal maximum size) คือ ขนาดตะแกรงใหญ่กว่าหนึ่งชั้นของตะแกรงแรกที่วัสดุค้างมากกว่าร้อยละ 10

จากภาพที่ 1 การจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดจะแสดงการจัดขนาดคละซึ่งอนุภาคต่าง ๆ ของมวลรวมจับตัวกันพอเหมาะตามสภาพความหนาแน่นมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ และยังแสดงแผนภูมิการจัดขนาดคละยกกำลัง 0.45 กับการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดสำหรับมวลรวมขนาดใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร

เขตจำกัดมีอาณาเขตอยู่ตามแนวการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุดระหว่าง
 ตะแกรงขนาดกลางและตะแกรงขนาด 0.3 มิลลิเมตร ภาพที่ 2 แสดงจุดควบคุมและเขตจำกัด
 สำหรับส่วนผสมซูเปอร์เฟฟ 12.5 มิลลิเมตร เขตจำกัดจะก่อให้เกิดแถบตลอดช่วงที่การจัดขนาด
 คละไม่ผ่านข้อกำหนด การจัดขนาดคละที่ผ่านเขตจำกัดมีชื่อเรียกว่า การจัดขนาดคละแบบตะโหงก
 (Humped Gradation) เพราะว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นตะโหงกในบริเวณนั้น ในกรณีส่วนมากการจัด
 ขนาดคละแบบตะโหงกชี้ให้เห็นว่าเป็นส่วนผสมที่มีทรายมากเกินไปหรือเป็นส่วนผสมที่มีทราย
 ละเอียดมากเกินไปเมื่อเทียบกับทรายทั้งหมด การจัดขนาดคละแบบนี้มักมีผลกับส่วนผสมในแง่
 ที่ว่าก่อให้เกิดปัญหาในการบดอัดยุ่งยากในช่วงระหว่างการก่อสร้างและมักลดความต้านทานต่อ
 การเสีรูปร่างอย่างถาวรในช่วงอายุการใช้งานให้บริการแก่การจราจร



ภาพที่ 2 จำกัดการการจัดขนาดคละระบบซูเปอร์เฟฟ

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

เขตจำกัดกีดกันการจัดขนาดคละจากการตามแนวความหนาแน่นสูงสุดในตะแกรงมวลรวมละเอียด การจัดขนาดคละที่ตามการจัดขนาดคละที่มีความหนาแน่นสูงสุดนี้ มักจะมีค่า VMA ไม่เพียงพอที่จะยอมให้มีแอสฟัลต์มากพอสำหรับความทนทานที่ต้องการ การจัดขนาดคละเป็นสิ่งที่ไวต่อปริมาณแอสฟัลต์ และสามารถกลายสภาพเป็นพลาสติกได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอสฟัลต์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

1.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40-50

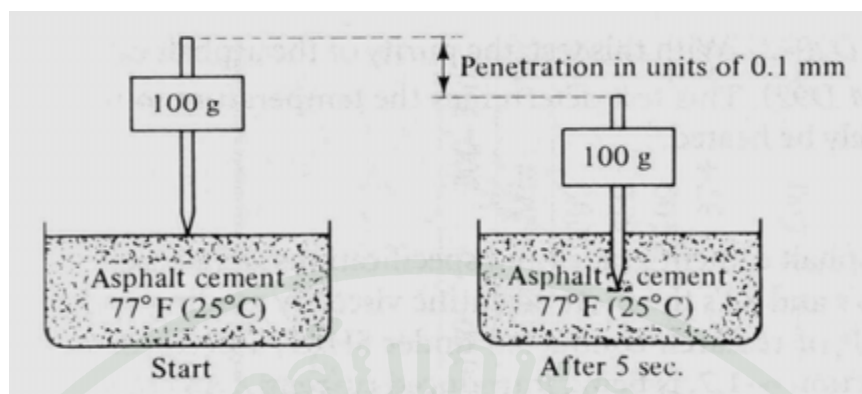
คือยางที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ มีสภาพเป็นกึ่งของแข็ง ๓ อุณหภูมิปกติ มีความหนืด สูง ประกอบด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อน และอะตอมอื่นๆ เช่นออกซิเจนร้อยละ 0-5 คาร์บอนร้อยละ 70-85 ไฮโดรเจนร้อยละ 7-12 ไนโตรเจนร้อยละ 0-6 ซัลเฟอร์ร้อยละ 1-7 เนื่องจากคุณสมบัติที่ข้นเหนียว หรือมีความหนืด จึงยึดเกาะกับอนุภาคมวลรวมได้ดี ใช้เป็นตัวประสานรวม เรียกว่าส่วนผสมว่า แอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติป้องกันน้ำ กทนต่อกรด ด่าง และเกลือ เนื่องจากเปลี่ยนแปลงสถานะได้ตามอุณหภูมิโดยจะค่อยๆอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนที่เพิ่ม ขึ้น ในทางกลับกันก็จะแข็งตัวเมื่อเย็นลง

ยางโดยทั่วไปสามารถแบ่งเกรดเป็น 4 ประเภทซึ่งได้แก่

- Penetration Grade แบ่งตามความแข็ง ทดสอบโดยวิธีเพนิเตอร์ชัน
- Viscosity Grade แบ่งตามความข้นเหลวของยาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- AR Viscosity Grade แบ่งตามความข้นเหลวของยางหลังการทดสอบ Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)
- Superpave Performance Grade แบ่งตามสมรรถนะของการใช้งาน ใช้อุณหภูมิของยางที่ยังคงคุณสมบัติตามข้อกำหนด ทดสอบโดยวิธี Dynamic Shear Reometer (DSR)

แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาแต่เฉพาะวิธีเพนิเตอร์ชัน ซึ่งทราบค่าได้จากระยะกดจมของเข็มกดเจาะมาตรฐานที่กดเจาะตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ในแนวตั้งด้วยน้ำหนักมาตรฐานที่ 100 กรัม ณ อุณหภูมิควบคุมที่ 25 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 วินาที (ดังแสดงในภาพที่ 3) ค่าเพนิเตอร์ชัน 1 หน่วยจะมีระยะเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร และควรมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 1

แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40-50 คือ ยางที่มีค่าเฉลี่ยจากการกดเพนิเตอร์ชันจำนวน 3 ครั้ง อยู่ในช่วง 40-50 หน่วย (4-5 มิลลิเมตร)



ภาพที่ 3 การทดสอบเพนเตรชัน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 40-50

รายการที่	คุณสมบัติ	หน่วย	ข้อกำหนด	วิธีการทดสอบ
1	เพนเตรชันที่อุณหภูมิ 25 °ซ	0.1 มม.	40 – 50	มอก. 1201
2	จุดวาบไฟ	°ซ	Min 232	มอก. 1182 เล่ม 2
3	จุดอ่อนตัว	°ซ	*	มอก. 1216
4	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 25 °ซ	ซม.	Min 100	มอก. 1202
5	การละลายในไตรโคโรเอธิลีน	%	Min 99	มอก. 1203
การทดสอบที่เหลือจากการอบ				
6	น้ำหนักที่หายไป	%	Max 0.8	มอก. 1223
7	ค่าเพนเตรชันที่เหลือ	%	Min 58	มอก. 1201
8	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 25 °ซ	ซม.	*	มอก. 1223 มอก. 1202

หมายเหตุ: * เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ทำรายการค่าด้วย

ที่มา: บริษัท ทิปโก้ จำกัด (ม.ป.ป.)

1.3 คุณสมบัติเชิงปริมาณของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1) ช่องว่างอากาศ

ช่องว่างอากาศ (Air Voids, V_a) ของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง ช่องว่างเล็ก ๆ ของอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคทั้งหมดของมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ในส่วนผสม แสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 4

ปริมาตรช่องว่างอากาศมีผลต่อความทนทานของผิวแอสฟัลต์คอนกรีตถ้าปริมาตรช่องว่างอากาศน้อยน้ำและอากาศมีโอกาสซึมผ่านเข้าไปทำลายการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้น้อยทำให้ผิวทางมีอายุยาวนาน อย่างไรก็ตามปริมาตรช่องว่างอากาศมีน้อยเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาบนผิวหน้าถนนได้

2) ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม

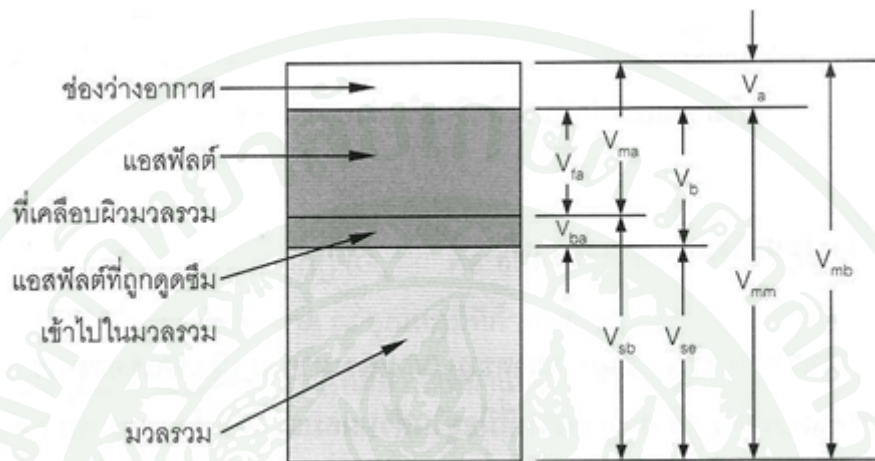
ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (VMA) หมายถึง ปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคแต่ละอนุภาคของมวลรวมที่มีอยู่ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งเป็นผลรวมของช่องว่างอากาศกับปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ แสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 4

3) ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์

ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ (VFA) หมายถึง ค่าร้อยละของปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ของมวลรวมที่บรรจุด้วยปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ จึงแสดงเป็นอัตราส่วนของ ($VMA - V_a$) กับ VMA ดังแสดงในภาพที่ 4

4) ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ

ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (P_{bc}) หมายถึง ปริมาณแอสฟัลต์ที่ได้จากผลแตกต่างระหว่างปริมาณแอสฟัลต์ทั้งหมดของส่วนผสมกับปริมาณแอสฟัลต์ส่วนที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคทั้งหมดของมวลรวมในส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 4



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

ภาพที่ 4 แผนผังส่วนประกอบของก้อนตัวอย่างที่บดอัดแล้วของ HMA

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

1.4 การบดอัดส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ (Superpave)

ปี ค.ศ. 1987 โครงการ SHRP (The Strategic Highway Research Program) ได้เริ่มพัฒนาข้อกำหนดของวัสดุผสมแอสฟัลต์ขึ้นมาใหม่ เรียกว่า ซูเปอร์เพฟ (SUPERPAVE ย่อมาจาก

Superior Performing Asphalt Pavements) ซึ่งเป็นลักษณะของการรวบรวมข้อกำหนดการเลือกวัสดุ วิธีการทดสอบวัสดุ วิธีการออกแบบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้างถนนที่มีผิวชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมุ่งเน้นคุณภาพในการใช้งานในสนามเป็นหลัก

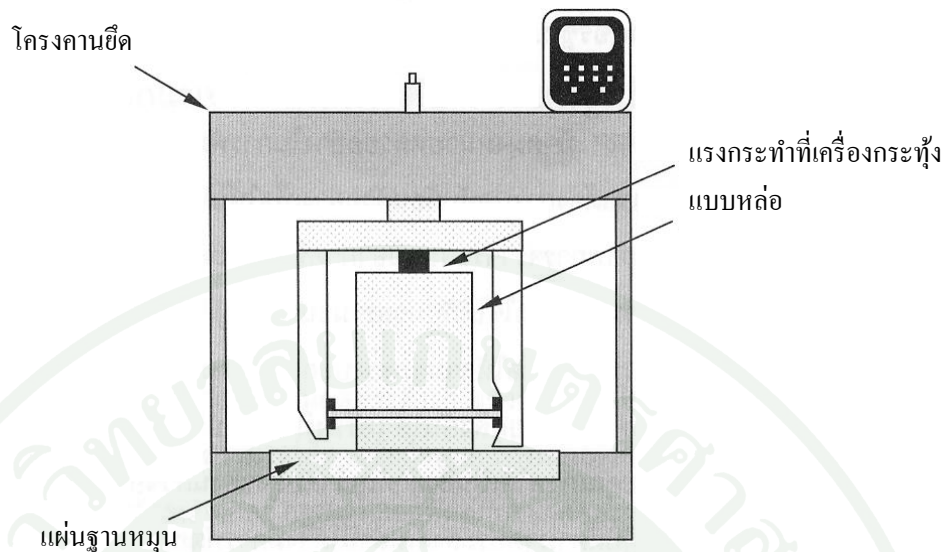
สิ่งที่สำคัญ 2 ประการ ในระบบซูเปอร์เพฟ คือ การบดอัดเชิงห้องปฏิบัติการและการทดสอบสมรรถภาพ การบดอัดเชิงห้องปฏิบัติการสามารถบรรลุความสำเร็จได้ด้วยการใช้เครื่องบดอัดไจราตอรีซูเปอร์เพฟ ที่เรียกกันย่อๆว่า SGC (Superpave Gyrotory Compactor)

วิธีการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในวิธีซูเปอร์เพฟนั้นจะใช้เครื่อง SGC ซึ่งใช้ในการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยสามารถใช้บดอัดผสมเพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างได้ 2 ขนาดคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและ 150 มิลลิเมตรจำนวนรอบของการบดอัดขึ้นอยู่กับระดับปริมาณการจราจรและอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย วัสดุผสมที่ใช้รองรับปริมาณการจราจรและอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นสูง ดังนั้นการบดอัดในห้องปฏิบัติการควรจะสามารถบดอัดก้อนตัวอย่างให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นได้ตามต้องการ ซึ่งการเพิ่มความหนาแน่นนี้ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการบดอัด

ลักษณะของเครื่อง SGC มีพื้นฐานมาจากเครื่องบดอัดแบบหมุนเทกซัส (Texas Gyrotory compactor) ซึ่งถูกดัดแปลงเพื่อใช้กับทฤษฎีบดอัดแบบหมุนฝรั่งเศส (French Gyrotory Compactor) เครื่องบดอัดแบบหมุนเทกซัสที่ถูกดัดแปลงนี้บดอัดก้อนตัวอย่างได้เสมือนจริงตรงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ได้สำเร็จจากเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างมีขนาด 6 นิ้ว จึงเหมาะสมที่จะใช้บรรจุส่วนผสมที่มีขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดได้ถึง 50 มิลลิเมตร ผู้วิจัยของ SHRP จึงได้ดัดแปลงเครื่องบดอัดแบบหมุนเทกซัสโดยทำมุมการหมุนให้ต่ำลง ลดความเร็วของการหมุนให้ช้าลงและเพิ่มความสามารถในการบันทึกความสูงของก้อนตัวอย่างให้ตรงกับเวลาที่เกิดขึ้นจริง

ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง SGC ดังแสดงในภาพที่ 5

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



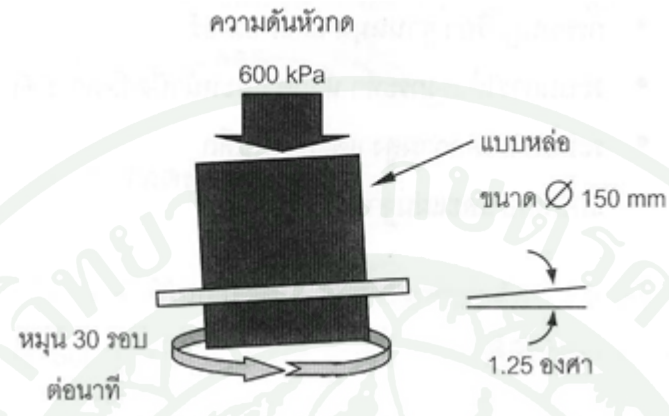
ภาพที่ 5 ส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor

ที่มา: การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ, วัชรินทร์ (2547)

กระบวนการบดอัดจะเริ่มขึ้น โดยนำวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะทำการบดอัดบรรจุลงในแบบหล่อ จากนั้นนำแบบหลอดังกล่าวเข้าติดตั้งกับส่วนฐานรับก้อนตัวอย่างซึ่งส่วนฐานจะหมุนในอัตรา 30 รอบต่อนาที และจะรองรับแบบหล่อไว้ขณะทำการบดอัด นอกจากนี้ที่ฐานจะมีขอบเพื่อล็อกกับ Bearing ที่ทำหน้าที่บังคับวัสดุผสมในแบบหล่อทำมุม 1.25 องศา กับหัวกดที่ควบคุมความดันกดบนวัสดุในแบบหล่อด้วยความดันคงที่ 0.6 เมกะปาสคาล (MPa) เพื่อทำการบดอัดวัสดุในแต่ละรอบตามภาพที่ 6 ซึ่งเป็นการลอกเลียนแบบจากสภาพจริงในสนามที่ล้อเหล็กของรถบดอัดทำกับถนน ขณะทำการบดอัดถนนในสนาม

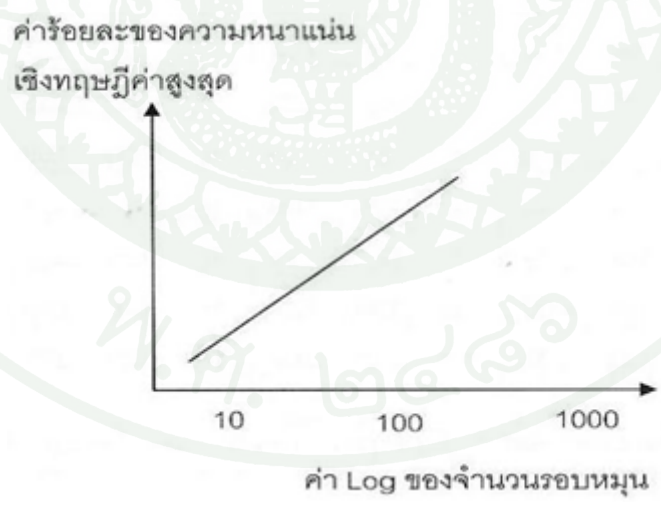
นอกจากนี้ในการบดอัดตัวอย่างวัสดุแต่ละรอบของการหมุน เครื่อง SGC ยังได้รับการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ทำให้สามารถทราบความสูงของก้อนตัวอย่างในทุกๆรอบของการบดอัดอีกด้วย การที่ได้ทราบความสูงของก้อนตัวอย่างในทุกๆรอบของการบดอัดประกอบกับข้อมูลอื่นที่ทราบอยู่แล้ว เช่น มวลของวัสดุที่บรรจุลงในแบบหล่อเพื่อบดอัด และเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อทำให้สามารถคำนวณความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทุกๆรอบของการบดอัด และสามารถได้รับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุที่ทำการบดอัดต่อจำนวนรอบของการบดอัด ดังภาพที่ 7 ซึ่งจากกราฟลักษณะนี้สามารถทำให้ทราบถึงคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้าง

วัสดุมวลรวมในวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างชัดเจนในขณะที่ทำการบดอัด อีกทั้งทำให้คาดการณ์ถึงความสามารถในการใช้งานในสนามของวัสดุนั้นอีกด้วย



ภาพที่ 6 แสดงกลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับเครื่อง Superpave Gyratory Compactor

ที่มา: การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ, วัชรินทร์ (2547)



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด

ที่มา: การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ, วัชรินทร์ (2547)

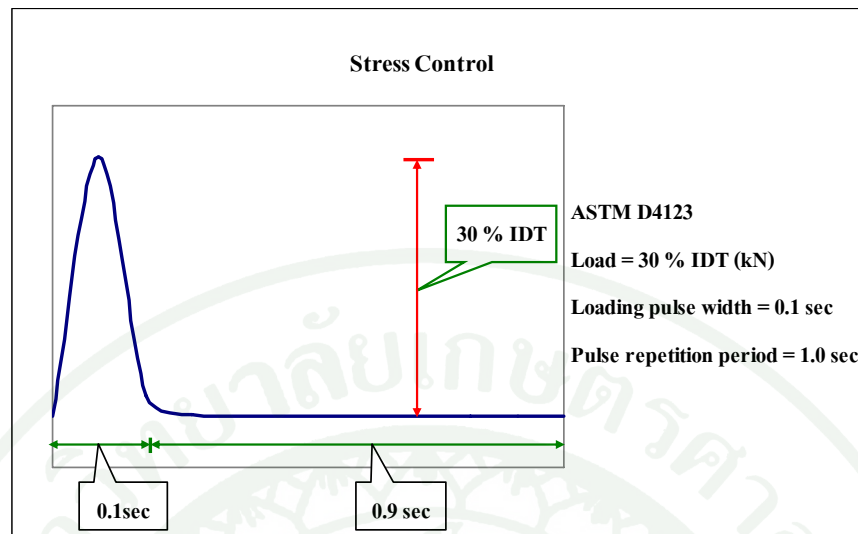
จากภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนรอบการหมุน สำหรับกระบวนการออกแบบส่วนผสมอื่น ส่วนผสมจะได้รับการออกแบบที่ระดับจำเพาะของแรงพยายามบดอัด (Compactive effort)

2. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

2.1 การทดสอบโมดูลัสคืบตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus Test)

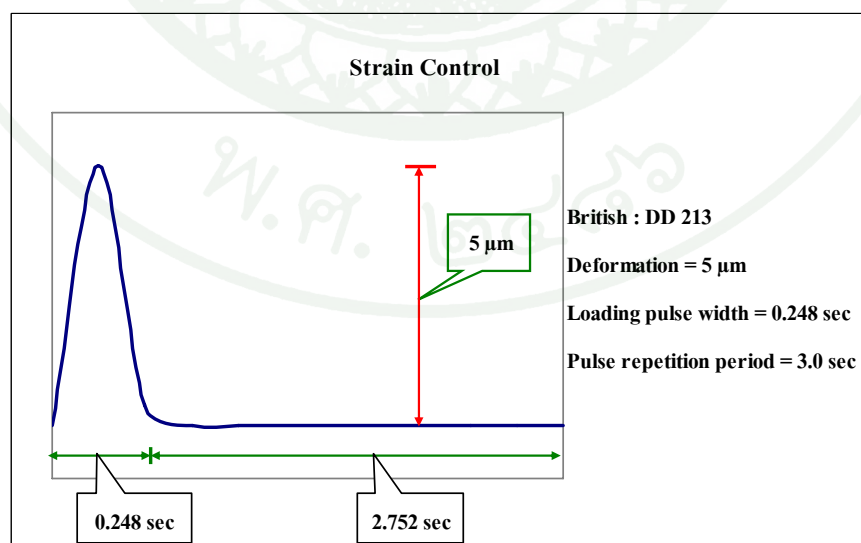
การทดสอบวิธีนี้ทดสอบโดยให้น้ำหนักกระทำซ้ำๆกับก้อนตัวอย่างที่ทดสอบ ซึ่งน้ำหนักที่กระทำนั้นเป็นลักษณะรูปคลื่น Haversine น้ำหนักที่กระทำในแนวตั้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของก้อนตัวอย่าง จะทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวในแนวราบ และขณะช่วงเวลาหยุดพักการให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างจะมีการคืนตัวกลับเรียกว่าค่าการคืนตัว (Resilient Strain) เมื่อให้น้ำหนักกระทำซ้ำจำนวน 200 รอบจนกระทั่งค่าการคืนตัวมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อทำการทดสอบเสร็จเครื่องจะทำการทดสอบต่ออีก 5 รอบสุดท้าย (รอบที่ 201-205) จึงนำค่าที่ได้มาหาค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ย โดยต้องกำหนดค่า Poisson's Ratio ให้สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ทดสอบ เนื่องจากการคืนตัวของก้อนตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

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



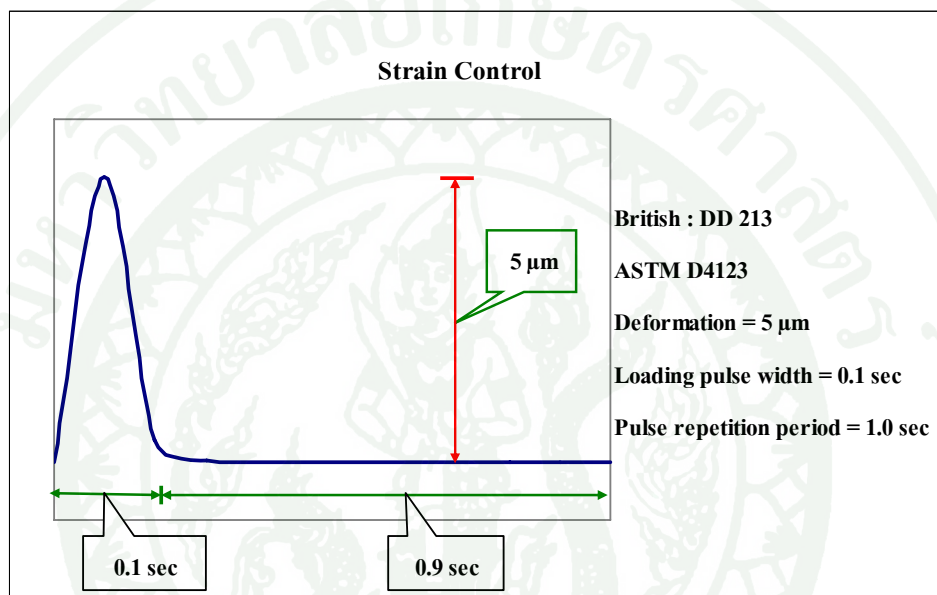
ภาพที่ 8 การทดสอบโมดูลัสกึ่งตัวแบบ Stress-Control Test ตามมาตรฐาน ASTM D 4123

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 9



ภาพที่ 9 การทดสอบโมดูลัสกึ่งตัวแบบ Strain-Control Test ตามมาตรฐาน BS DD 213:1993

จากมาตรฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จะให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวใน แนวราบเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (μm) ตามมาตรฐาน BS DD 213 แต่เปลี่ยนช่วงเวลาเวลาที่น้ำหนัก กระทำก่อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาทีตามมาตรฐาน ASTM D 4123 เนื่องจากถนนของประเทศไทยมีความหนาที่ค่อนข้างบางและเป็นช่วงเวลาที่สามารถจำลองความถี่ที่การเกิดจากปริมาณจราจรได้ใกล้เคียงได้มากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 รูปแบบการทดสอบโมดูลัสคั้นตัวแบบ Strain Control Test ในงานวิจัยนี้

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

ค่าโมดูลัสคั้นตัวสามารถคำนวณได้จากค่าความสัมพันธ์ของสมการต่อไปนี้

(Austroads Pavement Reference Group [APRG], 1999)

$$M_R = P(\nu + 0.27) / h_c \times H \quad (1)$$

$$\epsilon = H / D$$

เมื่อ M_R = ค่าโมดูลัสคั้นตัว (MPa)

P = น้ำหนักกระทำสูงสุด (N)

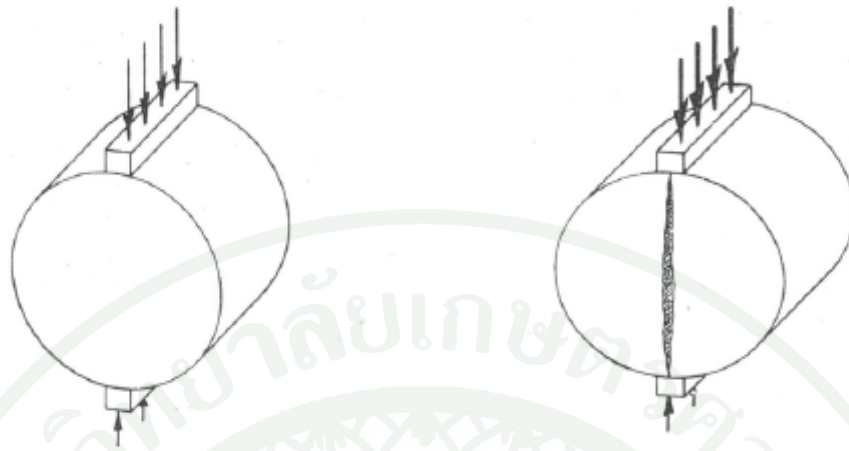
ν	=	ค่า Poisson's Ratio
h_c	=	ความสูงของก้อนตัวอย่าง โดยเฉลี่ย (mm)
H	=	ระยะการคั่นตัวทั้งหมด (mm)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของก้อนตัวอย่าง (mm)
ϵ	=	ค่าการคั่นตัว

2.2 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)

การแตกร้าวเนื่องจากความล้าเกิดขึ้นในโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อมีแรงกระทำจนเกิดหน่วยแรงมากเกินกว่าที่กำลังของแอสฟัลต์จะรับได้จึงเป็นสาเหตุหลักทำให้รอยแตกร้าวปรากฏขึ้น

การแตกร้าวเนื่องจากความล้ามีสาเหตุจากปัจจัยหลายประการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ที่เห็นได้ชัดเจนก็คือน้ำหนักรถบรรทุกกระทำซ้ำหลายครั้ง โครงสร้างถนนที่มีชั้นบางหรือชั้นรองรับข้างล่างอ่อนแอมีแนวโน้มที่จะแอ่นตัวมากเมื่อมีแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกจากขบวนขนาดใหญ่ การแอ่นตัวมากนำไปสู่การเพิ่มหน่วยแรงดึงตามแนวราบที่ด้านล่างของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งก่อให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าตามมา การระบายน้ำที่ไม่ดี รวมถึงการก่อสร้างกับการออกแบบที่ไม่ดีก็มีส่วนให้เกิดปัญหานี้ด้วยเช่นกัน

การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test) งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS DD ABF: 1995 Method for the Determination of Fatigue Characteristics of Bituminous Mixtures Using Indirect Tensile Fatigue เป็นการทดสอบโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression load) แบบกระทำซ้ำ (Repeated load) โดยที่ให้น้ำหนักกระทำในแนวขนานตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกระทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติเนื่องจากความล้า ตามที่แสดงในภาพที่ 11 (Fatigue Failure) เกณฑ์ในการพิจารณาจุดที่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า นั้นมีหลายเกณฑ์ ในงานวิจัยนี้ตั้งเกณฑ์ความเสียหายจากความล้าไว้ที่จุดซึ่งค่า Stiffness Modulus ของก้อนตัวอย่างที่ถูกแรงกระทำซ้ำลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่า Stiffness Modulus ที่เริ่มต้นการทดสอบ และเกณฑ์ในการกำหนดจุดวิบัติแบบนี้ มักใช้กับการทดสอบแบบ Strain Control



(ก) แรงอัดกระทำบนก้อนตัวอย่าง

(ข) ก้อนตัวอย่างเสียหาย

ภาพที่ 11 รูปแสดงการให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง

(ก) การให้แรงอัดกระทำกับก้อนตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก

(ข) ก้อนตัวอย่างชำรุดภายใต้แรงอัด

การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าเป็นการทดสอบที่แสดงถึงสมรรถนะในการใช้งานของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะสามารถทนรับแรงกระทำซ้ำจากน้ำหนักจราจรได้โดยไม่เกิดการแตกร้าวก่อนเวลาอันควร

นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำที่ระดับต่างกัน ก็จะสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นที่กระทำ (Stress) หรือค่าความเครียดที่เกิดขึ้น (Strain) กับจำนวนรอบที่วัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะรับแรงกระทำจนเกิดการเสียหายได้ ซึ่งสมการดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้พยากรณ์อายุการใช้งานของชั้นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้

2.3 การทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test)

การเปลี่ยนรูปร่างถาวรของชั้นผิวทาง โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักบรรทุกบนเส้นทางการจราจรการเปลี่ยนรูปร่างถาวรโดยทั่วไปจะพบอยู่ 2 ชนิดได้แก่ การยุบตัวที่เกิด ขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักบรรทุกขนานกับทิศทางของการจราจรเรียกว่า Rutting

และการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางของการจราจรในลักษณะเป็นคลื่น (Corrugation) และมักจะเกิดบริเวณที่มีการจราจรหยุด

การทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่ในการศึกษานี้จะใช้การทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ที่มีการให้แรงดันด้านข้าง (Confining Stress) เพื่อเป็นการจำลองสภาพถนนขณะมีรถสัญจรผ่าน

ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 Determination of The Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt – Dynamic Creep Test ซึ่งได้กำหนดเงื่อนไขไว้ว่าปริมาณช่องว่างของก้อนตัวอย่างเท่ากับร้อยละ 4 อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส หน่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 200 กิโลปาสกาล (kPa) ช่วงเวลาในการให้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 0.5 วินาที และช่วงเวลาที่ยืดเพื่อรอให้น้ำหนักกระทำ 1.5 วินาที ทดสอบเพื่อหาจำนวนรอบแรงกระทำที่ทำให้ค่าความเครียดสะสม (Accumulated strain, ϵ_p) เท่ากับ 10,000 ไมโครสเตรน (microstrain) ซึ่งก็คือมีค่าร้อยละ 1

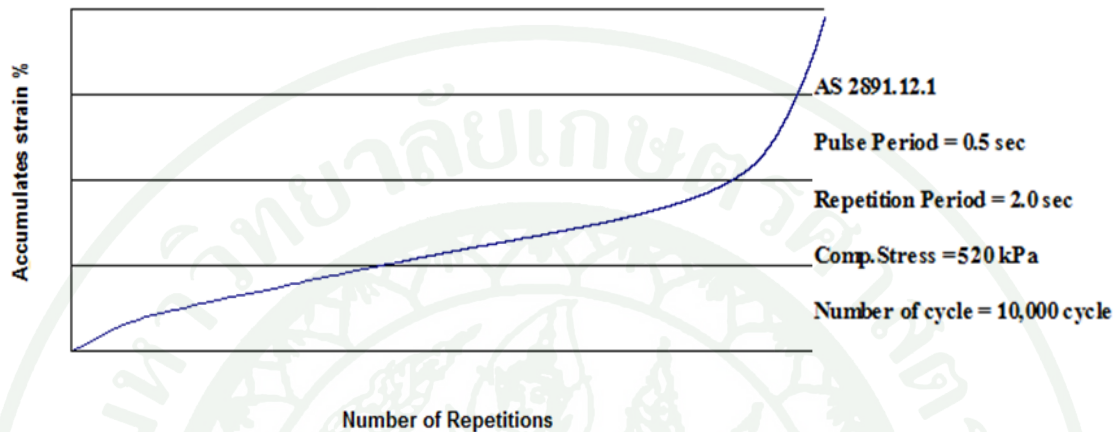
สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบโดยการเพิ่มแรงดันด้านข้าง (Confining Stress) เท่ากับ 220 kPa เพื่อจำลองสภาพถนนขณะรับน้ำหนักบรรทุกจราจรและมีแรงดันด้านข้าง และนอกจากนี้ยังเพิ่มแรงกระทำด้านบนเพื่อสร้างความเค้นเพิ่มในแนวตั้ง (Deviator stress) เท่ากับ 520 kPa โดยค่าแรง ดันและความเค้นดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างถนนลาดยางเมื่อรับน้ำหนักเพลาเดี่ยวมาตรฐาน (ESAL) ที่มีแรงดันลมยาง 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ChevronX ที่จำนวนรอบการทดสอบ (Number of cycle) 10,000 รอบ หรือ ได้ค่าความเครียดสะสมถึง 50,000 microstrain ระหว่างการทดสอบ

การทดสอบการยุบตัวถาวรแบบไดนามิกจะทำการคำนวณหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบ (Strain rate) และความเครียดสะสม ดังแสดงในภาพที่ 12 หรือค่าผลบวกสะสมของความเครียดถาวรที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำๆ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$\epsilon_p = \frac{\Delta h_p}{h_0} \quad (2)$$

เมื่อ $\Delta h_p =$ ระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรตามแนวแกน
ของตัวอย่างนับตั้งแต่เริ่มการทดสอบ (mm)

$h_0 =$ ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างที่ทดสอบ (mm)



ภาพที่ 12 รูปแบบการทดสอบ Dynamic creep test ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1

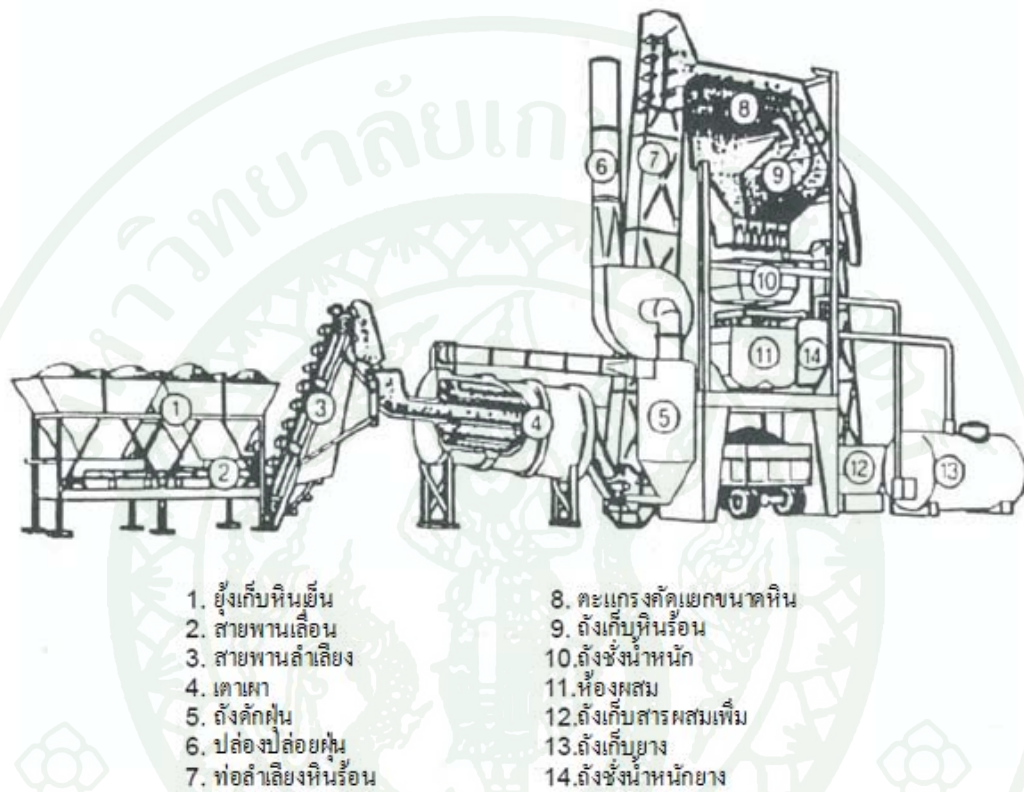
3. ขั้นตอนการก่อสร้าง

งานก่อสร้างโดยทั่วไปเริ่มจากการผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่โรงงานผสม ซึ่งต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ออกแบบ จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการขนส่งโดยรถบรรทุกไปยังหน้างาน เมื่อถึงหน้างานแล้วจึงยกท้ายเทใส่เครื่องปูเพื่อดำเนินการบดทับต่อไป ซึ่งรายละเอียดตามแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

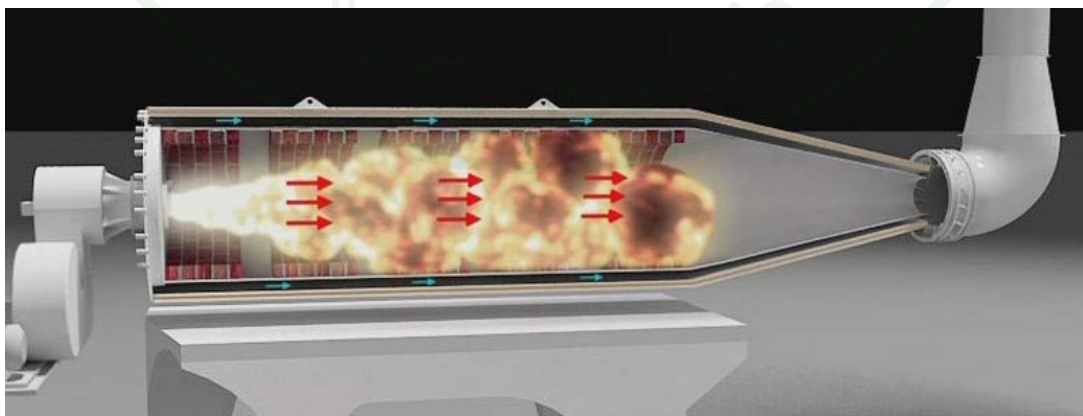
3.1 กระบวนการผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

การผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างจะเริ่มที่โรงงานผสม (Mixing Plant) ซึ่งโรงงานผสมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นโรงงานผสมแบบชุด (Batch type) ที่มีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 13 ส่วนผสมที่ใช้ทั้งหินและยางต้องเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง การผลิตจะเริ่มที่โรงงานผสมโดยนำหินไปเผาเพื่อไล่ความชื้น (ดังแสดงในภาพที่ 14) จากนั้นหินที่ถูกเผาจะถูกส่งต่อไปยังตะแกรงร่อน เพื่อคัดแยกเก็บหินให้เป็น Bin ต่างๆ (ดังแสดงในภาพที่ 15) ในขณะที่เดียวกัน ยางก็ต้องทำการอุ่นให้ได้อุณหภูมิเหมาะสม คือที่ประมาณ 160 องศาเซลเซียส (°C)

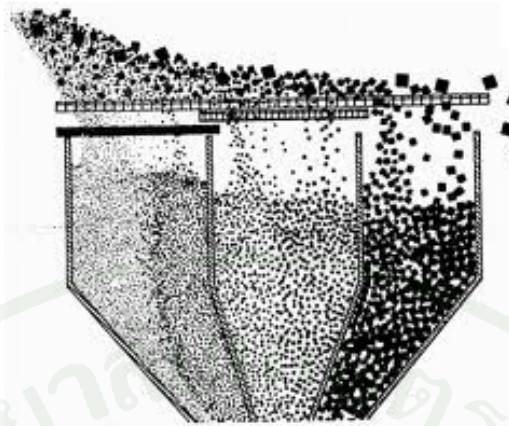
(ดังแสดงในภาพที่ 16) ผสมกับหินในห้องผสมตามสัดส่วนที่กำหนด (ดังแสดงในภาพที่ 17) โดยมีระยะเวลาในการผสมแห้งและผสมเปียกควรรใช้ที่ 15 และ 30 วินาทีตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 18) จากนั้นจึงปล่อยลงสู่รถบรรทุกที่รออยู่ด้านล่างห้องผสม



ภาพที่ 13 รายละเอียดของโรงงานผสมแบบชุด



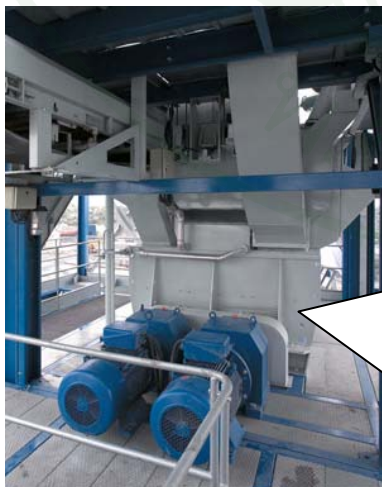
ภาพที่ 14 ภาพตัดขวางของเตาเผา (Dryer)



ภาพที่ 15 ตะแกรงคัดแยกขนาดหิน



ภาพที่ 16 ถังเก็บยาง



ภาพที่ 17 ห้องผสม



ภาพที่ 18 แผงวงจรควบคุม

3.2 กระบวนการขนส่ง

การขนส่งวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากโรงงานไปยังสถานที่ก่อสร้าง รถบรรทุกที่ใช้จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ก่อสร้าง และจะต้องใช้ผ้าใบหรือแผ่นวัสดุอื่นใดที่ใช้ได้อย่างเหมาะสมคลุมวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 19 เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำหรือความชื้นอย่างรวดเร็วรวมถึงเป็นการป้องกันน้ำฝนหรือสิ่งสกปรกอื่นๆด้วย และเมื่อมาถึงหน้างานให้ยกท้ายเทใส่เครื่องปู



ภาพที่ 19 รถบรรทุกพวงที่คลุมผ้าใบแล้ว

3.3 กระบวนการก่อสร้าง

ขั้นตอนการปูผิวทาง

ในการปูผิวทางจะต้องใช้เครื่องปู (ดังแสดงในภาพที่ 20) ให้มีความเร็วเหมาะสมกับกำลังผลิตของโรงงานผสม การปูจะต้องดำเนินการไปโดยต่อเนื่องมากที่สุด ด้วยความเร็วในการปูที่สม่ำเสมอ และในการปูวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผิวหน้าของชั้นทางที่ยังไม่ได้บดทับ จะต้องมีความเรียบแน่นสม่ำเสมอทั้งทางด้านตามขวางและตามยาว โดยไม่มีรอยฉีก (Tearing) รอยเคลื่อนตัวเป็นแอ่ง (Shoving) การแยกตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต หรือลักษณะความเสียหายอื่นๆ โดยต้องทำการปูให้ได้ความหนาที่กำหนดไว้



ภาพที่ 20 เครื่องปูขณะดำเนินการก่อสร้าง

ขั้นตอนการบดทับ

การบดทับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นจะต้องใช้เครื่องจักรถูกต้องตามข้อกำหนด จะต้องบดทับทันทีหลังจากการปูวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขณะที่ยังร้อนอยู่ ด้วยความเร็วของรถ

ในการบดทับตามตารางที่ 2 และความเร็วของรถบดสันสะเทือนที่เปิดเครื่องสันตามตารางที่ 3 เมื่อ บดทับแล้วต้องได้ชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแน่น ความเรียบสม่ำเสมอ ได้ระดับและความลาดตามแบบ ไม่มีรอยแตก รอยเคลือบตัวเป็นแอ่ง รอยคลื่น รอยล้อรถบด หรือความเสียหายของชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตอื่นๆ ลำดับของการบดทับโดยทั่วไปมี 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การบดทับขั้นต้น (Initial of Breakdown Rolling) การบดทับให้ใช้ได้ทั้งรถบดล้อเหล็ก และรถบดสันสะเทือน (ดังแสดงในภาพที่ 21 และ 22) ที่มีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 8 และ 6 ตัน ตามลำดับ ควรดำเนินการเมื่อวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 21 รถบดอัดล้อเหล็ก



ภาพที่ 22 รถบดอัดสันสะเทือน

2. การบดทับชั้นกลาง (Intermediate Rolling) ทำการบดอัดต่อจากชั้นต้นทันทีโดยใช้รถบดอัดล้อยาง (ดังแสดงในภาพที่23) ที่มีขนาดน้ำหนักไม่น้อยกว่า 10 ตัน ควรดำเนินการเมื่อวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 95 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 23 รถบดอัดล้อยาง

3. บดทับชั้นสุดท้าย (Finish Rolling) มีจุดประสงค์เพื่อลบรอยล้อรถบดที่ผิวหน้าและทำให้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอเท่านั้น ใช้รถบดล้อเหล็ก ควรดำเนินการเมื่อวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 66 องศาเซลเซียส

และจากลำดับการบดทับทั้ง 3 ขั้นตอน สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ความเร็วสูงสุดของรถบดในการบดทับ (กม./ชม.)

ชนิดของรถบด	ลำดับการบดทับ		
	การบดทับชั้นต้น	การบดทับชั้นกลาง	การบดทับชั้นสุดท้าย
รถบดล้อเหล็กชนิด 2 ล้อ	3	5	5*
รถบดล้อยาง	4	5	8
รถบดสันสะเทือน **	4-5	4-5	-

หมายเหตุ * รวมถึงรถบดสันสะเทือนบดทับโดยไม่สันสะเทือน

** ดูตารางที่ 3 ประกอบ

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความถี่ และจำนวนครั้งการกระแทก
(ควรใช้ช่วงที่เป็นตัวอักษรเข้ม)

ความถี่การสั่นสะเทือน เฮิรตซ์(รอบต่อนาที)	จำนวนครั้งการกระแทกต่อระยะ 1 เมตร				
	30(1800)	45	33.8	27	22.5
33(2000)	50	37.5	30	25	21.4
37(2200)	55	41.3	33	27.5	23.6
40(2400)	60	45	36	30	25.7
43(2600)	65	48.8	39	32.5	27.9
47(2800)	70	52.5	42	35	30
50(3000)	75	56.3	45	37.5	32.1
ความเร็วรถบด (กม/ชม)	2.4	3.2	4	4.8	5.6

ตารางที่ 4 สรุปลูณหภูมิที่ใช้ระหว่างการก่อสร้าง

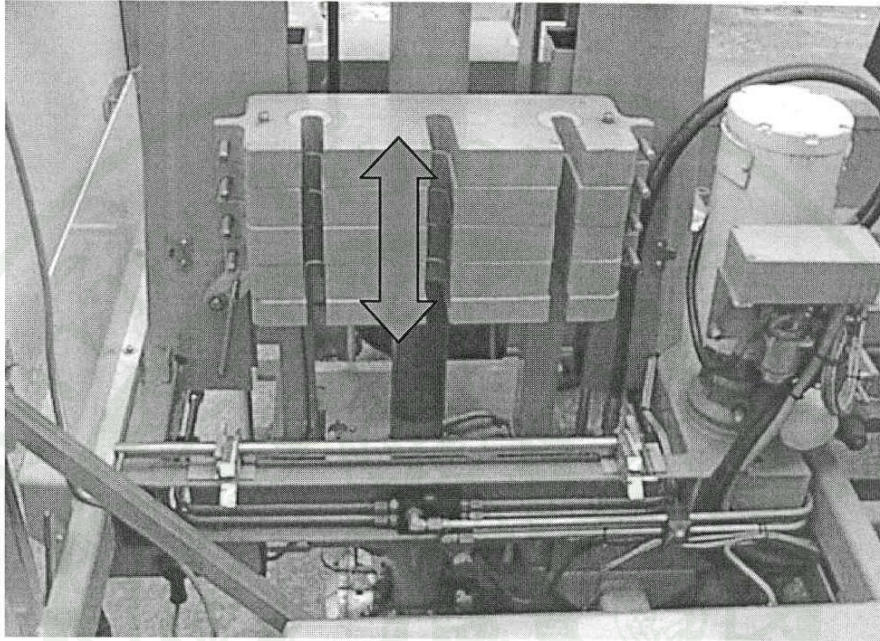
ชนิดของรถบด	ลำดับการบดทับ		
	การบดทับขั้นต้น	การบดทับขั้นกลาง	การบดทับขั้นสุดท้าย
ชนิดของรถบด	รถบดสั่นสะเทือน*	รถบดล้อยาง	รถบดล้อเหล็กชนิด 2 ล้อ
อุณหภูมิ (°c)	รถบดล้อเหล็กชนิด 2 ล้อ		
	168-121	120-96	95-67

หมายเหตุ * ใช้ในการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตส่วนใหญ่

4. การวัดการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

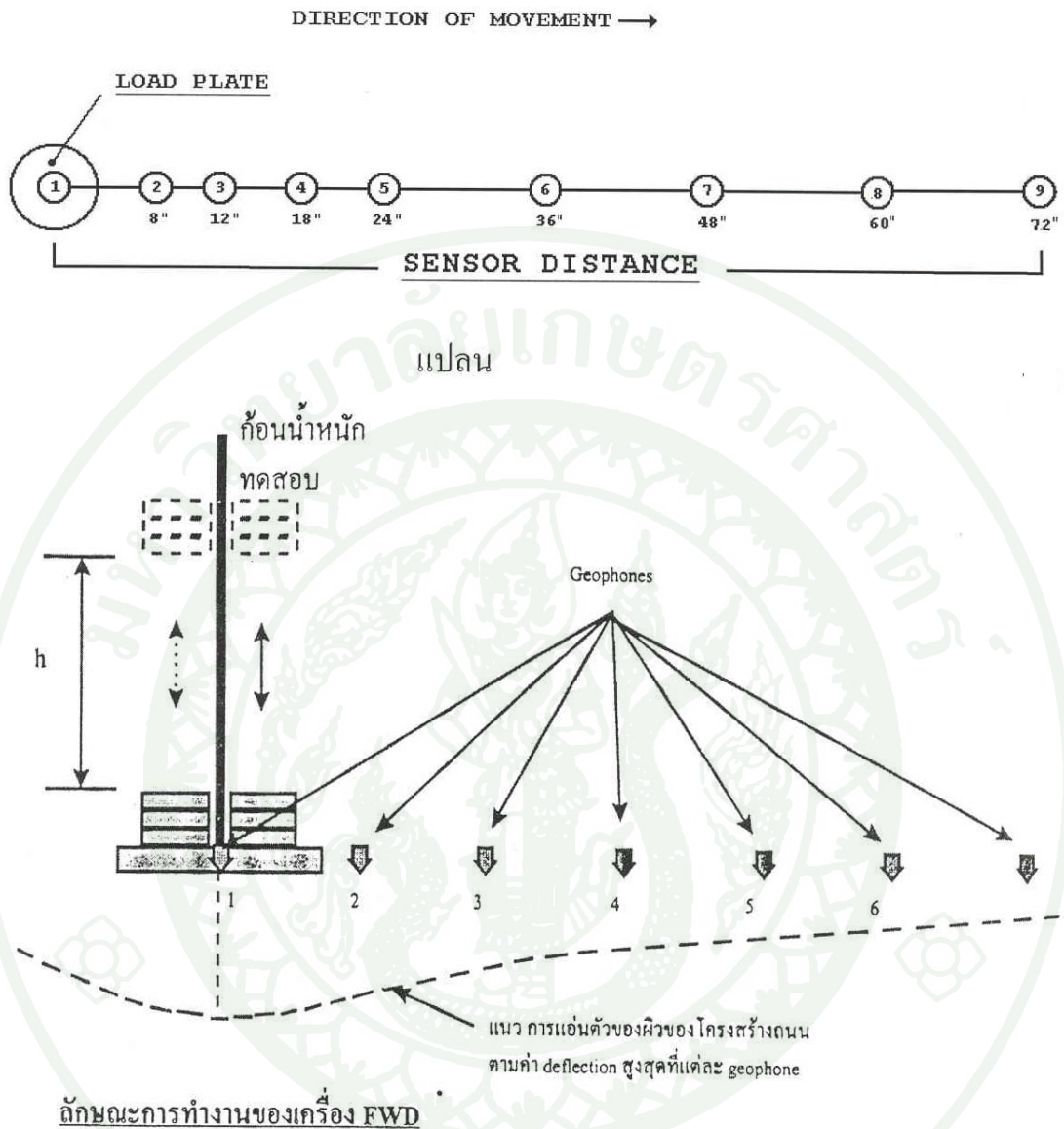
เครื่องมือ FWD มีลักษณะเป็นรถพ่วงที่สามารถใช้รถตู้หรือรถตรวจการณ์ขับเคลื่อน 4 ล้อลากไปในขณะปฏิบัติงาน มีส่วนประกอบของเครื่องที่สำคัญได้แก่ ก้อนน้ำหนัก แคนปล่อยน้ำหนัก แผ่นรองรับก้อนน้ำหนัก และแผ่นยางกันกระแทกที่ทำหน้าที่คล้ายสปริงรวมทั้งตัวรับสัญญาณ

Geophones (ดังแสดงในภาพที่ 24) ใช้กลไกควบคุมการยกและปล่อยก้อนน้ำหนักบนแผ่นรองรับน้ำหนักนั้นเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ซึ่งต่อเชื่อมควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 24 ก้อนน้ำหนักและโครงสร้างของเครื่องมือ FWD

ภายหลังจากการปล่อยน้ำหนักทดสอบให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างถนนเพื่อส่งสัญญาณคลื่นรูป Half Sine Wave ออกไป ขณะเดียวกันระบบสามารถทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่เป็นผลจากแรงที่กระทำโดยใช้ Geophones 9 ตัว ทำงานร่วมกัน ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยมี Geophone หนึ่งตัวทำหน้าที่วัดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนที่ตำแหน่งกึ่งกลาง (D_0) ได้จุดที่แรงทดสอบกระทำขณะที่ Geophones อีก 6 ตัวที่เหลือกระจายตัวเรียงกันบนแนวตั้งหน้าหรือหลัง Geophone ตัวแรกขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ เมื่อปล่อยก้อนน้ำหนักกระทำลงบนโครงสร้างทางระบบจะได้รับสัญญาณที่อ่านได้จาก Geophone แล้วสัญญาณของค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จะได้รับการบันทึกโดยระบบเก็บข้อมูล คอมพิวเตอร์ที่ต่ออยู่กับ Geophones



ภาพที่ 25 ตำแหน่ง Sensor และการทำงานของเครื่องมือ FWD

ในการทดสอบนั้นเครื่อง FWD จะปล่อยก้อนน้ำหนักมาตรฐานเพื่อให้เกิดแรงทดสอบกระทำไปบนโครงสร้างถนนโดยการปล่อยน้ำหนักทดสอบที่ทราบขนาดจากระดับความสูงที่กำหนดไว้ในโปรแกรมทดสอบ ซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนค่าระดับความสูงได้ตามความต้องการ ซึ่งค่าของแรงเมื่อปล่อยก้อนน้ำหนักกระทำกับโครงวางทางสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$P = (2ghmk)^{0.5} \quad (3)$$

โดยที่

P	=	จุดสูงสุดของแรง,ปอนด์
g	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,ฟุตต่อวินาที ²
h	=	ระยะความสูงของการปล่อยน้ำหนัก,ฟุต
m	=	มวลของก้อนน้ำหนักทดสอบ,ปอนด์
k	=	ค่าคงที่ของสปริง

การทำงานทดสอบโดยใช้เครื่อง FWD ค่าสูงสุดของแรง (P) จะได้รับการวัดและบันทึกโดยตัวควบคุมการให้น้ำหนักของเครื่อง จากนั้นข้อมูลค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่อง FWD สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่า Elastic Modulus ของวัสดุในโครงสร้างถนนแต่ละชั้น โดยใช้โปรแกรม ELMOD (Evaluation of Layer Module and Overlay Design) ซึ่งในขั้นตอนของการคำนวณย้อนกลับนี้จะกระทำโดยอาศัยหลักการป้อนข้อมูลต่างๆที่ทราบไม่ว่าจะเป็นความหนาของแต่ละชั้นในโครงสร้างถนน น้ำหนักหรือแรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบค่า Poisson's Ratio ของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน

5. ลักษณะความเสียหาย

ลักษณะความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ซึ่งในแต่ละกลุ่มสามารถแบ่งลักษณะความเสียหายย่อยที่เกิดขึ้นดังนี้

5.1 การเสีรูปร่าง หรือ การเปลี่ยนรูปร่าง (Distortion or Deformation)

- ร่องล้อ (Rut)
- การยุบตัวเป็นแอ่ง (Depression)
- การบวมตัว (Swell or Upheaval)

5.2 รอยแตก (Cracks)

- รอยแตกหนังจระเข้ (Alligator Cracks)

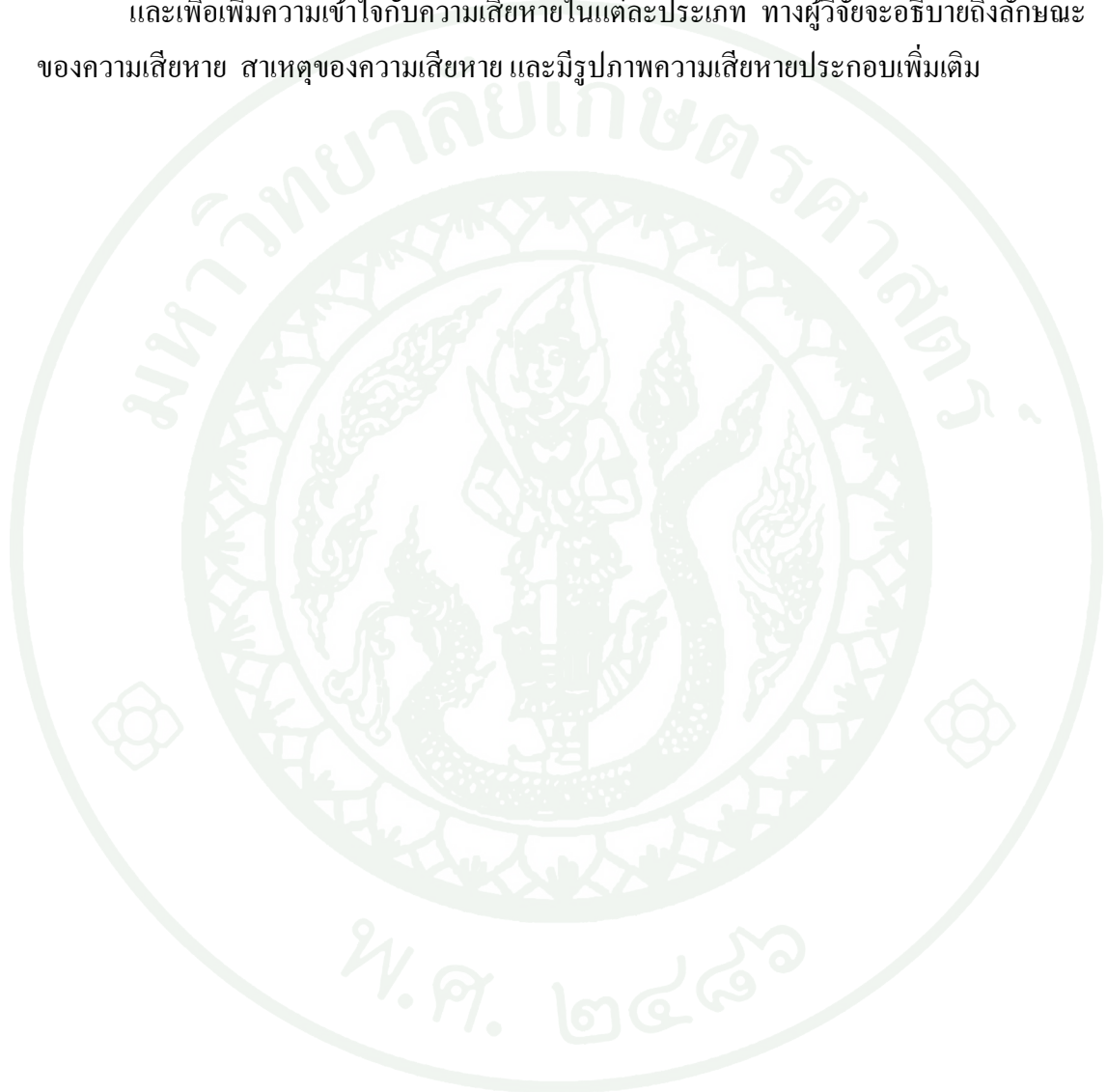
5.3 รอยตำหนิบนผิวทาง (Surface Defect)

- หลุมบ่อ (Potholes)

- ปะช่อม (Patching)

5.4 ความเสียหายอื่นๆ (Miscellaneous Distress)

และเพื่อเพิ่มความเข้าใจกับความเสียหายในแต่ละประเภท ทางผู้วิจัยจะอธิบายถึงลักษณะของความเสียหาย สาเหตุของความเสียหาย และมีรูปภาพความเสียหายประกอบเพิ่มเติม



ร่องล้อ (Rut)



ภาพที่ 26 ร่องล้อ

กลุ่มของความเสียหาย – เปลี่ยนรูปร่าง

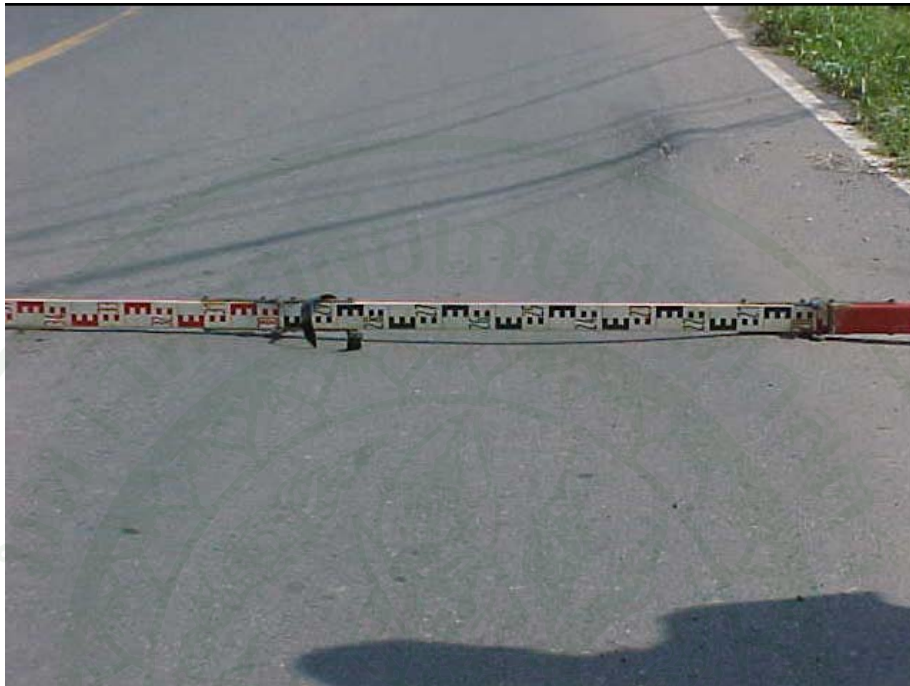
ลักษณะ

การเสียรูปร่างอย่างถาวรที่เกิดจากผิวจราจรยุบตัวเป็นร่องตามแนวล้อรถ (Wheel Paths) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแนวล้อซ้ายและขวา โดยอาจมีผิวจราจรปูขึ้นที่บริเวณขอบของร่องดังกล่าวในคราวเดียว ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของโครงสร้างถนน โดยทั่วไปจะมีสัดส่วนความยาวร่องล้อต่อความกว้างร่องล้อมากกว่า 4 เท่า

สาเหตุ

1. ความหนาของโครงสร้างทางไม่เพียงพอ
2. ความแข็งแรงของวัสดุชั้นผิวทางหรือชั้นพื้นทางไม่เพียงพอ
3. การบดอัดในชั้นผิวทางหรือชั้นพื้นทางไม่ดี

การยุบตัวเป็นแอ่ง (Depression)



ภาพที่ 27 การยุบตัวเป็นแอ่ง

กลุ่มของความเสียหาย – เปลี่ยนรูปร่าง

ลักษณะ

ผิวทางยุบเป็นแอ่ง มีระดับต่ำกว่าบริเวณอื่น

สาเหตุ

1. การก่อสร้างไม่ถูกต้อง
2. การทรุดตัวของโครงสร้างถนนชั้นล่าง
3. รถที่สัญจรมีน้ำหนักบรรทุกเกินพิกัด

บวมตัว (Swell or Upheaval)



ภาพที่ 28 การบวมตัว

กลุ่มของความเสียหาย – เปลี่ยนรูปร่าง

ลักษณะ

ผิวทางถูกดันตัวขึ้น

สาเหตุ

เนื่องจากโครงสร้างทางด้านล่างด้านล่างของถนนเกิดการบวมตัว (Swell) และมีน้ำหนักรวม

รอยแตกหนังจระเข้ (Alligator Cracks)



ภาพที่ 29 รอยแตกหนังจระเข้

กลุ่มของความเสียหาย – รอยแตก

ลักษณะ

เกิดรอยแตกเชื่อมกันเป็นรูปที่มีเหลี่ยมมากกว่าสี่เหลี่ยมซึ่งมีขนาดเล็กหรือมีรูปร่างคล้ายหนังจระเข้ เนื่องจากความล้าของวัสดุชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหรือชั้นพื้นทาง โดยปกติจะเกิดรอยแตกขึ้นบริเวณที่มีล้อรถเคลื่อนที่ผ่านและเป็นแนวยาวตามทิศทางจราจร รอยแตกเชื่อมต่อกันเป็นรูปเหลี่ยมซึ่งมีขนาด 150 มิลลิเมตร และกว้างได้มากถึง 300 มิลลิเมตร

สาเหตุ

1. ความหนาของโครงสร้างทางไม่เพียงพอ
2. วัสดุชั้นพื้นทางที่มีกำลังต่ำเนื่องจากความชื้นหรือเหตุอื่นๆ
3. การเสื่อมสภาพและแข็งกระด้างของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

หลุมบ่อ (Potholes)



ภาพที่ 30 หลุมบ่อ

กลุ่มของความเสียหาย – รอยตำหนิบนผิวทาง

ลักษณะ

มีรูปร่างเป็นช่องว่างหรือโพรงบนชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และจะเพิ่มความรุนแรงโดยขยายช่องว่างไปจนถึงชั้นที่ต่ำกว่าชั้น Wearing Course

สาเหตุ

1. การหลุดล่อน สูญเสีย วัสดุผิวทางเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น รอยแตกร้าวที่รุนแรงและการหลุดล่อน
2. ความเสียหายจากความชื้นลงไปสู่ที่ชั้นพื้นทางผ่านทางรอยแตกที่ผิวทาง
3. ความเสียหายของชั้นพื้นทางอันเนื่องจากน้ำหนักจราจร

รอยปะซ่อม (Patching)



ภาพที่ 31 รอยปะซ่อม

กลุ่มของความเสียหาย – รอยตำหนิบนผิวทาง

ลักษณะ

การบำรุงรักษาผิวทางที่แตกหรือเป็นหลุมบ่อด้วยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเช่น Pre-mix ลักษณะความเสียหายของผิวทางที่ซ่อมโดยวิธีนี้ได้แก่ผิวทางที่แตกต่อเนื่องคล้ายหนังจระเข้ (Alligator Cracks) หรือแตกเนื่องจากการเลื่อนตัวของผิวลาดยาง (Slippage Cracks) หรือผิวทางที่เป็นหลุมบ่อ ซึ่งชำรุดเสียหายเฉพาะผิวทางเท่านั้น ไม่ลึกลงไปถึงชั้นโครงสร้าง

สาเหตุ

1. การทรุดตัวมากเกินไปของผิวทาง
2. ยางเสื่อมสภาพ
3. ปริมาณยางน้อยเกินไป
4. การบดทับไม่ดี

การศึกษาในอดีตที่เกี่ยวข้อง

Khan *et al.* (1998) ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดในห้องปฏิบัติการจาก Loose Asphalt Mixture กับตัวอย่างที่เจาะในสนามจากถนนทั้งหมด 4 สาย มีผลการออกแบบดังตารางที่ 5 โดยที่ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการมีวิธีเตรียมในหลายวิธี ได้แก่ การเตรียมโดยใช้เครื่องบดอัดมาร์แชลล์แบบอัตโนมัติ การเตรียมโดยวิธีบดอัดมาร์แชลล์ การบดอัดโดยวิธี California Kneading การบดอัดโดยใช้เครื่อง SGC ที่ใช้มุมในการบดอัดเท่ากับ 1.25 และ 6 องศา แล้วทำการทดสอบโดยวิธี Marshall Resilient Modulus และ Static Creep ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดด้วยใช้เครื่อง SGC ที่ใช้มุมในการบดอัดเท่ากับ 1.25 องศา จะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่เจาะในสนามมากที่สุด

ตารางที่ 5 สรุปผลการออกแบบตาม Job Mix Formula ของถนนสายต่างๆ

Road No.	Type of mix	Optimum asphalt content (%)	Job mix formula		Specification
			AASHO sieve	Passing percent	
1	Wearing course	5.23	3/4 inches	100	100
			1/2 inches	86	80-95
			No.4	56	48-62
			No.10	40	32-45
			No.40	23	16-26
			No.80	12	8-18
			No.200	5	4-8
			2	Base course	5.12
1/2 inches	89	80-100			
3/8 inches	80	70-90			
No.4	57	50-70			
No.8	41	35-50			
No.30	26	18-29			
No.50	18	13-23			
No.100	11	8-16			
3	Binder course	4.96	1 inches	100	100
			3/4 inches	99	90-99
			3/8 inches	66	60-80
			No.4	42	35-65
			No.8	35	20-50
			No.50	18	8-20
			No.200	4	3-8
			4	Wearing course	4.7
1/2 inches	86.4	80-95			
No.4	56.2	48-62			
No.10	34.4	32-45			
No.40	21.1	16-26			
No.80	11.8	8-18			
No.200	5.2	4-8			

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและสนาม

สาย ทาง	รูปแบบการบดอัด	มาร์แชลล์			M _R (MPa)	Static Creep (Permanent Strain)
		เสถียรภาพ (kN)	ช่องว่าง อากาศ(%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)		
1	Marshall auto	20.1	4.31	2.353	4,557	8.51E-03
	Marshall manual	34.9	4.32	2.371	9,487	8.17E-03
	Kneading	17.3	5.85	2.315	8,805	6.72E-03
	Gyratory 1.25°	31	5.1	2.321	14,424	4.91E-03
	Gyratory 6°	33	3.25	2.379	12,935	3.01E-03
	Field cores	30.1	5.04	2.335	13,238	7.02E-02
2	Marshall auto	22.1	3.83	2.36	5,599	1.01E-02
	Marshall manual	35.3	3.05	2.379	8,136	1.14E-02
	Kneading	18.4	5.5	2.319	9,411	6.97E-03
	Gyratory 1.25°	33.1	5	2.332	11,583	4.35E-03
	Gyratory 6°	36.2	2.97	2.381	10,101	7.17E-03
	Field cores	29.6	5.01	2.331	11,790	5.43E-03
3	Marshall auto	19.5	4.51	2.331	4,082	1.31E-02
	Marshall manual	30.1	3.53	2.355	7,253	9.93E-03
	Kneading	14.5	5.65	2.303	8,122	7.87E-03
	Gyratory 1.25°	29.1	4.9	2.32	11,749	4.29E-03
	Gyratory 6°	30.8	3.08	2.366	9,232	8.57E-03
	Field cores	24.3	4.75	2.325	11,583	5.97E-03
4	Marshall auto	24	3.94	2.379	7,081	6.13E-03
	Marshall manual	37.2	3.34	2.394	8,977	5.72E-03
	Kneading	19.5	6.28	2.321	11,680	6.90E-03
	Gyratory 1.25°	34.3	5.12	2.35	13,114	4.00E-03
	Gyratory 6°	37.1	2.81	2.407	10,301	3.94E-03
	Field cores	28.2	5.3	2.345	12,797	4.76E-03

Swami *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาภายใต้หัวข้อ “A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India ” โดยทำการเปรียบเทียบ คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์ กับวิธี Superpave จากการศึกษพบว่า

การออกแบบโดยวิธี Superpave มีคุณสมบัติที่ได้ต่างจากวิธีมาร์แชลล์ในหลายด้านไม่ว่าจะเป็น ร้อยละของปริมาณยางที่ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้น้อยกว่าวิธีมาร์แชลล์ ค่าเสถียรภาพ (Stability) ที่ได้ค่าสูงกว่า ค่ากำลังรับแรงดึงโดยอ้อมที่ได้สูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลการออกแบบระหว่าง วิธีมาร์แชลล์ และวิธีซูเปอร์เพฟ

Method	Marshall			Superpave		
Percent B.C.	5.31			4.4		
Specimen	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Stability (kg)	1100	1090	1110	1505	1520	1505
Average Stability (kg)	1100			1510		
Flow (mm)	3.2	3.1	3.0	2.9	3.0	2.8
Average flow (mm)	3.1			2.9		

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบระหว่างวิธี Indirect Tensile Strength มาร์แชลล์และวิธีซูเปอร์เพฟ

Method	Marshall			Superpave		
Percent B.C.	5.31			4.4		
Specimen	A1	A2	A3	B1	B2	B3
ITS (kg/cm ²)	9.2	9.0	9.0	13.45	13.50	13.52
Average ITS	9.067			13.49		

และนอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของมุมที่ใช้ในการบดอัดของการออกแบบโดยวิธี Superpave โดยมีมุมที่ใช้เท่ากับ 1, 1.25, 1.5 และ 2 องศา ให้ได้ค่าความหนาแน่นตามทฤษฎี (Theoretical Density) ที่ร้อยละ 96 แล้วนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงโดยอ้อม พบว่าเมื่อใช้มุมในการบดอัดที่สูงขึ้น จำนวนรอบที่ใช้ในการบดอัดจะลดลงและค่ากำลังในการรับแรงดึงโดยอ้อมจะลดลง ดังผลการทดสอบในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบจากการบดอัดวิธีซูเปอร์เพฟที่มุมต่างๆ

Angle of gyration	1°	1.25°	1.5°	2°
Number of Gyration	130	80	70	65
ITS (kg/cm ²)	13.48	13.32	12.69	12.48

Kamal and Hafeez (2006) ได้ทำการศึกษาภายใต้หัวข้อ “ Field and Laboratory Evaluation of volumetric properties of Asphaltic concrete ” โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงปริมาตรของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMB ซึ่งเตรียมโดยวิธีมาร์แชลล์ กับวิธี Superpave และตัวอย่างที่เจาะจากในสนามทั้งในชั้นผิวทาง (Asphaltic Wearing Course) และชั้นรองผิวทาง (Asphaltic Base Course) ตามช่วงระยะเวลาต่างๆซึ่งได้แก่ ช่วงก่อนเปิดใช้งาน ช่วงหลังเปิดใช้งานแล้ว 6 เดือน และ 17 เดือน โดยมีคุณสมบัติที่ศึกษาได้แก่ ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (V_a) ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างมวลรวม (VMA) และ ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกเติมด้วยยาง (VFA) ได้ผลดังตารางที่ 10 และ 11 จากผลการศึกษาพบว่า

- การออกแบบโดยวิธี Superpave ช่วยเพิ่มสมรรถนะของผิวทางให้สูงขึ้น เนื่องจากตัวอย่างที่ได้มีคุณสมบัติเชิงปริมาตรที่ดีกว่าวิธีมาร์แชลล์ (V_a ต่ำกว่า VMA ต่ำกว่า และ VFA ที่สูงกว่า)
- การศึกษานี้สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมคุณสมบัติเชิงปริมาตรของผิวทางที่ใช้วัสดุการออกแบบ และปริมาณจราจร ที่เหมือนกับการศึกษานี้ได้

ตารางที่ 10 คุณสมบัติเชิงปริมาตรจากตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตของชั้นผิวทาง

ร้อยละปริมาณยาง 3.83%	ชั้นผิวทาง				
	คุณสมบัติ	Marshall	Superpave	Core _{Before}	Core _{6 month}
V_a	5.8	5.34	8.18	6.96	5.82
VMA	13.9	13.75	16.34	15.34	14.25
VFA	58	61.22	50.75	54.8	59.23

ตารางที่ 11 คุณสมบัติเชิงปริมาณจากตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตของชั้นรองผิวทาง

คุณสมบัติ	ร้อยละปริมาณยาง 3.4%				
	ชั้นรองผิวทาง				
	Marshall	Superpave	Core _{Before}	Core _{6 month}	Core _{17 month}
V _a	5.7	4.75	7.66	7.33	5.2
VMA	13.1	12.71	15.04	14.53	12.57
VFA	56	62	47.59	49.55	58.74

กฤษณะ (2551) ได้ศึกษาการทดสอบการค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test) โดยใช้หินแกรนิตผสมกับยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 แอสฟัลต์ชนิด 60-70 และแอสฟัลต์ชนิด PMA พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5-35 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60-70 จะมีค่าโมดูลัสคืนต่ำสุด สำหรับทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ และการทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic creep test) โดยใช้หินแกรนิต พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA มีค่าการเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรช้ากว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 และ 60-70 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส การเริ่มเกิดการยุบตัวถาวรมีเพียงแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60-70 ที่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA กับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 ยังไม่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรที่จำนวนรอบของการทดสอบที่ 10,000 รอบ และเมื่อพิจารณาค่าการยุบตัวถาวรต่อรอบ (Permanent microstrain per cycle) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 ดีกว่าเพราะมีค่าต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA

นภัสรพี (2551) ได้ศึกษาการทดสอบการค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test) โดยใช้หินปูนผสมกับยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50, แอสฟัลต์ชนิด 60-70 และแอสฟัลต์ชนิด PMA พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 5, 20 และ 35 องศาเซลเซียส เท่ากับ 19.05 %, 30.96 % และ

4.98 % ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่าค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 และ เท่ากับ 5.92%, 30.44% ตามลำดับและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60-70 จะมีค่าโมดูลัสคืนต่ำสุด สำหรับทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ และ การทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic creep test) โดยใช้หินปูนพบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA มีค่าการเริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรซ้ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 และ 60-70 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส การเริ่มเกิดการยุบตัวถาวรกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด 60-70 และบางแอสฟัลต์ชนิด 40-50 ที่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวร สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด PMA ยังไม่เริ่มเกิดความเสียหายจากการยุบตัวถาวรที่จำนวนรอบของการทดสอบที่ 10,000 รอบ

ธันวิน และอภิสิทธิ์ (2555) ได้ศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนค่าความหนืดของยางแอสฟัลต์ ทั้งในส่วนของ การผลิต การก่อสร้าง โดยการศึกษาวิจัยนี้ได้นำยางแอสฟัลต์ 3 ชนิด คือ AC 40-50 AC 60-70 และ PMA มาทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ โดยเน้นคุณสมบัติด้านความหนืดและความแข็งแรงของยางแอสฟัลต์ รวมถึงอาศัยหลักการและวิธีการทดสอบตามระบบ Superpave นอกจากนี้ในโครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำนักวิจัยและพัฒนาทางยังได้นำยางแอสฟัลต์ทั้ง 3 ชนิด ไปผลิตก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตและนำมาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและสมรรถนะในการใช้งานต่างๆ ได้แก่ความสามารถในการต้านทานความล้าและการต้านทานการเกิดร่องล้อ และจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายาง AC 60-70 มีคุณสมบัติขั้นต่ำเทียบเท่ากับยาง PG 64-22 ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้งานในถนนทั่วไปในประเทศไทยซึ่งมีปริมาณรถบรรทุกหนักไม่มากและไม่ใช้บริเวณทางแยกและทางลาดชัน ในขณะที่ผลการทดสอบยาง AC 40-50 แสดงให้เห็นว่ายาง AC 40-50 มีความแข็งแรงและต้านทานร่องล้อได้ดีกว่ายาง AC 60-70 โดยพบว่าสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง 66 ถึง 70 องศาเซลเซียส และมีคุณสมบัติขั้นต่ำเทียบเท่ากับยาง PG 70-22 และ PG 64-16

เสกชัย และคณะ (2549) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความต้านทานความล้าของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนาม โดยทำการทดสอบการต้านทานความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม กระทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยแรงที่กระทำอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.6 เมกะปาสคาล โดยการให้น้ำหนักกระทำประกอบไปด้วยช่วง Load-Unload เท่ากับ 0.1 วินาทีในลักษณะ Haversine และมีช่วง Rest Period เท่ากับ 0.9 วินาที จนกระทั่งค่าโมดูลัสลดลง

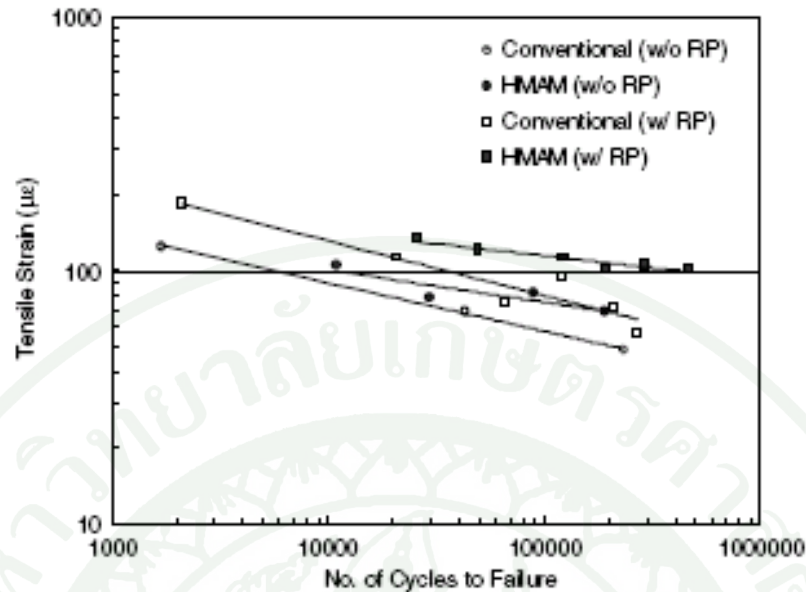
เหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่าโมดูลัสเริ่มต้น จึงถือว่าตัวอย่างวิบัติเนื่องจากความล้า ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permissible Strain (ϵ_{mi}) และจำนวนครั้งที่กระทำจนก่อนตัวอย่างวิบัติเนื่องจากการล้า (N_f) ที่ได้จากการทดสอบมีความสัมพันธ์แบบผกผัน คือ เมื่อ ϵ_{mi} เพิ่มขึ้น ค่า N_f จะลดลง และพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{mi} และ N_f ของก้อนตัวอย่างแต่ละภูมิภาคมีลักษณะใกล้เคียงกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้สมการความสัมพันธ์ ϵ_{mi} และ N_f (Fatigue Model) สมการเดียวสำหรับประเทศไทย คือ $\log \epsilon_{mi} = 3.405 - 0.159 \log N_f$ หรือ

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

Lee *et al.* (2006) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Life Asphalt Pavements” เพื่อดูสมรรถนะของ High Modulus Asphalt Binder (HMAB) และ Mixes (HMAM) โดยทดสอบความล้าแบบแรงดึงทางอ้อมในรูปของ Haversine ให้น้ำหนัก 0.1 วินาที และมีช่วงพักที่ 0.9 วินาที ทดสอบจนค่าโมดูลัสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าโมดูลัสเริ่มต้น ได้ค่าสมการ $N_f = a(e_0)^b$ เมื่อ N_f คือ ค่า fatigue life ของส่วนผสมแอสฟัลต์, e_0 คือ ค่าความเครียดดึงเริ่มต้น, a และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความล้า ได้ผลดังตารางที่ 12 ค่า Fatigue Life ของส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีช่วง Rest Period และความต้านทานต่อความล้าของ HMAM ดีกว่า Conventional Mix ทั่วๆ ที่ค่าความเครียดดึงต่ำกว่า 150 Microstrain ดังภาพที่ 32 ซึ่งหมายความว่า HMAM ดีกว่า Conventional Mix สำหรับผิวทางแอสฟัลต์ที่หนา ในทางกลับกัน ความต้านทานต่อความล้าของ HMAM แย่กว่า Conventional Mix ที่ผิวทางแอสฟัลต์บาง

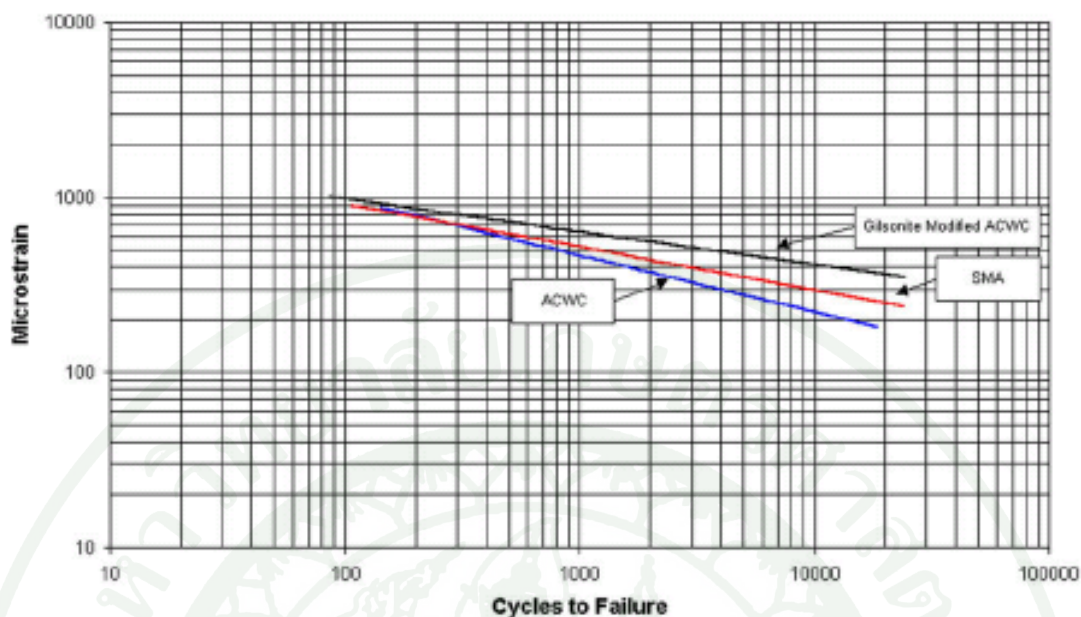
ตารางที่ 12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความล้าจากการทดสอบ

Mixture		Average air void (%)	Fatigue coefficient		
			a	b	R ²
Without rest period	Conventional	4.87	6×10^{-18}	-5.245	0.9993
	HMAM	5.45	1×10^{-21}	-6.288	0.7927
With rest period	Conventional	4.72	8×10^{-13}	-4.162	0.9005
	HMAM	5.91	3×10^{-38}	-10.823	0.9672



ภาพที่ 32 ผลการทดสอบความล้าของส่วนผสม Conventional Mixture and HMAM

Suo and Wong (2009) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in Asphalt Concrete Material in Wearing Course” เพื่อจะแสดงลักษณะของพฤติกรรมการเสียหายจากความล้าในเทอมของ Micro-Damage Mechanics โดยใช้วัสดุชั้นผิวทาง 3 ชนิดคือ Gilsonite Modified Asphalt Concrete Wearing Course (GM-ACWC), Stone Mastic Asphalt (SMA) และ Conventional Asphalt Wearing Course (ACWC) ใช้ยางแอสฟัลต์ AC60/70 บดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้เครื่อง SGC แบบควบคุมความหนาแน่น แล้วทดสอบ Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) แบบควบคุมทั้งแรงและความเครียด ผลจากการทดสอบค่า Stiffness พบว่า GM-ACWC มีค่า Fatigue Life สูง ตามด้วย SMA และ ACWC และค่า Fatigue Life จะมีลักษณะใกล้เคียงกันที่ค่าความเครียด 1000 $\mu\epsilon$ ดังภาพที่ 33 และได้ค่าสมการดังตารางที่ 13



ภาพที่ 33 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)

ตารางที่ 13 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในสมการ

	Average stiffness modulus (Mpa)	Continuum damage parameters			
		lg c	p	K_T	a
ACWC	1590	13.8385	4.1494	3.0	1.572E-15
GM-ACWC	2330	21.2313	6.4053	3.2	4.365E-23
SMA	1380	12.5801	3.7809	3.1	2.934E-14

Saad and Shatnawi (2007) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Prediction of Bituminous Mixture Fatigue Life Based on Accumulated Strain” โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำนายจำนวนรอบของการแตกหักของก้อนตัวอย่าง HMA ภายใต้ความลาดเอียงของความเครียดสะสมสลับจากรูปแบบลดลงเปลี่ยนเป็นเพิ่มขึ้น และประเมินผลของขนาดคละมวลรวมและอุณหภูมิต่อพฤติกรรมความล้าของ HMA โดยก้อนตัวอย่าง HMA ใช้วิธีออกแบบมาร์แชลล์ หาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม โดยใช้มวลรวมเป็นหินปูน ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิด AC 60-70 และขนาดคละของมวลรวมใหญ่สุดระบุ 3 ขนาดคือ 12.5 (Gradation A), 19.0 (Gradation B) และ 25.0 มม. (Gradation C) ให้น้ำหนักขนาด 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 กิโลนิวตัน เพื่อประเมินผลต่อพฤติกรรมความล้า โดยใช้เครื่องทดสอบ

UTM ที่อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 10, 45 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ ประเมินที่น้ำหนัก 3.5 กิโลนิวตัน ด้วยการให้น้ำหนัก 0.1 วินาทีช่วงพัก 0.4 วินาที กระทำซ้ำจนก่อน ตัวอย่างพังได้ผลดังตารางที่ 14 และสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อไม่คำนึงถึงขนาดคละของมวลรวมและขนาดน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ จำนวนรอบที่ เกิดขึ้นจนกระทั่งก่อนตัวอย่างพังสามารถทำนายได้ว่า ความลาดเอียงของความเครียดสะสมยังคง ลดลงต่อไปจนกระทั่งจำนวนรอบน้ำหนักมาถึงประมาณร้อยละ 44 ของจำนวนรอบที่จะเกิดการพัง
- ที่อุณหภูมิและขนาดน้ำหนักเดียวกัน ก่อนตัวอย่าง HMA ที่เตรียมโดยขนาดมวลรวม A มีค่า Fatigue Life สูงสุด ตามด้วยขนาดคละมวลรวม B ในขณะที่ขนาดคละมวลรวม C มีค่า Fatigue Life ต่ำสุด
- ที่อุณหภูมิและน้ำหนักเดียวกัน ก่อนตัวอย่าง HMA ที่ใช้ขนาดคละมวลรวม A มีค่า Stiffness Modulus เริ่มต้นสูงที่สุด ตามด้วยขนาดคละมวลรวม B ขณะที่ขนาดคละมวลรวม C มีค่า Stiffness Modulus ต่ำที่สุด

ตารางที่ 14 สรุปผลการทดสอบ

Maximum aggregate size (mm)	Load (kN)	Average initial stiffness (MPa)	Average final stiffness (MPa)	Fatigue life (cycles)	Average number of cycles at change slope of accumulated strain	Number of cycles to change slope/number of fatigue life cycles
12.5	3.5	213	72	3832	1674	0.44
12.5	3.0	209	54	9100	3860	0.42
12.5	2.5	200	80	39200	17242	0.44
12.5	2.0	182	49	188964	84742	0.45
12.5	1.5	176	69	268480	123017	0.46
19.0	3.5	191	59	3813	1619	0.42
19.0	3.0	188	75	7863	3484	0.44
19.0	2.5	174	77	25657	11660	0.45
19.0	2.0	167	68	116457	49964	0.43
19.0	1.5	155	72	171206	74588	0.44
25.0	3.5	156	59	1640	724	0.44
25.0	3.0	147	83	5514	2424	0.44
25.0	2.5	144	66	8130	3599	0.44
25.0	2.0	132	61	64867	28577	0.44
25.0	1.5	128	56	82214	36035	0.44

ชยธันว์ และคณะ (2546) ทำการทดสอบความต้านทานต่อการขูดถูผิวถาวรของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชั้น Wearing Course ตามภูมิภาคต่างๆ 4 ภาค โดยปริมาณช่องว่างของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์ หน่วยแรงในการทดสอบเท่ากับ 100 kPa ช่วงการให้น้ำหนักกระทำเท่ากับ 0.2 วินาที และช่วงเวลาการหยุดให้น้ำหนักในรอบต่อไปเท่ากับ 0.8 วินาที ในการทดสอบจะทำการทดสอบให้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างมีค่า Accumulated Strain เท่ากับ 1 % จึงหยุดทำการทดสอบ ส่วนในตารางจะประกอบด้วยผลการทดสอบความต้านทานต่อการขูดถูผิวถาวรที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าความต้านทานต่อการยวบตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

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

ที่มา: รายงานฉบับที่ วพ.205 สำนักวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง (2546)

ธนกร ชมภูรัตน์ (2552) ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยวบตัวของแอสฟัลติกคอนกรีต โดยใช้การทดสอบแรงกระทำซ้ำแบบปราศจากแรงคั้นด้านข้าง ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 10°C 25°C 40°C และ 55°C โดยค่าระดับความเค้น (Stress level) ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 207 กิโลปาสกาล (NCHRP Report 465, 2002) การให้ความเค้นดังกล่าวจะให้แรงกดในลักษณะกระทำซ้ำ (Repeated Load) จำนวน 40,000 รอบ หรือจนกว่าตัวอย่างจะเสียหาย โดยแรงกดดังกล่าวจะกระทำที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ (Hz) นั่นคือ มีสัดส่วนช่วงการให้แรง (Load) ต่อช่วงเวลาการปล่อยแรง (Unload) เท่ากับ 1 ต่อ 9 หรือก็คือในแต่ละชุดของแรงกระทำ 1 วินาที มีช่วงเวลาการให้แรง 0.1 วินาที สำหรับรูปร่างของการให้แรงกำหนดให้มีลักษณะเป็น ครึ่งวงของฟังก์ชันไซน์ (Haversine Function) ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมามีผลกระทบต่อค่าการยวบตัวของวัสดุ โดยค่าของแรงกระทำที่จุดเสียหายจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิต่ำ (10°C) นั้นไม่สามารถประมาณค่าการยวบตัวของวัสดุได้ภายในรอบของแรงกระทำที่กำหนด ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุแสดงพฤติกรรมแบบอีลาสติคสมบูรณ์ สำหรับที่ 25° นั้นพฤติกรรมของแอสฟัลติกคอนกรีตไม่แสดงพฤติกรรมความเสียหายในช่วงที่ 3 สุดท้าย ณ อุณหภูมิ 40°C และ 55°C เกิดความเสียหายที่จำนวนครั้งของการให้แรง ณ จุดเสียหายประมาณ 11,000-11,500 และ 3,000 รอบ ตามลำดับ จากการทดสอบจะทำให้สามารถหาค่าความเครียดยวบตัวได้ จากสมการเลขยกกำลัง (Power Function) ได้คือ

$$\varepsilon_p = aN^b \quad (3)$$

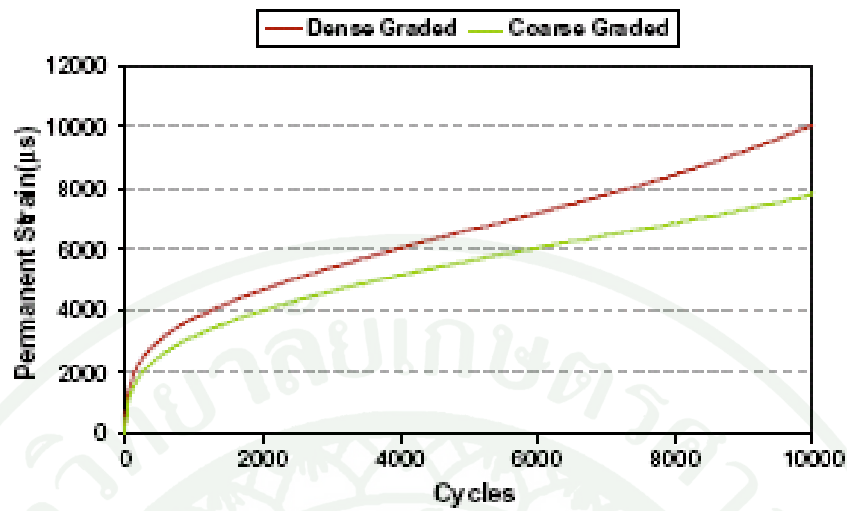
เมื่อ a และ b คือ ค่าคงที่จากการทดสอบ

การประมาณค่าคงที่ a และ b ณ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ เมื่อ θ คือ ค่าอุณหภูมิองศาเคลวิน คือ

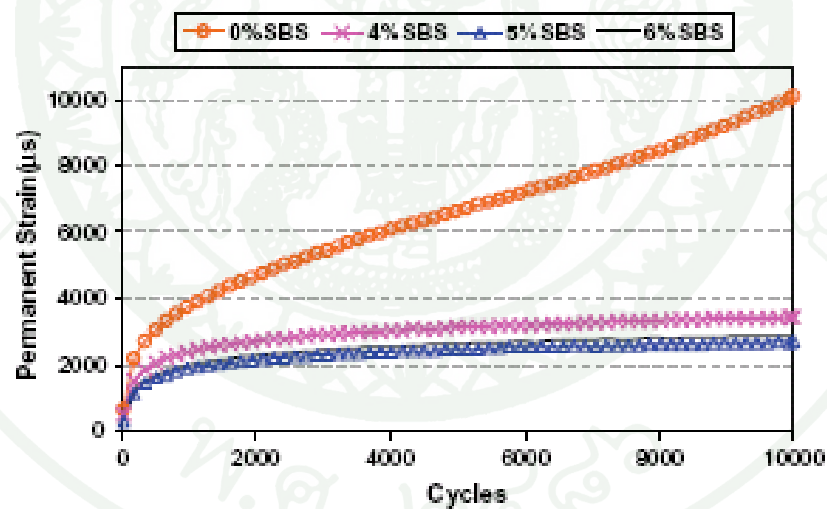
$$\begin{aligned} a &= 93.6 \exp(-0.0245\theta); R^2 = 0.632 \\ b &= 10^{-5} \exp(-0.0322\theta); R^2 = 0.847 \end{aligned} \quad (4)$$

Khodaii and Mehrara (2009) ได้ร่วมกันศึกษาภายใต้หัวข้อ “Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test” เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการเปลี่ยนรูปถาวรของส่วนผสมแน่นกับส่วนผสมหยاب และเปรียบเทียบผลของความแตกต่างของปริมาณ SBS ในส่วนผสมเพื่อกำหนดปริมาณของโพลีเมอร์ที่เหมาะสม โดยใช้ยางแอสฟัลต์ AC60/70 กับ SBS Modified บดอัดก้อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D1559 แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ UTM 25 โดยใช้ Square Pulse Wave ด้วยความถี่ 0.5 Hz ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 ผลจากการทดสอบดังภาพที่ 34-36 และสามารถสรุปได้ดังนี้

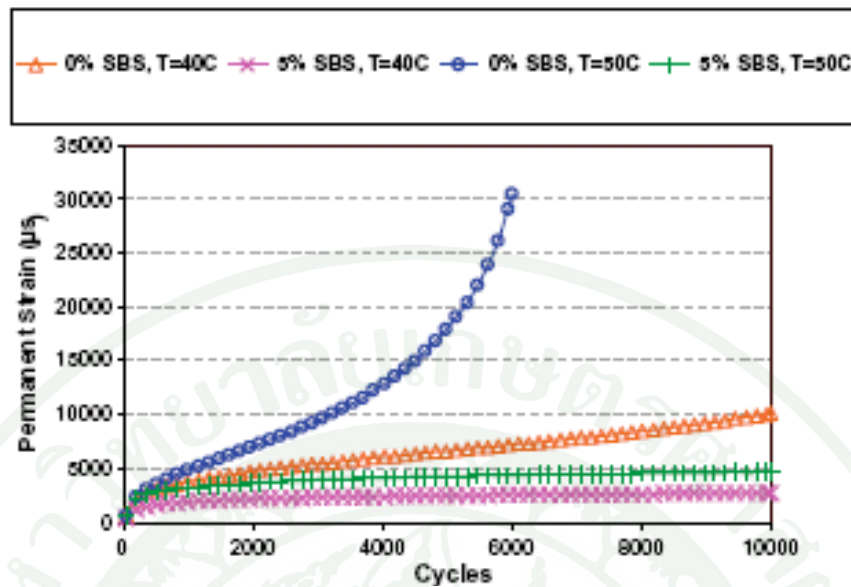
- ส่วนผสมหยابมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรมากกว่าส่วนผสมแน่น
- ในจำนวนส่วนผสมยางโพลีเมอร์ SBS คือที่ 4%, 5% และ 6% พบว่าที่ 5% SBS มีพฤติกรรมเชิงกลดีที่สุด
- ส่วนผสม Modified Asphalt SBS มีความไวต่ออุณหภูมิต่ำกว่าส่วนผสมแบบ Unmodified
- ส่วนผสม SBS Modified มีความสามารถต่อการบดอัดสูงกว่าส่วนผสมแบบ Unmodified



ภาพที่ 34 กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa



ภาพที่ 35 กราฟแสดงจำนวนรอบกับค่า Strain ของก้อนตัวอย่างตามปริมาณของ SBS ที่อุณหภูมิ 40 °C และระดับความเค้น 200 kPa



ภาพที่ 36 กราฟแสดงการทดสอบของส่วนผสมที่ Modified และ Unmodified

Hafeez and Kamal (2009) ได้ทำการศึกษาภายใต้หัวข้อ “ Repeated Load Permanent Deformation Behavior of Mixes With and Without Modified Bitumens ” โดยศึกษาถึงความต้านทานต่อการยุบตัวอย่างถาวรของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยพิจารณาจากค่า Plastic Strain (ϵ_p) เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างวิธีมาร์แชลล์โดยใช้มวลรวมขนาดละเอียด และมวลรวมขนาดละเอียดผสมกับยาง 3 ชนิด ประกอบด้วยยาง AC 60-70 AC 40-50 และ PMA ทดสอบแบบ Stress Control ให้แรงกระทำซ้ำจำนวน 1800 รอบ ให้ช่วงของแรงกระทำและคาบของแรงกระทำ เป็น 0.5 และ 2 วินาที ตามลำดับ โดยมีค่าระดับแรงกระทำ (Stress level) ที่ 100 300 และ 500 กิโลปาสคาล ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 16 และจากผลการทดสอบพบว่า

- ที่ความหนาแน่นเท่ากันร้อยละของปริมาณยางในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA จะใช้ในสัดส่วนที่น้อยกว่าชนิดอื่น ดังแสดงในตารางที่ 17
- ปริมาณยางที่ผสมกับส่วนผสมหยาบ จะใช้ในสัดส่วนที่น้อยกว่าที่ผสมกับส่วนผสมละเอียด
- ที่อุณหภูมิ และระดับของแรงกระทำต่ำ (25 องศาเซลเซียส 100 กิโลปาสคาล) ค่าของ Plastic Strain (ϵ_p) ที่ได้จะเท่ากัน แต่ที่อุณหภูมิ และระดับของแรงกระทำที่สูงขึ้น แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง PMA จะได้ค่าของ ϵ_p ที่ต่ำกว่า ดังภาพที่ 37

- ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 มีสมรรถภาพที่ต่ำกว่ายาง AC 40-50 และ PMA ในทุกส่วนผสม
- ค่าของ ϵ_p ที่ได้จากกราฟระหว่าง ϵ_p และ Stress level ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงในส่วนผสมของมวลรวมหยาบ และจะเป็นเส้นโค้งเพิ่มขึ้นในส่วนผสมกับมวลรวมละเอียด
- ϵ_p ของกราฟระหว่าง ϵ_p และ Stress level ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้เป็นตัวแทนได้ดีที่สุดของทั้งตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบ และตัวอย่างที่ใช้มวลรวมละเอียด
- ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ϵ_p ที่ได้จากตัวอย่างที่ใช้มวลรวมละเอียด มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลรวมหยาบ
- ที่ระดับแรงกระทำ 300 กิโลปาสคาล ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมหยาบ และส่วนผสมละเอียด ค่า ϵ_p ที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 16 ค่า Plastic Strain ที่ได้จากการทดสอบตาม ขนาดคละ แรงกระทำ และอุณหภูมิต่างๆ

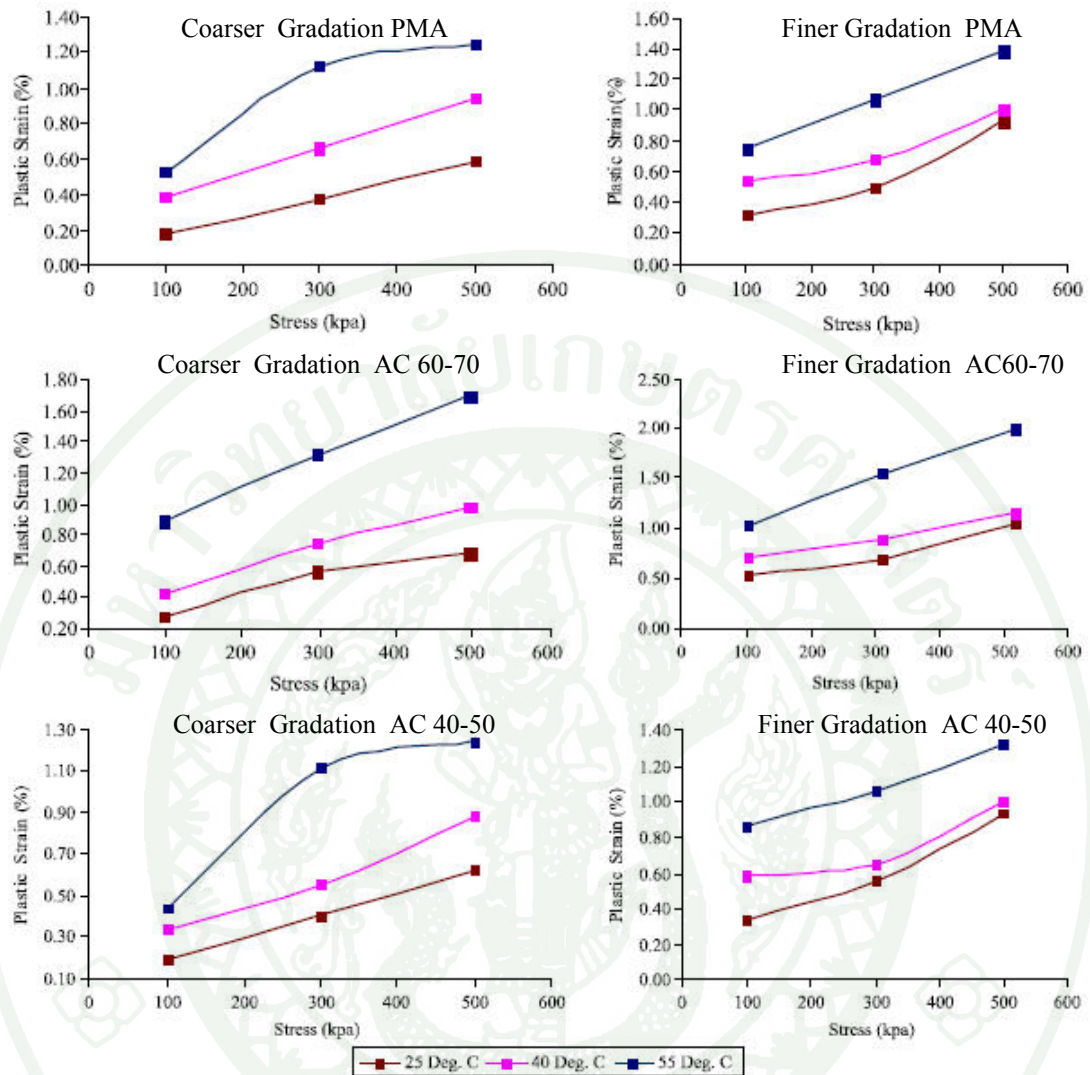
No.	Temperature (C°)	Stress (kPa)	Percentage Accumulated Strain (ϵ_p) of Mixes					
			1a	1b	1c	2a	2b	2c
1	25	100	0.193	0.281	0.183	0.286	0.403	0.315
2	25	300	0.399	0.564	0.375	0.516	0.572	0.493
3	25	500	0.616	0.686	0.592	0.907	0.958	0.926
4	40	100	0.332	0.424	0.389	0.540	0.590	0.536
5	40	300	0.547	0.742	0.666	0.609	0.774	0.676
6	40	500	0.881	0.990	0.946	0.989	1.057	0.995
7	55	100	0.438	0.577	0.526	0.833	0.647	0.747
8	55	300	1.114	1.164	1.124	1.052	1.172	1.058
9	55	500	1.242	1.266	1.247	1.320	1.441	1.375

หมายเหตุ: 1 - Coarser Gradation , 2 - Finer Gradation

a - PMA , b - AC 60/70 , c - AC 40/50

ตารางที่ 17 ร้อยละของปริมาณยาง และ คุณสมบัติเชิงปริมาตรของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ตาม ส่วนผสม และยางที่ต่างกัน

Mix Types	Optimum AC content (%)	Gsb	Gmm	Gmb	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
1a (PMA)	3.83	2.650	2.522	2.373	5.90	13.90	58.00
1b (60/70)	3.87	2.650	2.515	2.371	5.70	13.99	59.00
1c (40/50)	3.95	2.650	2.514	2.370	5.70	14.10	60.00
2a (PMA)	4.29	2.662	2.520	2.395	4.96	13.90	64.00
2b (60/70)	4.31	2.662	2.516	2.386	5.17	14.23	63.70
2c (40/50)	4.33	2.662	2.515	2.384	5.20	14.32	63.70



ภาพที่ 37 ค่าของ ϵ_p ที่ได้จาก Stress level ของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดที่อุณหภูมิต่างๆ

ชั้นวิน และคณะ (2551) ทำการสำรวจสภาพความเสียหายและสาเหตุของความเสียหายหลักของถนนลาดยางในประเทศไทยจำนวน 273 แห่งทั่วประเทศ และก๊อตัวอย่าง 948 ก๊อจากถนน 61 แห่ง เพื่อหาข้อสรุปปัญหาที่สำคัญและแนวทางในการแก้ไขปัญหา โดยการสำรวจในภาคสนามได้ทำการคัดเลือกถนนและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น เก็บข้อมูลสภาพความเสียหาย เจาะเก็บก๊อตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต และเก็บข้อมูลความแข็งแรงของถนนด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า สามารถสรุปความเสียหายหลักของถนนที่สำรวจคือ ร่องล้อ (ร้อยละ 67) รอยแตกตามยาว (ร้อยละ 53) และรอยแตกเชื่อมต่อในแนวล้อ (ร้อยละ 40) ทำให้สามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้คือ ก๊อตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวจากด้านบนลงสู่

ด้านล่าง (Top-Down Crack) มีมากถึง 169 ก้อน และที่มีรอยแตกร้าวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (Bottom-Up Crack) มีเพียง 1 ก้อน และจากผลการคำนวณย้อนกลับพบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัสชั้นทางในแนวร่องล้อซ้ายมีค่าน้อยกว่าในแนวร่องล้อขวาและระหว่างร่องล้อ แสดงถึงความเสื่อมสภาพของทางที่มากกว่าในแนวร่องล้อซ้าย และค่าเฉลี่ยโมดูลัสชั้นทางของแปลงทดสอบยาว 200 เมตร ที่มีความเสียหายมากกว่าในแปลงทดสอบยาว 3 กิโลเมตร จะมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัสชั้นทางของแปลงทดสอบยาว 3 กิโลเมตร



จากการศึกษาผลการทดสอบทางวิศวกรรมในด้านความแข็งแรงและการรับน้ำหนัก ได้แก่ วิธีทดสอบค่าโมดูลัสกึ่งตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม และด้านสมรรถนะการใช้งาน ได้แก่วิธีทดสอบการต้านทานการแตกร้าวจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม และการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลองหลายชนิดซึ่งได้แก่ มวลรวม อุณหภูมิ ช่องว่างอากาศ ชนิดและปริมาณยางแอสฟัลต์ โดยตัวอย่างวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมขึ้นจากยาง AC 60-70 จะมีค่า Marshall Stability ต่ำที่สุด ตามมาด้วย AC 40-50 จะมีค่าที่สูงกว่า และ PMA จะมีค่า Marshall Stability ที่สูงที่สุด

โดยผลการทดสอบที่ได้นี้จะสามารถใช้อ้างอิงถึงความจำเป็นในการเปลี่ยนแปลงยางที่ใช้ในการก่อสร้างซึ่งจากเดิมที่ใช้ยางแอสฟัลต์ AC 60-70 มาเป็น AC 40-50 ในอนาคต เนื่องด้วยความเหมาะสมทางวิศวกรรมศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากโรงงาน (Loose-mix)

เป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านการผสมแล้วระหว่าง วัสดุมวลรวม (หิน) กับ แอสฟัลต์-ซีเมนต์ (ยาง) และต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ทำการเก็บตัวอย่างมาจากโรงงานผสมวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยตัดจากท้ายรถบรรทุกใส่ถังบรรจุแล้ว นำมาเก็บไว้ในห้องปฏิบัติการ ก่อนนำมาใช้เตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ต้องทำการให้ความร้อนกับวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในตู้อบควบคุมอุณหภูมิ ก่อนนำไปบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor (SGC) ให้ได้ความหนาแน่นตามที่ได้ออกแบบไว้ที่ 2.394 - 2.411 gm./ml. แต่เนื่องจากความจำกัดของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากโรงงาน จึงได้ทำการปรับช่วงของความหนาแน่นให้อยู่ในช่วง 2.387 - 2.411 gm./ml. เพื่อให้วัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพียงพอต่อการทดสอบ

1.2 วัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนาม (Coring)

เป็นก้อนตัวอย่างที่ได้มาจากการเจาะผิวทางที่ผ่านการบดทับมาแล้ว โดยใช้เครื่องเจาะที่มีมาตรฐาน ทำการเจาะตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร จะต้องผ่านการตรวจสอบรับรองความแน่นให้มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างจากห้องทดลองที่ใช้เปรียบเทียบประจำวัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.404 – 2.409 gm./ml. ดังนั้น วัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนามต้องมีค่าความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 2.356 gm./ml. และตัวอย่างทุกก้อนก่อนจะทำการทดสอบจะต้องผ่านการแต่งผิว (Trim) ให้ได้พื้นผิวของตัวอย่างที่เรียบพอสำหรับการดำเนินการทดสอบต่อไป

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องเจาะดังแสดงในภาพที่ 38

2.2 เครื่องบดอัด Superpave Gyrotory Compactor ดังแสดงในภาพที่ 39

2.3 เครื่องทดสอบ UTM-5P ดังแสดงในภาพที่ 40 ใช้ในการทดสอบ Indirect Tensile Resilient Modulus และ Indirect Tensile Fatigue

2.4 เครื่องทดสอบ Simple Performance Tester ดังแสดงในภาพที่ 41 ใช้ในการทดสอบ SPT Dynamic Creep



ภาพที่ 38 เครื่องเจาะก้อนตัวอย่างจากสนาม



ภาพที่ 39 เครื่องบดอัด Superpave Gyrotory Compactor



ภาพที่ 40 เครื่องทดสอบ UTM – 5P



ภาพที่ 41 เครื่องทดสอบ Simple Performance Tester

วิธีการ

1. การก่อสร้างแปลงทดสอบผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 บนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 352

ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ทางหลวงหมายเลข 352 เป็นทางหลวงขนาด 2 ช่องจราจรที่เชื่อมต่อระหว่างอำเภอชัยบุรี จังหวัดพุมธานี และอำเภอวังน้อย จังหวัดอยุธยา ซึ่งถูกใช้เป็นเส้นทางหลักเพื่อการขนส่งของรถบรรทุกหนักในการขนส่งผลิตผลทางการเกษตรและสินค้าจากคลังสินค้าในพื้นที่บริเวณใกล้เคียง และเนื่องจากในช่วงที่ผ่านมาถนนมีปริมาณการจราจรเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะรถบรรทุกหนัก ทำให้ถนนเดิมเกิดความชำรุดเสียหายแตกร้าวและเกิดร่องล้อเนื่องจากรถบรรทุกหนัก ผู้ใช้เส้นทางจึงไม่ได้รับความสะดวกและปลอดภัยเท่าที่ควร กรมทางหลวงจึงได้สังเกตเห็นถึงความจำเป็นในการออกแบบและปรับปรุงเพื่อทำการบูรณะทางหลวงสายหลักนี้ให้เป็นแบบ 4 ช่องจราจร และเป็นโครงการนำร่องในการใช้ยางชนิด AC 40-50 ในบางช่วงของผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชั้น Binder Course ซึ่งจากเดิมที่ใช้ยางชนิด AC 60-70 ทั้งหมด เพื่อการรองรับน้ำหนัก สัจจากรถบรรทุกหนักได้ดีกว่าเดิม ตามผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการเบื้องต้นที่สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงได้ดำเนินการศึกษามาก่อนหน้านี้

กรมทางหลวงได้จัดสรรงบประมาณให้ทำดำเนินการ โครงการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 352 ตอน ชัยบุรี- บรรจบทางหลวงหมายเลข 309 ระหว่าง กม. 2+480 – กม. 7+000 และ กม. 11+800 – กม. 13+700 ฝั่งขาเข้าและขาออก (ภาพที่ 42) โดยใช้ผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชั้นรองผิวทาง (Binder Course) ที่ใช้ยางชนิด AC 40-50 AC 60-70 และชั้นผิวทาง (Wearing Course) ที่ใช้ยางชนิด Polymer Modified Asphalt (PMA) ซึ่งบริษัท พรธณีวรกิจ ก่อสร้างและขนส่ง จำกัด เป็นผู้รับจ้าง รวมเป็นค่างานทั้งสิ้น 102,878,209.00 บาท ตามสัญญาเลขที่ นย. 10/2550 เริ่มต้นสัญญาวันที่ 5 มิถุนายน 2552 และสิ้นสุดสัญญาวันที่ 1 ธันวาคม 2552 ระยะเวลารวม 180 วัน



ภาพที่ 42 แผนที่แสดงที่ตั้งของโครงการ

รายละเอียดของโครงการ

โครงการจ้างเหมาทำการบูรณะผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ทางหลวงแผ่นดิน หมายเลข 352 ตอน กม. 2+480 – กม. 7+000 และ กม. 11+800 – กม. 13+700 ฝั่งขาเข้าและขาออก โดยมีรายละเอียดของการใช้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางแอสฟัลต์ชนิดต่างๆดังนี้ (ภาพที่ 43)

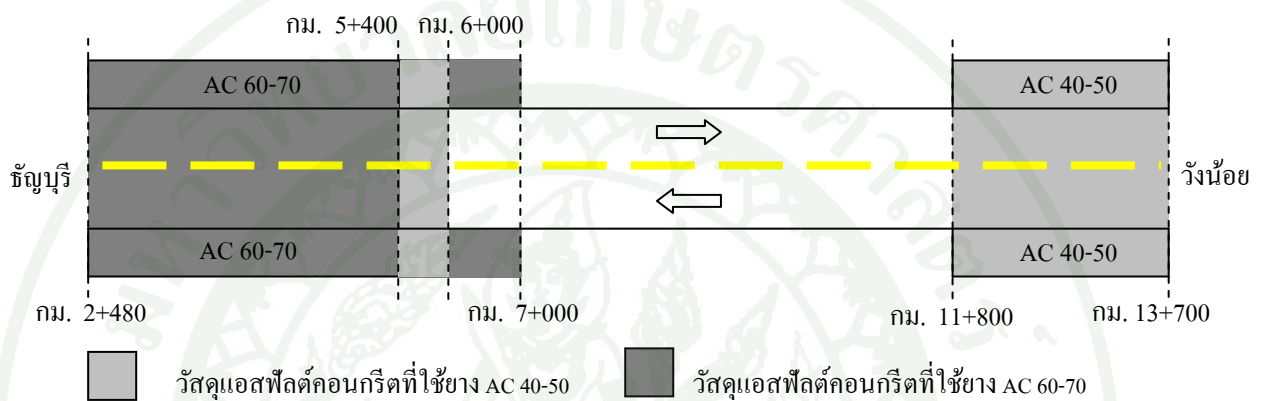
ชั้น Binder Course

- ใช้ยางชนิด AC 40-50 ช่วงกม. 5+400 - 6+000 และช่วงกม. 11+800 - 13+700
- ใช้ยางชนิด AC 60-70 ช่วงกม. 2+480 - 5+400 และช่วงกม. 6+000 - 7+000

ชั้น Wearing Course

- ใช้ยางชนิด PMA ตลอดทั้งโครงการ

โดยเริ่มดำเนินการโดยทำการขุดรื้อชั้นโครงสร้างทางเดิมที่มีความเสียหาย (Soft Spot) และทดแทนด้วยวัสดุใหม่ ทำการบุงนระชั้นพื้นทางเดิมด้วยวิธีบุงนระในที่ (Pavement In-Place Cement Recycling) จากนั้นจึงขยายคันทางใหม่โดยใช้หินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock) เป็นวัสดุชั้นพื้นทางใหม่ แล้วจึงทำการปูผิวทางชั้น Binder Course และชั้น Wearing Course ตามลำดับ



ภาพที่ 43 แผนผังแสดงตำแหน่งของวัสดุผิวทางชั้นรองผิวทางที่ใช้ยาง AC 40-50 และ AC 60-70

รูปตัดของถนน (Cross Section)

โครงสร้างของถนนก่อนการบุงนระเป็นผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต 2 ช่องจราจร มาตรฐานทางชั้น 1 ผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต กว้างข้างละ 3.50 เมตร ไหล่ทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต กว้างข้างละ 1.50 เมตร และโครงสร้างถนนหลังการบุงนระเป็นมาตรฐานชั้นพิเศษ ผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต กว้างข้างละ 7.00 เมตร ไหล่ทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต กว้างข้างละ 1.50 เมตร โดยทำการบุงนระอยู่บนแนวทางเดิมซึ่งมีรายละเอียดของโครงสร้างทางภายหลังการบุงนระดังแสดงในภาพที่ 44

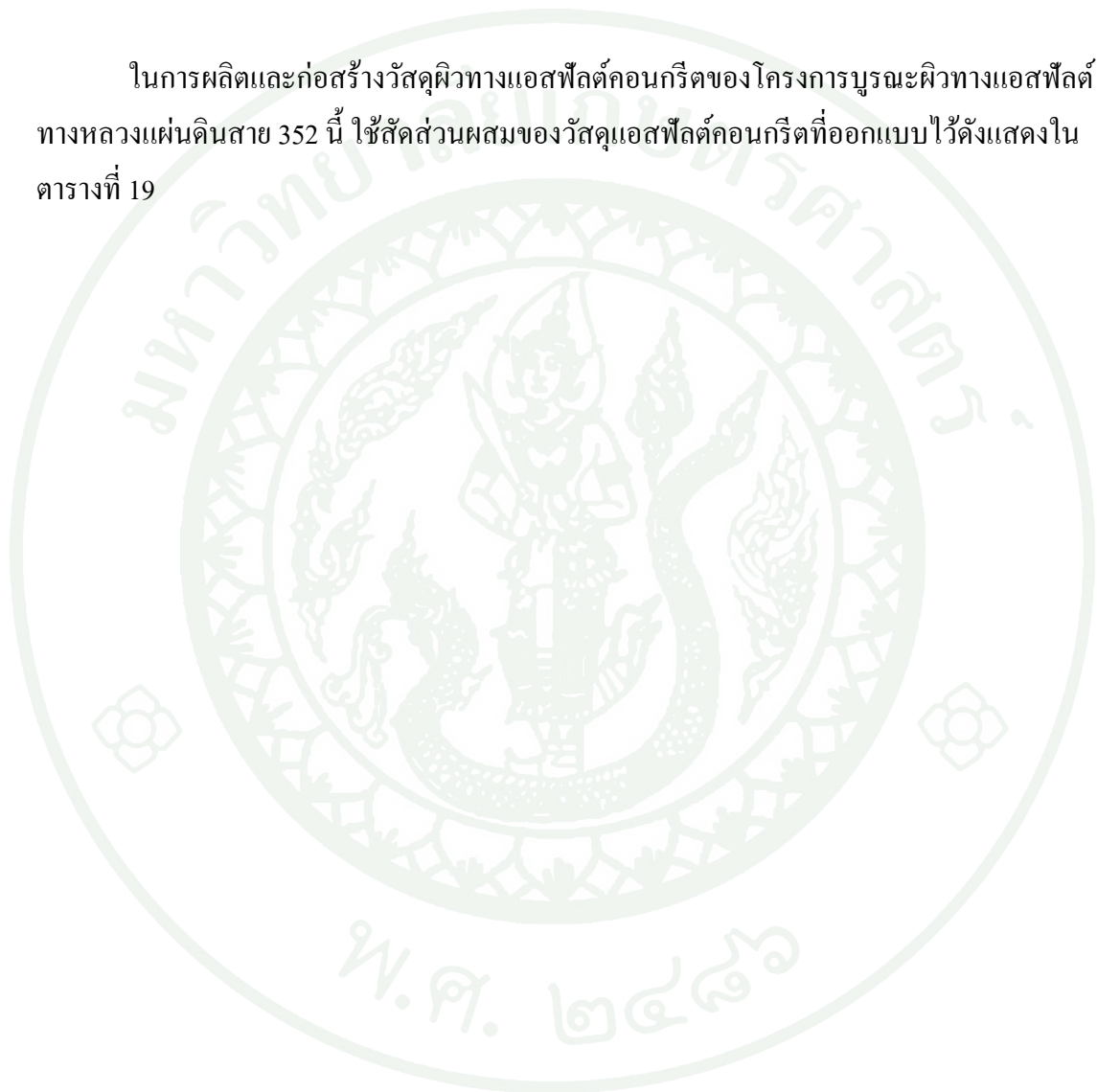
บัญชีรายการก่อสร้าง

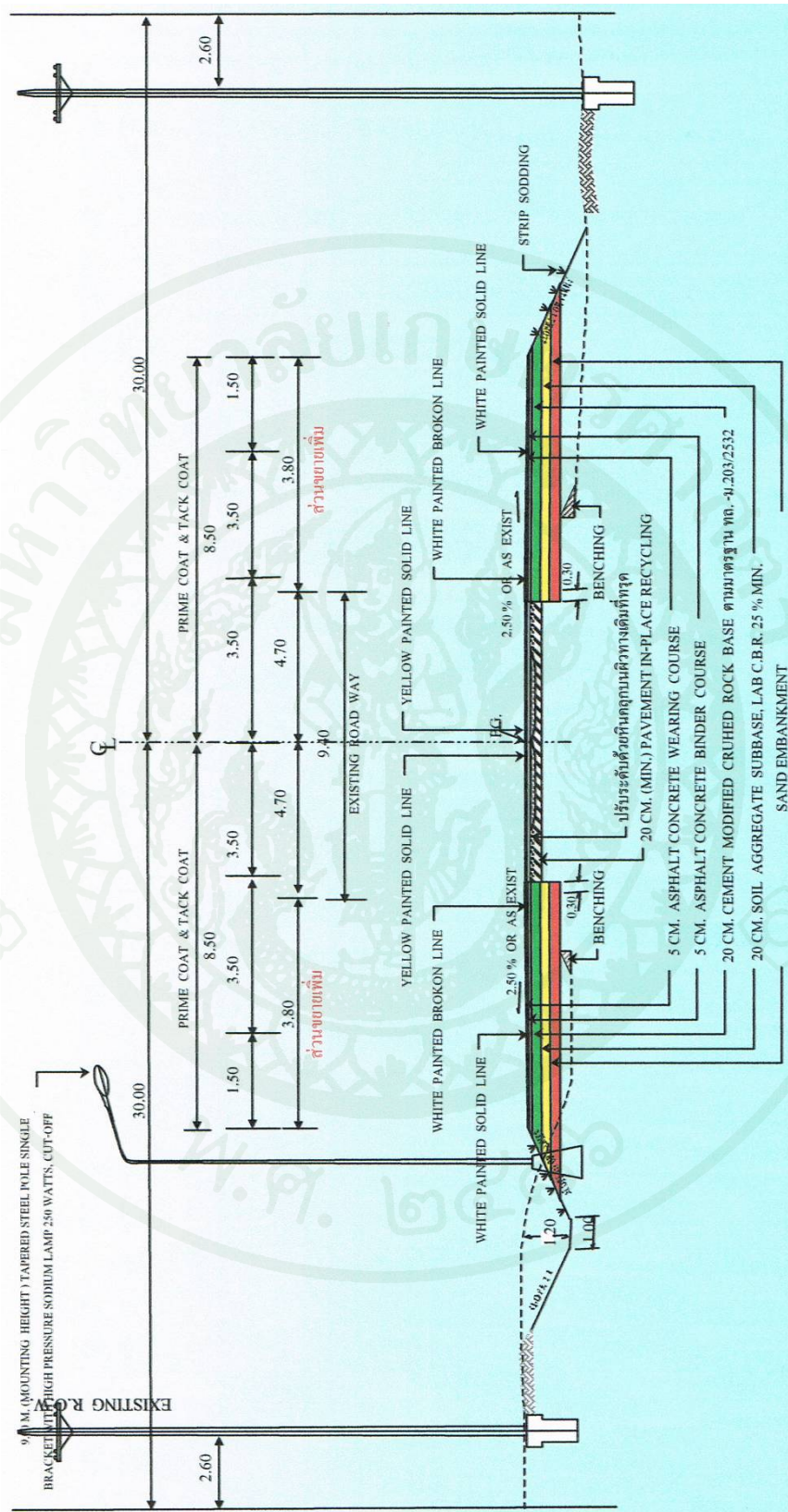
โครงการจ้างเหมาทำการบุงนระผิวทางแอสฟัลต์ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 352 ตอน รัญบุรี- บรรจบทางหลวงหมายเลข 309 ระหว่าง กม. 2+480 – กม. 7+000 และ กม. 11+800 – กม. 13+700 ฝั่งขาเข้าและขาออกโดยใช้ผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชั้น Binder Course ที่ใช้ยาง

ชนิด AC 40-50 AC 60-70 และชั้น Wearing Course ที่ใช้อย่างชนิด PMA มีรายละเอียดของปริมาณงานดังแสดงในตารางที่ 18

ส่วนผสมเฉพาะงานของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Job Mix Formula)

ในการผลิตและก่อสร้างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของโครงการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์ทางหลวงแผ่นดินสาย 352 นี้ ใช้สัดส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ดังแสดงในตารางที่ 19





ภาพที่ 44 รูปตัดของถนนทั้งก่อนและหลังการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์

ตารางที่ 18 รายละเอียดปริมาณงานในการก่อสร้าง

ลำดับ	รายการ	ปริมาณ งาน (ตร.ม.)	ราคา / หน่วย (บาท)	รวมเป็นเงิน (บาท)
1	งานClearing and Grubbing	50,350.00	0.99	49,846.50
2	งานUnsuitable Material Excavation	6,865.00	42.93	294,714.45
3	งานSoft Material Excavation (Excavation Only)	500.00	50.00	21,470.00
4	งานSand Embankment	50,866.00	453.27	23,056,031.82
5	งานSoil Aggregate Subbase	9,475.00	447.27	4,237,883.25
6	งานCement Modified Crushed Rock Base	9,085.00	887.05	8,058,849.25
7	งานCrushed Rock Levelling Course	1,490.00	272.86	406,561.40
8	งานPavement In-Place Recycling ลึก 20 ซม.	71,300.00	83.98	5,987,774.00
9	งานPrime Coat	110,765.00	28.48	3,154,587.20
10	งานTack Coat	109,990.00	8.99	988,810.10
11	งานAsphalt Concrete Binder Course 5 cm. Thick	110,765.00	197.90	21,920,393.50
12	งานAsphalt Concrete Wearing Course 5 cm. Thick	109,990.00	256.87	28,253,131.30
13	งานสาธารณูปโภค และอื่นๆ			6,448,156.23
			รวมเป็นเงิน	102,878,209.00

ตารางที่ 19 คุณสมบัติส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง (Job Mix Formula)

ลำดับ	คุณสมบัติ	ชั้นรองผิวทาง		ชั้นผิวทาง
		AC 40-50	AC 60-70	PMA
1	% Asphalt by Mass of Aggregate	5.0	5.0	5.0
2	Marshall Density (gm./ml.)	2.404	2.402	2.383
3	Marshall Air Voids (%)	4.0	4.0	4.0
4	Voids in Mineral Aggregate (%)	14.7	14.7	14.1
5	Voids Filled with Bitumen (%)	73	73	72
6	Marshall Stability (lbs.)	3,070	2,200	3,180
7	Marshall Flow (0.01")	14.0	11.0	14.0
8	Marshall Stability/Marshall Flow (lbs./0.01")	219	202	227

ข้อกำหนดขนาดกละ (Gradation)

ขนาดกละของวัสดุรวมสำหรับผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ยาง AC 60-70 และยาง PMA นั้นเป็นแบบ Dense Grade ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ข้อกำหนดในการควบคุมขนาดคละของผิวทางแต่ละชนิด

ขนาด ตะแกรง	ชั้นรองผิวทาง		ชั้นผิวทาง	
	AC 40-50 และ AC 60-70		PMA	
	Desired ¹ (%Passing ³)	Tolerant Limit ² (% Passing ³)	Desired ¹ (%Passing ³)	Tolerant Limit ² (% Passing ³)
1”	100	100	-	-
3/4”	90-100	88-98	100	100
1/2”	-	74-84	80-100	79-89
3/8”	56-80	61-71	-	58-68
#4	35-65	55-65	44-74	42-52
#8	23-49	31-41	28-58	27-37
#16	-	17-25	-	20-28
#30	-	10-18	-	10-18
#50	5-19	7-14	5-21	6-14
#100	-	6-10	-	5-10
#200	2-8	5-7	2-10	4-6

หมายเหตุ: ¹ ค่า Desired เป็นข้อกำหนดทั่วไปของกรมทางหลวง

² ค่า Tolerant Limit เป็นข้อกำหนดที่ใช้ในงานก่อสร้าง (Job Mix Formula)

³ ค่า %Passing ตามร้อยละของน้ำหนัก

ข้อกำหนดในการควบคุมคุณภาพวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในการก่อสร้าง

ในการก่อสร้างต้องมีการควบคุมทั้งส่วนผสมและคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งที่โรงงานผลิตรวมถึงสถานที่ก่อสร้าง โดยมีรายละเอียดการควบคุมการก่อสร้างดังตารางที่ 21 และ 22 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 21 ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้างของก้อนตัวอย่างที่เตรียมจากโรงผสม

ลำดับ	คุณสมบัติ	AC 40-50	AC 60-70	PMA
1	ปริมาณยางโดยน้ำหนักของมวลรวม (%)	5.0	5.0	5.0
2	ปริมาณยางผิดพลาดจากข้อกำหนดไม่เกิน	± 0.3 %	± 0.3 %	± 0.3 %
3	Gradation	อยู่ใน Tolerant Limit		
4	Marshall Stability (lbs.)	>2,800	>2,000	>3,000
5	Marshall Flow (1/100")	13-15	10-12	13-15
6	Marshall Density (gm/ml)	2.394-2.411	2.391-2.411	2.374-2.390

ตารางที่ 22 ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้างของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนาม

ลำดับ	คุณสมบัติ	AC 40-50	AC 60-70	PMA
1	ความหนาของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์ (ซม.)	5	5	5
2	ร้อยละความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนามต่อก้อนตัวอย่างที่บดอัดที่โรงผสม	≥ 98	≥ 98	≥ 98

รายละเอียดการก่อสร้างและการเก็บข้อมูลภาคสนาม

โครงการบูรณะสายทางนี้เป็นโครงการแรกในการนำยางชนิด AC 40-50 มาใช้ในงานก่อสร้างบางช่วงของชั้น Binder Course ซึ่งมีขั้นตอนการก่อสร้างรวมไปถึงวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้างเป็นไปตามมาตรฐานงานก่อสร้างงานทางของกรมทางหลวง ยกเว้นในกรณีของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางชนิด AC 40-50 ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานรองรับ โดยในงานวิจัยนี้จะขอเน้นในขั้นตอนการก่อสร้างผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชั้น Binder Course ที่ใช้ยางชนิด AC 40-50 ที่ความหนา 5 เซนติเมตร โดยมีรายละเอียดการก่อสร้างอยู่ในภาคผนวก

กระบวนการผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

การผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นการผสมมวลรวมกับยางแบบผสมร้อนเพื่อที่จะให้ได้ Hot Mix Asphalt (HMA) ที่ใช้ในงานก่อสร้างถนน โดยวัสดุผสมจะถูกผลิตที่โรงงานผสมโดย

ใช้สัดส่วนและควบคุมการผสมตามข้อกำหนดใน Job Mix Formula (JMF) โรงงานที่ผสมนี้เป็นโรงงานผสมแบบชุด (Batch Type) ดังแสดงในภาพที่ 45 มีกำลังการผลิตประมาณ 95 ตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 45 ภาพรวมของโรงงานผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตประเภท Batch Type

กระบวนการขนส่ง

ภายหลังจากการผสมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องผสมจนได้เข้ากันได้ดีตามระยะเวลาผสมที่กำหนด วัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะถูกปล่อยลงสู่บรรทุกพ่วง ในโครงการนี้รถบรรทุกพ่วง 1 คันจะรับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมแล้วได้ประมาณ 14 ถึง 15 Batch (23 ตัน) อุณหภูมิเฉลี่ยของHMAที่ทำรถบรรทุกพ่วงวัดได้ประมาณ 165 องศาเซลเซียส โดยต้องใช้ผ้าใบปิดท้ายเพื่อป้องกันการสูญเสียอุณหภูมิอย่างรวดเร็วรวมถึงเป็นการป้องกันน้ำฝน จากการเก็บข้อมูลพบว่าระยะทางที่ใช้จากโรงงานผลิตมายังสถานที่ก่อสร้าง ประมาณ 30 ถึง 40 กิโลเมตร เวลาที่ใช้ในการขนส่งนานประมาณ 30 ถึง 40 นาที

กระบวนการก่อสร้าง

ก) ขั้นตอนการปูผิวทาง

ก่อนที่จะทำการปูผิวทาง จะต้องมีการสเปรย์ Prime Coat ล้างหน้าบนชั้นพื้นทางก่อน จากนั้นจึงจะเข้าสู่ขั้นตอนการปูผิว โดยทำการปู HMA ให้มีความสูงก่อนการบดทับประมาณ 6.25 เซนติเมตร เพราะต้องการความสูงภายหลังการบดทับที่ 5 เซนติเมตร

ข) ขั้นตอนการบดทับ

จากการทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 พบว่าสามารถทำบดทับได้ที่อุณหภูมิไม่ต่างจากวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 แต่เพื่อความสะดวกในการเกลี่ยแต่งรอยต่อตามยาวระหว่างการปูในแต่ละเที่ยว ควรจะควบคุมอุณหภูมิของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ที่ทำการบดทับไว้ที่ไม่ต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส

การสำรวจปริมาณการจราจร

ภายหลังการเปิดใช้งาน ได้ทำการสำรวจปริมาณการจราจรบนถนนบริเวณ กม.3+600 เริ่มทำการสำรวจตั้งแต่ปี 2550 โดยแบ่งตามประเภทของรถยนต์ทุกชนิด เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าร้อยละของจำนวนรถบรรทุกหนัก โดยได้ผลการสำรวจดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ปริมาณรถบรรทุกหนัก ณ บริเวณจุดสำรวจ

ปีที่สำรวจ	รถยนต์นั่งไม่เกิน 7 คน	รถยนต์นั่งเกิน 7 คน	รถโดยสารเล็ก	รถโดยสารกลาง	รถโดยสารใหญ่	รถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ	รถบรรทุกขนาด 2 เพลา 6 ล้อ	รถบรรทุกขนาด 3 เพลา 10 ล้อ	รถบรรทุกพ่วง มากกว่า 3 เพลา	รถบรรทุกพ่วง มากกว่า 3 เพลา	รวม	% ของยานยนต์หนัก
2554	1,599	1,424	149	111	106	1,337	2,114	2,520	2,552	2,597	14,509	68.92
2553	1,798	1,748	131	56	94	1,515	1,533	1,898	1,949	1,981	12,703	59.13
2552	1,560	1,072	56	1	41	1,177	1,546	1,337	1,480	1,974	10,244	62.27
2551	1,097	1,143	67	21	14	1,535	1,677	1,827	1,733	1,605	10,719	64.16
2550	1,222	1,341	106	35	16	1,560	1,808	2,054	1,801	1,661	11,604	63.56

2. การเก็บตัวอย่างวัสดุ

2.1 ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Loose-Mix)

ทำการเก็บตัวอย่างที่ใช้ในงานก่อสร้างจริง จากโรงงานผสม (Mixing Plant) ที่จะนำไปใช้ในการก่อสร้างจริงในแปลงทดสอบมาสุ่มตัก (Sampling) ดังแสดงในภาพที่ 46 จากท้ายรถบรรทุกใส่ถังประมาณ 50 กิโลกรัม (ประมาณ 4 ถัง) ก่อนส่งไปยังห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 46 การเก็บตัวอย่างจากท้ายรถบรรทุกใส่ถาดก่อนนำไปบรรจุลงถัง

2.2 ก้อนตัวอย่างที่ได้จากการเจาะเก็บจากสนาม (Coring)

ได้จากเครื่องมือเจาะตัวอย่าง อาจเป็นชนิดใช้เครื่องยนต์หรือไฟฟ้าที่สามารถใช้เจาะตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ได้อย่างเรียบร้อย (ดังแสดงในภาพที่ 47) เป็นจำนวน 40 ก้อน โดยปกติกรมทางหลวงจะมีการเจาะตัวอย่างแต่ละวันเพื่อควบคุมคุณภาพการก่อสร้างที่ระยะทุกๆ 100 เมตร และไม่ควรเจาะผิวทางเป็นจำนวนมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายของผิวทางได้ง่าย



ภาพที่ 47 การเจาะ (Coring) ก่อนตัวอย่างโดยใช้เครื่องเจาะ

3. การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมก่อนตัวอย่างจะสามารถเตรียมได้จาก 2 แหล่ง คือ การเตรียมก่อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และการเตรียมตัวอย่างในสนาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การเตรียมก่อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

การเตรียมก่อนตัวอย่างในขั้นตอนนี้ เป็นการนำส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Loose-Mix) มาบดอัดก่อนตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Gyrotory Compactor ตามระบบ Superpave จะใช้แรงกดต่อก่อนตัวอย่างคงที่ 600 กิโลปาสกาล (kPa) ฐานของเครื่องหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 30 รอบต่อนาที โดยมีตำแหน่งการบดอัดก่อนตัวอย่างทำมุม 1.25 องศาตลอดช่วงการบดอัด โดยเครื่อง Gyrotory Compactor สามารถผลิตก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร และสามารถปรับความสูงของตัวอย่างได้ตามต้องการ แต่สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการผลิตก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร การบดอัดใช้สัดส่วนการผสมของผิวทางแต่ละชนิดตามการออกแบบ Job Mix Formula ที่ใช้ในการก่อสร้าง ก็อบดอัดก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตให้ได้ความถ่วงจำเพาะ (Bulk Specific Gravity) ที่ค่าระหว่าง 2.394-2.411 gm./ml. โดยมีขั้นตอนในการเตรียมผลิตก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตดังนี้

ก) ให้ความร้อนกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Loose-Mix) จนได้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 170 องศาเซลเซียส ตักจากถังแล้วชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 1,250 กรัม ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเทใส่แบบหล่อ (Mold) ที่เตรียมไว้แล้วนำ Mold เข้าเครื่องบดอัด Gyratory Compactor ดังภาพที่ 48 โดย Mold จะต้องผ่านการอบ มีอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียสเช่นกัน ก่อนที่จะทำการบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory Compactor



ภาพที่ 48 เครื่องบดอัด Superpave Gyratory Compactor หลังจากใส่ mold แล้ว

ข) ตั้งค่าเครื่องบดอัดโดยกำหนดค่าความหนาแน่นเป้าหมาย (Target Density) และเนื่องจากประสบการณ์จากการใช้งานของทางผู้วิจัย ทำให้ทราบว่าต้องตั้งค่าความหนาแน่นของเครื่องบดอัดให้ต่ำกว่าความหนาแน่นที่เป้าหมายประมาณ 0.055 gm./ml. โดยตั้งค่าความหนาแน่นในโปรแกรม Servopac ไว้ที่ 2.350 gm./ml. เพื่อบดอัดก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตให้มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.404 gm./ml. จากนั้นกดปุ่ม Start

ค) เมื่อเครื่อง Gyratory บดอัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำ Mold ออกจากเครื่อง Gyratory เพื่อดันก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตออกจาก Mold และวางก้อนตัวอย่างให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ง) นำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผลิตได้มาตรวจสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ โดยจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2.394-2.411 gm./ml. ก่อนที่จะนำไปทดสอบหาคุณสมบัติต่อไป

3.2 การเตรียมก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากสนาม

เมื่อได้ก้อนตัวอย่างที่เจาะมาแล้วขั้นตอนนี้ถัดไปจะต้องทำการตัดตัวอย่างเพราะก้อนตัวอย่างที่ได้จะมีทั้งชั้นผิวทางและรองผิวทางอยู่ในก้อนเดียวกัน จึงต้องทำการตัดให้เรียบร้อย ดังในภาพที่ 49 ก้อนตัวอย่างที่มีการตัดที่ดีจะต้องมีผิวหน้ารอยตัดที่เรียบ

จากนั้นนำตัวอย่างที่เจาะมาทำการแต่งผิว (Trim) โดยก้อนตัวอย่างจะต้องได้รูปทรงส่วนโค้งจะต้องเรียบ ไม่มีหินหลุดเป็นโพรงหรือหลุดออกมาจากก้อนตัวอย่าง ด้านสูงของตัวอย่างจะต้องขนานกัน ส่วนขอบมุมจะต้องไม่ป็นหรือกะเทาะ และก้อนตัวอย่างต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 30 มิลลิเมตร เพราะก้อนตัวอย่างที่มีรูปทรงไม่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ อาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการทดสอบได้ ก่อนการทดสอบจะต้องทดสอบหาความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T 166 Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixture Using Saturated Surface-Dry Specimens โดยค่าความหนาแน่นต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างจากห้องทดลองที่ใช้เปรียบเทียบประจำวัน ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 2.346 gm./ml. และก่อนการทดสอบต้องนำก้อนตัวอย่างที่ค่าความหนาแน่นผ่านเกณฑ์ (มากกว่า 2.346 gm./ml.)



ภาพที่ 49 ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตขณะติดตั้งกับเครื่องตัดตัวอย่าง

4. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมขึ้นใน 3 ลักษณะ ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไปแล้วในหัวข้อ 5.1.2 โดยแบ่งจำนวนก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ และการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 24 ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ได้แก่

1. Indirect Tensile Resilient Modulus Test ตามมาตรฐาน BS DD 213 ASTM D 4123
2. Indirect Tensile Fatigue Test ตามมาตรฐาน BS DD ABF
3. Dynamic Creep Test ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1

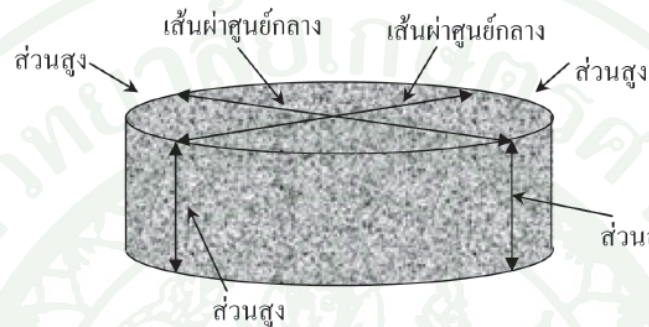
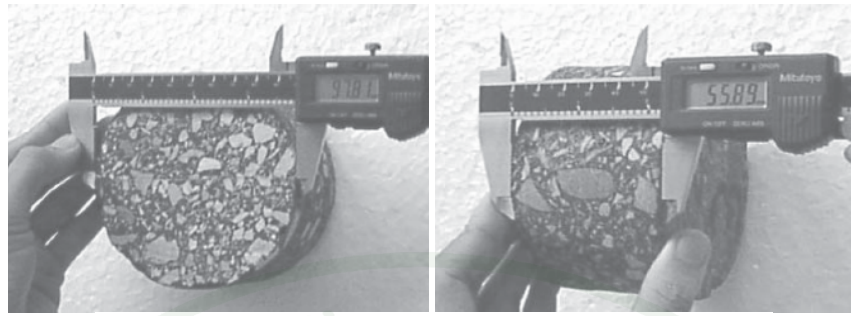
ตารางที่ 24 สรุปรายละเอียดการทดสอบก้อนตัวอย่าง

การทดสอบ	จำนวนก้อนตัวอย่าง	
	ห้องปฏิบัติการ (Lab. Mix)	เจาะจากสนาม (Coring)
Resilient Modulus at 5, 25, 40, 50 and 60 °C	3	3
Indirect Tensile Fatigue at 35 °C	15	- *
Dynamic Creep Test at 40 °C	3	3

หมายเหตุ * ไม่มีการทดสอบเนื่องจากข้อจำกัดทางก้อนตัวอย่างที่ไม่เพียงพอ เพราะความหนาแน่นต่ำกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวง

4.1 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test) (อ้างอิงจากมาตรฐาน BS DD 213 และ ASTM D 4123)

1. นำก้อนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของก้อนตัวอย่างด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ด้วยความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 50 โดยทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ครั้ง โดยวัดตั้งฉากกัน และความหนาทำการวัด 4 ครั้ง โดยวัดห่างกัน 90 องศาแล้วหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของก้อนตัวอย่าง

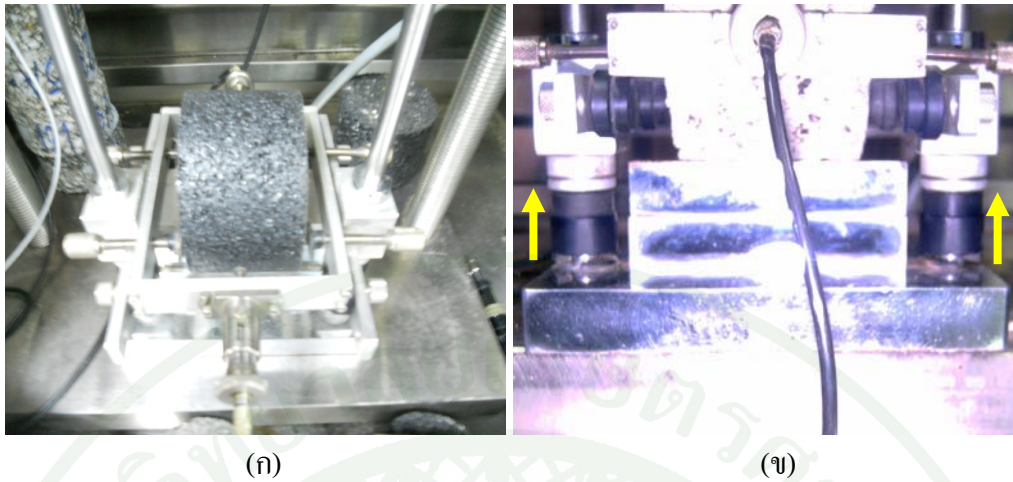


ภาพที่ 50 การวัดขนาดก่อนตัวอย่างในการทดสอบ Indirect Resilient Modulus Test

2. ก่อนการทดสอบจะทำการบ่มตัวอย่างไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control Chamber) เพื่อบ่มอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง เพื่อปรับอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างให้เท่ากับอุณหภูมิทดสอบ โดยงานวิจัยนี้จะทดสอบที่อุณหภูมิ 5 20 35 50 และ 60 องศาเซลเซียส

3. เปิดโปรแกรม UTM 16 V2.05 Indirect Tensile Resilient Modulus Test ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบ Resilient Modulus Test การทดสอบในงานวิจัยนี้จะทดสอบแบบ Strain Control ควบคุมการทำงานของเครื่อง UTM-5P ออกแรงกดแบบกระทำซ้ำในแนวดิ่ง โดยใช้แรงกระทำให้เกิดการขยายตัวของก้อนตัวอย่าง (Target Peak Deformation) ในแนวราบเท่ากับ 5 μm (ตามมาตรฐาน BS DD 213) และกำหนดช่วงเวลาการให้น้ำหนัก (Loading Pulse Width) เท่ากับ 0.1 วินาทีและช่วงเวลาน้ำหนักกระทำซ้ำอีกครั้ง (Pulse Repetition Period) ทุก 1 วินาที (ตามมาตรฐาน ASTM D 4123) โดยรูปร่างของการกดน้ำหนัก (Loading Waveshape) เป็นรูป Haversine

4. นำก้อนตัวอย่างใส่เครื่องทดสอบ เริ่มจากวางตัวอย่างใน Mold (ก) จากนั้นจึงทำการยกจุกสี่ด้านบริเวณด้านล่างขึ้นและหมุนเล็กน้อย (ข) ให้ลอยอยู่ในระดับที่สูงกว่าเดิม แล้วจึงยึดก้อนตัวอย่างด้วยที่ยึดทั้ง 4 ตัวพร้อมขันสกรูยึดให้แน่น (ค) ดังแสดงในภาพที่ 51



(ก)

(ข)



(ค)

ภาพที่ 51 แสดงวิธีการติดตั้งก้อนตัวอย่างกับเครื่องมือทดสอบ

5. นำแกนเหล็กมาวางด้านบนบนก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 52 จากนั้นเลื่อนชุดให้แรงกระทำลงมาให้ชนกับแกนเหล็กพอดี ดังแสดงในภาพที่ 53 จากนั้นจึงปลดจุกค้ำลงทั้งสองด้าน แล้วจึงปรับค่า LVDT 1 (ด้านนอก) ดังแสดงในภาพที่ 54 และค่า LVDT 2 (ด้านใน) ให้มีค่าอยู่ที่ระดับ 70% - 90% ของแถบที่แสดงในโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 55 และเมื่อเตรียมการเสร็จสิ้น จึงเริ่มดำเนินการทดสอบ



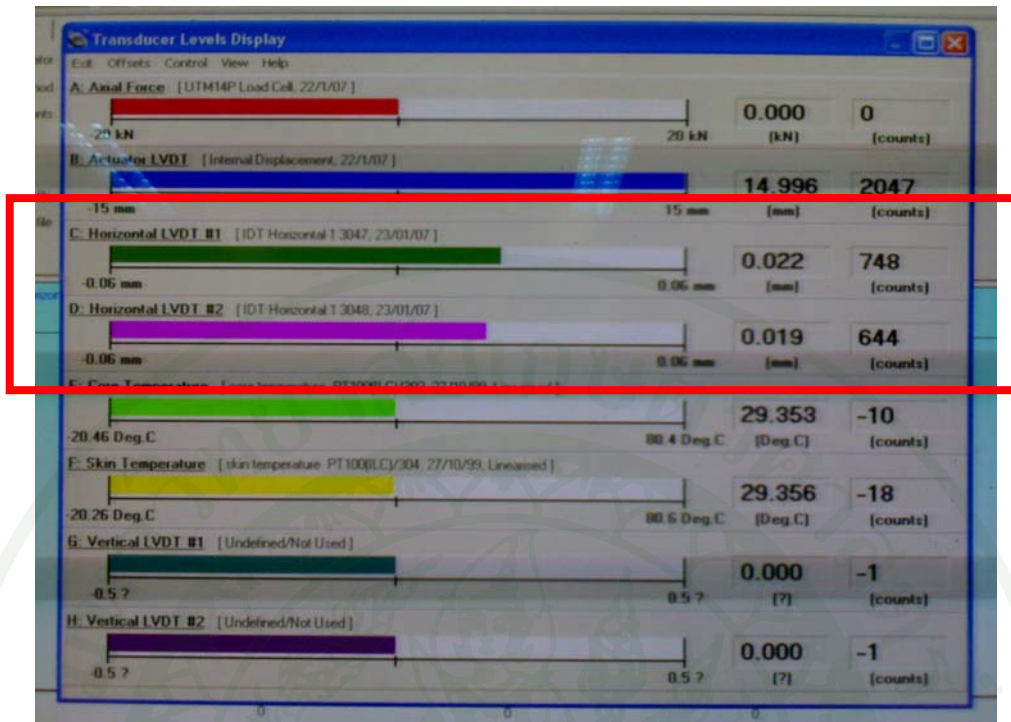
ภาพที่ 52 แสดงการนำแกนเหล็กมาวางด้านบนก่อนตัวอย่าง



ภาพที่ 53 แสดงการเลื่อน Load Sell



ภาพที่ 54 แสดงการปรับค่า LVDT 1



ภาพที่ 55 ค่า LVDT ที่แสดงในโปรแกรมทดสอบ

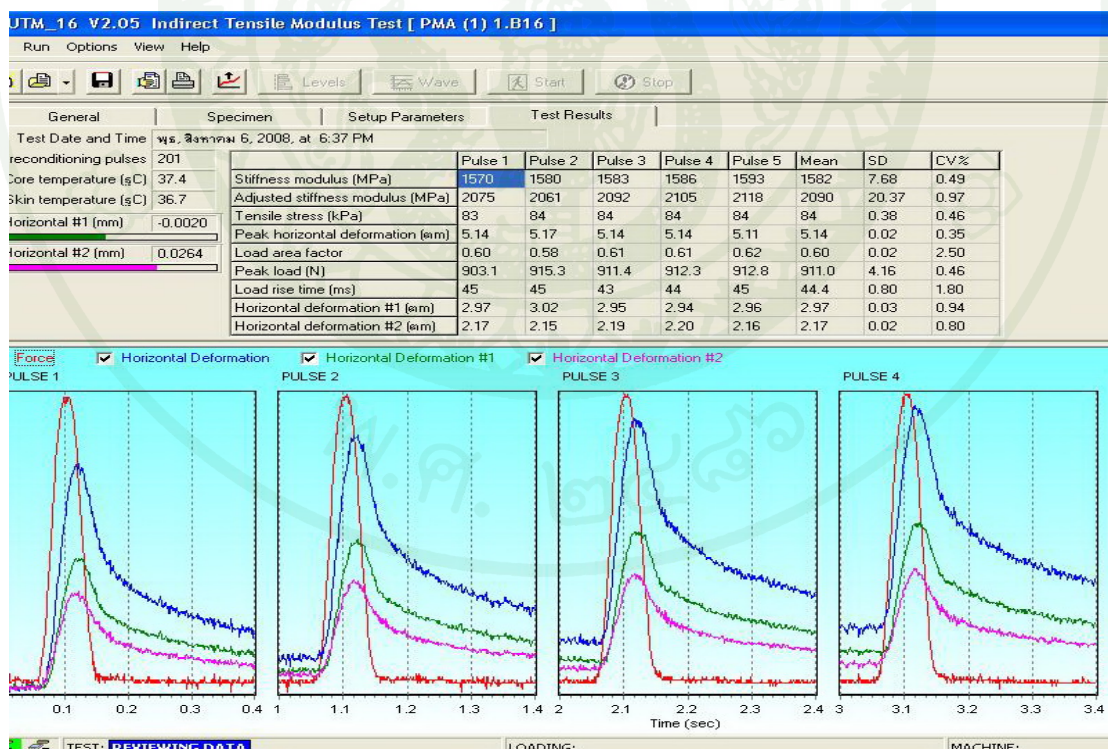
6. การเก็บข้อมูลและการคำนวณค่าโมดูลัสคั้นตัวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของเครื่อง UTM - 5P ทำการทดสอบโดยให้แรงกระทำที่ 200 รอบก่อน เพื่อให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวมีค่าค่อนข้างคงที่ แล้วจึงทำการเก็บข้อมูลค่าโมดูลัสคั้นตัวของรอบที่ 201 - 205 และนำข้อมูล 5 ค่าสุดท้าย มาหาค่าโมดูลัสคั้นตัวเฉลี่ย ทำการทดสอบทั้ง 2 ทิศทาง กำหนดให้ค่าต่างกัน 90 องศาตามแนวที่ขีดไว้ โดยที่ค่าร้อยละของความแตกต่างทั้งสองแกนเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยควรมีค่าต่างกันไม่เกินร้อยละ 10

7. การคำนวณค่าโมดูลัสคั้นตัว จะต้องใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ในตารางที่ 25 ช่วยในการคำนวณ จากโปรแกรมทดสอบดังแสดงในภาพที่ 56

ตารางที่ 25 ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ที่ใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ทดสอบ (องศาเซลเซียส)	ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)
5	0.30
20	0.30
35	0.35
50	0.40
60	0.40

ที่มา: วพ.285 การนำวิธีการออกแบบส่วนผสมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Superpave มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทย, กรมทางหลวง (2555)



ภาพที่ 56 การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากโปรแกรม UTM 16 V2.05

Indirect Tensile Resilient Modulus Test

4.2 การทดสอบค่าความต้านทานต่อการล้าโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test) (อ้างอิงจากมาตรฐาน BS DD ABF: 1995)

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านความต้านทานต่อความล้าที่เกิดขึ้นกับวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวจะทำได้ที่อุณหภูมิ 35°C จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าหน่วยความเครียดที่กระทำอยู่ในช่วง 50 - 200 ไมโครสเตรน (μstrain) ใช้จำนวนรอบของการกระทำซ้ำจนเกิดความเสียหายจากความล้าเท่ากับ 728 - 33,344 รอบ โดยให้น้ำหนักกระทำในลักษณะ Haversine คือ น้ำหนักกระทำ 1 คาบ ใช้เวลา 1.5 วินาที ประกอบไปด้วยช่วง Load-Unload เท่ากับ 0.248 วินาที และ Rest Period เท่ากับ 1.252 วินาที โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำก้อนตัวอย่างมาวัดขนาดความกว้างและความหนา โดยมีขั้นตอนเดียวกับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว
2. ก่อนการทดสอบจะทำการบ่มก้อนตัวอย่างไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 57 เป็นเวลาอย่างน้อยเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ก้อนตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่ากับทั้งผิวด้านในและผิวด้านนอกเพื่อปรับอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างให้เท่ากับอุณหภูมิทดสอบ



ภาพที่ 57 แสดงอุณหภูมิที่แสดงบนเครื่อง UTM-5P

3. เปิดโปรแกรมและกรอกข้อมูลของก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 58 โดยแรงทดสอบเริ่มต้นจะคำนวณจากค่า Estimated Stiffness Modulus และค่า μstrain ที่ต้องการ (จาก

สมการ $P = \frac{\pi E \epsilon A}{2(1+3\nu)}$) ทำการทดสอบเพื่อให้ทราบค่า Stiffness Modulus เริ่มต้นที่แท่งจริงก่อนนำ
แทนค่าในสมการเพื่อหาค่าแรงที่ใช้ทดสอบที่ถูกต้องอีกครั้ง

```

c:\ UTM.EXE
IPC_UTM [F013] V1.05 Repeated Load Indirect Tensile Test
BLK0 FAST JOG+ JOG-

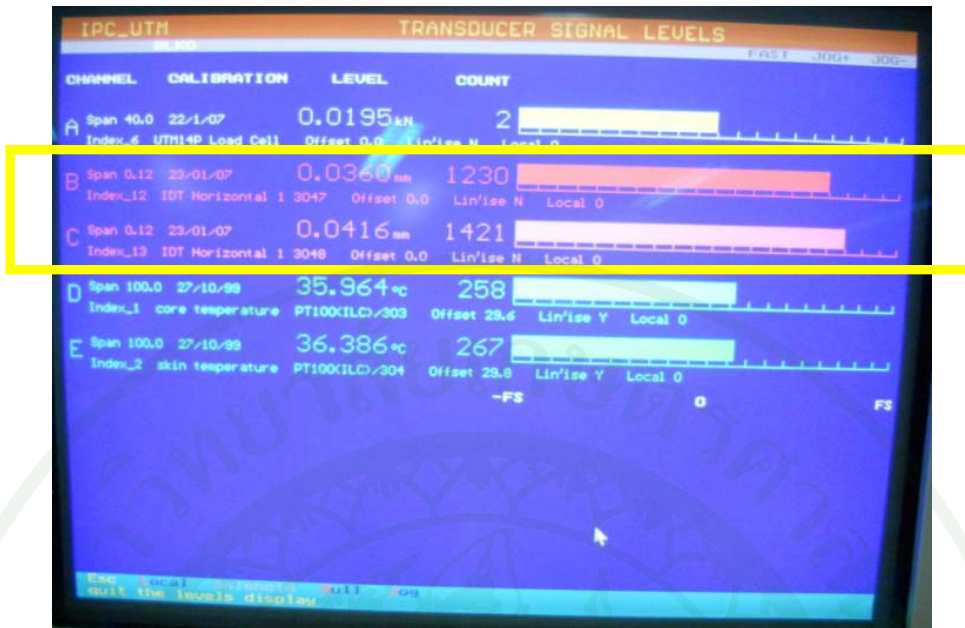
specimen identification: D607054
comment:
comment:
comment:
specimen length (mm): 100.1
specimen diameter (mm): 68.7
pulse period (ms): 1500
pulse width (ms): 248
test loading force (kN): 0.53
Poisson ratio: 0.35
test termination strain (μ): 50000
... or terminal pulse count: 100000
force load cell cal index: 6 [ UTM14P Load Cell ]
radial LVDT #1 cal index: 12 [ IDT Horizontal 1 3047 ]
radial LVDT #2 cal index: 13 [ IDT Horizontal 1 3048 ]
temperature probe 1 cal index: 1 [ core temperature PT100<ILC>/303 ]
temperature probe 2 cal index: 2 [ skin temperature PT100<ILC>/304 ]
archive binary file name: C:\UTM2\UTM-2.28\UTM13BIN\D607054.BIN
ASCII output data file name: C:\UTM2\UTM-2.28\UTM13CSU\D607054.CSU
test variant description: Fatigue Test

Esc=done
  
```

ภาพที่ 58 แสดงโปรแกรมการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากการล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม

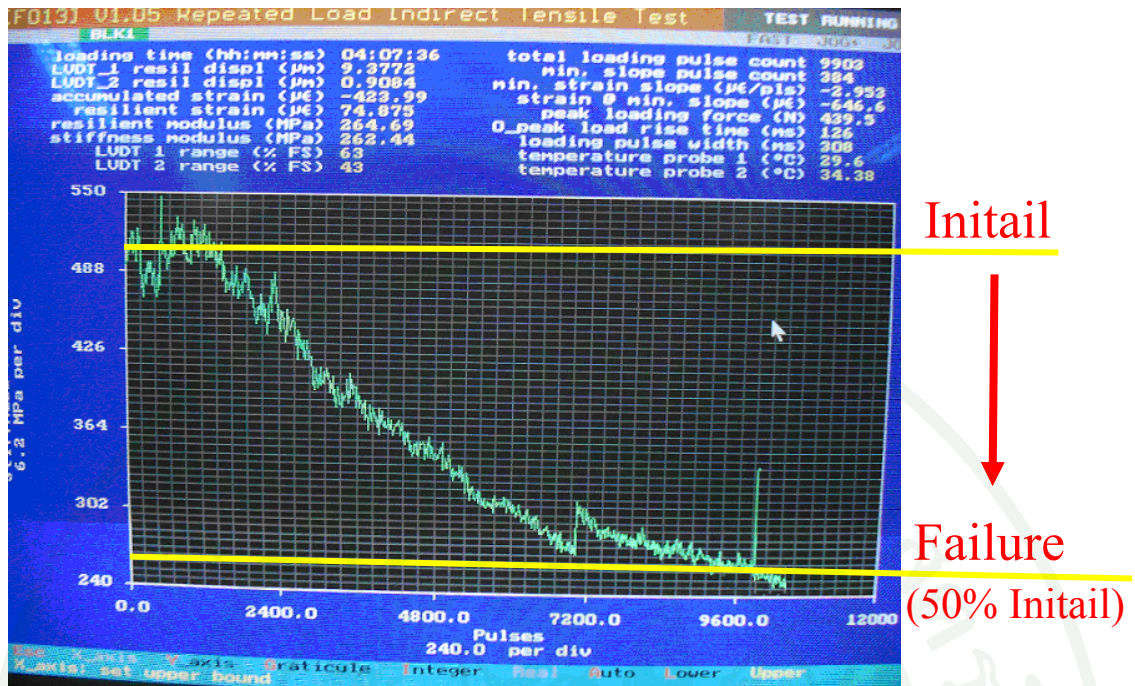
4. ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

5. ปรับค่า LVDT 1 (ด้านนอก) และค่า LVDT 2 (ด้านใน) ให้มีค่าอยู่ที่ระดับ 70% - 90% ของกราฟ ดังแสดงในภาพที่ 59 และเมื่อเตรียมการเสร็จสิ้นจึงเริ่มดำเนินการทดสอบ



ภาพที่ 59 แสดงค่าของ LVDT 1 และ LVDT 2

6. ทำการทดสอบจนกระทั่งค่า Stiffness Modulus ลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่า Stiffness Modulus เริ่มต้น จึงถือว่าก่อนตัวอย่างวิบัติเนื่องจากความล้าและบันทึกค่าจำนวนครั้งที่กระทำพร้อมกับค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นการสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการทำงาน และเก็บข้อมูลผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง UTM-5P ดังแสดงในภาพที่ 60



ภาพที่ 60 แสดงการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงคิงทางอ้อม

4.3 การทดสอบ Dynamic Creep Test (อ้างอิงจากมาตรฐาน AS 2891.12.1)

1. นำก้อนตัวอย่างมาวัดขนาดความกว้างและความหนา โดยมีขั้นตอนเดียวกับการทดสอบค่าโมดูลัสกิ้นตัว

2. ก่อนการทดสอบต้องบ่มตัวอย่างไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง

3. เปิดโปรแกรม UTS005 1.30 Simple Performance Flow Test ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบ Dynamic Creep Test ส่วนแรงดันที่ใช้กระทำกำหนดเป็นวิธี การวิจัยนี้กำหนดให้ใช้แรงดันด้านข้าง (Confining stress) เท่ากับ 220 kPa และแรงดันด้านบน (Deviator stress) เท่ากับ 520 kPa โดยแรงดันนี้ได้จากการคำนวณความเค้นในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจากน้ำหนักเพลลาเดี่ยวมาตรฐานหนัก 18000 ปอนด์ ที่ใช้แรงดันลมยางที่ 100 psi และกำหนด Contact Stress เพื่อกด

ตัวอย่างไว้ที่ร้อยละ 5 ของแรงกระทำด้านบน เท่ากับ 26 kPa กำหนดจำนวนรอบการทดสอบที่ 10,000 รอบ และค่าการยุบตัวระหว่างทดสอบสูงสุด (Max μ strain) ที่ 50,000 ดังแสดงในภาพที่ 61

Specimen information		Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.
Identification	40/50 -1 40C	Diameter (mm)	100.2	100.2					100.2	0.014
Conditioning		Height (mm)	67.3	67.4	67.4	67.6			67.5	0.129
Remarks		Cross-sectional area (mm ²)								7883.9
Test type	Target parameters						Termination parameters			
<input type="radio"/> Flow time	Test temperature (°C)	40	Contact stress (kPa)	26			Max microstrain	50000		
<input checked="" type="radio"/> Flow number	Confining stress (kPa)	220	Creep deviator stress (kPa)	520			Test duration (cycles)	10000		

ภาพที่ 61 รายละเอียดของตัวแปรที่แสดงในโปรแกรม

4. นำก้อนตัวอย่างทากาวบริเวณด้านบนและด้านล่าง เพื่อขจัดหน่วยแรงเค้นเฉือน (Shearing Stresses) นำมาวางไว้ระหว่างแผ่นรอง (Platens) แล้วจึงใส่ถุงยาง (Rubber membrane) โดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศดูดถุงยางเพื่อนำก้อนตัวอย่างใส่เข้าได้ง่ายตามแสดงดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 แสดงวิธีการใส่ถุงยาง

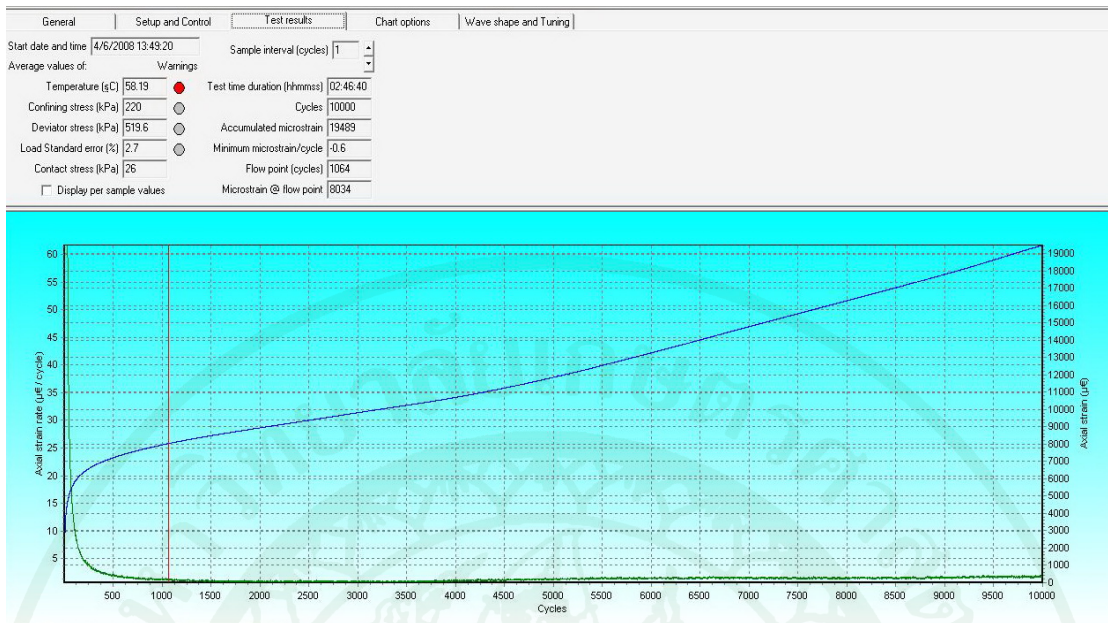
5. เปิดฝาตู้ควบคุมแรงดัน (Triaxial chamber) ของเครื่อง Simple Performance Test เพื่อทำการติดตั้งก้อนตัวอย่างแล้วตู้ควบคุมแรงดัน ก่อนทำการทดสอบรอบประมาณ 15 นาที เพื่อให้

เครื่องทำการปรับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ โดยมีการติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ Dynamic Creep Test แสดงดังภาพที่ 63



ภาพที่ 63 การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทำ Dynamic Creep Test

6. การทดสอบ Dynamic Creep Test จะใช้โปรแกรม UTS005 1.30 Simple Performance Flow Test ควบคุมการทดสอบดังแสดงตามภาพที่ 64 และในการวิจัยในครั้งนี้ กำหนดให้การทดสอบหยุดลงเมื่อ 10,000 รอบ หรือที่ตัวอย่างได้รับแรงกระทำจนเกิดความเครียดสะสม (Accumulated Strain) เท่ากับ $50,000 \mu\text{strain}$ ($50,000 * 10^{-6}$)



ภาพที่ 64 ผลการทดสอบ Dynamic Creep Test ที่ได้จากโปรแกรม UTS005 1.30 Simple Performance Flow Test

การทดสอบระหว่างการก่อสร้าง

การทดสอบระหว่างการก่อสร้างเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุตัวอย่างเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานในงานก่อสร้าง โดยมีรายการในการทดสอบดังนี้

ก) การทดสอบเพื่อหาขนาดคละ (Sieve Analysis)

การทดสอบหาขนาดคละนั้น ได้ทำการทดสอบกับวัสดุตัวอย่างที่มาจาก 2 ลักษณะ คือ วัสดุมวลรวมที่เก็บจากยุงหินร้อน และวัสดุมวลรวมที่ได้จากวัสดุผสมในโรงงานผสม โดยการล้างยางแอสฟัลต์ซึ่งได้ทำการทดสอบลักษณะละ 3 ครั้ง ภาพที่ 65 และ 66 แสดงตัวอย่างหินที่ได้จากยุงหินร้อน และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดคละ

การหาขนาดคละได้ดำเนินการตามมาตรฐานการทดลองของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.205/2517 ซึ่งเป็นการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง สำหรับมวล

รวมในยุงหินร้อน Bin 1 และ Bin 2 สำหรับมวลรวมในยุงหินร้อน Bin 3 และ Bin 4 ใช้วิธีทดสอบแบบไม่ล้าง ตามมาตรฐาน ทล.- ท. 204/2516



ภาพที่ 65 ตัวอย่างหินที่ได้จากยุงหินร้อน



ภาพที่ 66 เครื่องเขย่าและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาขนาดละเอียด

ข) การทดสอบเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ (Bulk Specific Gravity) ของมวลรวม\

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะนั้น ได้ทำการทดสอบกับวัสดุตัวอย่างที่มาจากยุงหินร้อน Bin 1, Bin 2, Bin 3, Bin 4 และ Filler ซึ่งแบ่งการทดสอบตามมาตรฐานการทดลองของกรมทางหลวง 2 มาตรฐาน ได้แก่ ทล.-ท. 207/2517 และ ทล.-ท. 209/2518 ซึ่งเป็นการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ Aggregate ชนิดเม็ดหยาบ และเม็ดละเอียด ตามลำดับ

ค) การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะตรวจสอบอุณหภูมิของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนออกจากโรงงานผสมและเมื่อไปถึงหน้างานที่มีการก่อสร้าง การทดสอบจะใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบก้านวัดเสียบเข้าไปในวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อวัดอุณหภูมิที่ท้ายรถบรรทุกทั้งที่โรงงานผสมและพื้นที่ก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 67 และ 68 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบวัดค่าอุณหภูมิโดยใช้เครื่องยิงเลเซอร์วัดอุณหภูมิของผิวทาง ที่อยู่ในระหว่างขั้นตอนการบดอัด เพื่อให้ทราบถึงอุณหภูมิขณะทำการก่อสร้าง ณ เวลาต่าง ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 69 เพื่อนำอุณหภูมิที่ได้มาทำตารางค่าอุณหภูมิแนะนำต่อไป



ภาพที่ 67 การวัดอุณหภูมิที่ท้ายรถบรรทุก ณ โรงงานผสม



ภาพที่ 68 การวัดอุณหภูมิที่ท้ายรถบรรทุก ณ พื้นที่ก่อสร้าง



ภาพที่ 69 การใช้เครื่องเลเซอร์วัดอุณหภูมิผิวทางที่อยู่ระหว่างการบดอัด

5. การติดตามพฤติกรรมของโครงสร้างทาง

การทดสอบความแข็งแรงถนนด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer

การทดสอบสมรรถนะการใช้งานของผิวทาง ดังแสดงในภาพที่ 70 โดยสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ทดสอบความแข็งแรงของถนนด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) บนแปลงทดสอบ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข.352 ตอน รัชบุรี- บรรจบทางหลวงหมายเลข 309 โดยทำการทดสอบที่ กม.2+680 (ชั้นรองผิวทางไฉ่ยาง AC 60-70) กม.5+600 (AC 40-50) กม.6+590 (AC 60-70) และ กม.13+500 (AC 40-50) ตามแนวล้อซ้าย (Wheel path) ของช่องทางรถบรรทุก (Truck Lane) ผลการทดสอบจะทำให้ทราบค่าการแอ่นตัว (Deflection) ของผิวทางเมื่อรับน้ำหนักกระทำ ประกอบกับความหนาชั้นทาง และอุณหภูมิผิวทางที่วัดได้ในสนาม สามารถนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD) โดยใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัส (Modulus) ของชั้นทางแต่ละชั้น ซึ่งจะแสดงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทางนั้นด้วย



ภาพที่ 70 การทดสอบความแข็งแรงของถนนด้วยเครื่อง FWD

6. การสำรวจความเสียหาย

ทำการเก็บข้อมูลโดยสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ในช่วงระหว่าง กม. 2+480 – กม. 7+000 และ กม. 11+800 – กม. 13+700 ฝั่ง LT และ RT ทำการเก็บข้อมูลความเสียหายทั้งหมด 3 ครั้ง (พฤศจิกายน 2553 มีนาคม 2554 และ มิถุนายน 2554) โดยตรวจพบความเสียหายที่เป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากชั้นรองผิวทางได้ดังนี้

- ร่องล้อ (Rutting)
- การยุบตัวเป็นแอ่ง (Depression)
- การบวมตัว (Swell or Upheaval)
- รอยแตกหนังจระเข้ (Alligator Cracks)
- หลุมบ่อ (Potholes)
- ปะซ่อม (Patching)

ความเสียหายที่เกิดขึ้นใช้วิธีประเมินด้วยสายตา (Visual Inspection) สามารถแบ่งได้ 3 ระดับได้ดังนี้

- เล็กน้อย (Low)
- ปานกลาง (Medium)

- สูง (High)

โดยรายละเอียดการเก็บข้อมูลจะอยู่ในภาคผนวก

7. วิเคราะห์และสรุปผล

สรุปผลการก่อสร้างแปลงทดสอบผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 บนทางหลวงหมายเลข 352 ตั้งแต่กระบวนการผลิต ขนส่ง และก่อสร้าง แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการก่อสร้างวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้าง

เปรียบเทียบผลการทดสอบก่อนตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ กับตัวอย่างที่เจาะจากสนาม ตามวิธีทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ Indirect Tensile Resilient Modulus Indirect Tensile Fatigue และ SPT Dynamic Creep โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50

สรุปผลการตรวจสอบพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นภายหลังจากการเปิดใช้งาน ได้แก่ ผลการทดสอบ Falling Weight Deflectometer ผลการเก็บข้อมูลความลึกของร่องล้อ รวมไปถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นในชั้นผิวทาง

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. รวบรวมข้อมูลการก่อสร้างของงานโครงการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์ ทางหลวงแผ่นดิน หมายเลข 352 ตอน รัชบุรี- บรรจบทางหลวงหมายเลข 309 ระหว่าง กม. 2+480 – กม. 7+000 และ กม. 11+800 – กม. 13+700 ผังขาเข้าและขาออกโดยใช้ผิวทางแบบ AC 40-50 AC 60-70 และ PMA ตั้งแต่กระบวนการผลิต การขนส่ง การปู และขั้นตอนการบดทับ
2. เก็บตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยจากทางหลวงหมายเลข 352 ขณะดำเนินการก่อสร้างมา ดังนี้
 - ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Loose-Mix) เก็บตัวอย่างวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ที่โรงผสม (Mixing Plant) โดยตัดจากท้ายรถบรรทุกใส่ถังที่เตรียมไว้
 - เจาะจากสนาม (Coring) ใช้เครื่องเจาะที่เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง
3. นำตัวอย่างที่ได้มาดำเนินการเตรียมตัวอย่างต่อดังนี้
 - ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต นำมาให้ความร้อนก่อนบดอัดด้วยเครื่องไจราตอรีและ ก่อนการทดสอบจะต้องหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ได้ ออกแบบไว้ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 2.387-2.411 gm./ml.
 - ตัวอย่างที่เจาะจากสนาม ทำการตัดก้อนตัวอย่างให้ได้ชั้นรองผิวทาง จากนั้นทำการ แต่งผิว (Trim) ให้เรียบร้อยก่อนการทดสอบ และมีค่าความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของค่า ความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างจากห้องทดลองที่ใช้เปรียบเทียบประจำวัน ซึ่งมีค่า 2.404 – 2.409 gm./ml. ดังนั้นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนามต้องมีค่าความหนาแน่นไม่ น้อยกว่า 2.356 gm./ml.
4. ทำการทดสอบคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ โดยมีวิธีทดสอบดังนี้
 - Indirect Tensile Resilient Modulus
 - Indirect Tensile Fatigue
 - SPT Dynamic Creep
5. ติดตามสภาพความแข็งแรงในชั้นผิวทาง

ทางสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ได้ทำการทดสอบเครื่องมือในสนาม ที่ก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางชนิด 40-50 โดยการทดสอบ Falling Weight Deflectometer เพื่อวัด ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และอุณหภูมิ เพื่อนำไปใช้ในการ วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างถนน

6. สํารวจความเสียหายในสนาม

ทางสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ได้ทำการสำรวจความเสียหายใน สนามหลังจากการเปิดใช้งานถนนแล้ว ทางเจ้าหน้าที่จะทำการวัดความลึกของรอยร่องล้อโดยใช้ไม้ บรรทัดวัดความเรียบ (Straightedge) และลิ้มวัดความลึก (Wedge) และสำรวจความเสียหายประเภท อื่นเพิ่มเติม หลังจากถนนเปิดให้มีการสัญจร

7. วิเคราะห์และสรุปผล

สรุปผลการก่อสร้างแปลงทดสอบ ตั้งแต่กระบวนการผลิต ขนส่ง และก่อสร้าง แล้วนำ ข้อมูลที่ได้มาทำตารางแนะนำอุณหภูมิที่ควรใช้ในการก่อสร้างของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ ยาง AC 40-50

เปรียบเทียบผลการทดสอบตามวิธีทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ Indirect Tensile Resilient Modulus Indirect Tensile Fatigue และ SPT Dynamic Creep ทั้งก่อนทั้งตัวอย่างที่เตรียม ในห้องปฏิบัติการ และตัวอย่างที่เจาะจากสนาม

สรุปผลการติดตามพฤติกรรมภายหลังจากการเปิดใช้งาน ได้แก่ ผลการทดสอบ Falling Weight Deflectometer รวมไปถึงผลการสำรวจความเสียหายประเภทต่างๆที่เกิดขึ้น

ผลและวิจารณ์

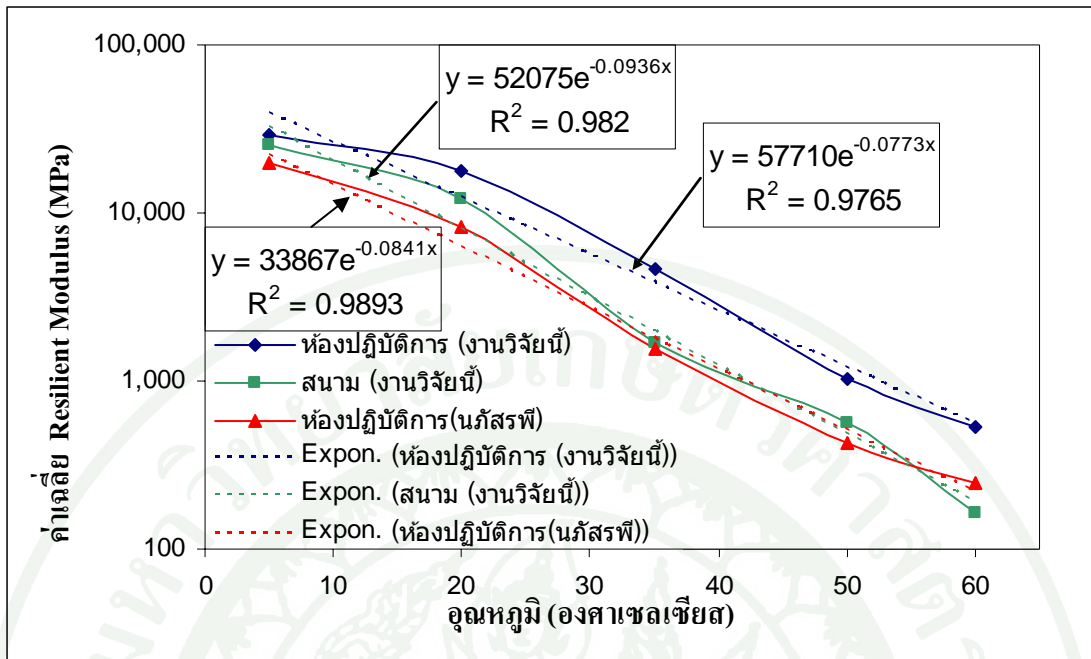
ผลการตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบทั้ง 2 ทิศทางแต่ละตัวอย่างจะได้ค่าร้อยละของความแตกต่างทั้งสองแกนเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย (ร้อยละความแตกต่าง: $\frac{|X_1 - X_2| * 100}{X}$) ไม่เกินร้อยละ 10 ตารางที่ 26 ได้แสดงค่าเฉลี่ยผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ โดยรายละเอียดผลการทดสอบจะอยู่ในภาคผนวก และเนื่องจากตัวอย่างที่เจาะจากสนามเป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ที่เริ่มใช้ในงานก่อสร้างจริงเป็นแห่งแรก จึงยังไม่สามารถทราบช่วงของผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงนำค่ามาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของงานวิจัยอื่นซึ่งเป็นของคุณนภัสรพี (2551) โดยวัสดุมวลรวมคือหินปูนนำมาจากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 3 สายเลียงเมืองชลบุรีผสมกับยาง AC 40-50 ร้อยละ 5.1 โดยน้ำหนักของมวลรวมชั้น Wearing Course ที่ทำการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และจากผลการทดสอบพบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างที่เจาะจากสนาม และผลการทดสอบของคุณนภัสรพีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่เจาะจากสนามมีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของคุณนภัสรพีมากกว่าที่เตรียมในห้องปฏิบัติการดังแสดงในภาพที่ 71 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการมีค่าสูงที่สุดตามด้วยตัวอย่างที่เจาะจากสนาม และ ผลงานวิจัยของคุณนภัสรพี ตามลำดับ

ตารางที่ 26 ผลการทดสอบโมดูลัสคั้นตัวที่อุณหภูมิ 5, 20, 35, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ. (C °)	ตัวอย่าง ที่	ห้องปฏิบัติการ			สนาม			นักษรพี (2551)		
		ถพ.	M _R (MPa)	แตก ต่าง (%)	ถพ.	M _R (MPa)	แตก ต่าง (%)	ถพ.	M _R (MPa)	แตก ต่าง (%)
5	1	2.399	29,894	0.37	2.367	26,073	1.88	2.398	18,881	6.06
	2	2.39	29,030	0.26	2.370	24,499	1.77	2.401	20,300	0.43
	3	2.387	27,546	0.75	2.369	25,012	7.14	2.395	20,526	4.58
	avg.	2.392	28,823		2.369	25,195		2.398	19,902	
20	1	2.399	18,091	5.26	2.367	12,784	6.55	2.398	8,411	0.48
	2	2.39	16,825	4.98	2.370	13,209	1.64	2.401	8,344	1.93
	3	2.387	17,732	3.12	2.369	10,789	9.25	2.395	8,176	1.90
	avg.	2.392	17,549		2.369	12,261		2.398	8,310	
35	1	2.399	4,675	4.28	2.367	1,734	6.29	2.398	1,440	17.64
	2	2.39	4,567	9.80	2.370	1,713	4.50	2.401	1,650	12.48
	3	2.387	4,518	8.35	2.369	1,542	3.70	2.395	1,607	11.02
	avg.	2.392	4,587		2.369	1,663		2.398	1,566	
50	1	2.399	1,085	1.92	2.367	464	28.45	2.398	450	28.44
	2	2.39	1,062	4.54	2.370	574	13.43	2.401	420	3.10
	3	2.387	916	8.89	2.369	637	4.24	2.395	416	0.96
	avg.	2.392	1,021		2.369	558		2.398	429	
60	1	2.399	626	3.02	2.367	171	19.88	2.398	256	8.59
	2	2.39	469	7.81	2.370	179	2.80	2.401	227	6.17
	3	2.387	489	3.62	2.369	145	9.00	2.395	265	2.26
	avg.	2.392	528		2.369	165		2.398	249	



ภาพที่ 71 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

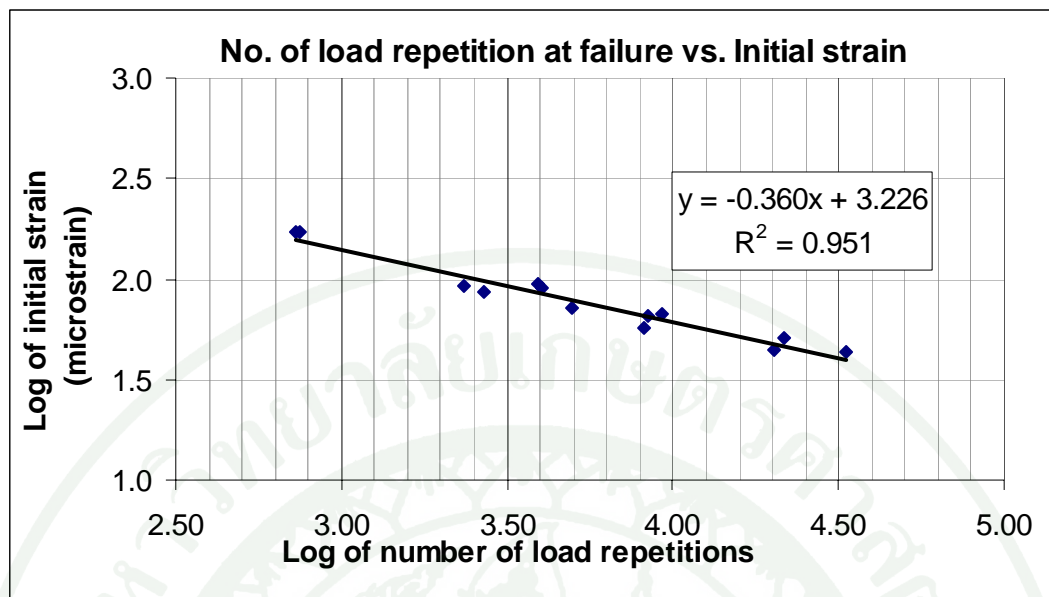
ผลการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)

จากการทดสอบหาความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม ได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 27 และได้นำผลการทดสอบไปสร้างกราฟและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเครียดที่เกิดขึ้น (Strain) กับ จำนวนรอบที่วัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะรับแรงกระทำก่อนจะเกิดความเสียหาย (Fatigue Life) ดังแสดงในภาพที่ 72

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนรอบ กับ ค่าความเครียด ได้ทำการตัดข้อมูลที่ใช้พิจารณาออก 2 ค่าจากข้อมูลทั้งหมด 15 ค่า (ก้อนที่ 3 และ 8) เพื่อให้ค่า Level of Confidence (R^2) ของสมการความสัมพันธ์ระหว่าง จำนวนรอบ กับ ค่าความเครียดมีค่าสูงเกินร้อยละ 95 ซึ่งค่า R^2 ภายหลังจากตัดข้อมูลออกแล้วจะมีค่าเท่ากับ 0.951

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบการแตกร้าวจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อมของวัสดุผสมแอสฟัลต์
คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50

แหล่งที่มา	ตัวอย่าง ที่	Initial stiffness modulus (MPa)	ϵ_x	σ_x	จำนวนรอบของการกระทำซ้ำ จนเกิดความเสียหายจากความล้า
	1	4,223	170	351	746
	2	4,219	170	350	728
	3	4,010	178	347	1,144
	4	4,004	87	169	2,696
	5	3,726	94	170	3,920
	6	3,789	92	169	2,340
	7	4,318	71	150	4,992
ห้องปฏิบัติการ	8	4,518	68	149	4,392
	9	3,443	91	152	4,008
	10	3,910	66	126	9,280
	11	4,575	57	127	8,144
	12	3,928	65	124	8,448
	13	4,294	43	91	33,344
	14	3,624	51	91	21,568
	15	4,185	45	91	20,160



ภาพที่ 72 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของค่าความเครียดเริ่มต้น (Log of initial strain) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40-50 กับ ค่าลอการิทึมของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 27 กับ ภาพที่ 72 แล้วจะพบว่า ก้อนตัวอย่างที่ถูกกระทำด้วยค่า ϵ_{mi} สูงกว่าจะมีค่า N_f ที่ต่ำกว่าซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีด้านความล้า และเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่เกิดขึ้น (Strain) กับ จำนวนรอบวัสดุกับผลงานวิจัยของคุณเสกชัย (2551) (ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{mi} และ N_f ของผิวทางที่เจาะจากสนามทั้ง 34 สายทางทั่วประเทศไทย โดยไม่แยกประเภทตามปริมาณการจราจร,อายุการบริการ และไม่ทราบถึงขนาดคละของหิน,ปริมาณยาง) และคุณชันวิน (2555) (วัสดุมวลรวมคือหินปูนจากทางหลวงหมายเลข 3 สายเลี่ยงเมืองชลบุรีผสมกับยาง AC 40-50 ร้อยละ 5.1 โดยน้ำหนักของมวลรวม ชั้น Wearing Course ที่ทำการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ) จะมีค่าดังนี้

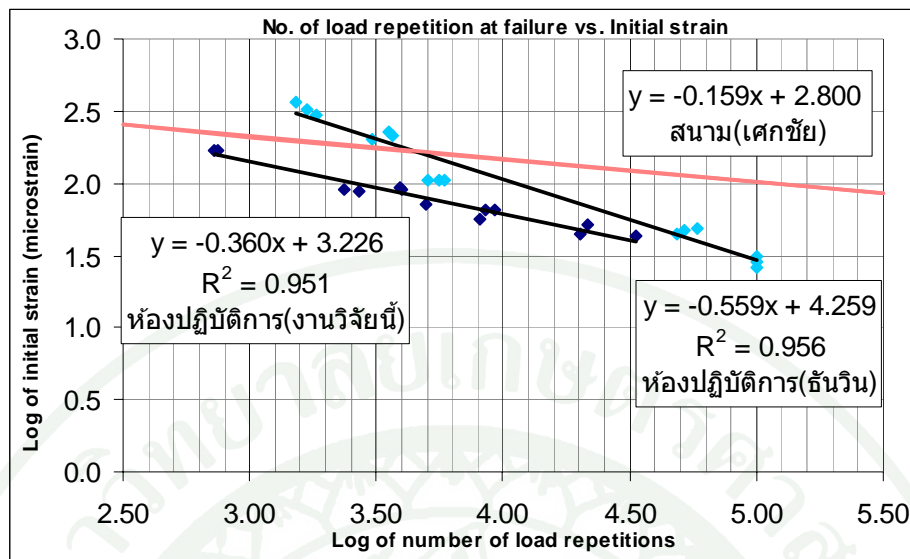
งานวิจัยนี้	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{mi} และ N_f
ห้องปฏิบัติการ	$\log \epsilon_{mi} = 3.326 - 0.360 \log N_f$
ผลงานวิจัยอื่น	
สนาม (เสกชัย)	$\log \epsilon_{mi} = 2.800 - 0.159 \log N_f$
ห้องปฏิบัติการ (ชันวิน)	$\log \epsilon_{mi} = 4.259 - 0.559 \log N_f$

จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 28 ที่ระดับความเครียดเท่ากับ 200 μStrian พบว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีจำนวนรอบกระทำซ้ำที่คำนวณได้ต่ำที่สุดตามด้วยผลของคุณเสกชัย และคุณชันวิน ตามลำดับ

ตารางที่ 28 จำนวนรอบกระทำซ้ำที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์โดยระบุค่าความเครียดและความเค้น

งานวิจัย	ϵ_x (200 μStrian)
ห้องปฏิบัติการ (งานวิจัยนี้)	423
สนาม (เสกชัย)	1,375
ห้องปฏิบัติการ (ชันวิน)	3,367

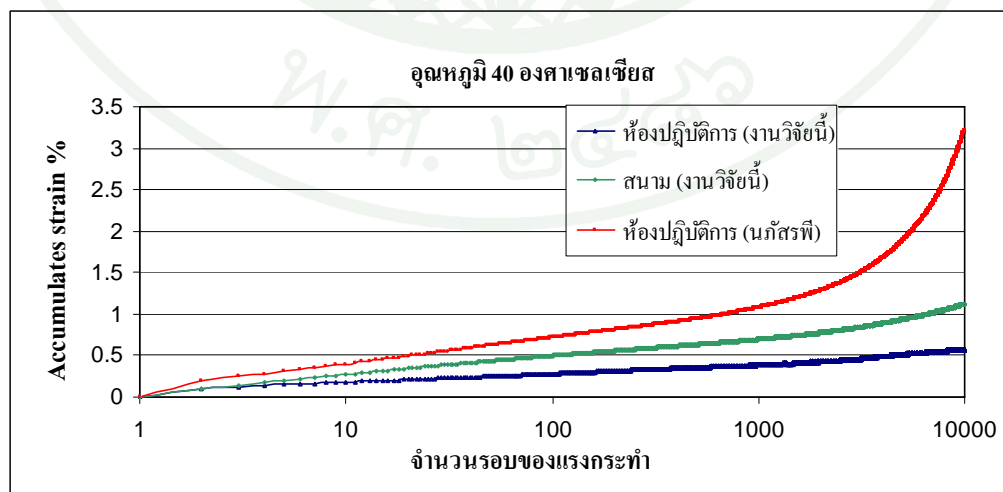
เมื่อเปรียบเทียบสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{mi} และ N_f ดังแสดงในภาพที่ 73 พบว่าตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการจะมีความต้านทานต่อการแตกร้าต่ำกว่าผลการทดสอบของทั้งคุณเสกชัย และชันวิน และที่แรงกระทำที่ระดับความเครียดตั้งแต่ 200 μStrian ขึ้นไป ผลการทดสอบของคุณชันวินจะมีความต้านทานต่อการแตกร้าสูงกว่าผลการทดสอบของคุณเสกชัย



ภาพที่ 73 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของค่าความเครียดเริ่มต้น (Log of initial strain) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางเกรด 40-50 กับ ค่าลอการิทึมของจำนวนรอบการกระทำซ้ำ (Log of number of load repetitions) เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยอื่น

ผลการทดสอบ Dynamic creep test

ตารางที่ 29 และภาพที่ 74 ได้แสดงผลการทดสอบค่า Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สำหรับรายละเอียดผลการทดสอบของแต่ละก้อนตัวอย่างอยู่ในภาคผนวก



ภาพที่ 74 ผลการทดสอบการยุบตัวถาวรระหว่างจำนวนรอบกับ Accumulate Strain

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส			
ชนิดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	Total Permanent microstrain	Permanent microstrain per cycle (%)
ห้องปฏิบัติการ (งานวิจัยนี้)	1	4,115	0.41
	2	5,739	0.57
	3	6,995	0.70
	Average	5,617	0.56
สนาม (งานวิจัยนี้)	1	8,860	0.89
	2	11,519	1.15
	3	11,240	1.12
	Average	10,540	1.05
ห้องปฏิบัติการ (นักรพี)	1	17,210	1.72
	2	15,151	1.52
	3	18,218	1.82
	Average	16,860	1.69

จากตารางที่ 29 แสดงผลการทดสอบ Dynamic Creep Test โดยมีจำนวนรอบของการกระทำซ้ำเท่ากับ 10,000 รอบ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภาพที่ 74 แสดงตัวอย่างกราฟผลการทดสอบ Dynamic Creep Test โดยเมื่อพิจารณาผลการทดสอบแล้วจะพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ มีค่าการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งรอบแรงกระทำซ้ำต่ำที่สุด ตามด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนาม และ ผลการทดสอบอื่นของนักรพี (2551) ซึ่งมีค่าการยุบตัวถาวรต่อหนึ่งรอบแรงกระทำซ้ำสูงที่สุด

และนอกจากนี้เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับ Hafeez (2009) ที่ทดสอบหาค่า Plastic Strain โดยเริ่มจากนำมวลรวมขนาดละเอียด (Coarser Gradation) และมวลรวมขนาดละเอียด (Finer Gradation) ชั้น Wearing Course มาผสมกับยาง AC 40-50 เตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ดำเนินทดสอบแบบ Stress Control แรงที่ใช้ในการทดสอบ 500 kPa ให้แรงกระทำซ้ำจำนวน 1800 รอบ โดยปราศจากแรงดันด้านข้าง ได้ผลดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่จำนวนรอบการทดสอบ 1,800 รอบ

อนุหภูมิ 40 องศาเซลเซียส			
ชนิดตัวอย่าง	Stress Level (kPa)	ตัวอย่างที่	Permanent microstrain per cycle (%)
ห้องปฏิบัติการ (งานวิจัยนี้)	520	1	0.327
		2	0.424
		3	0.517
		Average	0.422
สนาม (งานวิจัยนี้)	520	1	0.610
		2	0.765
		3	0.761
		Average	0.712
ห้องปฏิบัติการ (นักรพี)	520	1	1.284
		2	0.403
		3	1.244
		Average	0.977
ห้องปฏิบัติการ (Hafeez)	500	Coarser Gradation	0.946
		Finer Gradation	0.995

จากผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยค่าการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งรอบแรงกระทำซ้ำ (Permanent microstrain per cycle) ของ Hafeez ที่ใช้มวลรวมขนาดละเอียดมีค่าการยุบตัวถาวรสูงที่สุด ตามด้วยของคุณนักรพี, Hafeez ที่ใช้มวลรวมขนาดละเอียด และตัวอย่างที่เจาะจากสนาม ซึ่งมีค่าการยุบตัวต่ำที่สุด ตามลำดับ และหากผลการทดสอบของ Hafeez ทดสอบที่ Stress Level เท่ากัน (520kpa) ย่อมส่งผลต่อค่า Permanent microstrain per cycle ที่สูงขึ้น

ผลการติดตามพฤติกรรมบนแปลงทดสอบภายหลังการเปิดใช้งาน

ผลการติดตามสภาพความแข็งแรงถนนด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer

เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยการยุบตัวสูงสุด (Peak D_0) ที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางใต้จุดทดสอบ (Center Deflection) ที่ใช้แรงดันเท่ากับ 754 kPa ทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ทำการเก็บข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง หลังจากถนนเปิดใช้งานเป็นเวลาประมาณ 1 เดือน 4 เดือน และ 27 เดือน ตามลำดับ ทั้งในฝั่ง LT และ RT แต่ฝั่ง RT นั้นมีค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยที่สูงกว่าจึงเหมาะสมในการพิจารณามากกว่า ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกวิเคราะห์เฉพาะฝั่ง RT ได้ผลการเก็บข้อมูลดังตารางที่ 31 โดยรายละเอียดการเก็บข้อมูลอยู่ในภาคผนวก

ตารางที่ 31 ค่าการแอ่นตัวของผิวทาง ที่จุดทำการทดสอบต่างๆ

ช่วงกม.	ยางชั้น รองผิวทาง	Stress (kPa)	ค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวสูงสุด (ไมโครเมตร)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2+480 - 2+680	AC 60-70	754	241.9	294.0	410.4
5+400 - 5+600	AC 40-50		229.6	237.3	600.2
6+390 - 6+590	AC 60-70		240.0	313.6	578.2
13+200 - 13+500	AC 40-50		168.4	184.8	183.3

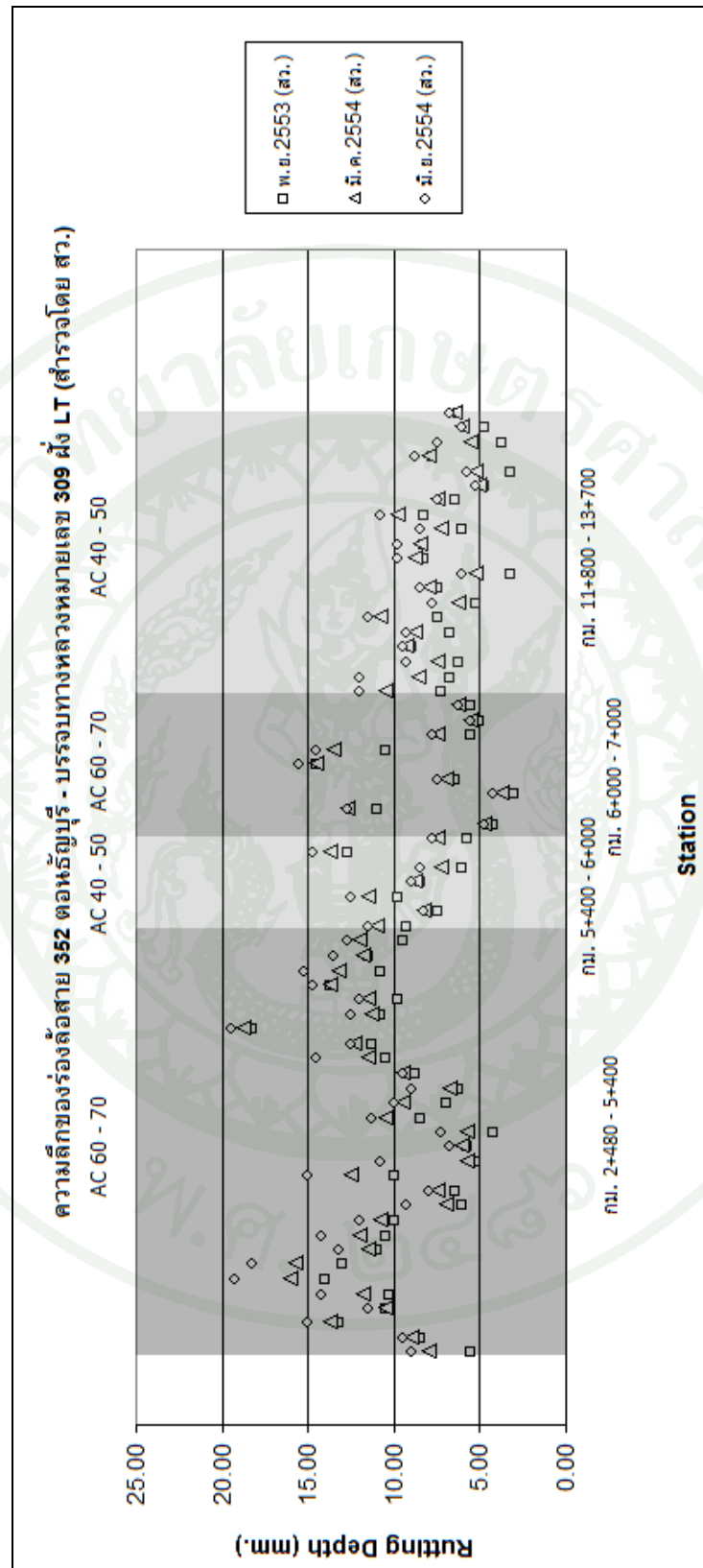
จากผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวที่ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือ FWD ค่าการแอ่นตัวของถนนช่วงที่มีชั้นรองพื้นทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 มีค่าต่ำกว่าช่วงที่ใช้ยาง AC 60-70 และจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นตามอายุของการเปิดให้บริการ นอกจากนี้ค่าการแอ่นตัวจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 3 ซึ่งสูงกว่าครั้งที่ 1 และ 2 อย่างชัดเจน บริเวณช่วงก่อสร้างที่ 1 (กม. 2+480 – กม. 7+000) มีความเป็นไปได้ว่าถนนอาจเริ่มเกิดความเสียหายแล้ว ซึ่งหากพิจารณาจากความเสียหายประเภทรอยแตกหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆก็จะพบว่า ค่าการแอ่นตัวที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นสอดคล้องกับความเสียหายประเภทรอยแตกหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเช่นเดียวกัน

ผลการสำรวจความเสียหาย

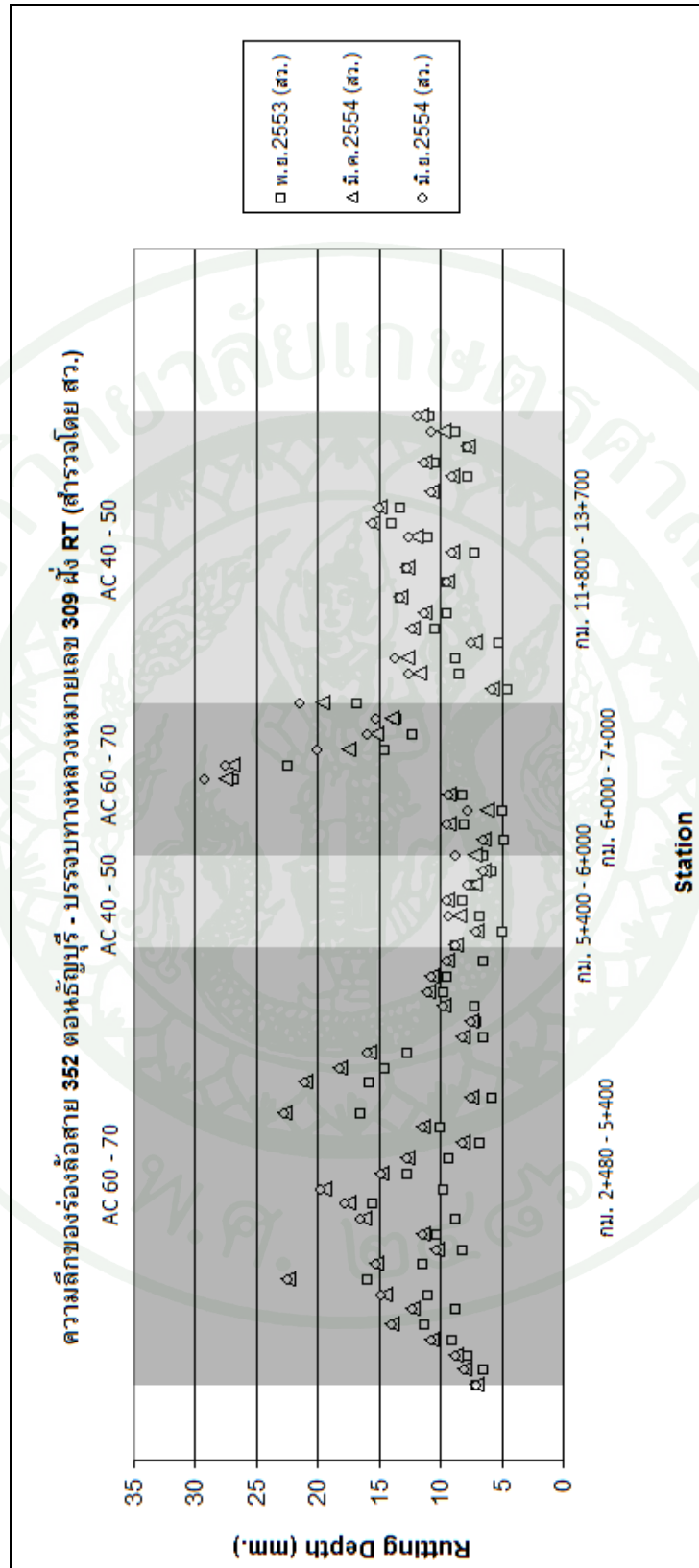
เป็นการเก็บข้อมูลความเสียหายของถนนสาย 352 ตอนชัยบุรี - บรรจบทางหลวงหมายเลข 309 ทั้งฝั่ง LT และ RT ของช่วง กม.2+480 - 5+400 (ใช้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับยางชนิด AC 60-70 ในชั้นรองผิวทาง) กม.5+400 – 6+000 (AC 40-50) กม.6+000 – 7+000 (AC 60-70) และ กม.11+800 – 13+700 (AC 40-50) โดยสำรวจความสึกของร่องล้อหลังจากเปิดใช้งาน 3 ครั้ง ในเดือนพฤศจิกายน 2553 มีนาคม 2554 และ มิถุนายน 2554 ได้ผลดังตารางที่ 32 กับในภาพที่ 75 และ 76 จากผลการเก็บข้อมูลความสึกของร่องล้อพบว่า ช่วงของถนนที่ใช้แอสฟัลต์คอนกรีตผสมกับยางชนิด 40-50 สามารถช่วยลดความสึกของร่องล้อในฝั่ง LT และ RT ได้สูงถึงร้อยละ 15.3 และ 48.6 ตามลำดับ ส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นสรุปได้ดังตารางที่ 33 และ 34 และรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก จากผลการเก็บข้อมูลความเสียหายพบว่า ประเภทของความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นบนชั้นผิวทาง ได้แก่ ร่องล้อ (Rutting) และรอยแตกหนังจระเข้ (Alligator crack)

ตารางที่ 32 ความลึกของร่องล้อในแต่ละช่วง

วันทดสอบ	ช่วงกม.	ยางชั้น		LT		RT		
		รองผิวทาง	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
ครั้งที่ 1 พฤศจิกายน 2553	กม. 2+480 - 2+540	AC 60-70	18.25	4.25	9.67	16.5	5.75	10.02
	กม. 5+400 - 6+000	AC 40-50	12.75	5.75	8.38	8.25	5	6.58
	กม. 6+000 - 7+000	AC 60-70	14.5	3	7.3	26.75	4.75	13.23
	กม.11+800 - 13+700	AC 40-50	9	3.25	6.32	14	4.5	9.67
	กม. 2+480 - 2+540	AC 60-70	18.75	5.75	10.89	22.75	7	12.87
ครั้งที่ 2 มีนาคม 2554	กม. 5+400 - 6+000	AC 40-50	13.75	7.25	9.5	9.5	6.5	7.67
	กม. 6+000 - 7+000	AC 60-70	14.5	3.75	8.6	27.5	6.25	15.21
	กม.11+800 - 13+700	AC 40-50	10.75	5	7.49	15.5	5.75	10.95
	กม. 2+480 - 2+540	AC 60-70	19.5	6.75	12.39	22.75	7	12.91
ครั้งที่ 3 มิถุนายน 2554	กม. 5+400 - 6+000	AC 40-50	14.75	7.75	10.13	9.5	6.5	8.13
	กม. 6+000 - 7+000	AC 60-70	15.5	4.25	9.08	29.25	6.5	16.24
	กม.11+800 - 13+700	AC 40-50	12	5.25	8.42	15.5	5.75	11.15
	กม. 2+480 - 2+540	AC 60-70	19.5	6.75	12.39	22.75	7	12.91



ภาพที่ 75 แสดงความลึกของร่องล้อที่เกิดขึ้นหลังจากการเปิดใช้งานตามช่วงเวลาต่างๆในฝั่ง LT



ภาพที่ 76 แสดงความลึกของร่องล้อที่เกิดขึ้นหลังจากการเปิดใช้งานตามช่วงเวลาต่างๆในฝั่ง RT

ตารางที่ 33 สรุปลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ฝั่ง LT

ฝั่ง LT	ช่วงระหว่าง	กม. 2+480 - 5+400			กม. 5+400 - 6+000			กม. 6+000 - 7+000			กม. 11+800 - 13+700		
		ยางชั้นรองผิวทาง	AC 60/70		AC 40/50		AC 60/70		AC 40/50				
ลักษณะความเสียหาย	วัดครั้งที่	จำนวน (จุด)	พื้นที่	ร้อยละ	จำนวน (จุด)	พื้นที่	ร้อยละ	จำนวน (จุด)	พื้นที่	ร้อยละ	จำนวน (จุด)	พื้นที่	ร้อยละ
			(ม. ²)	ความเสียหาย		(ม. ²)	ความเสียหาย		(ม. ²)	ความเสียหาย		(ม. ²)	ความเสียหาย
Pot Hole	1	5	0.89	0.0018							1	0.25	0.001
หลุมบ่อ	2	5	0.89	0.0018							1	0.25	0.001
	3	5	0.89	0.0018							1	0.25	0.001
Patching รอยปะซ่อม	1	1	0.04	0.00008	2	21.3	0.21	1	70	0.92			
	2	1	0.04	0.00008	2	21.3	0.21	1	70	0.92			
	3	1	0.04	0.00008	3	27.3	0.27	1	70	0.92			
Alligator crack หนังจระเข้	1												
	2												
	3	15	1040	2.10	3	190	1.86	3	275	3.62			
Depression การยุบตัว เป็นแอ่ง	1												
	2												
	3	1	10	0.02	1	10	0.10	1	10	0.13			

ตารางที่ 34 สรุปลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ฝั่ง RT

ฝั่ง RT	ช่วงระหว่าง	กม. 2+480 - 5+400			กม. 5+400 - 6+000			กม. 6+000 - 7+000			กม. 11+800 - 13+700		
ลักษณะ ความเสียหาย	ข้างขึ้นรองผิวทาง	AC 60/70			AC 40/50			AC 60/70			AC 40/50		
	วัดครั้งที่	จำนวน (จุด)	พื้นที่ (ม. ²)	ร้อยละ ความเสียหาย	จำนวน (จุด)	พื้นที่ (ม. ²)	ร้อยละ ความเสียหาย	จำนวน (จุด)	พื้นที่ (ม. ²)	ร้อยละ ความเสียหาย	จำนวน (จุด)	พื้นที่ (ม. ²)	ร้อยละ ความเสียหาย
Pot Hole	1							2	0.13	0.002	1	0.25	0.0008
หลุมบ่อ	2							2	0.13	0.002	1	0.25	0.0008
	3							2	0.13	0.002	1	0.25	0.0008
Patching	1	5	24.79	0.05	3	26	0.25						
รอยปะซ่อม	2	5	24.79	0.05	3	26	0.25						
	3	5	24.79	0.05	3	26	0.25						
Alligator crack	1	8	332	0.67	1	15	0.15						
หนังจระเข้	2	8	332	0.67	1	15	0.15						
	3	25	1,543	3.11	2	115	1.13	8	652	8.58	5	325	1.01
Depression	1	3	8	0.02				5	172	2.26	1	1	0.003
การยุบตัวเป็นแอ่ง	2	4	65	0.13				6	176	2.32	1	1	0.003
	3	4	65	0.13				6	176	2.32	1	1	0.003
Swell or Upheaval	1										1	8.75	0.027
การบวมตัว	2										1	8.75	0.027
	3										1	8.75	0.027

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการก่อสร้างถนนชั้นรองผิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และผลการติดตามผิวทางภายหลังจากการเปิดใช้งาน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ขั้นตอน เครื่องจักรและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต ขนส่ง และก่อสร้างวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 นั้นไม่แตกต่างจากขั้นตอน เครื่องจักรและอุปกรณ์ กระบวนการผลิต ขนส่ง และก่อสร้างวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 ตามมาตรฐานที่ทล.-ม. 408/2532 ของกรมทางหลวง ยกเว้นอุณหภูมิซึ่งควรใช้สูงกว่าปกติประมาณ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ใช้นี้มาจากงานวิจัยของกรมทางหลวงในวิธีการทดสอบหาค่าความหนืด (Viscosity) ของยางในห้องปฏิบัติการที่แนะนำให้เพิ่มอุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียสในกระบวนการผลิต และเมื่อดำเนินการก่อสร้างจริงแล้วพบว่าสามารถใช้งานก่อสร้างจริงได้ตามปกติ ไม่พบปัญหาขณะดำเนินการก่อสร้าง

2. ถึงแม้จากการทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 จะพบว่าสามารถผสมและบดทับได้ที่อุณหภูมิเดียวกับวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 แต่ก็ควรกำหนดอุณหภูมิของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ที่ Paver ไว้ที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส เพื่อให้คนงานสามารถดำเนินการเกลี่ยแต่งรอยต่อได้โดยสะดวกซึ่งในความเป็นจริง อุณหภูมิดังกล่าวก็จะสูงกว่าอุณหภูมิในการทำงานจริงที่หน้างานของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 ประมาณ 10 องศาเซลเซียส

3. การเพิ่มอุณหภูมิขึ้นประมาณ 10 องศาเซลเซียสในการผลิต ทำให้ใช้น้ำมันเตาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 ลิตรต่อ 1 ตันของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจากราคาน้ำมันเตาประมาณลิตรละ 17 บาท จะคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องเพิ่มขึ้นประมาณ 8.5 บาทต่อตัน หรือประมาณ 1 บาท/ตร.ม.ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่หนา 5 เซนติเมตร

4. สามารถสรุปคุณสมบัติในกระบวนการผลิต ขนส่ง และก่อสร้าง วัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 เทียบกับคุณสมบัติสำหรับวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 ดังแสดงในตารางที่ 35

5. ผลการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจากห้องทดลองที่ใช้เปรียบเทียบประจำวัน เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง และพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 จะมีค่าเสถียรภาพสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70

6. ผลการทดสอบการค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus test) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมในห้องปฏิบัติการจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนาม และผลงานวิจัยอื่นของคุณณภัสรพี ตามลำดับ ในทุกคุณสมบัติการทดสอบ และจากผลงานวิจัยของคุณณภัสรพี ทำให้ทราบถึงค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 จะมีค่าสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 ซึ่งหมายความว่าวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 สามารถรับน้ำหนักได้สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70 ภายใต้แรงที่ทำให้ตัวอย่างขยายตัวในแนวราบที่ระยะเท่ากัน

7. ผลการทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test) จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{mi} และ N_f ของก้อนตัวอย่างพบว่าความสัมพันธ์เป็นไปตามทฤษฎี คือโดยทั่วไปเมื่อค่า ϵ_{mi} เพิ่มขึ้นค่า N_f จะลดลง และค่าของสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_{mi} และ N_f ของทั้งตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ มีค่าใกล้เคียงกับสมการคุณเสกชัย และคุณธันวิน

8. ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาค่าการยุบตัวถาวรต่อรอบ (Permanent Microstrain per Cycle) พบว่าวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมในห้องปฏิบัติการมีค่าการยุบตัวถาวรต่อรอบต่ำที่สุด ตามด้วยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนาม และผลงานวิจัยอื่นของคุณณภัสรพี ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมในห้องปฏิบัติการมีความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสูงที่สุด ตามด้วยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะจากสนาม และผลงานวิจัยอื่นของคุณณภัสรพี ตามลำดับ

9. จากการตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางชั้นต่างๆ โดยการวัดค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) พบว่าค่า D_0 (Center Deflection) ที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางได้จุดทดสอบของถนนในช่วงที่มีชั้นรองผิวทางเป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 มีค่าการแอ่นตัวต่ำกว่าช่วงที่ใช้ยาง AC 60-70 ซึ่งทำให้ทราบถึงความแข็งแรงของโครงสร้างทางที่มีชั้นรองผิวทางเป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ที่มีค่าสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 60-70

10. จากผลการเก็บข้อมูลความเสียหายของชั้นผิวทางพบว่า ความเสียหายประเภทร่องล้อของถนนในช่วงที่มีชั้นรองผิวทางเป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 จะมีความลึกน้อยกว่าที่ใช้ยาง AC 60-70 ซึ่งหากเปรียบเทียบกันที่ชั้นผิวทางน่าจะเห็นความแตกต่างของความลึกร่องล้อที่ชัดเจนกว่านี้ แต่ปริมาณความเสียหายของถนนประเภทอื่นนั้นยังมีค่าใกล้เคียงกัน ยังแตกต่างกันไม่ชัดเจน จึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่าถนนช่วงที่มีชั้นรองผิวทางเป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ช่วยลดปริมาณความเสียหายประเภทอื่นที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสียหายได้แก่ ความหนาแน่นซึ่งมาจากการบดทับ ขนาดคละของมวลรวม ปริมาณยางในวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ฯลฯ

ตารางที่ 35 ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ขนส่ง และก่อสร้าง วัสดุผสมแอสฟัลต์
คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ยาง AC 60-70 และค่าที่แนะนำสำหรับวัสดุผสมแอสฟัลต์
คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50

กิจกรรม/วัสดุ	อุณหภูมิ (°c)		
	AC 60-70 (ทล.-ม. 408/2532)	AC 40-50 (แปลงทดสอบ)	AC 40-50 (ค่าแนะนำ)
1. ยางเก็บในถัง	< 100	-	< 100
2. ยางที่ใช้งาน	159 ± 8	130	169 ± 8
3. หินที่ Hot Bin	163 ± 8	180*	173 ± 8
4. หินที่ปาก Dryer	-	190	-
5. HMA ที่รถบรรทุก	121-168 (160)	165	131-178 (170)
6. HMA ที่Paver	≥ 120	160	≥ 130**

หมายเหตุ * ค่าจากการประมาณการ

** หากต้องการแต่งรอยต่อโดยสะดวกควรมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส หรือ
สูงกว่าอุณหภูมิของกรณีใช้ยาง AC 60-70 ประมาณ 10 องศาเซลเซียส

ข้อเสนอแนะ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ในงานวิจัยนี้พบว่า มีค่าสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่นที่ทดสอบโดยกรมทางหลวง และจากผลการติดตามพฤติกรรมในสนามด้วยเครื่อง FWD กับการสำรวจสภาพผิวทางด้วยวิธีประเมินด้วยสายตา ทำให้ทราบว่าช่วงของแปลงทดสอบที่ชั้น Binder Course เป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 มีค่าการแอ่นตัวต่ำกว่า และเกิดความเสียหายน้อยกว่า ช่วงอื่นในแปลงทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของกรมทางหลวง ที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 มีค่าโมดูลัสที่สูงกว่า และมีสมรรถภาพที่ดีกว่า AC 60-70 นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางทั้งสองชนิดยังใกล้เคียงกัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความเห็นสอดคล้องกับข้อสรุปจากงานวิจัยของกรมทางหลวงที่แนะนำให้ถนนที่มีปริมาณการจราจรระดับปานกลางถึงสูง ควรมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของยางที่ใช้จาก AC 60-70 มาเป็น AC 40-50

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมทางหลวง. 2535. รายละเอียดและข้อกำหนดการก่อสร้างทางหลวง เล่มที่ 1. กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.
- กฤษณะ จันทโรจิติ. 2551. คุณสมบัติด้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินแกรนิตโดยการเตรียมชั้นในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชยชนันว์ พรหมศร. 2541. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของยางแอสฟัลต์และวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลีเมอร์. รายงานฉบับที่ วพ.166 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- ชนกร ชมพู่รัตน์. 2542. ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการยุบตัวถาวรของแอสฟัลติกคอนกรีต วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ชันวิน สวัสดิ์สานต์ และอภิสิทธิ์ ก่อคำเหม็ง. 2555. การเลือกยางแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต่างๆของถนนในประเทศไทย. รายงานฉบับที่ วพ.284 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- ชันวิน สวัสดิ์สานต์, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, นวพล พรหมจารีย์ และจตุพร ทิพย์ทอง. 2551. การสำรวจสภาพความเสียหายและสาเหตุของความเสียหายหลักของถนนลาดยางในประเทศไทย. รายงานฉบับที่ วพ.261 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- นภัสรพี อนันต์ชัยพงศ์. 2551. คุณสมบัติด้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมกับหินปูนโดยการเตรียมชั้นในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2547. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, ชันวิน สวัสดิ์สานต์ และชนศักดิ์ ไร่กระโทก. 2549. **คุณสมบัติการต้านทาน
ความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เจาะเก็บจากสนาม**. รายงานฉบับที่ วพ. 227
สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง. 2543. **มาตรฐานวิธีทดลอง**. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม,
กรุงเทพฯ.

Hafeez, I. and M.A. Kamal. 2009. **Repeated Load Permanent Deformation Behavior of Mixes
With and Without Modified Bitumens**. Mehran University Resersh Journal of
Engineering & Technology, Volume 30, No. 1, January, pp.15|22.

Hyun, J.L., J.H. Lee and H.M. Park. 2007. **Performance Evaluation of High Modulus Asphalt
Mixtures for Long Life Asphalt Pavements**. Construction and Building Materials 21
pp.1079|1087, Republic of Korea.

Kamal, M.A. and I. Hafeez. 2006. **Field and Laboratory Evaluation of volumetric properties
of Asphaltic concrete**. Department of Civil Engineering. University of Engineering and
Technology, Pakistan.

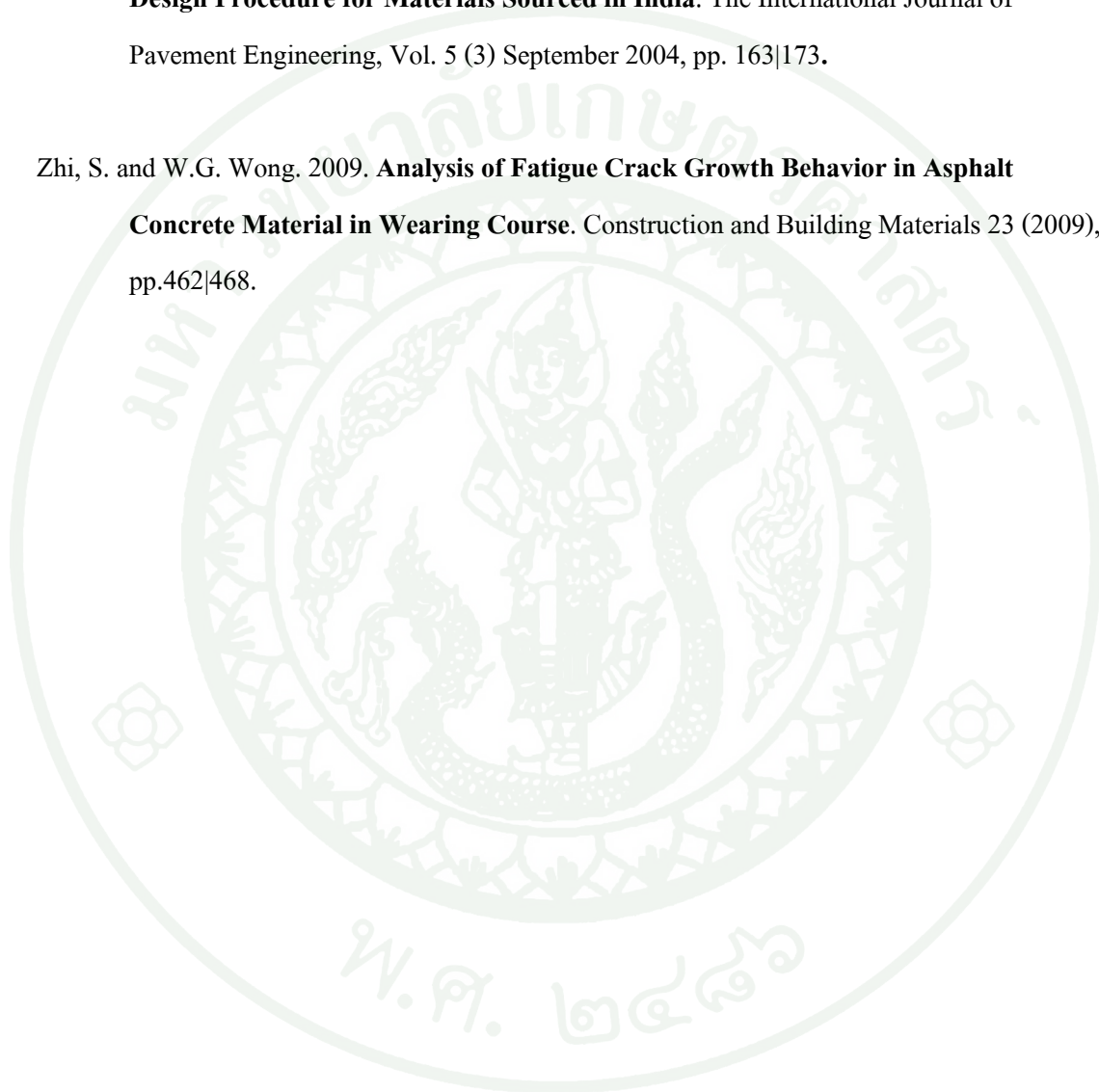
Khan, Z.A., H.A. Wahab, I. Asi and R. Ramadhan. 1998. **Comparative study of asphalt
concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction**. Construction
and Building Materials 12 pp.373|384.

Khodaii, A. and A. Mehrara. 2009. **Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and
SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test**. Construction and
Building Materials 23, pp.2586|2592.

Saad, A.Q. and I. Shatnawi. 2007. **Prediction of Bituminous Mixture Fatigue Life Base on Accumulated Strain.** Construction and Building Materials 21, pp.1370|1376.

Swami, B.L. ,Y.A. Metha and S. Bose. 2004. **A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India.** The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 5 (3) September 2004, pp. 163|173.

Zhi, S. and W.G. Wong. 2009. **Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in Asphalt Concrete Material in Wearing Course.** Construction and Building Materials 23 (2009), pp.462|468.







ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการก่อสร้างฝิวทางวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50

กระบวนการผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1. นำหินที่มาจากกองเก็บวัสดุที่แยกตามขนาดหิน โดยรถตัก แล้วนำไปเก็บในถังเก็บหินเย็น (Cold Bin) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก1



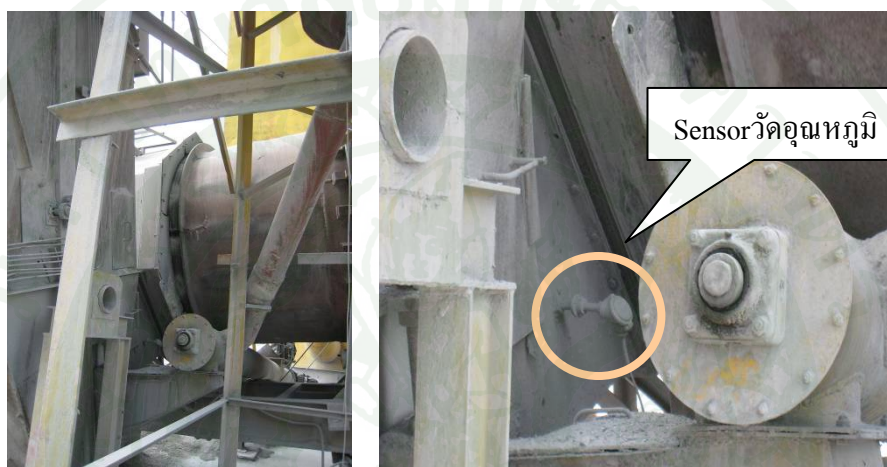
ภาพผนวกที่ ก1 หินที่ถูกเก็บใน Cold Bin

2. นำหิน Cold Bin ผ่านสายพาน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก2) ไปยังเตาเผา (Dryer) เพื่อไล่ความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของหินให้ได้ตามที่ต้องการ



ภาพผนวกที่ ก2 หินที่ลำเลียงผ่านสายพานไปยัง Dryer

3. นำหินที่ได้มาผ่านไปยังตะแกรงร่อน เพื่อแยกขนาดหินและจัดเก็บให้เป็น Bin ต่างๆ หินที่ได้จะเป็น Hot Bin ที่ใช้ตามสัดส่วนผสมของ JMF ซึ่งโดยปกติจะมีการควบคุมอุณหภูมิของ หินใน Hot Bin ที่ประมาณ 163 องศาเซลเซียส สำหรับการผลิตที่ใช้ยาง AC 60-70 แต่เนื่องจาก Sensor วัดอุณหภูมิที่ Hot Bin ของโรงงานผสมนั้นขัดข้อง จึงต้องใช้อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จาก Sensor ที่ปาก Dryer ก่อนเข้า Hot Elevator ซึ่งมีค่าประมาณ 190 องศาเซลเซียส (ดังแสดงในภาพ ผนวกที่ ก3) สำหรับการผลิตวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยาง AC 40-50 ในโครงการนี้



ภาพผนวกที่ ก3 Sensor วัดอุณหภูมิบริเวณปาก Dryer

4. ปล่อยหิน Hot Bin ไปยังห้องผสม (Pug Mill) ตามสัดส่วนที่กำหนด
5. ทำการอุ่นยางในถังให้พร้อมสำหรับการใช้งาน แต่เนื่องจากในโครงการนี้ มีถังเก็บยาง ไม่เพียงพอสำหรับ AC 40-50 ทำให้ไม่มีถังพักยางที่จะเพิ่มอุณหภูมิยางให้ได้ตามต้องการก่อน นำมาใช้งาน ทำให้ต้องนำยางที่ได้อุณหภูมिन้อยกว่าที่ต้องการ คือที่ประมาณ 130 องศาเซลเซียส (ดัง แสดงในภาพผนวกที่ ก4) ไปใช้ผสมกับวัสดุมวลรวม ซึ่งตามปกติสำหรับยาง AC 60-70 นั้นจะต้อง ทำให้อย่างมีอุณหภูมิประมาณ 159 ± 6 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงป้อนสู่เครื่องชั่งแล้วปล่อยลงสู่หม้อ ผสม



ภาพผนวกที่ ก4 ถังเก็บยาง และค่าอุณหภูมิของยาง

6. ทำการผสมหินและยางในห้องผสม โดยโรงงานผสมนี้ 1 Batch ใช้หินน้ำหนัก 1500 กิโลกรัม และยาง 75 กิโลกรัม ซึ่งในงานผลิตนี้ใช้เครื่องมือควบคุมสัดส่วนผสมแบบหน้าจอ Digital (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก5) โดยใช้เวลาในการผสมแห้งและผสมเปียกเท่ากับ 15 และ 30 วินาทีตามลำดับ จากนั้นจึงปล่อยลงสู่รถบรรทุกที่รออยู่ด้านล่างห้องผสม



ภาพผนวกที่ ก5 เครื่องมือควบคุมปริมาณหินและยางที่ใช้ในการผสมแบบหน้าจอ Digital

กระบวนการขนส่ง

เมื่อปล่อยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วทำการคลุมผ้าใบ (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก6) จากนั้นจึงนำมาส่งที่หน้างาน โดยวัดอุณหภูมิที่ทำรถบรรทุกได้ประมาณ 160 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงยกท้ายเทใส่เครื่องปู



ภาพผนวกที่ ก6 ภาพภายหลังจากปล่อยวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใส่ท้ายรถบรรทุกแล้ว

กระบวนการก่อสร้าง

6. การบดทับชั้นต้น ใช้รถอัดล้อเหล็ก น้ำหนัก 7 ตัน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก7) โดยเปิดระบบสั่นและต้องบดทับโดยเร็ว ซึ่งขณะบดทับ ทำการวัดได้อุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก8



ภาพผนวกที่ ก7 แสดงการบดทับชั้นต้น



ภาพผนวกที่ ก8 แสดงอุณหภูมิขณะการบดทับชั้นต้น

7. การบดทับชั้นกลาง ควรบดอัดต่อจากชั้นต้นทันทีโดยใช้รถบดล้อยางน้ำหนัก 13 ตัน จำนวน 2 คัน และรถบดน้ำหนัก 10 ตันจำนวน 1 คัน ทำการบดทับจนกว่าจะได้รับความหนาแน่นตามที่กำหนด ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก9



ภาพผนวกที่ ก9 ภาพแสดงการบดทับชั้นกลาง

8. บดทับชั้นสุดท้าย ใช้รถบดล้อเหล็ก น้ำหนัก 10 ตันบดทับเพื่อเป็นการลบรอยล้อของรถบดอัดตัวอย่างในการบดทับชั้นกลาง ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก10



ภาพผนวกที่ ก10 ภาพแสดงการบดทับชั้นสุดท้าย



ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 11 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง

No. of Specimen	Laboratory			Field							
	1	2	3	1	2	3	4	5	6		
% Ac by Mass of Agg	(a)	5.05		Sta.	Sta.	Sta.	Sta.	Sta.	Sta.		
% Ac by Mass of Mix	(b)	4.81		11+900	12+250	12+750	13+000	13+250	13+550		
%Eff Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$	4.58		LT-1	LT-1	LT-1	LT-1	LT-1	LT-1		
Specimen Height (cm)	(d)	6.35	6.35	6.35	5.2	5.1	5.3	5.5	5.1	5.4	
Mass in Air	gm.	(e)	1,252.3	1,251.9	1,255.2	920.7	915.4	923.6	932.1	919.4	925.5
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1,254.2	1,252.6	1,257.4	922.7	917.3	925.7	933.5	921.3	927.1
Mass in water	gm.	(g)	732.6	736.1	734.9	536.6	534.7	533.5	531.6	536.3	535.0
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	521.6	516.5	522.5	386.1	382.6	392.2	401.9	385.0	392.1
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.399	2.408	2.405	2.385	2.393	2.355	2.319	2.388	2.360
Average Density				2.404				2.367			
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$		10.8	Compaction Test = 98.2 %						
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$		85.5							
VMA	%	(l) = $100-k$		14.5							
Air Voids	%	(m) = $1-j$		3.7							
VFB	%	(n) = $100*j/l$		74.4							
Stability Measurement		lb		2,950	3,000	2,850					
Adjust Stability	lb			2,950	3,000	2,850					
				2,933							
Flow Measurement	in(1/100)			13.0	15.0	12.0					

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 12 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง

No. of Specimen	Laboratory			Field			Core				
	1	2	3	1	2	3	4	5	6		
% Ac by Mass of Agg	(a)	4.93			5.1		Sta.	Sta.	Sta.		
% Ac by Mass of Mix	(b)	4.70			4.87		12+500	12+700	13+100		
%Eff Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$	4.47			4.64		LT-2	LT-2	LT-2		
Specimen Height (cm)	(d)	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	5.4	5.1	5.0		
Mass in Air	gm.	(e) 1,251.3	1,250.9	1,254.2	1,250.7	1,251.5	1,253.6	914.3	929.1	933.5	
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f) 1,254.2	1,252.6	1,257.4	1,251.7	1,253.3	1,255.1	916.7	931.0	935.5	
Mass in water	gm.	(g) 732.6	733.1	735.9	729.4	732.7	731.8	531.2	535.6	540.7	
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	521.6	519.5	521.5	522.3	520.6	523.3	385.5	395.4	394.8
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.399	2.408	2.405	2.395	2.404	2.396	2.372	2.350	2.364
Average Density			2.404			2.398			2.362		
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$	10.8			10.9		Compaction Test = 98.3 %			
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$	85.5			85.0					
VMA	%	(l) = 100-k	14.5			15.0					
Air Voids	%	(m) = 1-j	3.7			4.1					
VFB	%	(n) = $100*j/l$	74.4			72.8					
Stability Measurement	lb		3,000	2,840	2,940						
Adjust Stability	lb		3,000	2,840	2,940						
				2,927							
Flow Measurement	in(1/100)		15.0	12.0	14.0						
				13.7							

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 13 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง

No. of Specimen	Laboratory			Field							
	1	2	3	1	2	3	4	5	6		
% Ac by Mass of Agg	(a)	5.05		Sta.	Sta.	Sta.	Sta.	Sta.	Sta.		
% Ac by Mass of Mix	(b)	4.81		11+950	12+350	12+750	13+100	13+300	13+650		
%Eff Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$	4.57		RT-1	RT-1	RT-1	RT-1	RT-1	RT-1		
Specimen Height (cm)	(d)	6.35	6.35	6.35	5.3	5.5	5.3	5.1	5.0	5.5	
Mass in Air	gm.	(e)	1,249.8	1,252.7	1,254.3	921.3	931.0	928.1	922.0	924.5	913.6
Mass Sat. Surface Dry	gm.	(f)	1,251.8	1,254.0	1,255.5	922.8	932.5	930.6	932.5	935.1	915.0
Mass in water	gm.	(g)	734.8	732.8	733.6	535.6	537.7	538.4	540.7	545.7	529.5
Bulk Volume	gm.	(h) = f-g	517.0	521.2	521.9	387.2	394.8	392.2	391.8	389.4	385.5
Bulk Density	gm./ml.	(i) = e/h	2.417	2.403	2.403	2.379	2.358	2.366	2.353	2.374	2.370
Average Density				2.408				2.367			
Volume AC	% Total	(j) = $c*i/Gac$		10.8	Compaction Test = 98.3 %						
Volume Agg	% Total	(k) = $(100-b)*i/Gag$		85.4							
VMA	%	(l) = 100-k		14.6							
Air Voids	%	(m) = l-j		3.8							
VFB	%	(n) = $100*j/l$		74.1							
Stability Measurement	lb		2,910	2,950	2,970						
Adjust Stability	lb		2,910	2,950	2,970						
				2,943							
Flow Measurement	in(1/100)		14.0	15.0	12.0						
				13.7							

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 14 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง

No. of Specimen	Laboratory			Field			Core			
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	
% Ac by Mass of Agg	(a)	5.01			5.08		Sta.	Sta.	Sta.	
% Ac by Mass of Mix	(b)	4.77			4.84		11+950	13+150	13+450	
%Eff Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$	4.54			4.60		RT-2	RT-2	RT-2	
Specimen Height (cm)	(d)	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	5.0	5.2	5.4	
Mass in Air	gm. (e)	1,255.0	1,252.7	1,254.6	1,252.4	1,251.6	1,255.4	913.0	923.6	907.0
Mass Sat. Surface Dry	gm. (f)	1,256.8	1,253.8	1,254.9	1,254.6	1,253.1	1,256.9	915.3	925.1	909.5
Mass in water	gm. (g)	734.5	733.2	733.5	733.8	731.8	733.1	530.1	532.6	529.6
Bulk Volume	gm. (h) = f-g	522.3	520.6	521.4	520.8	521.3	523.8	385.2	392.5	379.9
Bulk Density	gm./ml. (i) = e/h	2.403	2.406	2.406	2.405	2.401	2.397	2.370	2.353	2.387
Average Density			2.405		2.401				2.370	
Volume AC	% Total (j) = $c*i/Gac$		10.7		10.8		Compaction Test = 98.6 %			
Volume Agg	% Total (k) = $(100-b)*i/Gag$		85		85					
VMA	% (l) = 100-k		14.6		14.8					
Air Voids	% (m) = 1-j		3.9		4.0					
VFB	% (n) = $100*j/l$		73.1		72.9					
Stability Measurement	lb	3,050	2,950	2,870						
Adjust Stability	lb	3,050	2,950	2,870						
			2,927							
Flow Measurement	in(1/100)	15.0	15.0	14.0						
			14.7							

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 16 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง

No. of Specimen	Laboratory			Field				
	1	2	3	1	2	3	4	
% Ac by Mass of Agg	(a)	4.91		Sta.	Sta.	Sta.	Sta.	
% Ac by Mass of Mix	(b)	4.68		5+550	5+650	5+800	5+900	
%Eff Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$	4.45		RT-2	RT-1	RT-2	RT-1	
Specimen Height (cm)	(d)	6.35	6.35	6.35	5.3	5.0	5.2	5.4
Mass in Air	gm. (e)	1,255.5	1,247.6	1,252.6	926.4	911.3	920.5	925.9
Mass Sat. Surface Dry	gm. (f)	1,256.8	1,248.3	1,253.4	927.8	912.8	921.6	926.3
Mass in water	gm. (g)	733.2	732.6	732.3	537.8	530.6	535.3	535.1
Bulk Volume	gm. (h) = f-g	523.6	515.7	521.1	390.0	382.2	386.3	391.2
Bulk Density	gm./ml. (i) = e/h	2.398	2.419	2.404	2.375	2.384	2.383	2.367
Average Density			2.407			2.377		
Volume AC	% Total (j) = $c*i/Gac$		10.5	Compaction Test = 98.8 %				
Volume Agg	% Total (k) = $(100-b)*i/Gag$		85.5					
VMA	% (l) = 100-k		14.5					
Air Voids	% (m) = 1-j		4.0					
VFB	% (n) = $100*j/l$		72.4					
Stability Measurement	lb	3,070	2,910	2,900				
Adjust Stability	lb	3,070	2,910	2,900				
			2,960					
Flow Measurement	in(1/100)	14.0	14.0	11.0				
			13.0					

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดสอบ Marshall ประจำวันที่ 17 พฤศจิกายน 2552 ของยาง AC 40/50 และร้อยละของความหนาแน่นในการบดอัดชั้นรองผิวทาง

No. of Specimen	Laboratory			Field			
	1	2	3	1	2	3	4
% Ac by Mass of Agg	(a)	5.07		Sta.	Sta.	Sta.	Sta.
% Ac by Mass of Mix	(b)	4.83		5+600	5+700	5+850	5+950
%Eff Ac by Mass of Mix	(c) = $b-x(10-b)/100$	4.59		LT-1	LT-2	LT-1	LT-2
Specimen Height (cm)	(d)	6.35	6.35	6.35	5.0	5.2	5.3
Mass in Air	gm. (e)	1,248.6	1,249.3	1,250.5	894.6	937.4	908.4
Mass Sat. Surface Dry	gm. (f)	1,249.4	1,250.7	1,251.7	896.0	939.3	909.8
Mass in water	gm. (g)	731.4	731.9	731.9	521.3	538.0	529.4
Bulk Volume	gm. (h) = f-g	518.0	518.8	519.8	374.7	401.3	380.4
Bulk Density	gm./ml. (i) = e/h	2.410	2.408	2.406	2.388	2.336	2.388
Average Density			2.408			2.366	
Volume AC	% Total (j) = $c*i/Gac$		10.8		Compaction Test = 98.3 %		
Volume Agg	% Total (k) = $(100-b)*i/Gag$		85.4				
VMA	% (l) = 100-k		14.6				
Air Voids	% (m) = 1-j		3.7				
VFB	% (n) = $100*j/l$		74.3				
Stability Measurement	lb	2,950	2,970	2,940			
Adjust Stability	lb	2,950	2,970	2,940			
			2,953				
Flow Measurement	in(1/100)	13.0	15.0	14.0			
			14.0				

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ
เจาะจากสนาม และนักรพี

Specimen	Soruce		ห้องปฏิบัติการ				สนาม				นักรพี								
	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	99.97	100.10	100.13	101.72	101.69	101.63	99.8	99.8	99.9	99.8	99.9	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.9	99.7
Average Diameter	(mm)	99.96	100.11	100.13	101.73	101.71	101.57	99.9	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.9	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
Height (mm)	1	68.04	68.19	68.23	64.78	65.60	65.16	68.0	67.3	67.5	67.3	67.5	68.0	67.3	67.5	67.3	67.5	67.3	67.5
	2	68.10	68.29	68.27	67.04	66.53	65.18	67.8	67.2	67.4	67.8	67.2	67.4	67.8	67.2	67.4	67.2	67.4	67.4
	3	68.12	68.20	68.18	66.02	65.88	66.17	67.9	67.2	67.3	67.9	67.2	67.3	67.9	67.2	67.3	67.2	67.3	67.3
	4	68.02	68.25	68.20	64.54	65.16	65.66	67.8	67.2	67.4	67.8	67.2	67.4	67.8	67.2	67.4	67.2	67.4	67.4
Average Height	(mm.)	68.07	68.23	68.22	65.60	65.79	65.54	67.9	67.2	67.4	67.9	67.2	67.4	67.9	67.2	67.4	67.2	67.4	67.4
Bulk Specific Gravity		2.399	2.390	2.387	2.367	2.37	2.369	2.398	2.401	2.395	2.398	2.401	2.395	2.398	2.401	2.398	2.401	2.395	2.395
Pulse 1	(MPa)	3039	2957	2975	2842	2736	3200	2549	2580	2581	2392	2424	2693	1771	1988	2106	2115	2071	2016
Pulse 2	(MPa)	2779	2934	2815	2697	2869	2649	2637	2501	2441	2446	2311	2423	1800	1867	1984	2004	1995	2202
Pulse 3	(MPa)	3130	3083	2870	2897	2737	2525	2696	2576	2506	2302	2360	2634	1857	1896	1994	2079	1948	2095
Pulse 4	(MPa)	3103	3033	2985	3002	2676	2736	2588	2593	2347	2502	2555	2647	1876	2027	1996	2010	2001	2076
Pulse 5	(MPa)	2865	2966	2885	3056	2804	2609	2687	2661	2481	2496	2408	2553	1847	1946	2046	1961	2011	2107
Mean	(MPa)	2983	2995	2906	2899	2764	2744	2631	2582	2471	2428	2411	2590	1830	1945	2025	2034	2005	2099
CV	(%)	0.37	0.26	0.75	1.88	1.77	7.14	6.06	0.43	4.58	0.37	0.26	0.75	1.88	1.77	7.14	6.06	0.43	4.58
Resilient Modulus	(MPa)	29,894	29,030	27,546	26,073	24,499	25,012	18,881	20,300	20,526	18,881	20,300	20,526	18,881	20,300	20,526	18,881	20,300	20,526
Average M _R	(MPa)		28,823			25,194		18,803			18,803			18,803			18,803		
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	3.72	0.72	4.43	3.49	2.76	0.72	5.13	2.00	3.13	3.72	0.72	4.43	3.49	2.76	0.72	5.13	2.00	3.13

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ
เจาะจากสนาม และนักรพี

Specimen	Soruce		ห้องปฏิบัติการ						สนาม				นักรพี							
	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		99.97		100.10		100.13		101.72		101.69		101.63		99.8		99.8		99.9	
	2		99.95		100.12		100.12		101.73		101.73		101.50		99.9		99.8		99.7	
Average Diameter	(mm)		100.0		100.1		100.1		101.7		101.7		101.6		99.9		99.8		99.8	
Height (mm)	1		68.04		68.19		68.23		64.78		65.60		65.16		68.0		67.3		67.5	
	2		68.10		68.29		68.27		67.04		66.53		65.18		67.8		67.2		67.4	
	3		68.12		68.20		68.18		66.02		65.88		66.17		67.9		67.2		67.3	
	4		68.02		68.25		68.20		64.54		65.16		65.66		67.8		67.2		67.4	
Average Height	(mm.)		68.1		68.2		68.2		65.6		65.8		65.5		67.9		67.2		67.4	
Bulk Specific Gravity			2.399		2.390		2.387		2.367		2.37		2.369		2.398		2.401		2.395	
Pulse 1	(MPa)	19356	17336	17640	16092	17714	18991	13054	12241	13164	13049	10986	9972	8487	8351	8315	8350	8041	8513	
Pulse 2	(MPa)	18921	18098	17173	16531	17333	18359	13392	12331	12823	12859	10960	10497	8386	8317	8368	8326	8071	8195	
Pulse 3	(MPa)	17427	17781	16882	16218	16907	17625	13061	12555	12732	13563	11501	10373	8448	8386	8162	8575	8099	8217	
Pulse 4	(MPa)	19033	17411	16903	16240	18288	17582	13509	12186	13191	13502	11650	10329	8526	8476	8130	8264	8199	8060	
Pulse 5	(MPa)	18161	17392	17626	16949	17038	17484	12996	12512	13597	13611	11344	10279	8306	8423	8341	8607	8082	8279	
Mean	(MPa)	18580	17603	17244	16406	17456	18008	13202	12365	13101	13317	11288	10290	8431	8391	8263	8424	8098	8253	
CV	(%)		5.26		4.98		3.12		6.55		1.64		9.25		0.48		1.93		1.90	
Resilient Modulus (M_R)	(MPa)		18,580		16,825		17,732		12,784		13,209		10,789		8,411		8,344		8,176	
Average M_R	(MPa)				17,550						12,261						8,310			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)		4.90		5.01		0.11		4.27		7.74		12.00		1.22		0.40		1.62	

ตารางผนวกที่ ข9 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ
เจาะจากสนาม และนักรพี

Specimen	Sorcoe No.	ห้องปฏิบัติการ						สนาม						นักรพี					
		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	99.97		100.10		100.13		101.72		101.69		101.63		99.8		99.8		99.9	
	2	99.95		100.12		100.12		101.73		101.73		101.50		99.9		99.8		99.7	
Average Diameter	(mm)	100.0		100.1		100.1		101.7		101.7		101.6		99.9		99.8		99.8	
Height (mm)	1	68.04		68.19		68.23		64.78		65.60		65.16		68.0		67.3		67.5	
	2	68.10		68.29		68.27		67.04		66.53		65.18		67.8		67.2		67.4	
	3	68.12		68.20		68.18		66.02		65.88		66.17		67.9		67.2		67.3	
	4	68.02		68.25		68.20		64.54		65.16		65.66		67.8		67.2		67.4	
Average Height	(mm.)	68.07		68.23		68.22		65.60		65.79		65.54		67.9		67.2		67.4	
Bulk Specific Gravity		2.399		2.390		2.387		2.367		2.37		2.369		2.398		2.401		2.395	
Pulse 1	(MPa)	4732	4639	4841	4205	4735	4364	1746	1623	1732	1640	1493	1557	1599	1264	1702	1512	1603	1496
Pulse 2	(MPa)	5004	4684	4802	4439	4627	4274	1835	1719	1742	1682	1519	1553	1593	1323	1759	1565	1703	1515
Pulse 3	(MPa)	4627	4370	4823	4310	4729	4331	1828	1756	1747	1675	1512	1569	1537	1286	1800	1543	1719	1487
Pulse 4	(MPa)	4803	4602	4686	4316	4708	4382	1736	1676	1784	1680	1514	1593	1512	1342	1735	1565	1723	1534
Pulse 5	(MPa)	4708	4579	4801	4448	4736	4297	1796	1620	1748	1694	1529	1580	1595	1349	1771	1548	1728	1557
Mean	(MPa)	4775	4575	4790	4343	4707	4330	1788	1679	1751	1674	1513	1570	1567	1313	1753	1547	1695	1518
CV	(%)	4.28		9.80		8.35		6.29		4.50		3.70		17.64		12.48		11.02	
Resilient Modulus	(MPa)	4,675		4,567		4,518		1,734		1,713		1,542		1,440		1,650		1,607	
Average Resilient Modulus	(MPa)			4,587						1,663						1,566			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	1.92		0.43		1.49		4.27		3.01		7.28		8.02		5.40		2.62	

ตารางผนวกที่ ข10 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ
เจาะจากสนาม และนักรพี

Specimen	Soruce No.	ห้องปฏิบัติการ						สนาม						นักรพี					
		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	99.97		100.10		100.13		101.72		101.69		101.63		99.8		99.8		99.9	
	2	99.95		100.12		100.12		101.73		101.73		101.50		99.9		99.8		99.7	
Average Diameter	(mm)	100.0		100.1		100.1		101.7		101.7		101.6		99.9		99.8		99.8	
Height (mm)	1	68.04		68.19		68.23		64.78		65.60		65.16		68.0		67.3		67.5	
	2	68.10		68.29		68.27		67.04		66.53		65.18		67.8		67.2		67.4	
	3	68.12		68.20		68.18		66.02		65.88		66.17		67.9		67.2		67.3	
	4	68.02		68.25		68.20		64.54		65.16		65.66		67.8		67.2		67.4	
Average Height	(mm.)	68.07		68.23		68.22		65.60		65.79		65.54		67.9		67.2		67.4	
Bulk Specific Gravity		2.399		2.390		2.387		2.367		2.37		2.369		2.398		2.401		2.395	
Pulse 1	(MPa)	1051	1097	1008	1068	917	873	518	361	564	422	682	610	477	397	404	405	397	402
Pulse 2	(MPa)	1119	1110	1033	1094	982	848	493	413	616	570	675	607	507	379	408	461	425	421
Pulse 3	(MPa)	1045	1120	1051	1080	940	881	503	392	606	536	609	642	537	404	428	429	423	428
Pulse 4	(MPa)	1078	1060	1045	1083	963	885	556	412	656	591	639	615	507	377	419	425	421	429
Pulse 5	(MPa)	1079	1088	1052	1106	978	886	578	415	618	553	644	641	541	373	407	410	423	390
Mean	(MPa)	1074	1095	1038	1086	956	875	530	398	612	535	650	623	514	386	413	426	418	414
CV	(%)	1.92		4.54		8.89		28.45		13.43		4.24		28.44		3.10		0.96	
Resilient Modulus	(MPa)	1,085		1,062		916		464		574		637		450		420		416	
Average Resilient Modulus	(MPa)			1,021						558						429			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)	6.28		4.03		10.31		16.85		2.78		14.07		5.02		2.10		2.92	

ตารางผนวกที่ ข11 ผลการทดสอบ Indirect tensile resilient modulus test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ
เจาะจากสนาม และนักรพี

Specimen	Sorce No.	ห้องปฏิบัติการ						สนาม						นักรพี					
		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	99.97		100.10		100.13		101.72		101.69		101.63		99.8		99.8		99.9	
	2	99.95		100.12		100.12		101.73		101.73		101.50		99.9		99.8		99.7	
Average Diameter	(mm)	100.0		100.1		100.1		101.7		101.7		101.6		99.9		99.8		99.8	
Height (mm)	1	68.04		68.19		68.23		64.78		65.60		65.16		68.0		67.3		67.5	
	2	68.10		68.29		68.27		67.04		66.53		65.18		67.8		67.2		67.4	
	3	68.12		68.20		68.18		66.02		65.88		66.17		67.9		67.2		67.3	
	4	68.02		68.25		68.20		64.54		65.16		65.66		67.8		67.2		67.4	
Average Height	(mm.)	68.07		68.23		68.22		65.60		65.79		65.54		67.9		67.2		67.4	
Bulk Specific Gravity		2.399		2.390		2.387		2.367		2.37		2.369		2.398		2.401		2.395	
Pulse 1	(MPa)	594	601	454	430	465	482	201	165	194	168	150	123	255	243	244	255	243	244
Pulse 2	(MPa)	659	624	483	464	455	483	177	172	176	172	144	139	266	247	248	266	247	248
Pulse 3	(MPa)	642	623	496	453	515	477	185	147	188	177	157	146	273	248	219	273	248	219
Pulse 4	(MPa)	639	620	494	458	526	479	176	149	182	183	150	138	269	255	238	269	255	238
Pulse 5	(MPa)	645	617	506	447	530	480	199	138	163	180	155	142	275	229	220	275	229	220
Mean	(MPa)	636	617	487	450	498	480	188	154	181	176	151	138	267	245	234	267	245	234
CV	(%)	3.02		7.81		3.62		19.88		2.80		9.00		8.59		6.17		2.26	
Resilient Modulus	(MPa)	626		469		489		171		179		145		256		227		265	
Average Resilient Modulus	(MPa)			528						165						249			
ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่ม	(%)		18.61		11.25		7.36		3.85		8.40		12.25		2.67		8.96		6.28

ตารางผนวกที่ ข12 ผลการทดสอบ Indirect tensile Fatigue test ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Diameter (mm)	100	100	99.9	99.7	100	99.6	100	99.9	99.9	99.9	99.90	99.80	99.9	99.9	99.9
Height (mm)	68.9	67.2	68	68.9	69.1	67.8	67	68.4	68.1	67.8	67.5	67.8	67.9	67.3	70.8
Bulk specific gravity	2.401	2.403	2.409	2.404	2.402	2.407	2.406	2.403	2.398	2.399	2.400	2.403	2.410	2.407	2.404
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Loading force (kN)	0.99	0.96	0.97	1.34	1.38	1.34	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	3.7	3.7	3.9
Initial Stiffness modulus (MPa)	4,185	3,624	4,294	3,928	4,575	3,910	3,443	4,518	4,318	3,789	3,726	4,004	4,010	4,219	4,223
Initial strain (ϵ_x , Microstrain)	44.8	51.4	43.4	64.8	57.0	66.2	90.5	67.6	71.1	91.5	93.5	86.7	177.5	170.2	170.4
Log of ϵ_x	1.65	1.71	1.64	1.81	1.76	1.82	1.96	1.83	1.85	1.96	1.97	1.94	2.25	2.23	2.23
Indirect tensile stress (σ_x , kPa)	91	91	91	124	127	126	152	149	150	169	170	169	347	350	351
Log of σ_x	1.96	1.96	1.96	2.09	2.10	2.10	2.18	2.17	2.18	2.23	2.23	2.23	2.54	2.54	2.55
Horizontal deformation (μm)	2.183	2.183	2.181	3.265	3.275	3.262	3.821	3.817	3.817	4.362	4.362	4.368	8.725	8.725	8.725

ตารางผนวกที่ ข12 (ต่อ)

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Stiffness modulus															
at failure (MPa)	2,092	1,804	2,139	1,951	2,287	1,915	1,724	2,253	2,126	1,894	1,857	2,000	2,005	2,110	1,352
No. of repetitions															
at failure	20,160	21,568	33,344	8,448	8,144	9,280	4,008	4,392	4,992	2,340	3,920	2,696	1,144	728	746
Log of No. of repetitions at failure	4.30	4.33	4.52	3.93	3.91	3.97	3.60	3.64	3.70	3.37	3.59	3.43	3.06	2.86	2.87

NA = Unavailable results due to machine

Loading Waveshape : Haversine

Loading pulse width : 250 ms

Pulse repetition period : 1500 ms

ตารางผนวกที่ ข13 ผลการทดสอบ Dynamic creep test ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ
เจาะจากสนาม และนักรพี

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	Sorce	ห้องปฏิบัติการ			สนาม			นักรพี		
	No.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Diameter (mm.)	1	100.4	100.3	100.1	100.4	100.4	100.2	99.9	100.0	100.1
	2	100.2	100.3	100.2	100.4	100.2	100.3	100.1	100.1	100.1
Average Diameter (mm.)		100.3	100.3	100.2	100.4	100.3	100.3	100.0	100.0	100.0
Height (mm.)	1	67.45	67.18	67.22	67.45	67.41	67.23	67.46	67.46	67.67
	2	67.69	67.23	67.17	67.55	67.44	67.35	67.68	67.53	67.64
	3	67.65	67.24	67.25	67.51	67.17	67.34	67.66	67.65	67.63
	4	67.68	67.16	67.18	67.43	67.55	67.31	67.67	67.66	67.68
Average Height (mm.)		67.6	67.2	67.2	67.5	67.4	67.3	67.6	67.6	67.7
Bulk Specific Gravity		2.397	2.399	2.396	2.403	2.396	2.404	2.397	2.399	2.396
Termination cycle		10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Accumulated microstain		4,115	5,739	6,995	8,860	11,519	11,240	17,210	15,151	18,218
Microstrain @ flow point		3,740	5,013	4,672	6,119	9,348	10,484	9,581	7,657	9,458
Permanent microstrain per cycle		0.41	0.57	0.70	0.89	1.15	1.12	1.72	1.52	1.82
Average permanent microstrain per cycle			0.56			1.05			1.69	



ภาคผนวก ค
ผลการติดตามพฤติกรรมบนแปลงทดสอบ

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการเก็บข้อมูลค่าการแอ่นตัวสูงสุดตามจุดทดสอบต่างๆ ด้วยเครื่อง FWD

Station	Stress (kPa)	Maximum Deflection (micron)		
		ครั้งที่		
		1	2	3
2+480		158.39	147.10	195.9
2+530		212.12	227.28	676.0
2+580	754	436.06	611.31	417.3
2+630		214.66	209.56	413.0
2+680		188.06	274.62	350.0
	avg.	241.86	293.97	410.43
5+400		216.75	187.03	741.9
5+450		222.97	208.43	629.3
5+500	754	269.19	324.40	416.1
5+550		281.21	249.03	446.5
5+600		157.77	217.70	767.3
	avg.	229.58	237.32	600.23
6+390		220.42	472.33	490.7
6+440		298.43	405.60	242.3
6+490	754	363.09	266.98	418.2
6+540		181.37	108.51	710.8
6+590		136.44	314.73	1029.0
	avg.	239.95	313.63	578.21
13+200		166.08	158.09	125.2
13+250		236.58	162.29	142.6
13+300		168.80	280.16	201.2
13+350	754	211.72	138.86	125.8
13+400		135.85	-	219.9
13+450		125.00	-	305.0
13+500		134.82	-	163.3
	avg.	168.40	184.85	183.30

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการเก็บข้อมูลลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวทางฝั่ง LT

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องล้อ (มม.)			ขูดตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 2+480 - 2+500	L	5.50	8.00	9.00												
	M								25.00							
	H															
กม. 2+500 - 2+600	L	8.50	9.00	9.50												
	M								100.00							
	H															
กม. 2+600 - 2+700	L															
	M	13.25	13.75	15.00					90.00							
	H						10.00			0.25	0.25	0.25				
กม. 2+700 - 2+800	L	10.50	10.50	11.50												
	M								100.00							
	H															
กม. 2+800 - 2+900	L	10.25	11.75						100.00							
	M			14.25												
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องล้อ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 2+900 - 3+000	L															
	M	14.00	16.00	19.25												
	H															
กม. 3+000 - 3+100	L															
	M	13.00	15.75	18.25												
	H										0.09	0.09	0.09			
กม. 3+100 - 3+200	L	11.00	11.50													
	M			13.25												
	H															
กม. 3+200 - 3+300	L	10.50	12.00													
	M			14.25												
	H										0.01	0.01	0.01			
กม. 3+300 - 3+400	L	10.00	10.75	12.00												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลื้อ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 3+400 - 3+500	L	6.00	7.00	9.25						100.00						
	M															
	H									0.50	0.50	0.50				
กม. 3+500 - 3+600	L	6.50	7.50	8.00												
	M															
	H															
กม. 3+600 - 3+700	L	10.00														
	M		12.50	15.00						50.00						
	H															
กม. 3+700 - 3+800	L	5.25	5.75	10.75												
	M															
	H															
กม. 3+800 - 3+900	L	5.75	6.00	6.75												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องล้อ (มม.) ครั้งที่			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²) ครั้งที่			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²) ครั้งที่			หลุมบ่อ (ม ²) ครั้งที่			ปะช้อม (ม ²) ครั้งที่		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
กม. 3+900 - 4+000	L	4.25	5.75	7.25												
	M															
	H															
กม. 4+000 - 4+100	L	8.50	10.50	11.25												
	M															
	H															
กม. 4+100 - 4+200	L	7.00	9.50	10.00												
	M															
	H															
กม. 4+200 - 4+300	L	6.25	6.75	9.00												
	M															
	H															
กม. 4+300 - 4+400	L	8.75	9.50	9.50												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลื้อ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 4+400 - 4+500	L	10.50	11.50													
	M			14.50						100.00						
	H										0.04	0.04				
กม. 4+500 - 4+600	L	11.25														
	M		12.25	12.50						100.00						
	H															
กม. 4+600 - 4+700	L															
	M	18.25	18.75	19.50						50.00						
	H															
กม. 4+700 - 4+800	L	10.75	11.25													
	M			12.50						50.00						
	H															
กม. 4+800 - 4+900	L	9.75	11.50	12.00												
	M									25.00						
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย															
		ร่องลือ (มม.)			ยุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกผนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 4+900 - 5+000	L																
	M	13.75	13.75	14.75													
	H																
กม. 5+000 - 5+100	L	10.75															
	M		13.25	15.25				25.00						0.04	0.04		
	H																
กม. 5+100 - 5+200	L	11.50	11.75														
	M			13.50													
	H																
กม. 5+200 - 5+300	L	9.50	12.00														
	M			12.75				25.00									
	H																
กม. 5+300 - 5+400	L	9.25	11.00	11.50													
	M																
	H																

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลือ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกผนังจรเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)		
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 5+400 - 5+500	L	7.50	8.25	8.25												
	M															
	H															
กม. 5+500 - 5+600	L	9.75	11.50													
	M			12.50												
	H															
กม. 5+600 - 5+700	L	8.50	8.75	9.00												
	M															
	H												21.00	21.00		
กม. 5+700 - 5+800	L	6.00	7.25	8.50												
	M									25.00						
	H						10.00									
กม. 5+800 - 5+900	L											65.00				
	M	12.75	13.75	14.75												
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องล้อ (มม.)			ขุดตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 5+900 - 6+000	L	5.75	7.50	7.75						100.00						
	M													0.30	0.30	
	H															
กม. 6+000 - 6+100	L	4.25	4.75	4.75						75.00						
	M															
	H															
กม. 6+100 - 6+200	L	11.00								100.00						
	M		12.75	12.75												
	H															
กม. 6+200 - 6+300	L	3.00	3.75	4.25						100.00						
	M															
	H															
กม. 6+300 - 6+400	L	6.50	7.00	7.5												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลือ (มม.) ครั้งที่			ยุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²) ครั้งที่			รอยแตกผนังจระเข้(ม ²) ครั้งที่			หลุมบ่อ (ม ²) ครั้งที่			ปะช่อม (ม ²) ครั้งที่		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
กม. 6+400 - 6+500	L															
	M	14.50	14.50	15.50												
	H															
กม. 6+500 - 6+600	L	10.50												70.00	70.00	
	M		13.50	14.50												
	H															
กม. 6+600 - 6+700	L	5.50	7.50	7.75												
	M															
	H															
กม. 6+700 - 6+800	L	5.00	5.50	5.50												
	M															
	H															
กม. 6+800 - 6+900	L	5.50	6.25	6.25												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลื้อ (มม.)			ขุดตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะซ่อม (ม ²)		
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 6+900 - 7+000	L	7.25	10.50	12.00												
	M															
	H						10.00									
กม. 11+800 -11+900	L	6.80	8.60	12.00												
	M															
	H															
กม. 11+900 -12+000	L	6.25	7.50	9.25												
	M															
	H															
กม. 12+000 -12+100	L	9.00	9.25	9.50												
	M															
	H															
กม. 12+100 -12+200	L	6.75	8.75	9.25												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลื้อ (มม.)			ขุดตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะซ่อม (ม ²)		
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 12+200 -12+300	L	7.50	10.75	11.50												
	M															
	H															
กม. 12+300 -12+400	L	5.25	6.25	7.75												
	M															
	H															
กม. 12+400 -12+500	L	7.50	8.00	8.50												
	M															
	H															
กม. 12+500 -12+600	L	3.25	5.25	6.00												
	M															
	H									0.25	0.25	0.25				
กม. 12+600 -12+700	L	8.25	8.75	9.75												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลื้อ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกผนังจรเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 12+700 -12+800	L	8.25	8.50	9.75												
	M															
	H															
กม. 12+800 -12+900	L	6.00	7.25	8.50												
	M															
	H															
กม. 12+900 -13+000	L	8.25	9.75	10.75												
	M															
	H															
กม. 13+000 -13+100	L	6.50	7.50	7.50												
	M															
	H															
กม. 13+100 -13+200	L	4.75	5.00	5.25												
	M															
	H															

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย														
		ร่องลื้อ (มม.)			ยุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			รอยแตกผนังจรเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 13+200 -13+300	L	3.25	5.25	5.75												
	M															
	H															
กม. 13+300 -13+400	L	7.75	8.00	8.75												
	M															
	H															
กม. 13+400 -13+500	L	3.75	5.50	7.50												
	M															
	H															
กม. 13+500 -13+600	L	4.75	6.00	6.00												
	M															
	H															
กม. 13+600 -13+700	L	6.25	6.50	6.75												
	M															
	H															
																10.00

ตารางผนวกที่ ๓ ผลการเก็บข้อมูลลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวทางฝั่ง RT

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																	
		ร่องล้อ (มม.)			ขูดตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะซ่อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 2+480 - 2+500	L	7.00	7	7.00															
	M												25.00						
	H																		
กม. 2+500 - 2+600	L	6.00	7.75	8.00															
	M												100.00						
	H																		
กม. 2+600 - 2+700	L	9.00	9.75	9.75															
	M												100.00						
	H																		
กม. 2+700 - 2+800	L	9.00	10.75	10.75															
	M												100.00						
	H																		
กม. 2+800 - 2+900	L	11.25										2.00	2.00						
	M		14.00	14.00										100.00					
	H																		

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย ย	ความเสียหาย																	
		ร่องล้อ (มม.)			ยุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะซ่อม (ม ²)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กม. 2+900 - 3+000	L	8.00	11.75	12.25															
	M													100.00					
	H																		
กม. 3+000 - 3+100	L	11.50																	
	M		16.25	16.75										100.00					
	H																		
กม. 3+100 - 3+200	L													100.00					
	M	15.50	23.50	23.50							6.00	6.00							
	H																		
กม. 3+200 - 3+300	L													100.00					
	M	12.75	13.50	15.25															
	H																		
กม. 3+300 - 3+400	L	7.00	9.75	10.25										100.00					
	M																		
	H																		

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																	
		ร่องลื้อ (มม.)			ขุดตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะซ่อม (ม ²)		
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่					
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
กม. 3+400 - 3+500	L	10.00	10.75	11.50															
	M											100.00							
	H																		
กม. 3+500 - 3+600	L																		
	M	12.25	19.50	16.5															
	H												100.00						
กม. 3+600 - 3+700	L																		
	M	14.5	21.00	17.75								100.00	100.00						
	H													100.00					
กม. 3+700 - 3+800	L																		
	M	16.50	17.00	19.75								50.00	50.00						
	H													100.00					
กม. 3+800 - 3+900	L	11.25	14.25	14.75								50.00	50.00						
	M																		
	H																	100.00	

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																	
		ร่องสื้อ (มม.)			ยุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนั้งจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)		
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่					
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
กม. 3+900 - 4+000	L	9.25	11.75																
	M			12.75															
	H											95.00				17.50	17.50	17.50	
กม. 4+000 - 4+100	L	6.00	7.50	8.25									100.00						
	M																		
	H																		
กม. 4+100 - 4+200	L	10.75	11.50	11.5									98.00						
	M																		
	H				2.00	2.00	2.00												
กม. 4+200 - 4+300	L																		
	M	14.75	15.25	22.75									50.00						
	H				2.00	50.00	50.00												
กม. 4+300 - 4+400	L	7.50	8.75	7.50															
	M												100.00				0.25	0.25	0.25
	H																		

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																		
		ร่องลือ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะซ่อม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 4+400 - 4+500	L																			
	M	15.75	23.25	21.00									94.00				6.00	6.00	6.00	
	H				7.00	7.00														
กม. 4+500 - 4+600	L																			
	M	15.25	16.75	18.25									100.00							
	H				6.00	6.00														
กม. 4+600 - 4+700	L	10.75																		
	M		14.25	16.00																
	H																			
กม. 4+700 - 4+800	L	7.00	8.75	8.25																
	M																			
	H																			
กม. 4+800 - 4+900	L	6.50	7.75	7.50																
	M																			
	H										20.00	20.00	20.00							

ตารางผนวกที่ ๓3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																		
		ร่องลื้อ (มม.)			ยุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่						
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 4+900 - 5+000	L	8.75	9.75	10																
	M																			
	H										50.00	50.00	50.00							
กม. 5+000 - 5+100	L	9.75	11	11.00																
	M																0.04	0.04	0.04	
	H																			
กม. 5+100 - 5+200	L	8.50	10.5	10.75																
	M										4.00	4.00	4.00							
	H																			
กม. 5+200 - 5+300	L	7.25	9.5	9.50																
	M																			
	H																			
กม. 5+300 - 5+400	L	7.25	7.25	8.75																
	M																1.00	1.00	1.00	
	H																			

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																		
		ร่องลือ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกผนังจรเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะซ่อม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่						
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 5+400 - 5+500	L	6.50	7.00	8.5																
	M																	13.00	13.00	13.00
	H										15.00	15.00	15.00							
กม. 5+500 - 5+600	L	6.75	8.5	9.25																
	M																			
	H																	7.00	7.00	7.00
กม. 5+600 - 5+700	L	8.25	9.5	9.50																
	M																			
	H																			
กม. 5+700 - 5+800	L	6.25	7.25	7.75																
	M																			
	H																	6.00	6.00	6.00
กม. 5+800 - 5+900	L	5.75	6.5	6.50																
	M																			
	H																			

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																		
		ร่องลือ (มม.)			ยวบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 5+900 - 6+000	L	6.50	7.25	8.75										100.00						
	M																			
	H																			
กม. 6+000 - 6+100	L	4.75	6.5	6.50										100.00						
	M																			
	H																			
กม. 6+100 - 6+200	L	8.00	9.25	9.50										100.00						
	M																			
	H																			
กม. 6+200 - 6+300	L	5.00	6.25	7.75										100.00						
	M																			
	H																			
กม. 6+300 - 6+400	L	8.25	9.25	9.25										100.00						
	M																			
	H																			

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																		
		ร่องลื้อ (มม.)			ขุบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกผนังจรเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 6+400 - 6+500	L																			
	M	26.75																		45.00
	H		27.5	29.25		104.00	104.00	104.00												
กม. 6+500 - 6+600	L																			90.00
	M	22.50																		
	H		27	27.5		8.00	8.00	58.00												
กม. 6+600 - 6+700	L																			90.00
	M	14.50	17.50	20.00		4.00	4.00	4.00												
	H														0.09	0.09	0.09			
กม. 6+700 - 6+800	L																			
	M	12.25	15.25	16.00																
	H							4.00	4.00											
กม. 6+800 - 6+900	L																			
	M	13.50	14.00	15.25																
	H					4.00	4.00	4.00							0.04	0.04	0.04			

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																			
		ร่องลือ (มม.)			ยวบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช่อม (ม ²)				
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่				
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
กม. 6+900 - 7+000	L																			27.00	
	M	16.80	19.50	21.50	2.00	2.00	2.00														
	H																				
กม. 11+800 - 11+900	L	4.50	5.75	5.75																	
	M																				100.00
	H																				
กม. 11+900 - 12+000	L	8.50	11.75																		
	M			12.50																	100.00
	H																				
กม. 12+000 - 12+100	L	8.75																			
	M		12.75	13.75																	100.00
	H																				
กม. 12+100 - 12+200	L	5.25	7.25	7.50																	
	M																				
	H																				

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																		
		ร่องลือ (มม.)			ยวบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกหนังจระเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่						
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 12+200 - 12+300	L	10.50																		
	M		12.25	12.25																
	H																			
กม. 12+300 - 12+400	L	9.50	11.25	11.25																
	M																			
	H																			
กม. 12+400 - 12+500	L																			
	M	13.25	13.25	13.25																
	H																			
กม. 12+500 - 12+600	L	9.50	9.50	9.50																
	M																			
	H							8.25	8.25	8.25				0.25	0.25	0.25				
กม. 12+600 - 12+700	L																			
	M	12.75	12.75	12.75																
	H																			

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																		
		ร่องลือ (มม.)			ขุดตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกผนังกระเซ้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะชอม (ม ²)			
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
กม. 12+700 -12+800	L	7.25	9	9.00																
	M																			
	H																			
กม. 12+800 -12+900	L	11.00	12																	
	M			12.50																
	H																			
กม. 12+900 -13+000	L																			
	M	14.00	15.50	15.50																
	H																			
กม. 13+000 -13+100	L																			
	M	13.25	15.00	15.00							25.00	25.00								
	H																			
กม. 13+100 -13+200	L	10.25	10.75	10.75																
	M																			
	H																			

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ช่วงกม.	ระดับ ความ เสียหาย	ความเสียหาย																					
		ร่องลือ (มม.)			ยวบตัวเป็นแอ่ง (ม ²)			การบวมตัว (ม ²)			รอยแตกผนังจรเข้(ม ²)			หลุมบ่อ (ม ²)			ปะช้อม (ม ²)						
		ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่			ครั้งที่									
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				
กม. 13+200 - 13+300	L	7.75	9.00	9.00																			
	M																						
	H																						
กม. 13+300 - 13+400	L	10.50	11.25	11.25																			
	M																						
	H				1.00	1.00	1.00																
กม. 13+400 - 13+500	L	7.75	7.75	7.75																			
	M																						
	H																						
กม. 13+500 - 13+600	L	8.75	9.75	10.75																			
	M																						
	H																						
กม. 13+600 - 13+700	L	10.75	11.75	11.75																			
	M																						
	H																						

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นาย ชีรยุทธ อุดมสินประเสริฐ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	1 มิถุนายน 2528
สถานที่เกิด	เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-

