



การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์
Stabilization of Reclaimed Highway Materials with Foam Asphalt

ณรงค์ อุทัยรัตน์

Narong Uthairath

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering (Geotechnical Engineering)**

Prince of Songkla University

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟม แอสฟัลต์
ผู้เขียน	นายณรงค์ อุทัยรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ถิ่นกตัญญู)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)
..... (ดร.จุฬา สุนิตย์สกุล)กรรมการ (ดร.จุฬา สุนิตย์สกุล)
..... (ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)กรรมการ (ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)
กรรมการ (ดร.อรรณสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์
ผู้เขียน	นายณรงค์ อุทัยรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

การศึกษาการนำวัสดุโครงสร้างชั้นทางเก่ากลับมาใช้ใหม่ โดยนำวัสดุโฟมแอสฟัลต์มาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุชั้นทางเก่า โดยทำการเก็บตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเก่าจากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี-ปากท่อ) บริเวณ กม. 80 โดยได้ทำการแยกเก็บระหว่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ (RAP) กับหินคลุกเดิม (RCR) แล้วนำวัสดุโครงสร้างทางทั้งสองชนิดมาผสมกันเพื่อใช้ในการทดลองในสัดส่วน (RAP:RCR); 0:100 (RAP0), 25:75 (RAP25), 50:50 (RAP50), 75:25 (RAP75), และ 100:0 (RAP100) แล้วนำไปทดลองผสมกับโฟมแอสฟัลต์เพื่อหาปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สามารถให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีที่สุด

ผลการทดสอบพบว่าโฟมแอสฟัลต์ผลิตโดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC60/70 ที่อุณหภูมิ 170 °C ปริมาณน้ำร้อยละ 2.6 ของปริมาณแอสฟัลต์ และความดันน้ำที่ 6 บาร์ ทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์มีค่าการขยายตัว และค่าครึ่งชีวิตที่ดีที่สุด และเมื่อนำวัสดุมาลรวมผสมกับโฟมแอสฟัลต์เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงทางอ้อมสูงสุด พบว่าต้องใช้ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 4.3, 3.8, 3.2, 3.0 และ 2.9 สำหรับวัสดุมาลรวม RAP0, RAP25, RAP50, RAP75 และ RAP100 ตามลำดับ และยังพบว่าค่าการยุบตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามส่วนผสมของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมาลรวมที่ผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าโมดูลัสแบบคืนตัว โดยทำการทดสอบ 3 สถานะ คือ ทดสอบแบบไม่แช่น้ำ ทดสอบแบบแช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C พบว่าการทดสอบในสถานะไม่แช่น้ำจะให้ผลการทดสอบที่สูงที่สุด และการทดสอบในสถานะที่อุณหภูมิ 40 °C ผลการทดสอบมีค่าน้อยที่สุด บ่งบอกว่าวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยโฟมแอสฟัลต์มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายเนื่องจากสภาพอากาศที่อุณหภูมิ 40 °C มากที่สุด

คำหลัก: โฟมเอสพีเอส, แรงดึงทางอ้อม, โมดูล์สกินตัว, หินคลุกเดิม

Thesis Title	Stabilization of Reclaimed Highway Materials with Foam Asphalt
Author	Mr. Narong Uthairath
Major Program	Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
Academic Year	2009

ABSTRACT

In this study utilization of a foam asphalt as an admixture to improve the engineering properties of the reclaimed highway materials was studied. Two reclaimed highway materials, namely; reclaimed asphalt pavement; (RAP) and reclaimed crushed rock; (RCR) were collected separately from Highway 35 (Tonburi - Baktor) at 80th-kilometer. Prior to foam asphalt adding, mixtures of these two materials were prepared by the ratio of RAP and RCR by weight as follow; 0:100 (RAP0), 25:75 (RAP25), 50:50 (RAP50), 75:25 (RAP75), and 100:0 (RAP 100).

Experimental results indicated that the best foam asphalt having the best expansion and half-life values was obtained by preparing asphalt cement grade AC 60/70 at 170°C with 2.6 percent of water which pressurized to six bar. Testing specimen were prepared by mixing the foam asphalt with the reclaimed highway material mixtures. Indirect tensile testing results showed that the foam asphalts of 4.3, 3.8, 3.2, 3.0, and 2.9 percent by weight were suitable for RAP0, RAP25, RAP75 and RAP100 respectively. In addition, permanent contraction values of the testing specimens were increased with increasing RAP contents.

Indirect tensile strength, unconfined compressive strength and resilient modulus values of the testing specimen tested in three different conditions, namely; soaked test, unsoaked test and 40-°C test, showed that the highest testing values were found in unsoaked testing condition whereas 40-°C testing condition provided the lowest testing values. These testing results indicated that the reclaimed highway material-foam asphalt mixtures are most susceptible to damage at 40-°C testing condition.

Key word: Foam Asphalt, Stabilization, Resilient Modulus, Reclaimed Crushed Rock

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ตลอดจนวิศวกรประจำสำนักวิจัยและพัฒนางานทางที่ให้คำปรึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม และดร.จุฑา สุนิตย์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลงได้

ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณนายช่างสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ คุณคอเลด โต๊ะยูโตะ คุณอรรถพล พลเขต และอีกหลายๆ คนที่ไม่ได้เอยนาม

ขอขอบคุณ น้ำใจจากพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโทด้วยกัน คุณสारा เอียดเนียม คุณชัยเจริญ มังคสาธนะ และอีกหลายๆท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ นายสามารถ - นางเน้า อุทัยรัตน์ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาและให้กำลังใจ นายทรงพล อุทัยรัตน์ น้องชาย ที่ช่วยงานโดยตลอด และ ค.ช.พุดพิงศ์ อุทัยรัตน์ เป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา ข้าพเจ้าระลึกถึงเสมอและจะอยู่ในใจตลอดไป

ณรงค์ อุทัยรัตน์

สารบัญ

		หน้า
สารบัญ		(8)
สารบัญรูป		(11)
สารบัญตาราง		(14)
บทที่ 1	บทนำ	
	1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต	4
	2.2 แนวคิดการนำวัสดุโครงสร้างทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่	13
	2.2.1 การนำวัสดุโครงสร้างทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่	13
	2.2.2 สารปรับสภาพ	20
	2.3 โฟมแอสฟัลต์	26
	2.3.1 การคิดค้นโฟมแอสฟัลต์	26
	2.3.2 กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์	27
	2.3.3 การออกแบบส่วนผสม	28
	2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	31
	2.4.1 การทดสอบขนาดผลของวัสดุผสมรวม	31
	2.4.2 ปริมาณความชื้นของวัสดุผสมรวม	31
	2.4.3 การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม	31
	2.4.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	32
	2.4.5 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว	33
	2.4.6 การทดสอบหาค่าความต้านทานการขูดตัวถาวร	35
	2.4.7 การบดอัดด้วย Gyrotory Compaction	35
		(8)

สารบัญ(ต่อ)

		หน้า
บทที่ 3	วิธีการวิจัย	
	3.1 การเตรียมตัวอย่าง	39
	3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นวัสดุมวลรวม	41
	3.2.1 ขนาดผลของวัสดุมวลรวม	41
	3.2.2 ปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวม	41
	3.3 การทดสอบคุณสมบัติของโฟมเอสฟัลต์	42
	3.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเอสฟัลต์ซีเมนต์	42
	3.3.2 การทดสอบหาค่าคุณลักษณะของโฟมเอสฟัลต์ที่เหมาะสม	42
	3.4 การออกแบบส่วนผสม	45
	3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	48
	3.5.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม	49
	3.5.2 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	50
	3.5.3 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว	50
	3.5.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร	52
บทที่ 4	ผลการทดสอบ	
	4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น	55
	4.2 ผลการทดสอบการผลิตโฟมเอสฟัลต์	59
	4.3 การออกแบบส่วนผสม	68
	4.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	70
	4.4.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม	71
	4.4.2 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียว	72
	4.4.3 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว	74
	4.4.4 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร	83
	4.4.5 แนวทางการออกแบบ	84

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5	
สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม	89
ภาคผนวก	
ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์และหินคลุก	93
ข. ผลการทดสอบการผลิตโฟมแอสฟัลต์	107
ค. การออกแบบส่วนผสม	112
ง. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	118
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	
ก. การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ	142
ประวัติผู้เขียน	149

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การปรับปรุงโครงสร้างทางเดิมด้วยวิธีการผสมร้อน	14
2.2	การปรับปรุงโครงสร้างทางเก่าด้วยวิธีการผสมเย็น ทางหลวงหมายเลข 407 (อ.หาดใหญ่-อ.จะนะ) บริเวณ กม.24	14
2.3	การปรับปรุงโครงสร้างทางเดิมด้วยวิธีการผสมเย็นในโรงงาน	15
2.4	การปรับปรุงโครงสร้างทางเก่าด้วยวิธีการผสมเย็น ทางหลวงหมายเลข 4 (พัทลุง-หาดใหญ่) บริเวณ กม.96	16
2.5	เครื่องจักรที่ใช้ในงานปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมโดยวิธีผสมเย็นในที่	17
2.6	เครื่องจักรสำหรับการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้น	19
2.7	กระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้ซีเมนต์	21
2.8	รูปแสดงกระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน	22
2.9	รูปแสดงกระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้แอสฟัลต์อิมัลชันและซีเมนต์	23
2.1	รูปแสดงกระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้โฟมแอสฟัลต์	24
2.11	กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์	26
2.12	ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิต	27
2.13	ขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวม	29
2.14	การให้น้ำหนักกระทำก่อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง	32
2.15	ลักษณะของแรงกระทำและการทรุดตัว	33
2.16	กลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้กับเครื่อง Superpave Gyratory Compactor	36
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบชั้นพื้นทาง	38
3.1	ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต	39
3.2	การขุดลอกโครงสร้างทางแอสฟัลต์คอนกรีต	40
3.3	ตัวอย่างวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการทดสอบ	40
3.4	การทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง	41
3.5	การทดลองหาปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวม	42
3.6	เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง	43
3.7	อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าในการผลิตโฟมแอสฟัลต์	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.8	การวัดค่าการขยายตัวของโฟมแอสฟัลต์	44
3.9	ขั้นตอนการผสมน้ำเข้ากับวัสดุมวลรวม	45
3.10	ขั้นตอนการนำวัสดุมวลรวมผสมด้วยโฟมแอสฟัลต์	45
3.11	ขั้นตอนการนำวัสดุมวลรวมบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory Compactor	46
3.12	รายละเอียด โปรแกรมการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory Compactor	47
3.13	ขั้นตอนการบ่มวัสดุมวลรวม	47
3.14	การทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม	48
3.15	การวิเคราะห์ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม	48
3.16	การวัดขนาดก้อนตัวอย่างใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม	49
3.17	การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม	49
3.18	ก้อนตัวอย่างใช้ในการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด	50
3.19	การจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว	51
3.20	รายละเอียด โปรแกรมที่ใช้ทดสอบ โมดูลัสคืนตัว	51
3.21	การจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหาค่าการยุบตัวถาวร	52
3.22	รายละเอียด โปรแกรมที่ใช้ทดสอบ Dynamic Creep Test	53
3.23	ขั้นตอนการทดสอบ	54
4.1	ขนาดผลของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา	56
4.2	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	57
4.3	ผลการทดสอบค่า UCS และการทดสอบ IDT	59
4.4	ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C ที่ความดันน้ำต่างๆ	60
4.5	ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	63
4.6	ผลการทดสอบหาค่า Expansion และ Half-Life ของโฟมแอสฟัลต์	66
4.7	ผลการออกแบบส่วนผสม	68
4.8	ผลการออกแบบส่วนผสม	70
4.9	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม	72
4.10	ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียว	73
4.11	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP0	74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสกึ่งตัวของวัสดุมวลรวม RAP25	75
4.13	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสกึ่งตัวของวัสดุมวลรวม RAP50	76
4.14	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสกึ่งตัวของวัสดุมวลรวม RAP75	77
4.15	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสกึ่งตัวของวัสดุมวลรวม RAP100	78
4.16	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสกึ่งตัว	80
4.17	ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสกึ่งตัว	81
4.18	ผลการทดสอบค่าความต้านการยุบตัวถาวร	83
4.19	แนวทางการออกแบบส่วนผสม	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	มาตรฐานของวัสดุและการก่อสร้าง	7
2.2	คุณสมบัติที่สำคัญของ Stabilized Base ที่ปรับสภาพด้วย Stabilizing Agent ชนิดต่างๆ	9
2.3	ผลการทดสอบทางวิศวกรรม	13
2.4	ข้อดีและข้อเสียของการใช้ปูนซีเมนต์	25
2.5	ข้อดีและข้อเสียของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน	25
2.6	ปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุมวลรวมประเภทต่างๆ	30
2.7	ค่าอัตราส่วนปัวซองที่ใช้ในการทดสอบ	34
2.8	ปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามประเภทวัสดุมวลรวม	37
4.1	การจำแนกวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา	55
4.2	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	57
4.3	ผลการทดสอบค่าการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุมวลรวม	58
4.4	ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของวัสดุมวลรวม	58
4.5	ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C ที่ความดันน้ำต่างๆ	61
4.6	การหาปริมาณการไหลของแอสฟัลต์	62
4.7	ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ	64
4.8	ค่า Expansion และค่า Half-Life ของโพลีเมอร์แอสฟัลต์	65
4.9	เปรียบเทียบค่า Expansion และ Half-Life ของโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่ได้จากกราฟและทดสอบ	67
4.10	ผลการออกแบบส่วนผสม	70
4.11	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม	71
4.12	ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียว	73
4.13	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP0	75
4.14	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP25	76
4.15	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP50	77
4.16	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP75	78
4.17	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP100	79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.18	เปรียบเทียบผลการวิจัยจากแหล่งอ้างอิงอื่นๆ	82
4.19	ผลการทดสอบค่าความต้านการยุบตัวถาวร	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของการวิจัย

การก่อสร้างถนนเป็นการพัฒนาประเทศทางด้านการคมนาคมขนส่งรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจ และความมั่นคงประเทศ การก่อสร้างถนนเมื่อใช้งานระยะเวลาหนึ่ง ถนนก็จะเกิดความเสียหายตามอายุการใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการซ่อมแซม หรือปรับปรุงใหม่ให้มีสภาพการใช้งานที่ดีเสมอ

ความเสียหายของถนนอันเนื่องมาจากโครงสร้างของถนน เช่น การทรุดตัวของผิวทางตามแนวล้อ ผิวทางแตกหลายแห่งจะเข้า ชำรุดเนื่องจากแรงเฉือนทำให้ถนนอยู่ในสภาพที่ไม่ดี ส่งผลให้การขับเคลื่อนยานพาหนะผ่านไปมาไม่สะดวก จำเป็นต้องบำรุงรักษาถนน วัสดุที่นำมาใช้ใน ปัจจุบันจะยิ่งหายากขึ้น และอยู่ห่างไกลจากบริเวณก่อสร้าง จึงมีแนวความคิดที่จะนำวัสดุชั้นทางเก่า กลับมาใช้ใหม่ โดยนำวัสดุผสมเพิ่มมาปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม ที่เรียกว่า Pavement Recycling เพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทางต่อไป

ในกระบวนการนำวัสดุโครงสร้างเดิมกลับมาใช้ใหม่ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการผสมร้อน (Hot Recycling) วิธีนี้ต้องอาศัยความร้อนมาใช้ในการผสมส่วนผสมต่าง วิธีที่ 2 คือ วิธีผสมเย็น (Cold Recycling) วิธีนี้ในปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลาย และใช้งานมากยิ่งขึ้น การนำวัสดุโครงสร้างเดิมกลับมาใช้ใหม่ นำมาใช้เป็นโครงสร้างชั้นพื้นทาง (Base Course) โดยการใช้ปูนซีเมนต์ และแอสฟัลต์ซีเมนต์หรือแอสฟัลต์อิมัลชัน แต่จากการทำงานที่ผ่านมาพบว่ามีข้อจำกัดในการใช้งาน คือปริมาณที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้ชั้นผิวทางเปราะและลดความต้านทานการล้าของชั้นพื้นทาง สำหรับอิมัลชันแอสฟัลต์จะต้องให้ความชื้นแก่วัสดุรวมรวมในปริมาณที่สูงเพื่อช่วยในการผสมของส่วนผสม ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาในการบดอัดได้

การนำวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทางเก่ากลับมาใช้เป็นที่นิยมในปัจจุบัน และการใช้โฟมแอสฟัลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างชั้นทาง ได้รับความนิยม

แพร่หลายในประเทศแถบทวีป ยุโรป อเมริกา ออสเตรเลีย และแอฟริกาใต้ รวมถึงแถบทวีปเอเชีย เช่น มาเลเซีย ใต้หวัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ โครงสร้างทางเดิมมี วัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้

1. เพื่อศึกษาวิธีการใช้โฟมเอสโฟลต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ โครงสร้างทางเดิม
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ โครงสร้างเดิมด้วยวิธีการผสม โฟม เอสโฟลต์
3. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างทางที่มีการนำวัสดุ โครงสร้างทางเดิมที่ ปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยโฟมเอสโฟลต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ โครงสร้างทางเดิมมีขอบเขต การวิจัยดังนี้

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุ โครงสร้างเดิม ชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง
2. ในการศึกษาใช้เอสโฟลต์ซีเมนต์ เกรด AC 60-70 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 851 เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิต โฟมเอสโฟลต์
3. วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการวิจัย คือ วัสดุผิวทางเอสโฟลติกคอนกรีต และวัสดุหินคลุก โดยทำผสมกัน 5 อัตราส่วน
4. ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมทั้ง 5 ส่วนผสม
 - หาขนาดคละของวัสดุมวลรวม (Gradation)
 - หาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content)
 - การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
 - การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

5. ทำการทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม
6. ทำการออกแบบส่วนผสมของวัสดุรวมในแต่อัตราส่วนผสมโดยผสม โฟมแอสฟัลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 - 5 ของวัสดุรวม
7. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเตรียมด้วยเครื่องมือ Gyrotory Compaction โดยวัสดุรวมผสมด้วยโฟมแอสฟัลต์ในปริมาณต่างๆ
8. หาปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมในการผสมกับวัสดุรวมทั้ง 5 ส่วนผสม โดยการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)
9. สรุปรูปปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมใช้ในการผสมกับวัสดุรวมทั้ง 5 ส่วนผสม
10. ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยทำการทดสอบแบบแช่น้ำ ไม่แช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C
 - การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
 - การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)
 - การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)
11. ทำการทดสอบการหาค่ายุบตัวแบบถาวร (Permanent Deformation)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมมีประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับดังนี้

1. ทราบถึงวิธีการใช้โฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิม
2. ทราบถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม และคุณสมบัติเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนน

บทที่ 2

เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

Hogentogler, 1938 อธิบายว่า การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเป็นการทำให้ดินตามธรรมชาติมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ดีขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอ วิธีการปรับปรุงอาจเป็นการบดอัดให้แน่นหรือการใช้สารผสมเพิ่มลงในดิน

Winerkorn, 1955 อธิบายว่า การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเป็นการนำเอาวิธีการทางด้านฟิสิกส์ และเคมีมาใช้ผสมกับดินเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติที่ดีสำหรับงานทางด้านวิศวกรรม

Kennedy and Oleson, 1987 ได้ทำ Mixed In-Place Recycling โดยใช้ปูนซีเมนต์และวัสดุอื่นเป็นสารผสมเพิ่มซึ่งเริ่มนำมาใช้งานในปี 1984 ในประเทศอังกฤษ

Kuhlman, 1989 ได้สรุปว่า มีการใช้ดินซีเมนต์ที่นำวัสดุมาจากโครงสร้างทางเก่าซึ่งเป็น Bituminous Surface มาผสมกับปูนซีเมนต์ใช้เป็นชั้นพื้นทาง วิธีดังกล่าวนี้ได้ใช้ในงานก่อสร้างถนนใน 12 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงเวลาปี 1942 และ 1958 ต่อมาในปี 1970 การปรับปรุงวัสดุเหล่านี้ได้เรียกว่า Pavement Recycling และการทำ Recycling ทั้งผิวทางแบบลาดยาง และผิวทางคอนกรีตเก่าด้วย

Tabensky, 1990 กล่าวว่า Recycling หมายถึงการนำวัสดุที่ใช้แล้วนำมาใช้ใหม่ไม่ใช่เรื่องใหม่ ในประเทศอเมริกา ได้มีการรายงานไว้ในปี 1915 Florida Department of Transportation ได้ทำนำวัสดุโครงสร้างทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนน

Rammanujam, 1995 บันทึกว่า อายุของผิวจราจรแบบยึดหยุ่นจะอยู่ที่ประมาณ 20 ปี ก็จะต้องมีการบำรุงรักษาและซ่อมแซม เพราะภายหลังจากอายุการใช้งาน 20 ปีตามที้ออกแบบไว้แล้ว จะเกิดหลุมบ่อจากการผุพังและเป็นอันตรายต่อการขับขี่ การขาดแคลนเงินทุนที่จะซ่อมแซม

หรือก่อสร้างใหม่ทำให้ต้องพิจารณาการทำ Recycling กับถนนเดิมเพราะจะประหยัดและได้ถนนที่มีคุณภาพดีสามารถรองรับการจราจรได้

Reeves, 1995 ได้กล่าวถึงข้อได้เปรียบของการทำ Pavement Recycling ว่าเป็นการเพิ่มคุณค่าของวัสดุทางเดิม ซึ่งบางพื้นที่วัสดุทางเดิมมีการใช้งานสั้น วัสดุก่อสร้างใหม่มีราคาสูง และมีข้อจำกัดทางธรณีภูมิศาสตร์ ดังนั้นการทำ Recycling เป็นการประหยัดพลังงาน อนุรักษ์ระบบนิเวศน์ สิ่งแวดล้อม และอนุรักษ์แหล่งวัสดุธรรมชาติ

Black, 1995 ได้บอกถึงความเหมาะสมของถนนที่จะทำ Recycling ว่าต้องพิจารณาสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. งาน Pavement Recycling สามารถทำได้ทั้งทางในชนบทและงานทางหลวงที่ไม่จำกัดขนาดของเครื่องมือในการทำงาน
2. งาน Recycling จะเหมาะกับที่ซึ่งห่างไกลจากแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพดี
3. ถนนที่จะทำ Recycling ควรมีความลึกของชั้นวัสดุที่เหมาะสม
4. ต้องพิจารณาการเพิ่ม Granular Material grb, เข้าผสมกับวัสดุโครงสร้างทางเดิมว่ามีความเหมาะสมเพียงใด
5. ถนนที่จะทำ Recycling ควรมีความยาวประมาณ 5 กม. เป็นอย่างน้อยจึงมีความประหยัดอย่างคุ้มค่า
6. ควรพิจารณาถึงความคล่องตัวของจราจรข้างเคียงในระหว่างการปฏิบัติการ
7. ถนนที่มีรอยปะซ่อมเป็นจุดๆ ต้องพิจารณากำจัดออกเพราะอาจจะมีปัญหาความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ

Walton, 1995 บันทึกว่ามีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยใช้ Cold In Place Recycling ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่ามีความประหยัดมากและได้มีการเริ่มใช้เป็นมาตรฐานในปี 1970 ในมลรัฐ Oregon, New Mexico, Kansas และ Florida ภายหลังจากได้มีการทำ Cold In-Place Recycling ในหลายประเทศเช่น Australia, Italy, Russia, Germany และ England ซึ่งใช้กับถนนที่มีการจราจรต่ำถึงปานกลาง ในปี 1980 การทำ Cold In-Place Recycling ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยการนำ Emulsion และ Emulsion ผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 20 ของปริมาณ Emulsion

Atkinson, 1995 ได้สรุปใน Queensland ได้มีการทำ Cement Stabilization ตั้งแต่ปี 1980 กับถนนที่เป็นดินกรวด ซึ่งเมื่อมีปริมาณการจราจรสูงและมีน้ำท่วมทำให้ความแข็งแรงลดลง เกิดการชำรุดวิธีการปรับปรุงคุณภาพได้ถูกพิจารณาให้เป็นตัวแก้ปัญหาทุกอย่างเนื่องจากภาระการจราจรในขณะนั้น ในช่วงแรกของการออกแบบต้องการให้มีกำลังอัดที่ 2 MPa สำหรับถนนที่มี Flexible Subgrade

Giummara, 1995 กล่าวว่า จากการศึกษาที่มีเครื่องมือใหม่ๆ มีประสิทธิภาพสูงทำให้การบดทับ มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ Slow Setting Additive ในการนำโครงสร้างทางเดิม มาใช้ Accelerated Loading Facility (ALF) ได้ประเมินพฤติกรรมแบบ Long Term ของการนำโครงสร้างทางเดิมมาใช้ ที่ Numeraller River ซึ่งใกล้กับ Monaro Highway อยู่ทางเหนือของ Cooma 20 กม. ประเทศอเมริกา ซึ่งทำ Recycling โดยใช้ Binder Slag/Hydrate Lime ในสัดส่วน 85/15 ที่ปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักของโครงสร้างทางเดิม ความหนาที่ใช้ 250, 300, 360 มม. เปรียบเทียบกับความหนา 400 มม. ที่ไม่ทำ Recycling พบความเสียหายว่าจะเกิด Fatigue Cracking เนื่องมาจากเกิด Subgrade Cracking และยังพบว่าเมื่อทำการบดอัดที่ชั้นหนา 300 มม. ขึ้นไปค่าความหนาแน่นที่หนึ่งในสาม ของความหนาที่อยู่ด้านล่างของชั้นจะมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าส่วน

Wijk and Wood, 1983 ได้ร่วมกันศึกษาในหัวข้อ “Use of Foamed Asphalt in Recycling of an Asphalt Pavement” โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อตรวจสอบและประเมินค่าวิธีการนำเอาโพรแมสฟัลต์มาใช้ในการปรับปรุงสภาพชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ (Recycling) รวมถึงทดสอบคุณสมบัติของชั้นทางภายหลังการปรับปรุงสภาพแล้ว โครงการนี้ทำการทดลองปูชั้นทางที่ปรับปรุงใหม่เป็นระยะทาง 14 กิโลเมตร โดยใช้วิธีการปรับปรุงสภาพด้วยวิธีการผสมเย็น (Cold-mix Recycling) ชั้นทางเก่าจะทุบหรือแล้วขนส่งไปยังโรงงานเพื่อนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregate) ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ส่วน วัสดุมวลรวมที่ได้นำไปผสมกับโพรแมสฟัลต์ในสัดส่วน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับมาตรฐานของวัสดุที่ใช้ และการก่อสร้าง กำหนดตามตารางที่ 2.1 ในระหว่างการก่อสร้างส่วนผสมจะได้รับการเก็บเป็นตัวอย่าง เพื่อนำกลับไปบดอัดในห้องปฏิบัติการ และทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว ค่าสัดส่วนปัวซอง ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม และค่าเสถียรภาพมาร์แชล โดยทำการทดสอบทั้งในสภาพแห้งและผ่านการแช่น้ำ ภายหลังการก่อสร้างชั้นทางจะทุบหรือขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบผลและประเมินค่าภายหลังการใช้งานอีกครั้ง

จากผลการทดสอบพบว่า ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของส่วนผสมในระหว่างการบดอัดเป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบและการก่อสร้าง คุณสมบัติของชั้นทางที่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยรวมเป็นที่น่าพอใจ ชั้นทางยังมีคุณภาพที่ดี ภายหลังใช้งานไปได้ 8 เดือน การศึกษาชี้ให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวน่าจะแพร่หลายในอนาคต

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของวัสดุและการก่อสร้าง

Item	Specification
<p><u>Foamed asphalt</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Asphalt - Mixing temperature - Amount of water - Expansion ratio - Half-life - Temperature during processing 	<p>AC-5</p> <p>330 °F</p> <p>2 % by weight of asphalt</p> <p>10</p> <p>20 sec</p> <p>>20 °F</p>
<p><u>Milled material</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Max size - Free moisture during mixing 	<p>3 in.</p> <p>2.5-3.5 %</p>
<p><u>Additional aggregate</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Grading - Coarse aggregate - Free moisture during mixing 	<p>Meeting Section 903 of Indiana State Highway Commission (ISHC) standard specification</p> <p>Meeting requirements of class C aggregate</p> <p>2.5-3.5 %</p>
<p><u>Geometry of pavement</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Minimum thickness of recycled base - Construction 	<p>5 in.</p> <p>Construction section must be open to two-way traffic during non-work periods and be grade and compacted</p>

Maccarrone, et. al., 1994 ทำศึกษาเกี่ยวกับโฟมแอสฟัลต์ พบว่า ปริมาณน้ำร้อยละ 2.6 นิดเข้าไปในแอสฟัลต์ร้อน ทำให้เกิดโฟมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด คือมีค่าการขยายตัวประมาณ 15 เท่า และค่าครึ่งชีวิต ประมาณ 60 วินาที โดยมีการผสมสารผสมเพิ่ม (Additive) เข้าไป 0.7 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลให้โฟมที่เกิดขึ้นมีคุณภาพสูง

Maccarrone, et. al., 1995 ศึกษาส่วนผสมเย็น (Cold Mix) ที่ได้จากส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน และให้คำแนะนำว่า การเคลือบมวลรวมของแอสฟัลต์ เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในงานผสมเย็น เพื่อให้แน่ใจว่าส่วนผสมนั้นมีความต้านทานต่อความชื้นที่เพียงพอ ในกรณีของชั้นผิวทาง วัสดุมวลรวมจำเป็นจะต้องถูกเคลือบในทูลส่วนไม่ว่าขนาดใหญ่หรือเล็ก ขณะที่ในกรณีของชั้นพื้นทาง การเคลือบวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่ จะไม่ใช่จุดที่ต้องเน้นมากนัก แต่ต้องมั่นใจว่า ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำในชั้นผิวทางและระบบระบายน้ำมีคุณภาพเพียงพอ การกระจายตัวเข้าไปเคลือบวัสดุมวลรวมของแอสฟัลต์นั้น ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของมวลรวม ดังนั้น แอสฟัลต์ซีเมนต์มีแนวโน้มที่จะกระจายตัวเข้าไปเคลือบวัสดุที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่า นอกจากนี้ความสามารถในการกระจายตัวของแอสฟัลต์ยังขึ้นอยู่กับความหนืด โดยพบว่า แอสฟัลต์ที่มีความหนืดต่ำจะมีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีกว่า

K M Muthen, 1999 สรุปข้อดีของการใช้โฟมแอสฟัลต์เพื่อปรับปรุงสภาพวัสดุงานทางไว้ดังนี้

- ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงเสียดทานให้ความแข็งแรงของส่วนผสมและมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ โดยส่วนผสมจะมีความยืดหยุ่นและความต้านทานต่อการล้าที่ดีกว่า
- โฟมแอสฟัลต์สามารถนำไปปรับปรุงสภาพวัสดุมวลรวมได้หลายประเภท
- ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ใช้แอสฟัลต์จำนวนน้อยเป็นส่วนผสม ดังนั้นจึงสามารถลดค่าแอสฟัลต์และการขนส่ง
- ภายหลังจากการบดอัดในการก่อสร้างสามารถเปิดการจราจรได้ทันทีในเกือบทุกโครงการ
- ประหยัดเชื้อเพลิงเนื่องจากไม่ต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม
- ลดปัญหาด้านมลพิษจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
- กระบวนการก่อสร้างสามารถกระทำในสภาพเย็นจัดหรือมีฝนตกเล็กน้อยได้

- ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์สามารถเก็บไว้ได้นานก่อนการบดอัดโดยปราศจากการแยกตัวของแอสฟัลต์

Lewis and Collings, 1999 ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ Recycling ที่ได้รับการปรับสภาพด้วยสารปรับสภาพ (Stabilization Agent) ชนิดต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 คุณสมบัติต่างๆ ได้มาจากการใช้ RAP ที่มีการปรับแต่งเกรดเป็นอย่างดี ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบยกเว้นการทดสอบ Unconfined Compressive Strength and Indirect Tensile Strength Testing สำหรับ Cement Stabilization เตรียมมาจากแบบหล่อทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 12.5 ซม. จนได้แท่งคินรูปทรงกระบอก

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของ Stabilized Base ที่ปรับสภาพด้วย Stabilizing Agent ชนิดต่างๆ

TEST PARAMETER	Cement (3%)	Bitumen Emulsion (3.5% net bitumen)	Emulsion/Cement (3.5% net bitumen plus 2% cement)	Foamed Bitumen (3.5%)	Foamed Bitumen/Cement (3.5% net bitumen plus 1% cement)
Unconfined Compressive Strength (Mpa)	3	n/a	n/a	n/a	n/a
Indirect Tensile Strength, Dry (kPa)	250	200	500	200	500
Indirect Tensile Strength, Soaked (kPa)	n/a	80	250	80	300
Marshall Stability, Dry (kN)	n/a	10	20	10	20
Marshall Stability, Soaked (kN)	5000	1500	3500	2500	3500
Resilient Modulus, Dry (MPa)	5000	2000	3500	2000	3500

ชยธันว์ พรหมตร, 2541 ศึกษาถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยใช้วิธีการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) โดยกล่าวว่าวิธีการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test สามารถทดสอบได้ทั้งแบบอัตราคงที่ (Static Load) และแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) เพื่อประมาณค่าคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elastic) ของวัสดุ คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุที่สามารถประมาณค่าได้จากการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test แต่ละแบบคือ

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักแบบคงที่ (Static Indirect Tensile Test)

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Static Modulus of Elasticity)
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Test)
- ค่าสัดส่วนปัวซอง (Static Poisson's Ratio)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated-Load Indirect Tensile Test)

- ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus of Elasticity)
- ค่าสัดส่วนปัวซองแบบคืนตัว (Resilient Poisson's Ratio)
- ค่าความล้า (Fatigue Characteristics)
- ค่าการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation Characteristics)

ข้อดีของวิธีการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test ที่ควรได้รับการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ นอกเหนือไปจากประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุดังกล่าวไว้ข้างต้น

- วิธีทดสอบมีลักษณะเรียบง่ายและไม่ซับซ้อน
- ลักษณะการแตกร้าวของวัสดุ เนื่องมาจากการทดสอบไม่มีผลจากสภาพของผิวของวัสดุทดสอบ ทำให้แน่ใจได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง
- ลักษณะการแตกร้าวของวัสดุเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ

Chui, T.C., Ming Y.H. and Lu L.C., 2002 ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์เพื่อประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุงานทางสำหรับประเทศไทย โดยนำโฟมแอสฟัลต์

เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่เตรียมขึ้นใน 2 สัดส่วน คือ สัดส่วนที่ 1 ใช้วัสดุชั้นทางเก่าผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 สัดส่วนที่ 2 ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของการเติมวัสดุผสมเพิ่มต่อส่วนผสมโดยการเพิ่มส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ร้อยละ 1.5 กับถั่วลยร้อยละ 1.5 และการเพิ่มส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ร้อยละ 1.5 กับตะกรันเหล็กร้อยละ 1.5 ลงในส่วนผสม ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนของมวลรวมที่มีส่วนประกอบของวัสดุเก่าต้องการปริมาณโพลีเมอร์ที่น้อยกว่า เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมของวัสดุเก่า นอกจากนี้ส่วนผสมที่ได้ยังมีอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพผ่านการแช่น้ำต่อสภาพแห้ง (Retained Strength) สูงกว่าส่วนผสมที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมด แสดงให้เห็นข้อดีของการนำวัสดุเก่ามาเป็นส่วนผสม สำหรับผลของสารผสมเพิ่มที่ใช้พบว่าการใช้ตะกรันเหล็กจะทำให้ส่วนผสมโพลีเมอร์มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงขึ้น เมื่อพิจารณาสมรรถนะในการใช้งานของส่วนผสมโดยการทดสอบหาความต้านทานต่อการล้า พบว่าส่วนผสมที่ใช้วัสดุ มวลรวมใหม่ทั้งหมดมีความต้านทานสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณภาพของวัสดุเป็นสำคัญ

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และมีฤกษ์ พัชร, 2544 การนำโพลีเมอร์มาปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย ในการศึกษาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุชั้นทางเก่าในปริมาณที่แตกต่างกันโดยกำหนดสัดส่วนร้อยละ 80, 50 และ 0 ผสมเข้ากับวัสดุมวลรวมใหม่ ผลการออกแบบพบว่าส่วนผสมต้องการปริมาณ โพลีเมอร์ในอัตราส่วนร้อยละ 2.1, 2.6 และ 3.4 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม ตามลำดับ แม้ว่าส่วนผสมที่มีวัสดุเก่าผสมอยู่ปริมาณมากกว่าแต่มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต่ำ และจะมีอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงหลังจากการแช่น้ำ

การทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมโพลีเมอร์มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน สำหรับความต้านทานต่อการล้าและการยุบตัวถาวร ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงสมรรถนะในการใช้งาน พบว่าการผสมวัสดุชั้นทางเก่าลงในส่วนผสมสามารถกระทำได้ถึงร้อยละ 50 โดยที่ความสามารถในการต้านทานต่อการล้าและการยุบตัวของส่วนผสมไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก

วรภัทร เกตุแก้ว, 2549 การศึกษาถึงความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการนำโพลีเมอร์มาปรับปรุงคุณภาพของวัสดุชั้นทางเก่าที่เก็บตัวอย่างจากถนนสายพิษณุโลก-อุตรดิตถ์โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุชั้นทางเก่าในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยกำหนดอัตราส่วนจาก

100 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 0 เปอร์เซ็นต์ มาผสมเข้ากับวัสดุมวลรวมใหม่ ผลการออกแบบพบว่าส่วนผสมที่แตกต่างต้องการปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่แตกต่างกันได้แก่ 2.35 เปอร์เซ็นต์ 2.50 เปอร์เซ็นต์ และ 2.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมที่มีวัสดุชั้นทางเดิม 100 เปอร์เซ็นต์ มีคุณสมบัติค้อยที่สุดใน 3 ส่วนผสม และกรณีทั่วไปส่วนผสมที่มีวัสดุชั้นทางเก่า 0 เปอร์เซ็นต์ จะมีคุณสมบัติดีกว่าส่วนผสมที่มีวัสดุชั้นทางเก่า 50 เปอร์เซ็นต์เล็กน้อย

สำหรับส่วนผสมซีเมนต์ใช้วัสดุทางเดิม ร้อยเปอร์เซ็นต์ต่อซีเมนต์ โดยกำหนดอัตราส่วนที่ 2 เปอร์เซ็นต์ 3 เปอร์เซ็นต์ 4 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบพบว่าปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัวและกำลังอัดเพิ่มขึ้น

สุรพล เกตุแก้ว, 2551 กล่าวว่าปกติแล้วหากวัสดุพื้นทางมีปริมาณแอสฟัลต์ต่ำจะใช้ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ร้อยละ 3 - 5 โดยน้ำหนัก แต่สำหรับวัสดุรีไซเคิลที่มีปริมาณแอสฟัลต์สูงสามารถลดปริมาณโฟมแอสฟัลต์ลงมาได้ถึงร้อยละ 2 - 3 โดยน้ำหนักมวลรวม

ธันวิน สวัสดิ์สถานต์ และ จิตติมา อังษานาม, 2551 ได้ศึกษาการบูรณะลาดยางด้วยวิธีหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่แบบในที่ โดยใช้โฟมแอสฟัลต์เป็นวัสดุเพิ่ม ในการบูรณะทางหลวงหมายเลข 304 ระหว่าง กม.95+653 – กม. 101+000 (ด้านชาล่อง) ในการดำเนินการก่อสร้างได้แบ่งพื้นที่ในการก่อสร้างเป็น 2 ช่วงโดยช่วงที่ 1 ระหว่าง กม.98+350 – กม.101+000 ใช้สัดส่วนผสม ผิวทางเดิม 9 ซม. และหินฝุ่น 6 ซม. (RAP60:หินฝุ่น40) และช่วงที่ 2 ระหว่างกม. 94+253 - กม.97+901 ใช้สัดส่วนผสม ผิวทางเดิม 15 ซม. (RAP100)

ในการออกแบบส่วนผสมในห้วงปฏิบัติการ โดยการใช้ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 1 เป็นสารผสมเพิ่ม มีค่าแรงดึงทางอ้อมเท่า 352.6 kPa และ 306.7 kPa ตามลำดับ จากการนำตัวอย่างในสนามมาทำการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมและค่ากำลังอัดแกนเดียว ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบทางวิศวกรรม

TEST PARAMETER	Lab		Field	
	RAP100	RAP60:หินฝุ่น40	RAP100	RAP60:หินฝุ่น40
Unconfined Compressive Strength (ksc)	n/a	n/a	16.7	11.4
Indirect Tensile Strength, Dry (kPa)	202 - 285	258 - 339	317 - 371	521 - 594
Indirect Tensile Strength, Soaked (kPa)	178 - 239	165 - 270	394 - 419	507 - 677

2.2 แนวคิดการนำวัสดุโครงสร้างทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่

2.2.1 การนำวัสดุโครงสร้างทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่

การนำวัสดุโครงสร้างทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่เริ่มใช้ครั้งแรกในทศวรรษที่ 50 โดยการนำวัสดุแอสฟัลต์ (Asphalt) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) มาผสมกับชั้นทางเก่าที่ถูกลบออกโดยใช้เครื่องจักรกลแล้วผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุโครงสร้างทางเก่าให้ดีขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุทางเก่าทำได้ 2 วิธีคือวิธีการผสมร้อน (Hot Mix Recycling) และวิธีการผสมเย็น (Cold Mix Recycling)

วิธีการผสมร้อน Asphalt Hot-Mix Recycling คือการผลิต Recycling Asphalt Concrete โดยการนำแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการรื้อชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมนำมาใช้เป็นวัสดุดิบ โดยอาจเพิ่มวัสดุใหม่เข้าไปผสมด้วยหรือไม่ก็ได้ตามความจำเป็น วัสดุใหม่ดังกล่าวได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ และ/หรือสารปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ (Asphalt Recycling Agent) และ/หรือมวลรวม และ/หรือแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการบำรุงทาง

ในการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยวิธีการผสมร้อน (Hot mix recycling) โดยการเผาผิวแอสฟัลต์ให้อ่อนตัวแล้วนำมาผสมใหม่โดยนำปูนซีเมนต์หรือแอสฟัลต์เข้าไปผสมดังรูปที่ 2.1 ทั้งนี้วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในระหว่างทำการขุดลอกและทำให้เกิดมลพิษเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.1 การปรับปรุงโครงสร้างทางเดิมด้วยวิธีการผสมร้อน

ที่มา : Asphalt Recycling in Pavement Preservation, Donald M. Matthews 2007

ในการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นนั้นสามารถทำการขุดลอกวัสดุผิวทางเดิมและผสมกับสารผสมเพิ่มและทำการบดทับ ดังแสดงรูปที่ 2.2 วิธีนี้เป็นการประหยัดพลังงานและงบประมาณจึงได้รับความนิยม



รูปที่ 2.2 การปรับปรุงโครงสร้างทางเก่าด้วยวิธีการผสมเย็น ทางหลวงหมายเลข 407 (อ.หาดใหญ่-อ.จะนะ) บริเวณ กม.24

1) การนำวัสดุโครงสร้างทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็น

การปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ การผสมเย็นภายในโรงงาน (Cold In-Plant Recycling) และการผสมเย็นในที่ (Cold In-Place Recycling)

การผสมเย็นในโรงงาน (Cold In-Plant Recycling) ทำได้โดยเครื่องจักรทำการขุดวัสดุจากโครงสร้างทางเดิม และขนส่งมาที่โรงงานเพื่อทำการผสมกับสารผสมเพิ่มและ/หรือวัสดุมวลรวมใหม่ที่ต้องการ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมและทำการบดทับในสายทางดังแสดงรูปที่ 2.3 วิธีจะเป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณเนื่องจากการขนย้ายวัสดุ แต่จะเป็นผลดีสำหรับ โครงสร้างทางเก่าที่เป็นหลุมเป็นบ่อเพราะสามารถปรับ/และซ่อมแซมโครงสร้างทางได้สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.3 การปรับปรุงโครงสร้างทางเดิมด้วยวิธีการผสมเย็นในโรงงาน

ที่มา : Asphalt Recycling in Pavement Preservation, Donald M. Matthews 2007

การผสมเย็นในที่ (Cold In-Place Recycling) เป็นกระบวนการที่ทำก่อสร้างในพื้นที่โดยเครื่องจักรทำการขุดลอกวัสดุโครงสร้างทางเดิมและทำการผสมกับสารผสมเพิ่มแล้วทำการบดทับโดยทั่วไปความหนาที่ใช้ในช่วง 200 – 300 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของโครงสร้างทางดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นวิธีการรวดเร็ว ประหยัดงบประมาณและเวลาอีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ

เนื่องจากการผสมเย็นในที่ เป็นกระบวนการที่ทำในพื้นที่สายทางจึงเป็นวิธีการที่รวดเร็วกว่า ประหยัดงบประมาณและเวลาในการขนส่ง ก็ตามงานผสมเย็นภายในโรงงาน เป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อมีจุดเสียหายได้ชั้นทางจะต้องทำการขุดรื้อชั้นทางด้านบนออกและทำการซ่อมแซมจุดที่มีความหาย หากตำแหน่งที่ได้รับ ความเสียหายไม่ได้รับการแก้ไข จะทำให้ถนนใหม่เสียหายภายหลังจากการเปิดการจราจร

งานการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ด้วยวิธีผสมเย็นจะช่วยให้ความแข็งแรงของโครงสร้างถนนเพิ่มขึ้น โดยความหนาของโครงสร้างทางใหม่จะเพิ่มเฉพาะความหนาของผิวทางใหม่ประมาณ 5 - 10 ซม. ซึ่งนอกจากจะช่วยประหยัดวัสดุงานทางแล้ว ยังจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังไม่มีผลกระทบต่ออาคารสองข้างทาง



รูปที่ 2.4 การปรับปรุงโครงสร้างทางเก่าด้วยวิธีการผสมเย็น

2) เครื่องจักรที่ใช้ในงานปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิม

การนำวัสดุโครงสร้างโครงทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีผสมเย็นในที่ (Cold In-Place Recycling) สำหรับชั้นรองพื้นทางรองรับ Surface Treatment โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 20 – 30 ซม. ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบโครงสร้าง ในปัจจุบันเครื่องจักรกล ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลาหลายปี จากการพัฒนาทำให้ได้เครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่ มีกำลังสูง และมีกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะสำหรับงานการปรับปรุงสภาพในที่ มีระบบการผสมน้ำและสารผสมเพิ่ม ซึ่งควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ให้ความถูกต้องและแม่นยำ เครื่องจักรดังกล่าวสามารถทำงานแล้วเสร็จ ด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพียงครั้งเดียว ซึ่งถึง

สำคัญของการทำงานของขบวนเครื่องจักรขึ้นอยู่กับขนาดและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สามารถ
ชุดหรือชิ้นทางเก่าขึ้นมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องจักรที่ใช้ในงานปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมโดยวิธีผสมเย็นในที่
ที่มา : Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments, Prithvi et. al., 1997

กรมทางหลวง, 2543 กำหนดว่าเครื่องจักรที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างจะต้องสามารถขุดตัดตัดผสม หรือขุดใส่ผสมกับชั้นทางเดิมได้ความลึกตามที่ได้กำหนด หรือผสมวัสดุชั้นทางเดิม พร้อมวัสดุใหม่ได้โดยสม่ำเสมอและถูกต้องตามแบบและข้อกำหนด ชุดอุปกรณ์ขุดตัดชั้นทางเดิมจะต้องมีขนาดเหมาะสม สามารถทำงานขุดตัดผสมวัสดุได้เต็มความกว้างช่องจราจรมาตรฐาน

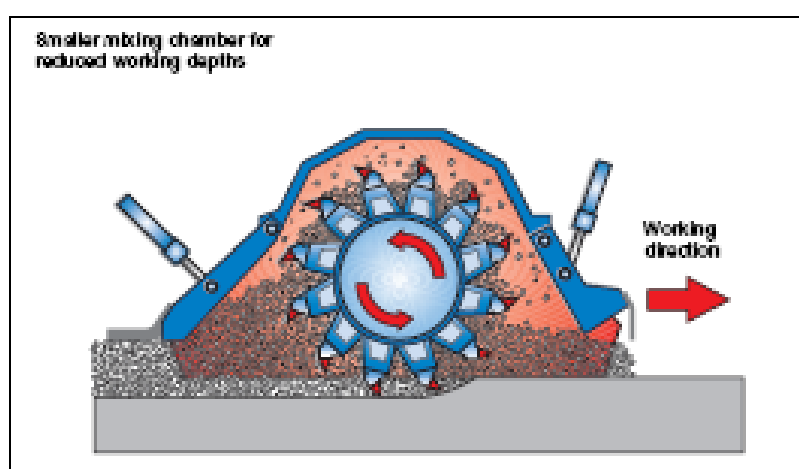
สำหรับชุดเครื่องจักรประกอบการก่อสร้างจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

1. เครื่องจักรอุปกรณ์เกี่ยวกับวัสดุผสมเพิ่มและน้ำ
2. ต้องมีอุปกรณ์วัดคุมปริมาณการจ่ายวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิดและ/หรือน้ำ ที่เที่ยงตรง สม่ำเสมอตามที่กำหนด
3. ถังบรรจุแอสฟัลต์แบบเคลื่อนที่
4. ต้องเป็นถังบรรจุชนิดที่ติดตั้งบนรถบรรทุก มีขนาดความจุมากพอที่จะป้อนแอสฟัลต์ได้อย่างต่อเนื่องขณะก่อสร้าง
5. เครื่องจักรปรับเกลี่ยระดับ
6. เครื่องจักรเกลี่ยปรับระดับ จะต้องเป็นชนิดขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเองมีขนาดและกำลังมากพอที่จะเกลี่ยวัสดุ และปรับระดับ ได้ถูกต้องตามรูปแบบ
7. รถบรรทุกวัสดุ
8. รถบรรทุกวัสดุที่นำใช้จะต้องเป็นชนิดที่เหมาะสมกับงาน มีจำนวนเพียงพอกับกำลังการผลิต เพื่ออำนวยความสะดวกให้การก่อสร้างดำเนินการไปได้โดยไม่ติดขัด หรือหยุดชะงัก
9. เครื่องจักรปูวัสดุ
10. เครื่องจักรปูวัสดุ จะต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเองมีกำลังมากพอ และสามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ได้อย่างสม่ำเสมอ และปูวัสดุได้ระดับความลาดเอียงได้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนด มีลักษณะผิวเรียบสม่ำเสมอ โดยจะต้องมีระบบหรืออุปกรณ์ควบคุมระดับและความลาดเอียงการปูโดยอัตโนมัติ
11. เครื่องจักรบดทับ
12. ต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง โดยมีขนาด ชนิด น้ำหนัก และจำนวนที่เหมาะสมกับงานก่อสร้าง

เครื่องจักรสำหรับการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นนั้น สามารถทำงานได้แล้วเสร็จด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุง

สภาพเพียงครั้งเดียว ซึ่งสิ่งสำคัญของการทำงานของขบวนเครื่องจักรอยู่ที่ขนาดและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สามารถขุดหรือชั้นทางเดิมขึ้นมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ในกระบวนการขุดหรือชั้นทางเก่าเกิดขึ้น น้ำจากท่อจะฉีดเข้าไปในห้องผสม (Mixing Chamber) เพื่อผสมกับวัสดุชั้นทางเก่า ซึ่งปริมาณน้ำจะได้รับการควบคุมให้ได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมพอดีสำหรับการบดอัด จากนั้นสารปรับปรุงสภาพที่อยู่ในรูปของเหลว เช่น น้ำปูน (Cement Slurry) แอสฟัลต์อิมัลชัน หรือ โฟมแอสฟัลต์ จะได้รับการฉีดเข้าผสมกับวัสดุชั้นทางเก่า



รูปที่ 2.6 เครื่องจักรสำหรับการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้น

ที่มา : Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments, Prithvi et. al., 1997

ข้อดีของการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็น

1. ชั้นทางเก่าทั้งหมดจะนำมาใช้ในกระบวนการปรับปรุงสภาพ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่สำหรับทิ้งวัสดุเก่า อีกทั้งยังต้องการใช้วัสดุมวลรวมใหม่ในปริมาณน้อย ทำให้ลดค่าวัสดุและค่าขนส่ง
2. ลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่วัสดุ อีกทั้งช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม
3. ด้วยเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพทำให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณภาพ สามารถปูและบดอัดชั้นทางได้เป็นอย่างดีสม่ำเสมอและเรียบแน่น

4. ในกรณีงานผสมเย็นในที่ กระบวนการทำงานส่งจะผลרבกวนโครงสร้างชั้นทางน้อยที่สุดเนื่องจากเครื่องจักรสามารถทำงานได้แล้วเสร็จด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพียงครั้งเดียว
5. สามารถทำงานให้แล้วเสร็จได้อย่างรวดเร็ว จึงรบกวนต่อการจราจรในเวลาไม่มากนัก
6. ใช้พื้นที่ในการทำงานเพียง 1 ช่องการจราจร จึงลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุกับขบวนการที่เคลื่อนตัวผ่าน รวมทั้งลดผลกระทบต่อกระแสการจราจร

2.2.2 สารปรับสภาพ (Stabilizing Agent)

ในการปรับสภาพวัสดุรีไซเคิล มีเหตุผลดังต่อไปนี้

1. เพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างถนน โดยไม่ต้องเพิ่มวัสดุใหม่
2. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน
3. ลดการซึมผ่านเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1) ปูนซีเมนต์

โดยทั่วๆไปการปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างทางเดิมด้วยปูนซีเมนต์ จะใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 2 - 4 โดยน้ำหนักของมวลรวม โดยจะใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 1 วิธีการที่ใช้ในการผสมซีเมนต์นั้นสามารถทำได้ 2 วิธีการ คือ

1. โปรรูปูนซีเมนต์ลงบนผิวถนนหน้าเครื่องจักรรีไซเคิล จากนั้นเครื่องบดย่อยผิวทางจะผสมปูนซีเมนต์ที่โปรรลงไปกับวัสดุที่บดย่อยวิธีนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียซีเมนต์ไปกับอากาศในกรณีที่เกิดลมพัดในขณะที่ทำงานและประสิทธิภาพในการผสมต่ำ
2. ผสมปูนซีเมนต์กับน้ำด้วยเครื่องผสมเพื่อให้ได้น้ำปูนซีเมนต์เข้มข้น (Cement Slurry Mix) จากนั้นพ่นตรงไปที่ห้องผสม ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ ได้ปริมาณของซีเมนต์ที่มีปริมาณแน่นอนตามข้อกำหนด และไม่มีการสูญเสียซีเมนต์

เครื่องจักรรีไซเคิล จะเป็นเครื่องปรีด (Grader) เพื่อปาดผิวถนนก่อนหน้าที่จะบดอัดด้วยรถบดสั่นสะเทือน (Vibratory Roller) ท้ายสุดตามด้วยรถบดล้อยาง (Rubber Tired Roller) เพื่อความ

สวยงามของผิวหน้า เมื่อบดอัดเสร็จแล้วจึงพ่นยางมะตอยน้ำ (Prime Coat) ตามด้วยการปิดทับด้วยผิวทางใหม่ กระบวนการรีไซเคิลด้วยซีเมนต์ดูได้จากรูปที่ 2.7

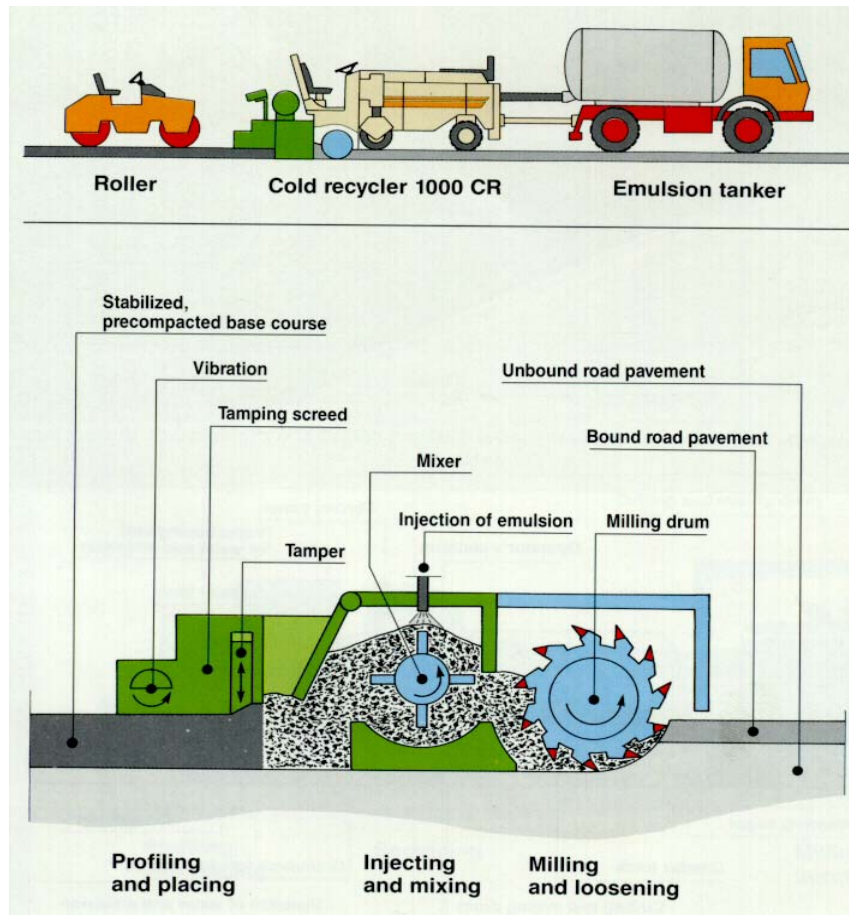


รูปที่ 2.7 กระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้ซีเมนต์

2) แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion)

แอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ในงานรีไซเคิลถนนส่วนใหญ่จะมีปริมาณ Asphalt Cement ประมาณ 60% ข้อดีของแอสฟัลต์อิมัลชันคือ อยู่ในสภาพของเหลวที่อุณหภูมิบรรยากาศ และสามารถผสมกับหิน ได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนกับหิน การนำแอสฟัลต์อิมัลชันมาใช้ในงานรีไซเคิลถนนนั้น ทำได้โดยการบรรจุยางแอสฟัลต์อิมัลชันในรถบรรทุก วังหน้าเครื่องรีไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 2.8

แอสฟัลต์อิมัลชันจะถูกลำเลียงผ่านท่ออ่อน (Flexible Hose) และสเปรย์ลงไปในห้องผสมของเครื่องจักรรีไซเคิล วัสดุโครงสร้างทางเดิมจะผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันในห้องผสมแล้วปลงบนพื้นถนน



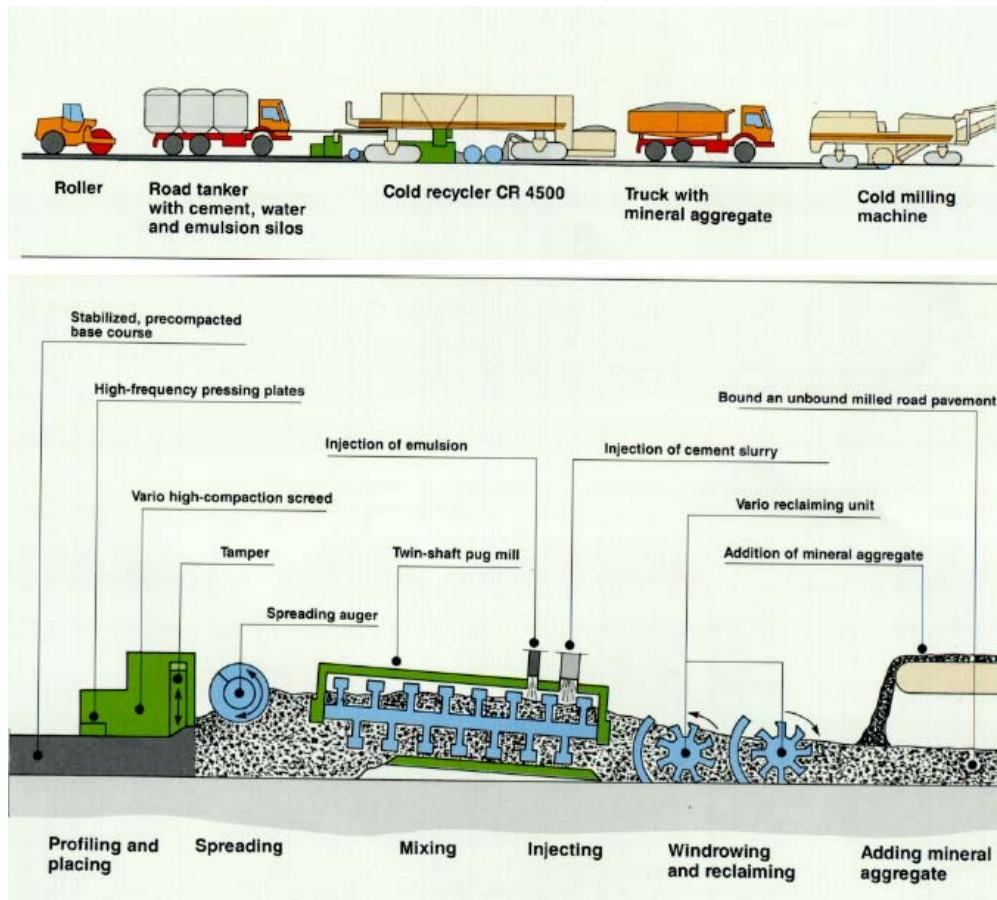
รูปที่ 2.8 รูปแสดงกระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้แอสฟัลต์อิมัลชันและซีเมนต์

ที่มา : Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments, Prithvi et. al., 1997

ในบางกรณีสามารถใช้แอสฟัลต์อิมัลชันร่วมกับปูนซีเมนต์ได้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยปริมาณการใช้ซีเมนต์จะค่าประมาณร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักของมวลรวม การผสมคือท่อน้ำปูนซีซีเมนต์ขึ้น (Cement Slurry Mix) ลงไปผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันในห้องผสมของเครื่องจักรรีไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

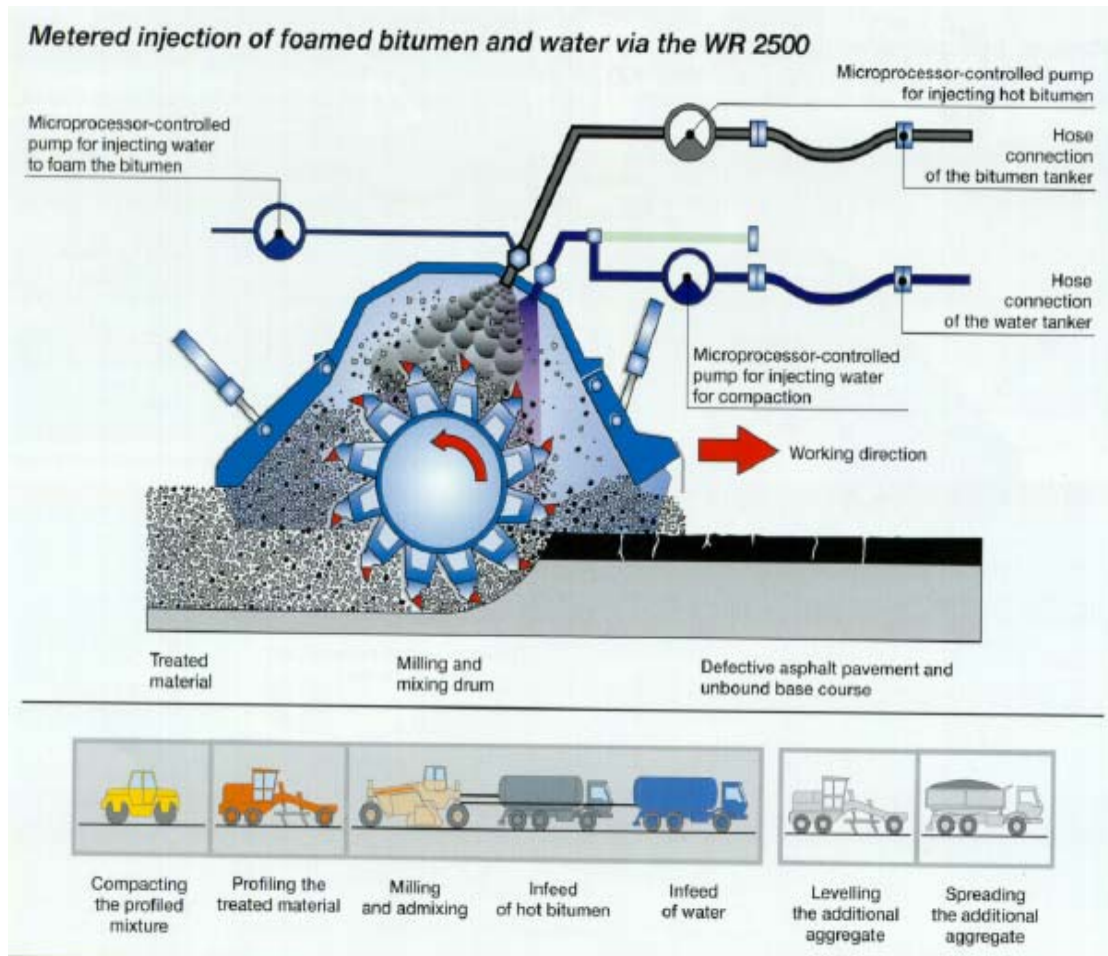
ข้อดีของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันร่วมกับปูนซีเมนต์คือ

1. เพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับหิน
2. แอสฟัลต์อิมัลชันสามารถเซตตัวได้เร็วและเปิดผิวทางจราจรได้เร็วขึ้น
3. เพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างถนน



รูปที่ 2.9 รูปแสดงกระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้แอสฟัลต์อิมัลชันและซีเมนต์

ที่มา : Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments, Prithvi et. al., 1997



รูปที่ 2.10 รูปแสดงกระบวนการรีไซเคิลถนนโดยใช้โฟมแอสฟัลต์

ที่มา : Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments, Prithvi et. al., 1997

สำหรับกลุ่มของแอสฟัลต์ซึ่งประกอบด้วย แอสฟัลต์อิมัลชันและโฟมแอสฟัลต์ นั้นเป็นวัสดุที่เหมาะสมในหลายด้าน ทั้งการมีแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมรับได้ มีความยืดหยุ่นและช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ ข้อดีของการใช้สารปรับปรุงสภาพในกลุ่มนี้คือจะทำให้ชั้นทางมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ แต่สำหรับการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน มีข้อเสียคือเกิดความชื้นสูงในส่วนผสม ทำให้เกิดปัญหาในการบดอัดและการพัฒนากำลังช้า ข้อดีและข้อเสียของสารปรับปรุงสภาพชนิดต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์	
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถหาใช้ได้ง่ายจากที่ต่างๆทั่วโลก 2. มีราคาต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ 3. สามารถใช้ได้ทั้งรูปผงและในรูปของเหลวที่อยู่ในรูปของน้ำปูน 4. ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานรองรับ 5. เพิ่มความต้านทานต่อการเสียหายเนื่องจากความชื้นให้วัสดุ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ (Shrinkage Cracking) แต่สามารถลดการแตกร้าวได้เมื่อให้ปริมาณที่เหมาะสม 2. ลดความต้านทานความล้าของวัสดุ เนื่องจากชั้นทางขาดความยืดหยุ่น 3. ต้องการการบ่มที่เหมาะสม การเปิดใช้ผิวจราจรทันทีสามารถก่อให้เกิดความเสียหายได้

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน

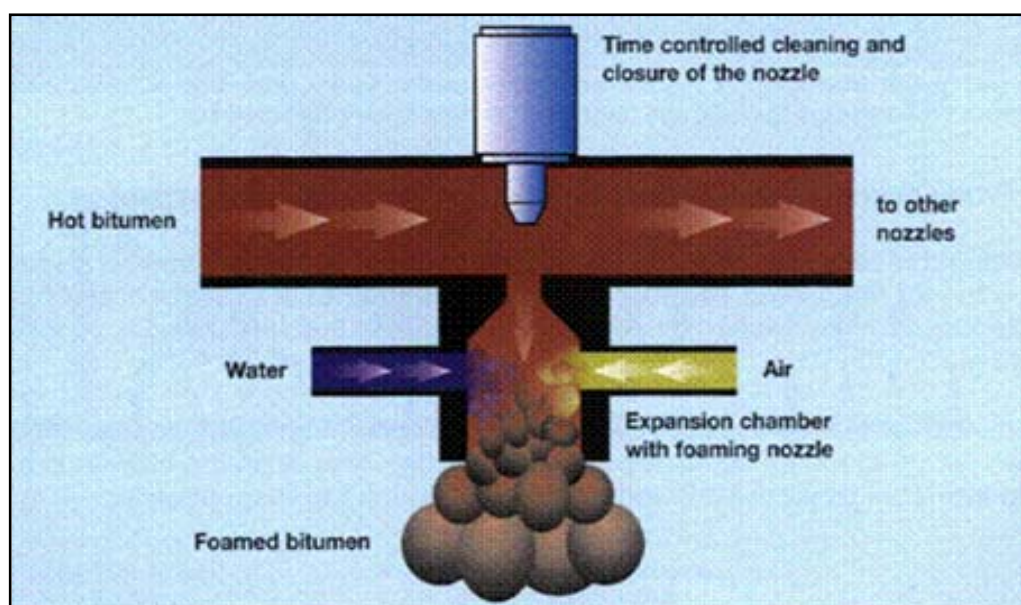
แอสฟัลต์อิมัลชัน	
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. ให้ความยืดหยุ่นที่ดีแก่ชั้นทาง ทำให้ช่วยเพิ่มความต้านทานความล้า 2. สะดวกในการปฏิบัติงานปรับปรุงสภาพ 3. ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานรองรับ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. โรงงานผลิตต้องมีการควบคุมคุณภาพสูง อีกทั้งสารอิมัลซิไฟร์ที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันยังมีราคาที่สูง 2. ถ้าวัสดุที่ได้จากชั้นทางเก่ามีปริมาณความชื้นสูงเมื่อผสมเข้ากับแอสฟัลต์อิมัลชันจะทำให้ได้ส่วนผสมที่อยู่ในสภาพอิมัลชันด้วยน้ำ 3. การบ่มใช้เวลานานเนื่องจากกำลังของวัสดุจะพัฒนาขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004

2.3 โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt)

2.3.1 การคิดค้นโฟมแอสฟัลต์

โฟมแอสฟัลต์ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Prof. Ladis Csanyi จากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐ Iowa State University เมื่อปี ค.ศ.1956 ภายหลังจากเทคโนโลยีนี้ได้รับพัฒนาต่อโดย Mobil Oil Organization ซึ่งได้สิทธิบัตรจาก Prof. Ladis Csanyi การผลิตโฟมแอสฟัลต์ ทำได้โดยการฉีดแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนอุณหภูมิประมาณ 160-200 °C และน้ำในปริมาณที่พอเหมาะเข้าไปผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 น้ำเมื่อกระทบเข้ากับความร้อนจะระเหยเป็นไออย่างรวดเร็ว ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะแทรกอยู่ในเนื้อแอสฟัลต์ ผลที่ตามมาทำให้แอสฟัลต์มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะฟองโฟม แต่ทำให้ความหนืดของแอสฟัลต์จะลดลง แอสฟัลต์ที่อยู่ในรูปโฟมจะมีความสามารถในการเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่มีสภาพชื้นและเย็นได้ดี



รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004

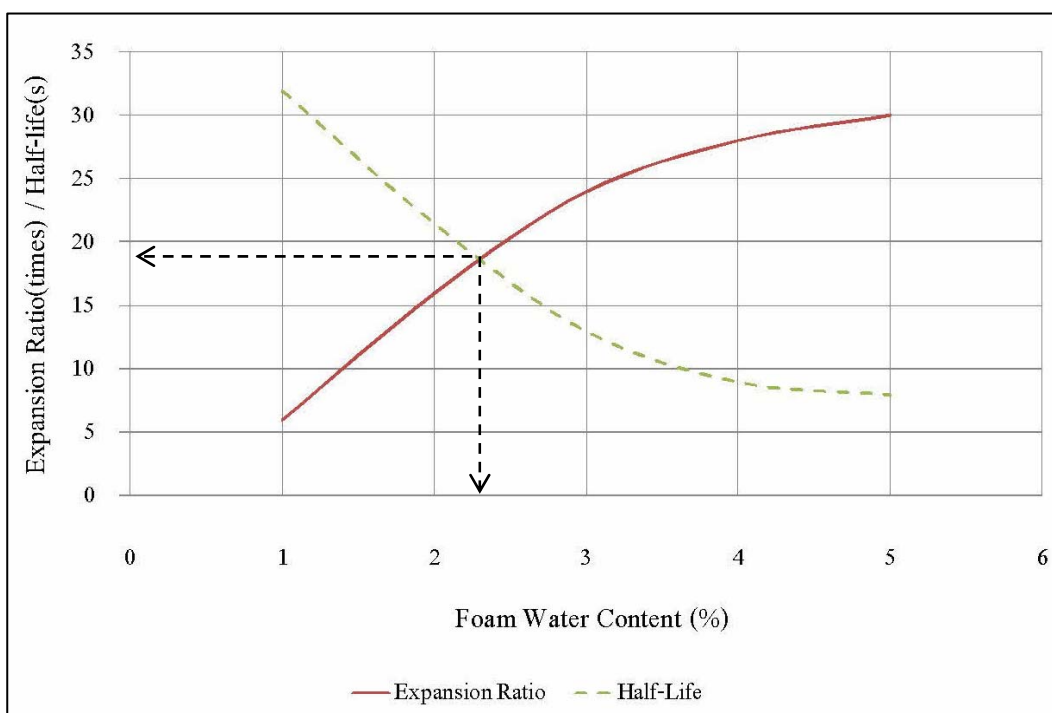
2.3.2 กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์

1) คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งชี้คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์คือ

1. ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อปริมาตรแอสฟัลต์เดิม
2. ค่าครึ่งชีวิต (Half-life) แสดงถึงเวลาเป็นวินาทีที่ปริมาตรสูงสุดของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นยุบตัวลงเหลือครึ่งหนึ่ง

Hosin David Lee, 2007 กล่าวถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Expansion Ratio และ Half - Life เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำ และจุดตัดของเส้นทั้งสองจะได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิต

2) ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

1. อุณหภูมิของแอสฟัลต์ ที่สูงจะทำให้คุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ดีขึ้น แต่จะเหมาะสมที่สุดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 160 - 200 °C
2. ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตรงกันข้ามกับค่าครึ่งชีวิตที่จะลดลง
3. ความดันที่ต่ำกว่า 3 MPa จะทำให้ค่าการขยายตัว และ ค่าครึ่งชีวิตลดลง
4. สารลดสภาพโฟม (Anti-foaming agent) เช่น สารประกอบซิลิโคน จะลดสภาพการเกิดโฟมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ลง

3) การกระจายตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์

การกระจายตัวของโฟมแอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่เหมือนกับแอสฟัลต์ ในงานผสมร้อน ส่วนผสมที่ได้จากโฟมแอสฟัลต์จะไม่มีสีดำ เนื่องจากแอสฟัลต์จะไม่เคลือบวัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่โดยตรง แต่ฟองโฟมที่มีเป็นจำนวนมาก จะเข้าไปยึดเกาะและผสมกับอนุภาคที่เป็นฝุ่นละเอียดของมวลรวม (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือ มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) ส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์ กับส่วนละเอียด จะทำหน้าที่เหมือนมอร์ต้ายึดเชื่อมระหว่างมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้ส่วนผสมทั้งหมดมีสีคล้ำจางๆ ในทางปฏิบัติจะมีการเติมซีเมนต์ ปูนขาว หรือวัสดุมวลละเอียดเพื่อผสมในวัสดุชั้นทางเก่าที่นำมาปรับปรุงสภาพเพื่อผสมกับแอสฟัลต์ ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมที่มีขนาดใหญ่

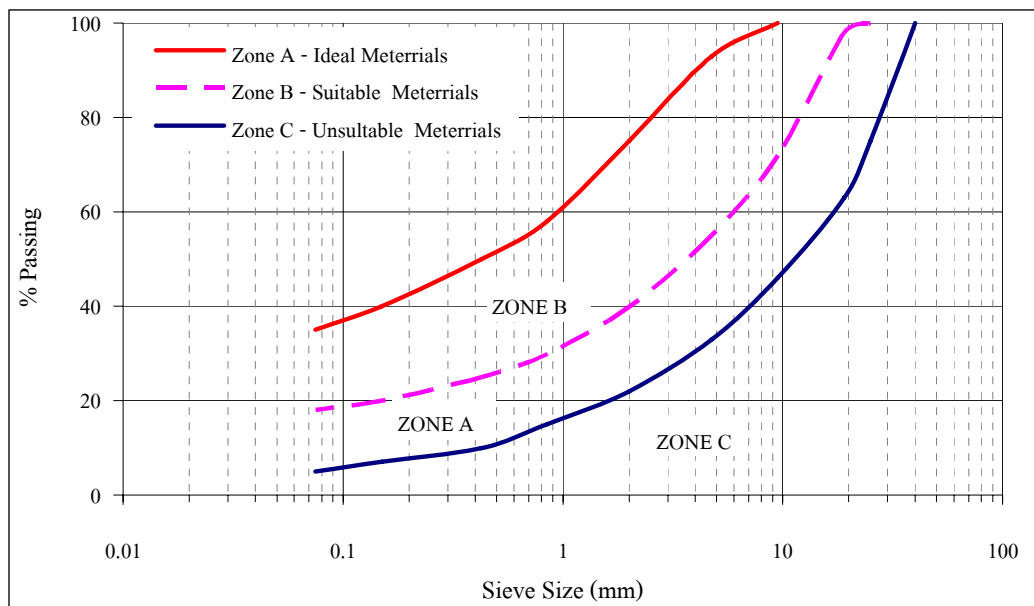
2.3.3 การออกแบบส่วนผสม

1) วัสดุมวลรวม

ขนาดกะละของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์จะต้องมีปริมาณฝุ่นละเอียด (มวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 5–20 ทั้งนี้เนื่องจากตัวโฟมแอสฟัลต์จะกระจายตัวเข้าไปผสมกับฝุ่นละเอียด เกิดเป็นรูปแบบของมอร์ต้า ซึ่งส่วนผสมระหว่างโฟมแอสฟัลต์กับฝุ่นละเอียดนี้ทำหน้าที่เป็นตัวยึดวัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ไว้ด้วยกัน แทนการที่ตัวโฟมแอสฟัลต์จะเข้าไปเคลือบกับวัสดุโดยตรง

ดังนั้นปริมาณฝุ่นละเอียดที่พอเหมาะจะทำให้โพลีแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวเข้าเป็น
ตัวเชื่อมยึดติดระหว่างวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่ ส่งผลถึงความแข็งแรงโดยรวมของส่วนผสมด้วย

จากการวิจัยในประเทศออสเตรเลียแสดงให้เห็นว่าวัสดุมวลรวมทั้งหินปูน ทราย และ
ตะกรันเหล็ก สามารถนำมาผสมกับโพลีแอสฟัลต์ได้ โดยจะต้องมีขนาดละเอียดของวัสดุมวลรวมที่
นำมาใช้ที่เหมาะสม ผลการวิจัยที่ผ่านมาได้บ่งชี้ถึงขนาดละเอียดที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 2.13
วัสดุมวลรวมที่มีขนาดละเอียดอยู่ในช่วงโซน A เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสภาพชั้นทางที่มี
ปริมาณการจราจรสูง โซน B เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับปริมาณการจราจรต่ำ ถ้าใส่สารผสมเพิ่มเช่น
ปูนขาว หรือปูนซีเมนต์เพิ่มก็จะสามารถรองรับปริมาณการจราจรสูงได้ สำหรับวัสดุมวลรวมที่มี
ขนาดละเอียดในโซน C จะต้องมีการเพิ่มมวลละเอียดเข้าไป เพื่อให้เพียงพอต่อการผสมโพลีแอสฟัลต์
ได้อย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ขนาดละเอียดที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวม

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004

2) การผลิตโพลีเมอร์แอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่นิยมใช้จะเป็นแอสฟัลต์เกรด 60-70 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์แอสฟัลต์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา โดยทั่วไปปริมาณน้ำจะอยู่ที่ร้อยละ 1.0-5.0 ของปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ โพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่ดีต้องเป็นโพลีเมอร์ที่มีทั้งค่าการขยายตัวและค่าครีปชีวิตเหมาะสมที่สุด สำหรับปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่ใช้ในส่วนผสมพบว่าขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดของวัสดุรวมรวมโดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์ของส่วนละเอียด โดยทั่วไปใช้ปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ประมาณ 3-4% ดังแสดงตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุรวมรวมประเภทต่างๆ

Binder	Range of Optimum Binder Content (%)	Additional Requirements
Well graded clean gravel	2.0-2.5	
Well graded marginally clayey/silty gravel	2.0-4.5	
Poorly graded marginally clayey gravel	2.5-3.0	
Clayey gravel	4.0-6.0	Lime modification
Well graded clean sand	4.0-5.0	Filler
Well graded marginally silty sand	2.5-4.0	
Poorly graded marginally silty sand	3.0-4.5	
Poorly graded clean sand	2.5-5.0	Filler
Silty sand	2.5-4.5	
Silty clayey sand	4.0	Possibly lime
Clayey sand	3.0-4.0	Lime modification

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การทดสอบขนาดผลของวัสดุผสมรวม (Gradation)

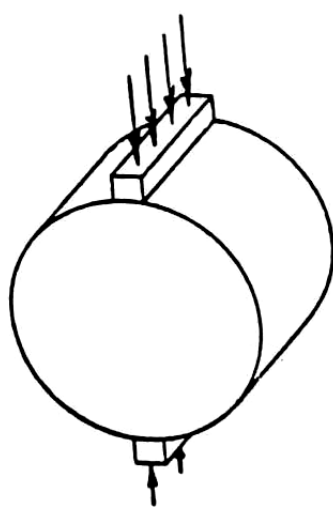
วิธีการทดลองอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO T27 “Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates” และ มาตรฐานกรมทางหลวง ทม.-ท. 205/2517 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง”

2.4.2 ปริมาณความชื้นของวัสดุผสมรวม

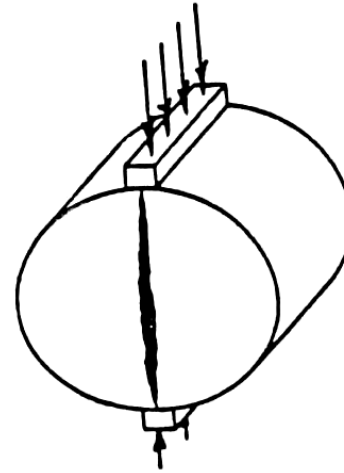
วิธีการอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO T180 “Moisture- Density Relations of Soils Using a 10-lb (4.54 kg) Rammer and an 18-in. (457 mm) Drop” และ มาตรฐานกรมทางหลวง ทม.-ท. 108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” การทดสอบการบดอัดเพื่อหาค่า Maximum Dry Density (MDD) และ Optimum Moisture Content (OMC) แบบตัวอย่างที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มม. (4 นิ้ว) สูง 116.8 มม. (4.584 นิ้ว) ดินตัวอย่างผ่านตะแกรง 19.0 มม. (3/4 นิ้ว) ใช้จำนวนการบดอัดที่ 25 ครั้งต่อ 1 ชั้น จำนวน 5 ชั้น

2.4.3 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

การทดสอบ Indirect Tensile Test นั้นกระทำโดยการทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression Load) ซึ่งอาจจะเป็นไปได้แบบอัตราคงที่ (Static) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) ก็ได้แล้วแต่กรณี โดยทั่วไปให้นำกระทำตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบตามที่แสดงในรูปที่ 2.14



(ก) การใช้น้ำหนักกดด้านบนของตัวอย่าง



(ข) ก้อนตัวอย่างที่เสียหาย

รูปที่ 2.14 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง

วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ASTM D6931 “Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures” โดยมีการคำนวณจากสมการดังนี้

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

เมื่อ

σ_T	=	Indirect Tensile Strength (MPa)
P	=	แรงกด (N)
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของก้อนตัวอย่าง (mm)
T	=	ความสูงของก้อนตัวอย่าง (mm)

2.4.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแบ่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอก จะรับได้ การทดสอบจะให้แรงกดในแนวตั้ง

โดยวิธีการอ้างอิงตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทม.-ท.105/2517 “วิธีการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน” ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$q = \frac{4P}{\pi D} \quad (2.2)$$

เมื่อ

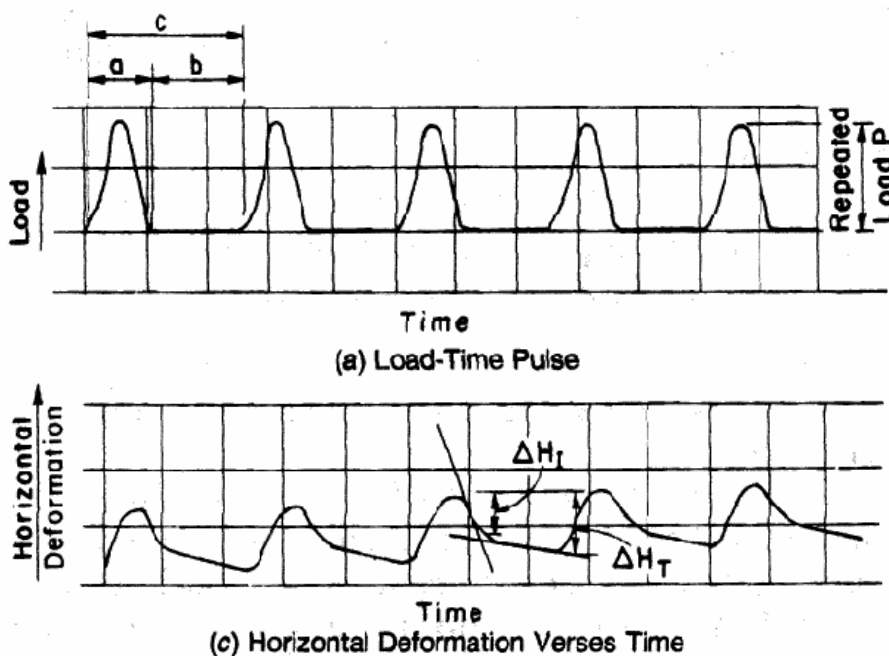
q = ค่ากำลังอัดแกนเดียว (MPa)

P = แรงกด (N)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (mm)

2.4.5 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์มาตรฐานวิธีทดสอบมาตรฐานวิธีทดสอบของ ASTM D4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures โดยมีรูปแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ซึ่งใช้ช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 0.1 วินาที และเวลาพักเท่ากับ 0.9 วินาที โดยให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบโดยประมาณเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (μm) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะของแรงกระทำและการทรุดตัว

ที่มา : University of New Mexico, 2003

ในการทดสอบจะทำการเก็บข้อมูลและการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของเครื่อง UTM ทำการคำนวณ โดยค่าโมดูลัสที่ใช้ในการทดสอบที่ 200 รอบ และทำการเก็บข้อมูล 5 ค่าสุดท้ายที่มีค่าการคืนตัวคงที่ โดยแต่ละแรงกระทำจะทดสอบจำนวน 2 ครั้ง ซึ่งในการทดสอบครั้งที่ 2 จะหมุนก้อนตัวอย่างในทิศทาง 90 องศาจากการทดสอบครั้งแรก ในการทดสอบจะใช้แรงกระทำที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 ของค่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม และผลการทดสอบ สามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$M_R = \frac{P(0.27 + \nu)}{(\Delta H)D} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} M_R &= \text{โมดูลัสคืนตัว (MPa)} \\ P &= \text{น้ำหนักที่ใช้กระทำ (N)} \\ D &= \text{ความหนาก้อนตัวอย่าง (mm.)} \\ \Delta H &= \text{การทรุดตัวในแนวดิ่ง (mm.)} \\ \nu &= \text{อัตราส่วนปัวซอง} \end{aligned}$$

โดยที่ค่าอัตราส่วนปัวซองของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าอัตราส่วนปัวซองที่ใช้ในการทดสอบ

Temperature, °C	Poisson's Ratio, ν
5	0.30
25	0.35
40	0.40

ที่มา : University of New Mexico, 2003

2.4.6 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวของผิว

การเปลี่ยนรูปแบบถาวรของชั้นผิวทาง โดยทั่วไปแล้วมักเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุก บนเส้นทางการจราจรเปลี่ยนรูปแบบถาวร โดยทั่วไปมักพบอยู่ 2 ชนิดได้แก่ การยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุกขนานกับทิศทางของการจราจรเรียกว่า Rutting และการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทางการจราจรและมักจะเกิดบริเวณที่มีการจราจรหยุดรอ

การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวของผิวโดยวิธี Dynamic Creep Test จะอ้างอิงมาตรฐานวิธีทดสอบของ AS 2891.12.1 “Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt” โดยหน่วยแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 200 กิโลปาสคาล แบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที แล้วให้น้ำหนักกระทำซ้ำกับก้อนตัวอย่างไปเรื่อยๆ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติหรือมีค่ายุบตัวไม่เกิน 50,000 micro strain หรือจำนวนรอบการทดสอบไม่เกิน 10,000 รอบ จึงหยุดทำการทดสอบ

ความเครียดสะสม (Accumulated strain, ϵ_p) คือผลบวกสะสมของความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เมื่อวัสดุนั้นได้รับแรงกระทำซ้ำๆ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\epsilon_p = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ

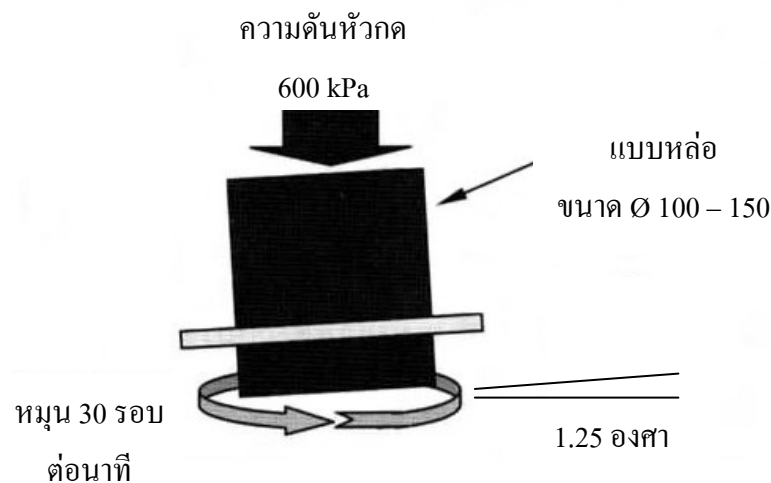
$$\begin{aligned} \epsilon_p &= \text{Accumulated strain (\%)} \\ \Delta H &= \text{อัตราความสูงที่เปลี่ยนไป (mm)} \\ h_0 &= \text{ความสูงของก้อนตัวอย่าง (mm)} \end{aligned}$$

2.4.7 การบดอัดด้วย Gyrotory Compaction

วิธีการทดสอบ อ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T 312 “Preparing and Determining the Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor”

วิธีการบดทับในห้องปฏิบัติการมีความต้องการบดทับก้อนตัวอย่างเพื่อให้ได้ความหนาแน่นที่เหมือนกับสภาพจริง ตามสภาพจราจรและสภาพอากาศที่ผลต่อพื้นผิวถนนด้วย ซึ่งเครื่องบดทับสามารถบอกถึงพฤติกรรมส่วนผสมที่ระมัดระวังศักยภาพและปัญหาการบดทับที่คล้ายคลึงกันได้ เครื่องบดทับต้องเคลื่อนย้ายได้สะดวกในการปฏิบัติงานที่ควบคุมคุณภาพได้เป็นสิ่งสำคัญ จากนั้นจึงได้พัฒนาเครื่องไจราทอรี (Superpave Gyrotory Compactor : SGC) ซึ่งมีลักษณะการเตรียมก้อนตัวอย่างโดยพยายามเลียนแบบการบดอัดจริงที่เกิดขึ้นจริงในสนามโดยรถบดถนน

ระบบกลไกการให้แรงกระทำจะทำหน้าที่กดกรอบปฏิกริยาและถ่ายแรงไปยังหัวกดเพื่อให้เกิดความดันในการบดอัดขนาด 600 กิโลปาสกาล บนก้อน หมุนด้วยความเร็วคงที่ขนาด 30 รอบต่อนาที ในระหว่างการบดอัดแบบหล่อซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุม 1.25 องศาแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้กับเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor
ที่มา : การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ, วัชรินทร์ วิทยกุล 2547

2.5 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโพนแอสฟัลต์

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโพนแอสฟัลต์เป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นเครื่องบ่งบอกประสิทธิภาพในการใช้งานจริง ส่วนผสมโพนแอสฟัลต์จะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเมื่อมีโพนแอสฟัลต์ผสมอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม โดยทราบได้จากขั้นตอนการออกแบบส่วนผสม

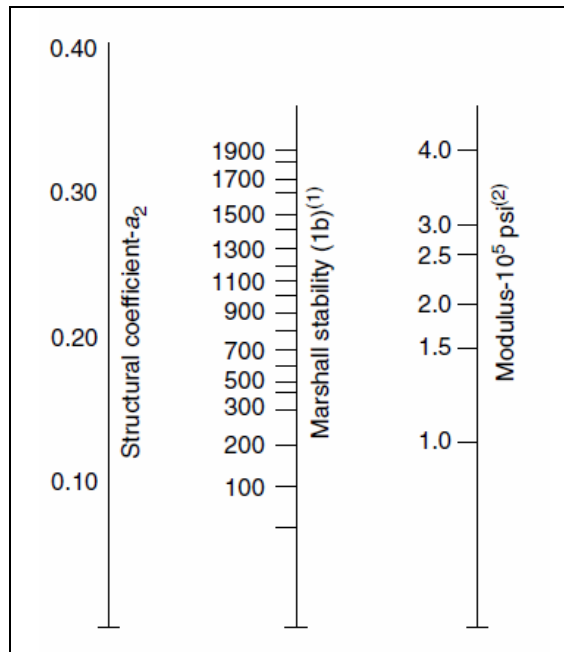
อย่างไรก็ตามวัสดุรวมในแต่ละประเภทจะมีความต้องการโฟมแอสฟัลต์ในปริมาณที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ปริมาณ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามประเภทวัสดุรวม

Material Type	Foam Bitumen Addition (%)	Indirect Tensile Strength (kPa)	TRS (ratio)	Resilient Modulus (MPa)
RAP/Crushed Stone (50/50 Blend)	1.5-3.0	250 – 600	0.8 – 1.0	2,500 - 4,000
Crushed Stone	2.5-4.0	200 – 500	0.6 – 0.9	2,000 – 3,000
Natural Gravel (PI<10, CBR>30)	3.0-4.5	150 – 450	0.3 – 0.75	1,500 – 3,000

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004

ในการออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์ (Analytical Design) โดยวิธี AASHTO, 1993 สำหรับวัสดุที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติซีเมนต์มีค่าโมดูลัสคืนตัวดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยมีค่าโมดูลัสในช่วงระหว่าง 1 – 4 psi (689 – 3445 MPa)



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคั่นตัวกับโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบชั้นพื้นทาง
ที่มา : AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO 1993

บทที่ 3

วิธีการวิจัย (Research Methodology)

การศึกษการวิจัยในครั้งนี้ จะนำวัสดุจากโครงสร้างทางเดิมมาทำการปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นทางใหม่ โดยทั่วไปจะลักษณะของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

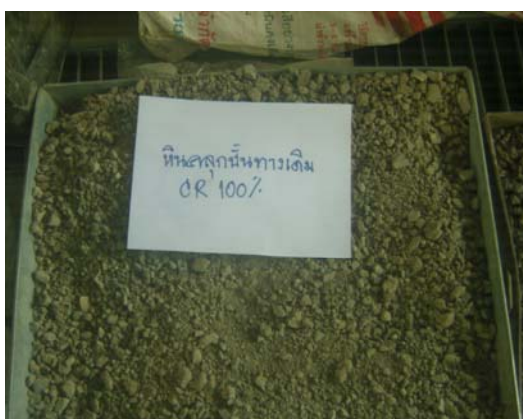
ในการศึกษาครั้งนี้ นำวัสดุจากทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี – ปากท่อ) โดยทำการขุดลอกผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Reclaimed Asphaltic Concrete : RAP) และหินคลุก (Reclaimed Crushed Base : RCR) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การขุดลอกโครงสร้างทางแอสฟัลต์คอนกรีต

วัสดุมวลรวมที่ขุดรื้อจะทำการผสมในสัดส่วนปริมาณผิวทางเดิมและหินคลุกเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับการวิจัยครั้งนี้มี 5 อัตราส่วนผสมได้แก่

- ส่วนผสม 1 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 0 : 100 (RAP0)
- ส่วนผสม 2 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 25 : 75 (RAP25)
- ส่วนผสม 3 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 50 : 50 (RAP50)
- ส่วนผสม 4 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 75 : 25 (RAP75)
- ส่วนผสม 5 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 100 : 0 (RAP100)



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวม

การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของของวัสดุมวลรวมมีดังต่อไปนี้

3.2.1 การทดสอบขนาดผละของวัสดุมวลรวม

การนำวัสดุมวลรวมทั้งสองชนิดมาผสมกันตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ใน การเตรียมตัวอย่าง มาทำการหาขนาดเม็ดวัสดุเพื่อจำแนกชนิดของดิน นอกจากนั้นยังดูปริมาณวัสดุเม็ดละเอียดสำหรับ ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยวิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ดังแสดงใน รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง

3.2.2 การทดสอบปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวม

ปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวมและการบดอัดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบ ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ความชื้นที่เหมาะสมจะช่วยให้บดอัดได้ความหนาแน่นสูงขึ้น และการ

กระจายตัวของโพลีเมอร์เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมได้ดี ดังนั้นวัสดุมวลรวมที่ได้ จะนำมาทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทดลองหาปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวม

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของโพลีเมอร์

3.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตโพลีเมอร์แอสฟัลต์ใช้ แอสฟัลต์เกรด 60 - 70 ซึ่งเป็นแอสฟัลต์ที่มีใช้ทั่วไปในประเทศไทย คุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะได้รับการทดสอบเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทางตามมาตรฐานเลขที่ 851

3.3.2 การทดสอบหาลักษณะของโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสม

การทดสอบคุณลักษณะของโพลีเมอร์แอสฟัลต์จะทำการทดสอบเพื่อประมาณค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และค่าครึ่งชีวิต (Half-Life) ในกระบวนการผลิตโพลีเมอร์แอสฟัลต์จะใช้เครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 3.6



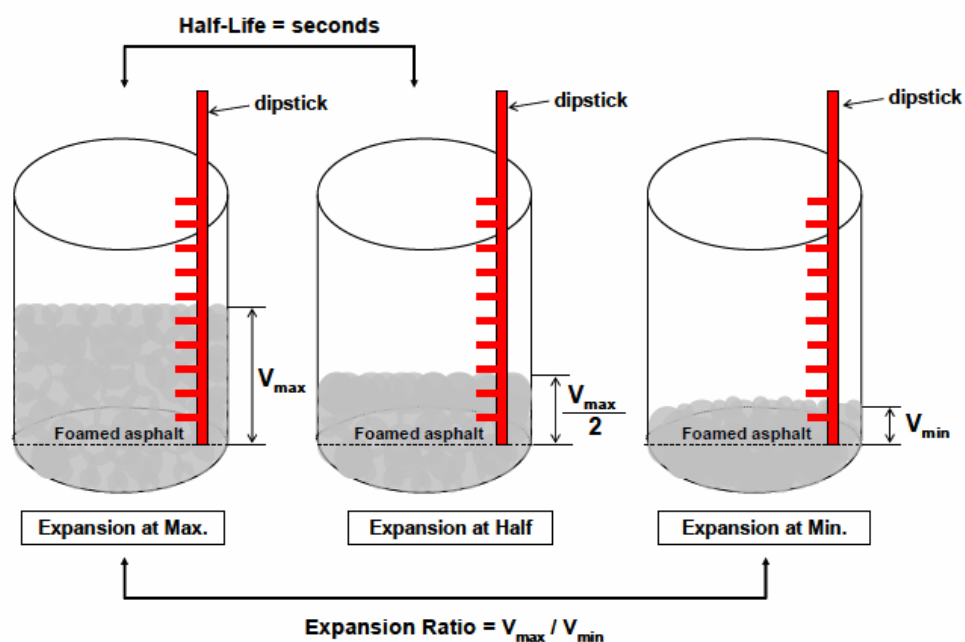
รูปที่ 3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิต โฟมเอสฟลด์ ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง

ในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 1 - 5 โดยใช้แรงดันน้ำในช่วง 5 - 7 Bar และอุณหภูมิของเอสฟลด์ในการทดสอบจะควบคุมอยู่ในช่วง 160 - 180 °C ค่าการขยายตัว และค่าครึ่งชีวิต จะทำการวัดค่าที่อุณหภูมิและปริมาณน้ำต่างๆ ด้วยไม้วัดการขยายตัว (Dip-Ruler) และถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยจะนำไม้วัดค่าการขยายตัวจะจุ่มลงในถังที่รองรับ โฟมเอสฟลด์ที่เกิดขึ้นจากเครื่องผลิตโฟมเอสฟลด์



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าในการผลิต โฟมเอสฟลด์

ค่าการขยายตัวได้จากการวัดด้วยไม้วัดระดับการขยายตัว สำหรับค่าครึ่งชีวิตวัดจากเวลาที่ ปริมาตรโฟมสูงสุดยุบตัวลงเหลือปริมาตรครึ่งหนึ่งโดยการสังเกตจากระดับไม้วัดการขยายตัว ดัง แสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การวัดค่าการขยายตัวของโฟมแอสฟัลต์

ที่มา : Manual of Laboratory Mix Design Procedure for Cold In-place Recycling using Foamed Asphalt (CIR-foam), Hosin David Lee 2007

โดยค่าการขยายตัวและค่ายุบตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ในการฉีดเข้าไปใน กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์ ภายหลังทราบค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตในแต่ละอุณหภูมิและ ปริมาณน้ำแล้ว จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยนำไปเขียนกราฟ บริเวณที่ กราฟทั้งสองเส้นตัดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม

Wirtgen, 2004 แนะนำว่าค่าการขยายตัวควรมีค่าไม่น้อยกว่า 8 เท่า และค่าครึ่งชีวิตมีค่าไม่ น้อยกว่า 6 วินาที ทั้งนี้เพื่อให้โฟมแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมได้อย่าง มีประสิทธิภาพเพียงพอ

3.4 การออกแบบส่วนผสม

จากการหาคุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบส่วนผสมแล้ว นำวัสดุรวมรวมทั้ง 5 ส่วนผสม มาออกแบบส่วนผสม โดยมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบหาปริมาณ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละส่วนผสมขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำวัสดุรวมรวมแต่ละชนิดมาคลุกผสมน้ำ โดยใช้ปริมาณที่ร้อยละ 50 ของปริมาณ ความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการผสมน้ำเข้ากับวัสดุรวม

2. นำวัสดุรวมมาผสมโฟมแอสฟัลต์ ที่ได้จากเครื่องผลิตโฟมในปริมาณอัตราส่วน ร้อยละ 1.5 - 5 ของปริมาณวัสดุรวม โดยจะฉีดผสมกันและทำการคลุกผสมกัน แล้วเติมน้ำส่วนที่เหลือเข้าไปผสมกับวัสดุรวมแล้วทำการคลุกผสมกันจนได้ที่

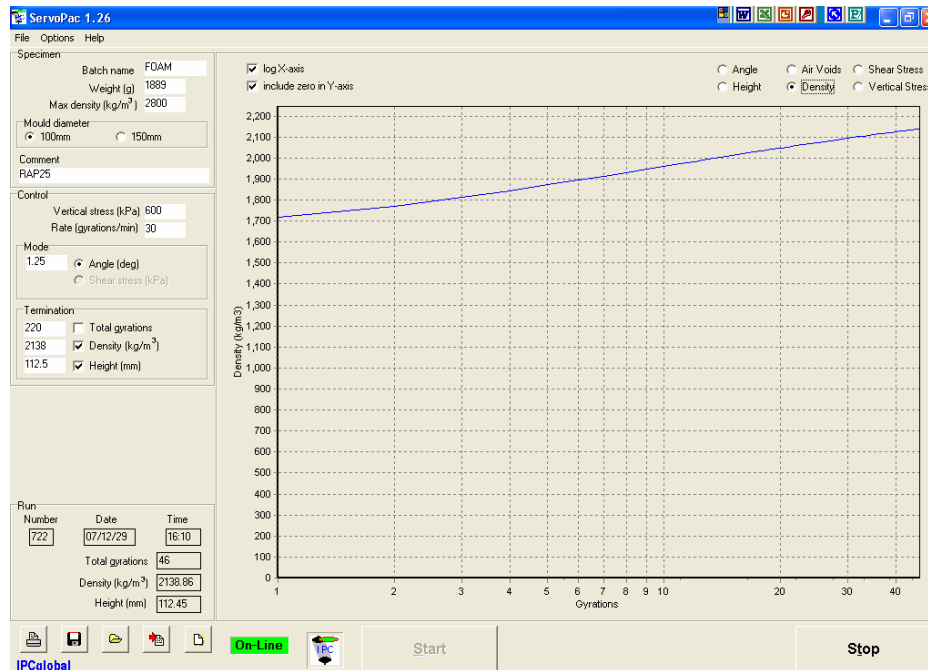


รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการนำวัสดุรวมผสมด้วยโฟมแอสฟัลต์

3. ทำการบดอัดวัสดุรวมดังกกล่าวด้วยเครื่อง Gyrotory Compaction โดยทำการกำหนดค่าความหนาแน่นที่ต้องการ โดยใช้โปรแกรม ServoPac 1.26 ของสำนักวิจัย และพัฒนางานทาง กรมทางหลวง



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการนำวัสดุรวมบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory Compaction



รูปที่ 3.12 รายละเอียด โปรแกรมการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory Compaction

- นำก้อนตัวอย่างที่ได้รับการบดอัดแล้ว ไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำก้อนตัวอย่างออกจากตู้อบทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

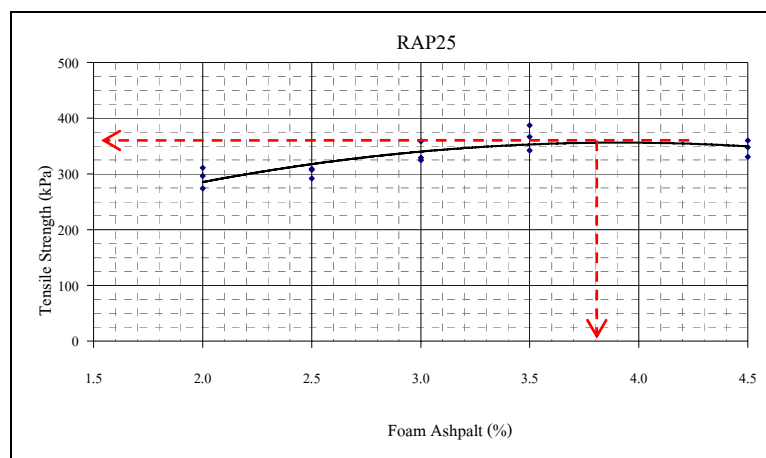


รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการบ่มวัสดุรวม

- นำก้อนตัวอย่างที่ได้มาทำการทดสอบหาค่าแรงดึงทางอ้อมเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมในแต่ละส่วนผสม



รูปที่ 3.14 การทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม



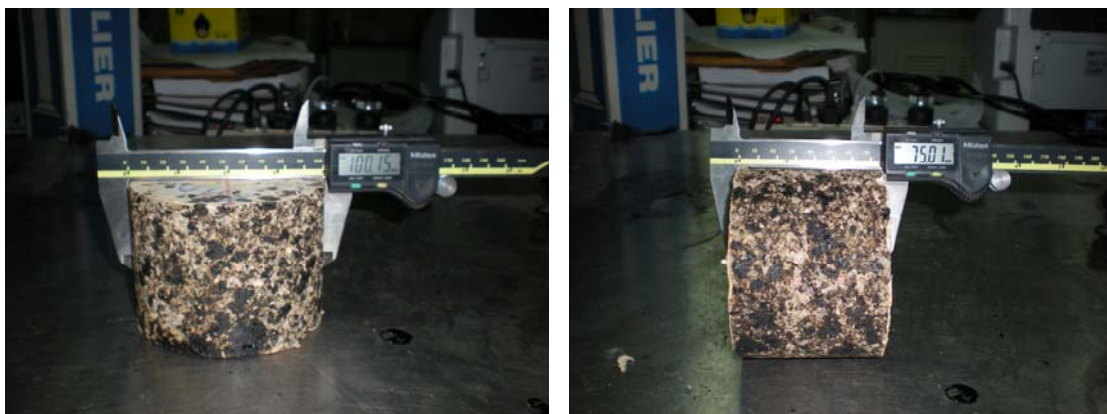
รูปที่ 3.15 การวิเคราะห์ปริมาณ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม

3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ผลที่ได้จากการออกแบบจะได้ปริมาณ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมทั้ง 5 สัดส่วนแล้ว นำวัสดุแต่ละส่วนผสมไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมโดยทดสอบแบบ แช่น้ำ ทดสอบแบบ ไม่แช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C โดยทำการทดสอบดังนี้

3.5.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ในการทดสอบการหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม ขนาดของก้อนตัวอย่าง 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) x 75 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เครื่องมือที่ใช้กดก้อนตัวอย่างจะมี อัตราความเร็วในการกดเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 การวัดขนาดก้อนตัวอย่างใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม



รูปที่ 3.17 การติดตั้งก้อนตัวอย่างในการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

3.5.2 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ในการทดสอบการหาค่ารับกำลังรับแรงอัด ใช้ตัวอย่างขนาด 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) x 112.5 มิลลิเมตร (4.5 นิ้ว) ดังแสดงในรูปที่ 3.18

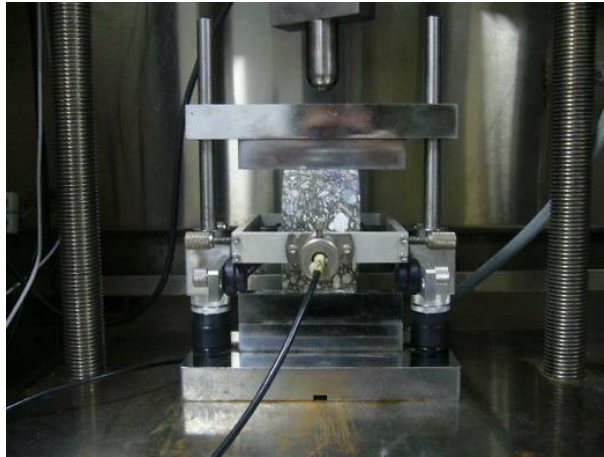


รูปที่ 3.18 ก้อนตัวอย่างใช้ในการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

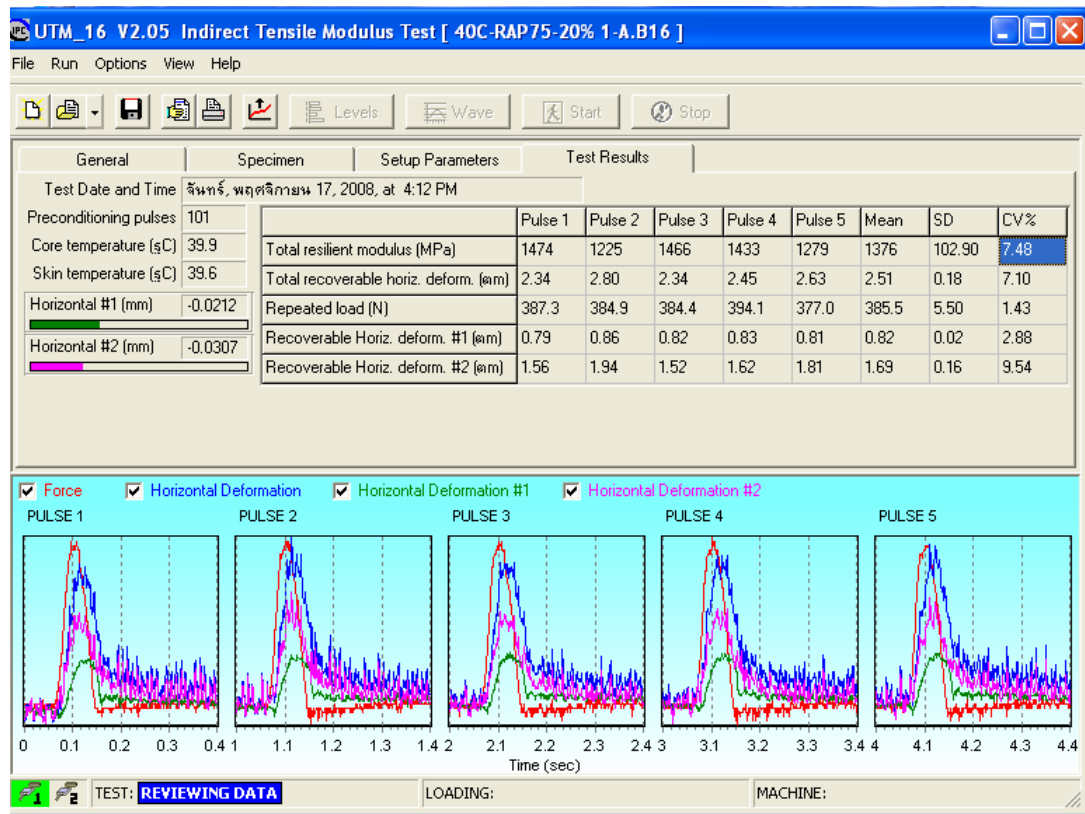
3.5.3 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จะใช้โปรแกรม UTM_16 V2.05 Indirect Tensile Modulus Test ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบขนาดของก้อนตัวอย่าง 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) x 75 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) โดยมีลักษณะการจัดวางก้อนดังแสดงในรูปที่ 3.19 และรายละเอียดโปรแกรมที่ใช้การทดสอบโมดูลัสคืนตัวดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 การจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

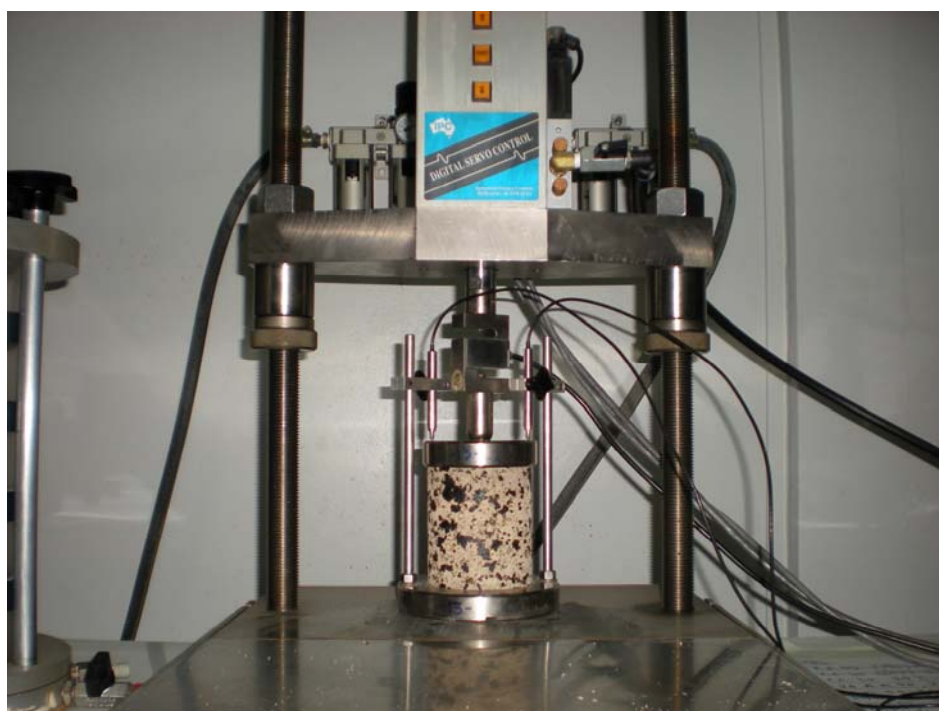


รูปที่ 3.20 รายละเอียดโปรแกรมที่ใช้ทดสอบโมดูลัสคืนตัว

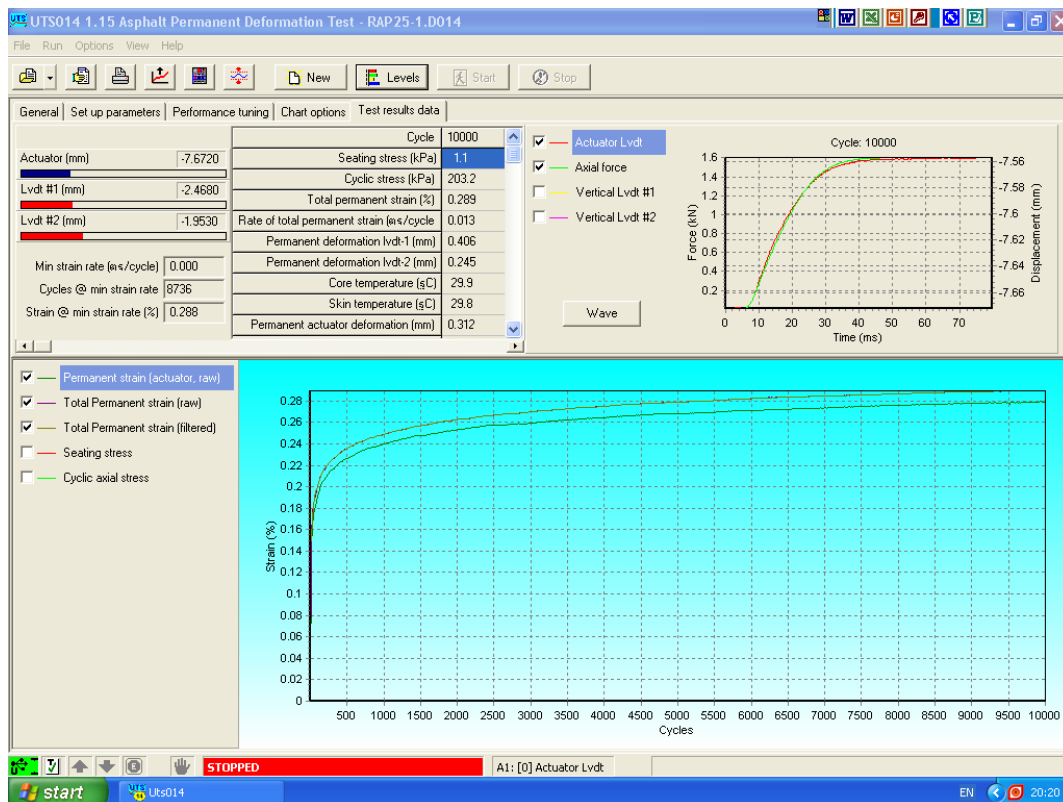
3.5.4 การทดสอบค่าต้านทานต่อการยุบตัวถาวร

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ข้อมูลต่างๆ ที่ได้ใส่ลงในโปรแกรม UTS014 1.15 Asphalt Pavement Deformation Test เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบขนาด 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) x 112.5 มิลลิเมตร (4.5 นิ้ว) โดยมีลักษณะการจัดวางก่อนดังแสดงในรูปที่ 3.21 และรายละเอียดโปรแกรมที่ใช้การทดสอบค่าต้านทานต่อการยุบตัวถาวรดังแสดงในรูปที่ 3.22

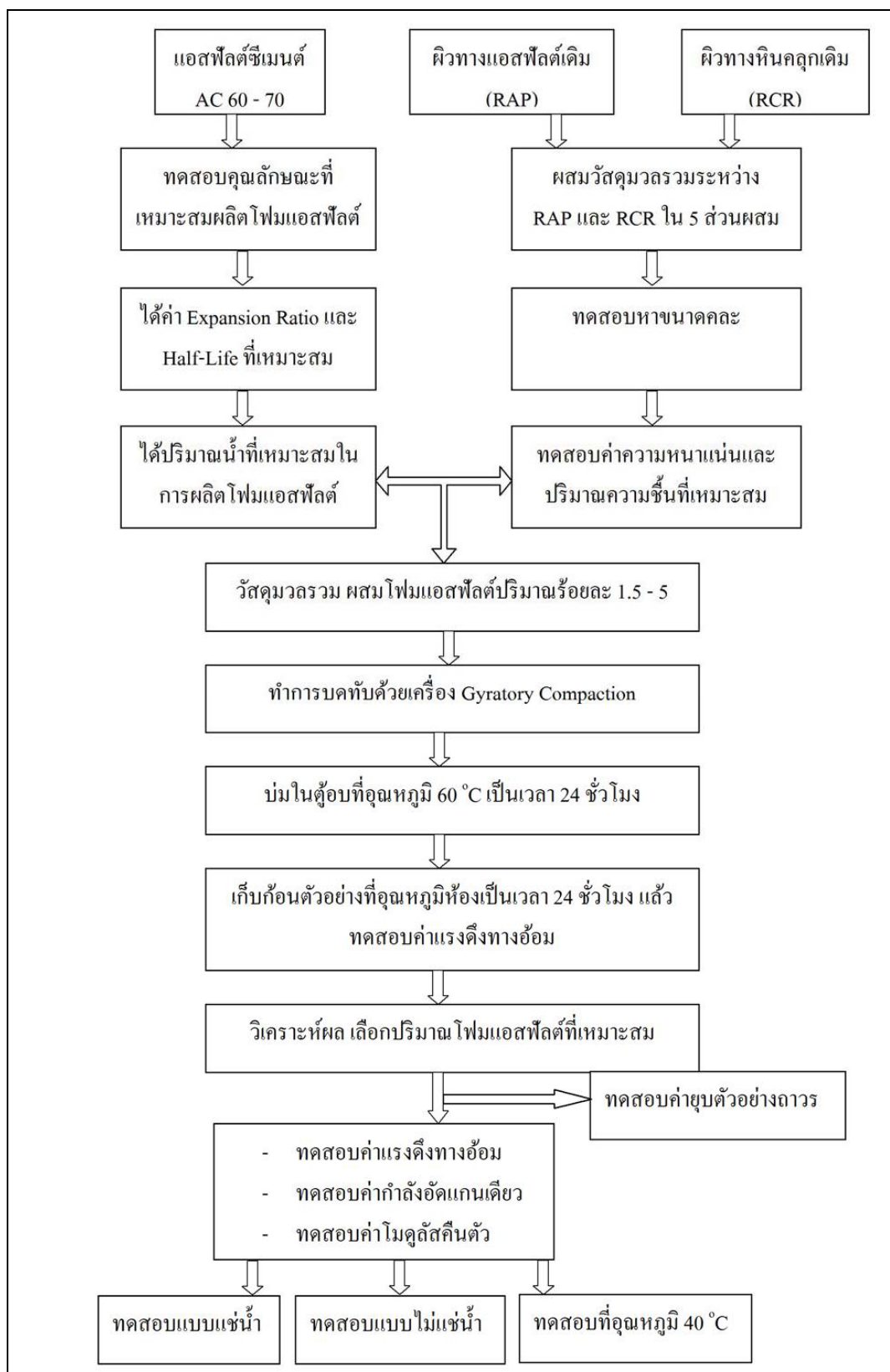


รูปที่ 3.21 การจัดวางก่อนตัวอย่างในการทดสอบค่าต้านทานต่อการยุบตัวถาวร



รูปที่ 3.22 รายละเอียดโปรแกรมที่ใช้ทดสอบ Dynamic Creep Test

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้สามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

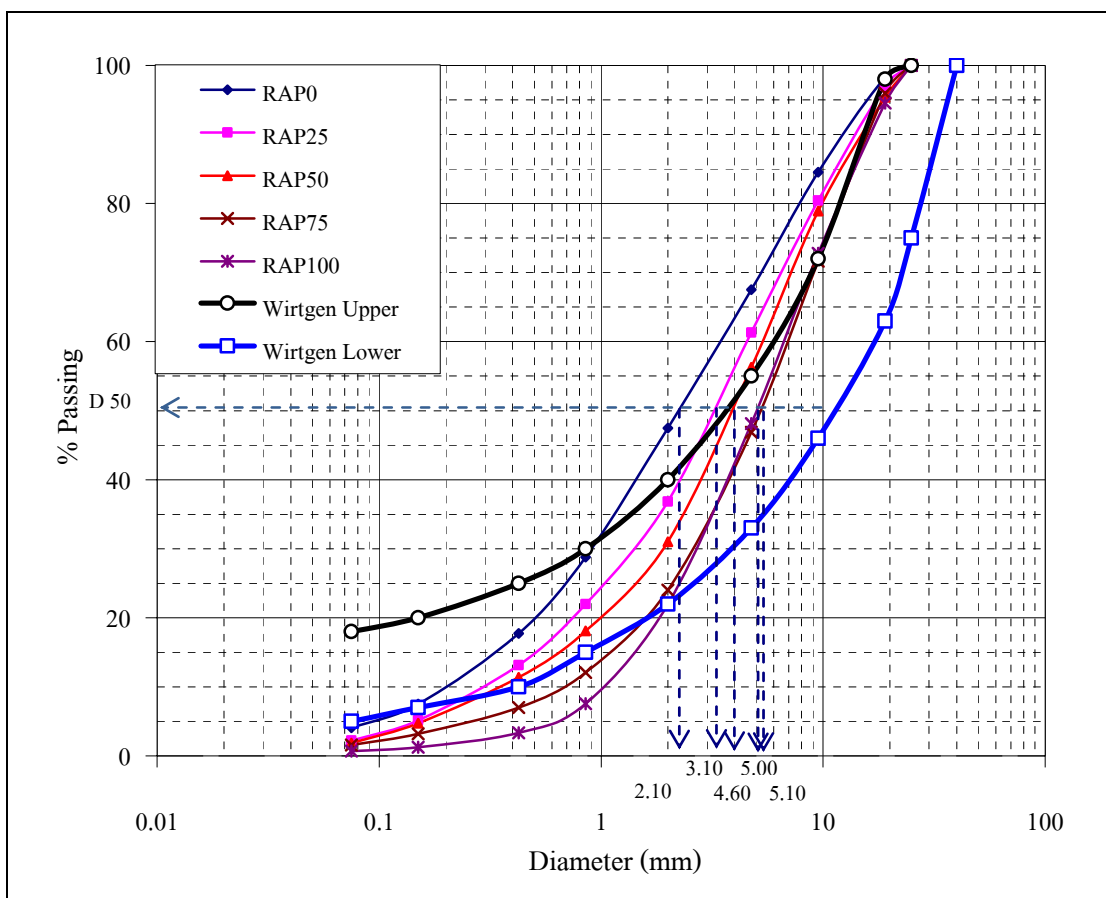
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น

ในการสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมในแต่ละส่วนผสม การหาขนาดผลเฉลยไว้ในตารางที่ 4.1 จำแนกดินตามระบบ AASHTO และ Unified Soil Classification วัสดุมวลรวมทั้ง 5 ส่วนผสมอยู่ในกลุ่ม A-1-a และ GW ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การจำแนกวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษา

การจำแนกดิน	Material Proportion				
	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP 100
การวิเคราะห์ห้อนผ่านตะแกรง :					
เบอร์ 10 (2.00 mm), %	47.50	36.85	31.00	24.03	21.93
เบอร์ 40 (425 μ m), %	17.72	13.13	11.39	7.01	3.33
เบอร์ 200 (425 μ m), %	4.06	2.20	1.85	1.56	0.69
Median Diameter (D_{50}), mm	2.10	3.10	4.60	5.10	5.00
คุณสมบัติของส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (425 mm) :					
ดัชนีพลาสติก(PI)	NP	NP	NP	NP	NP
การกระจายของเม็ดดิน					
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ, C_u	16.5	15.0	23.1	10.0	6.7
สัมประสิทธิ์ความโค้ง, C_c	1.23	1.45	1.69	1.28	1.01
การจำแนกชนิดของมวลรวม					
AASHTO	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Unified Soil Classification	GW	GW	GW	GW	GW

จากการเปรียบเทียบขนาดเม็ดวัสดุโครงสร้างชั้นทางเดิมระหว่างวัสดุหินคลุกเดิม (RCR) และวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) สรุปได้ว่าวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เดิม มีขนาดเม็ดหยาบกว่าหินคลุกเนื่องจากค่า Median Diameter (D_{50}) ของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีขนาด 5.00 มม. และวัสดุหินคลุก มีขนาด 2.10 มม. และเมื่อนำวัสดุทั้ง 2 ชนิดผสมกันตามอัตราส่วนที่กำหนดปรากฏว่าขนาดเม็ดวัสดุที่ Median Diameter (D_{50}) มีขนาดดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 คือขนาดของวัสดุ RAP75 มีค่าเท่า 3.10 มม. วัสดุ RAP 50 มีค่า 4.60 มม. และวัสดุ RAP25 มีค่า 5.10 มม.



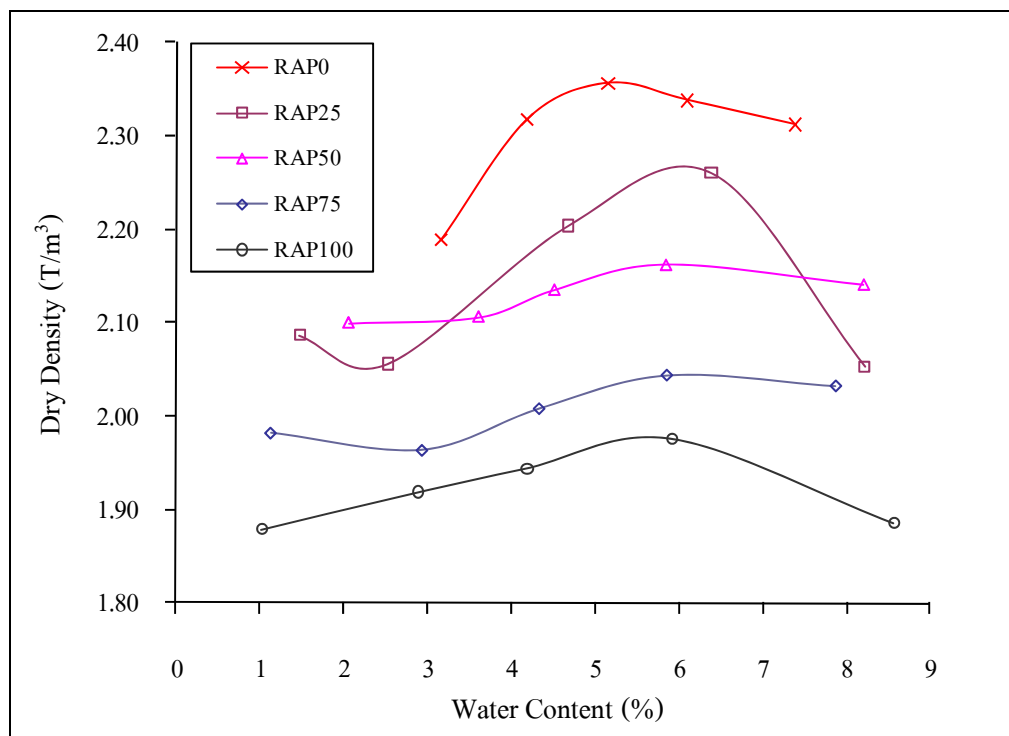
รูปที่ 4.1 ขนาดคละของวัสดุรวมที่ใช้ในการศึกษา

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 สามารถได้ว่าวัสดุ RAP0, RAP25, RAP50, RAP75 และ RAP100 มีค่าความหนาแน่นแห้งที่สูง 2.36, 2.27, 2.16, 2.04 และ 1.98 ตัน/ลบ.ม. ตามลำดับ และค่าความหนาแน่นของวัสดุรวมจะแปรผันกับส่วนผสมของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเมื่อวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.2

ในการทดสอบครั้งนี้เป็นวัสดุทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดสอบเป็นจำพวก Non Plastic (NP) ทำให้ดินเม็ดละเอียดมีค่าการpongตัวต่ำ ดังนั้นความหนาแน่นของวัสดุรวมแต่ละส่วนผสมจึงขึ้นกับวัสดุเม็ดละเอียดเพราะวัสดุเม็ดละเอียดจะเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างวัสดุเม็ดหยาบ และน้ำที่ใช้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะน้ำจะเข้าไปเคลือบวัสดุทำให้ส่วนผสมที่แอสฟัลต์คอนกรีตผสมมากมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าและต้องการปริมาณน้อยกว่า

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

Compaction Test	Material Proportion				
	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Maximum Dry Density, (T/m ³)	2.36	2.27	2.16	2.04	1.98
Optimum Moisture Content, (%)	5.20	6.00	5.80	5.80	5.60



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ผลการทดสอบพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้น

จากการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานได้อัตราส่วนน้ำที่ทำให้วัสดุมีค่าความหนาแน่นสูงสุดแล้วของแต่ละวัสดุแล้ว ได้นำวัสดุมาทำการทดสอบค่าการรับกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength : q) และการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength : σ_T) แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ไม่สามารถเตรียมก้อนตัวอย่างวัสดุมวลรวม RAP100 ได้เนื่องจากไม่จับตัวเป็นก้อน

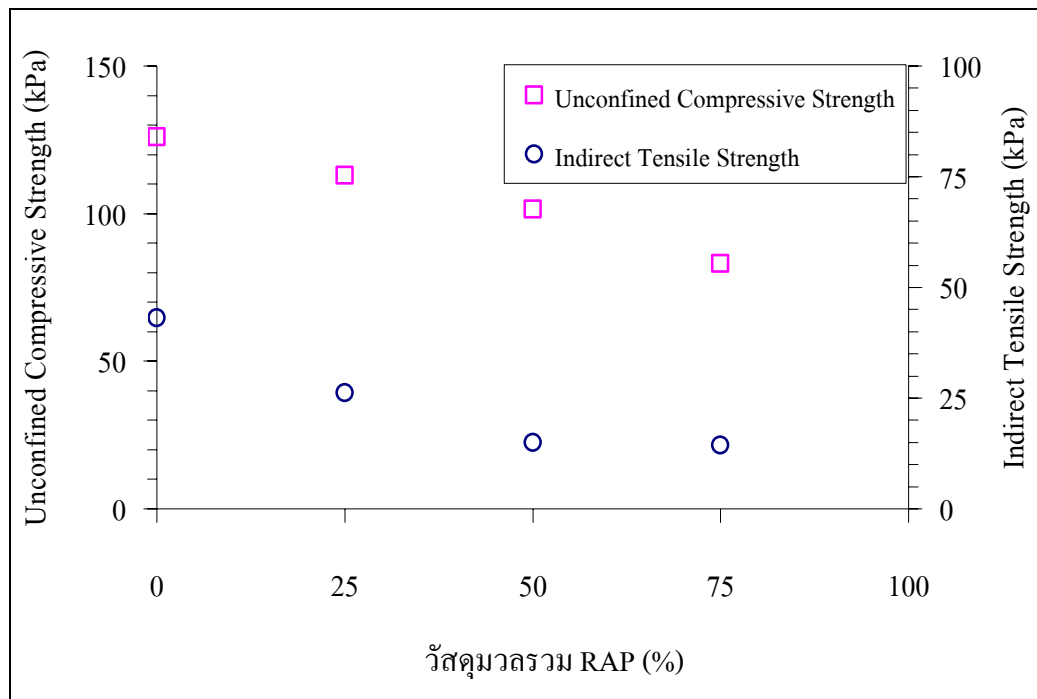
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุมวลรวม

Unconfined Compressive Strength	Material Proportion				
	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
q (kPa)	126	113	101	83	n/a

หมายเหตุ 1 kPa = 0.0101972 ksc

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของวัสดุมวลรวม

Indirect Tensile Strength	Material Proportion				
	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
σ_T (kPa)	43	26	15	14	n/a

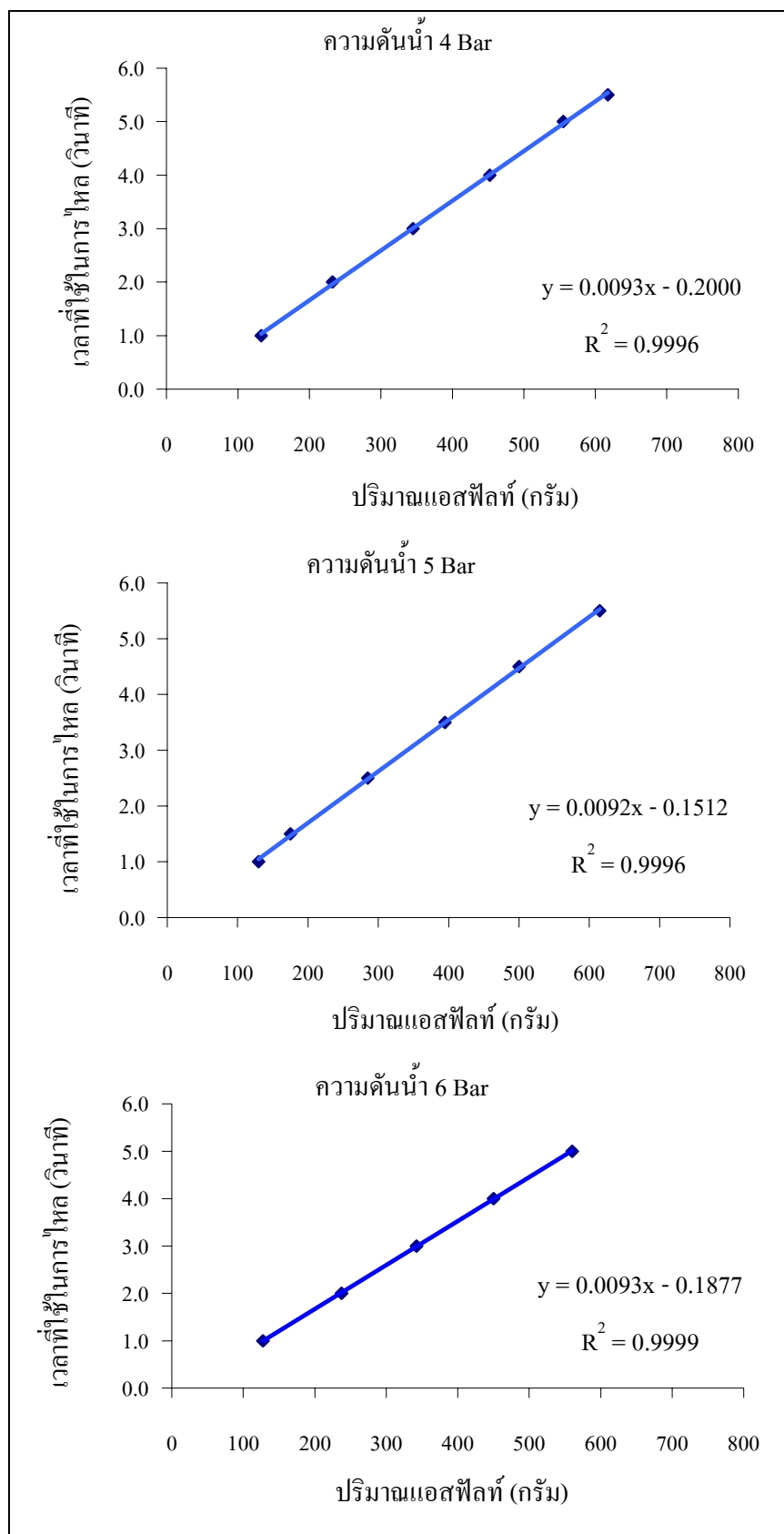


รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่า UCS และการทดสอบ IDT

จากผลที่การทดสอบ Unconfined Compressive Strength และการทดสอบ Indirect Tensile Strength พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน คือการรับกำลังของวัสดุจะมีค่าลดลงตามส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3

4.2 ผลการทดสอบการผลิตโฟมแอสฟัลต์

จากผลทดสอบหาค่าของอุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไปในแอสฟัลต์ร้อนๆเพื่อทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ที่มีค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และ Half-life ที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดการทดสอบที่อุณหภูมิแอสฟัลต์ 160 °C, 170 °C และ 180 °C



รูปที่ 4.4 ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลท์ที่อุณหภูมิ 170 °C ที่ความดันน้ำต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C ที่ความดันน้ำต่างๆ

Water Pressure (Bar)	Regression	Equation Model	Foam Asphalt (g)	Times(Sec.)
4	$y^*=0.0093x^*-0.2000$	Linear	500	4.45
5	$y^*=0.0092x^*-0.1512$	Linear	500	4.45
6	$y^*=0.0093x^*-0.1877$	Linear	500	4.45

หมายเหตุ y^* คือ เวลาที่ใช้ในการไหล (วินาที)

x^* คือ ปริมาณแอสฟัลต์

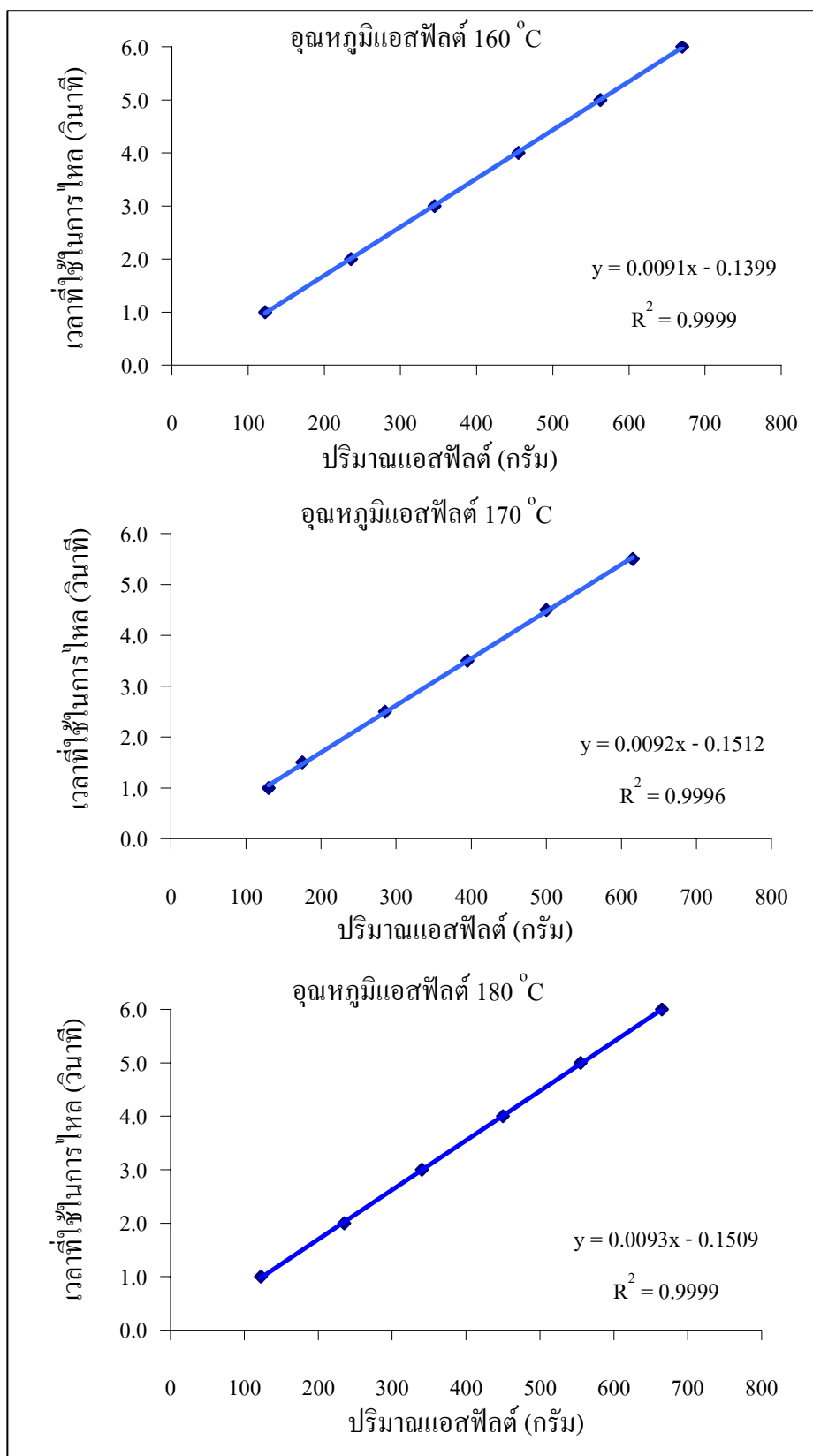
การทดสอบการหาปริมาณการไหลของแอสฟัลต์เพื่อใช้ในการทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม จากการทดสอบแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C และทำการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำที่ใช้ฉีดในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์ จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ปริมาณแอสฟัลต์ 500 กรัม ใช้เวลาในการไหล 4.45 วินาที ทำให้ทราบว่าความดันน้ำและความดันอากาศไม่ส่งผลต่อการไหลของแอสฟัลต์

การหาอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 160 °C, 170 °C และ 180 °C ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 ในการทดสอบหาคุณลักษณะที่เหมาะสมของโฟมแอสฟัลต์ ใช้แอสฟัลต์ปริมาณ 500 กรัม จากการทดสอบพบว่าเวลาแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 160 °C, 170 °C และ 180 °C ใช้เวลาในการไหลของแอสฟัลต์เท่ากับ 4.41 วินาที, 4.45 วินาที และ 4.50 วินาที ตามลำดับดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ในการพิจารณาการไหลของแอสฟัลต์ต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์ 500 กรัม เพราะในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์ ไม่ที่ใช้วัดค่าการขยายตัว 1 ส่วนเท่ากับปริมาณแอสฟัลต์ 500 กรัม

ตารางที่ 4.6 การหาปริมาณการไหลของแอสฟัลต์

Asphalt Temperature (°C)					
160 °C		170 °C		180 °C	
Times (sec.)	Foam Asphalt (g.)	Times (sec.)	Foam Asphalt (g.)	Times (sec.)	Foam Asphalt (g)
1.0	122.5	1.0	130.0	1.0	122.5
2.0	235.0	1.5	175.0	2.0	235.0
3.0	345.0	2.5	285.0	3.0	340.0
4.0	455.0	3.5	395.0	4.0	450.0
5.0	562.5	4.5	500.0	5.0	555.0
6.0	670.0	5.5	615.0	6.0	665.0



รูปที่ 4.5 ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

Asphalt Temperature (°C)	Regression	Equation Model	Foam Asphalt (g)	Times (Sec.)
160 °C	$y^*=0.0091x^*-0.1399$	Linear	500	4.41
170 °C	$y^*=0.0092x^*-0.1512$	Linear	500	4.45
180 °C	$y^*=0.0093x^*-0.1509$	Linear	500	4.50

หมายเหตุ y^* คือ เวลาที่ใช้ในการไหล (วินาที)

x^* คือ ปริมาณแอสฟัลต์

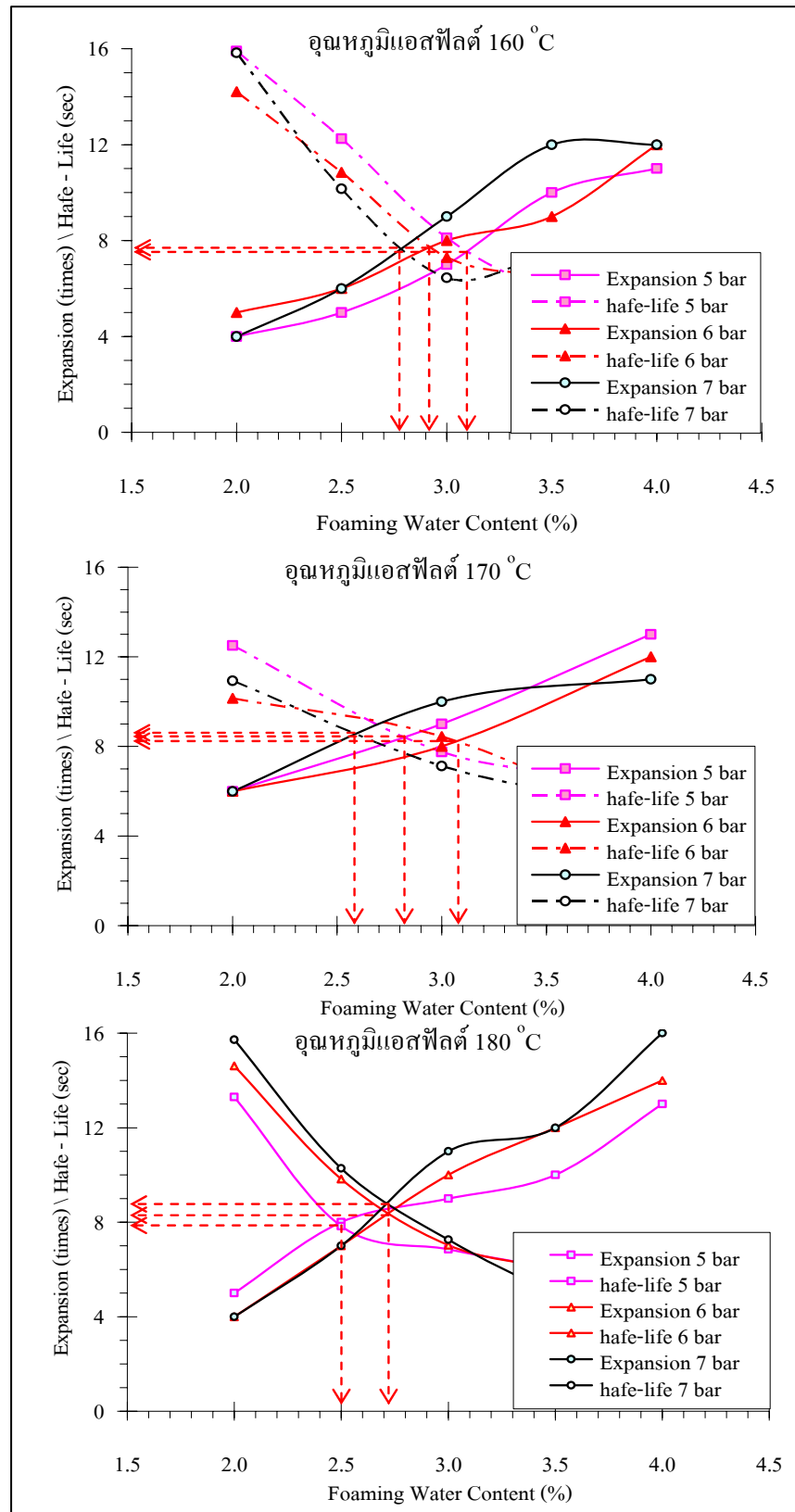
ผลที่ได้จากการหาอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 160 °C, 170 °C และ 180 °C ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิมีผลต่อไหลของแอสฟัลต์คืออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้แอสฟัลต์ที่ปริมาณ 500 กรัม ใช้เวลาในการไหลมากขึ้น เนื่องจากแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีความหนืดลดลง ดังนั้นในการทดสอบที่ใช้เวลาเท่ากันปริมาณการไหลของแอสฟัลต์ไม่เท่ากัน

ในการทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม จะใช้ปริมาณแอสฟัลต์ 500 กรัม ในการทดสอบ แอสฟัลต์ที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ที่อุณหภูมิ 160 °C, 170 °C และ 180 °C โดยที่แต่ละอุณหภูมิจะตั้งค่าเวลาการไหลที่เครื่องผลิตโฟมแอสฟัลต์ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และแต่ละอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ฉีด ผลการทดสอบแสดงตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่า Expansion และค่า Half-Life ของ โฟมแอสฟัลต์

Asphalt Temperature (°C)	Water (%)	Water Pressure (bar)					
		4		5		6	
		Expansion (times)	Half-Life (sec)	Expansion (times)	Half-Life (sec)	Expansion (times)	Half-Life (sec)
160	2.0	4	15.9	5	14.2	4	15.8
	2.5	5	12.2	6	10.8	6	10.2
	3.0	7	8.1	8	7.3	9	6.4
	3.5	10	5.9	9	6.5	12	7.2
	4.0	11	4.9	12	5.7	12	6.1
170	2.0	6	12.5	6	10.1	6	10.9
	3.0	9	7.8	8	8.4	10	7.1
	4.0	13	6.5	12	4.5	11	5.3
180	2.0	5	13.3	4	14.6	4	15.7
	2.5	8	7.8	7	9.8	7	10.3
	3.0	9	6.9	10	7.0	11	7.3
	3.5	10	6.0	12	6.0	12	5.0
	4.0	13	5.3	14	5.0	16	3.7

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบคุณสมบัติของ โฟมแอสฟัลต์พบว่าค่าการขยายตัวของ โฟมแอสฟัลต์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไป ขณะที่ค่าครึ่งชีวิตจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าการขยายตัว ผลการหาค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมของ โฟมแอสฟัลต์ ดังแสดงรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบหาค่า Expansion และ Half-Life ของโฟมแอสฟัลต์

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.6 การหาคุณลักษณะที่เหมาะสมในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ โดยการพิจารณาจากเส้นกราฟ Expansion และ Half-Life ตัดกันจะได้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ นำปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโฟมแอสฟัลต์มาทำการทดสอบการผลิตโฟมแอสฟัลต์ ผลแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า Expansion และ Half-Life ของโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากกราฟและทดสอบ

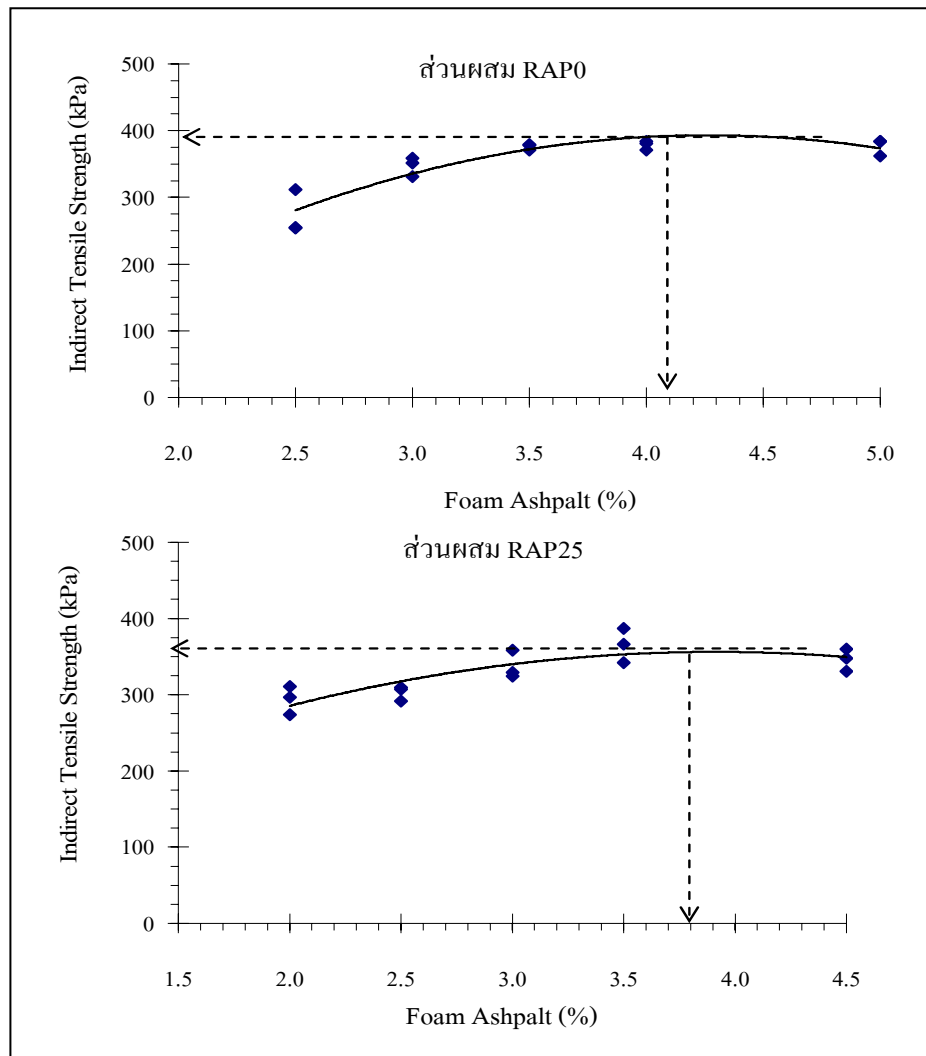
Asphalt Temperature (°C)	Water Pressure (Bar)	Foam Water Content (%)	Trail Mix		Retest	
			Expansion (Times)	Half-Life (Sec)	Expansion (Times)	Half-Life (Sec)
160	4	3.1	7.7	7.7	7.0	8.7
	5	2.9	7.8	7.8	8.0	8.0
	6	2.8	7.7	7.7	7.5	8.4
170	4	2.8	8.1	8.1	7.5	7.6
	5	3.1	8.2	8.2	8.5	9.1
	6	2.6	8.3	8.3	9.5	9.8
180	4	2.5	8.0	8.0	7.5	7.9
	5	2.7	8.3	8.3	8.0	8.7
	6	2.7	8.4	8.4	8.5	8.1

จากผลการทดสอบคุณลักษณะที่เหมาะสมของโฟมแอสฟัลต์ ในแต่ละอุณหภูมิแอสฟัลต์ จะพบว่าค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิเท่ากับ 170 °C และ 180 °C ให้การขยายตัวมากกว่า 8 เท่า และค่าครึ่งชีวิตมากกว่า 6 วินาที ในทางปฏิบัติการทำให้อุณหภูมิแอสฟัลต์ จำนวนมากๆ ปรับจาก 170 °C เป็น 180 °C ต้องใช้พลังงานความร้อนมากทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกใช้แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C ในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์และใช้ความดันน้ำที่ 6 Bar โดยจะได้ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ 9.5 เท่าและค่า Half-Life 9.8 วินาที และปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ร้อยละ 2.6 ดังแสดงในตารางที่ 4.9

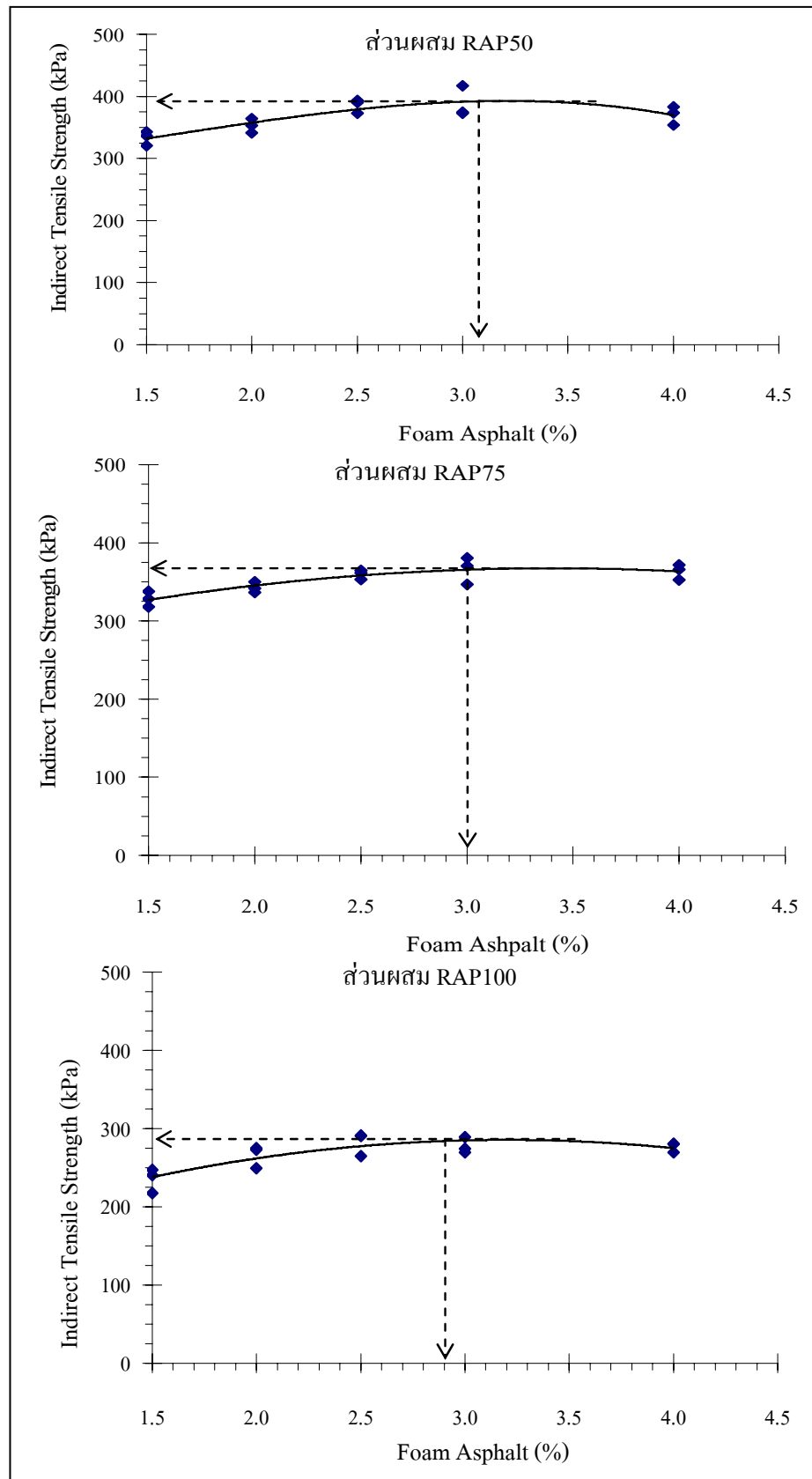
จากนำผลการออกแบบโฟมแอสฟัลต์ที่ได้ไปทดสอบพบว่าที่แอสฟัลต์อุณหภูมิ 170 °C ปริมาณน้ำร้อยละ 2.6 และความดันน้ำ 6 Bar ได้ค่าการขยายตัว 9.5 เท่า และค่าครึ่งชีวิต 9.76 วินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับที่ได้จากการออกแบบไว้

4.3 การออกแบบส่วนผสม

เมื่อได้ขนาดคละและค่าปริมาณความชื้นที่ต้องการในแต่ละส่วนผสมแล้ว ส่วนผสมทั้งสามจะนำไปทดสอบเพื่อหาปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมกับแต่ละส่วนผสม โดยการออกแบบนั้นพิจารณาจากค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่แช่น้ำ ผลการทดสอบในขั้นตอนนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.10



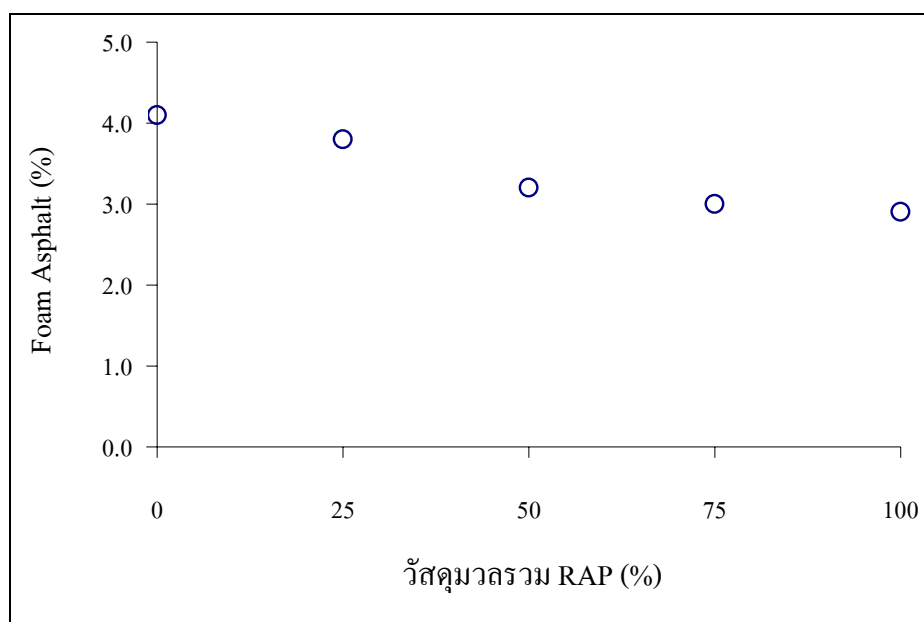
รูปที่ 4.7 ผลการออกแบบส่วนผสม



รูปที่ 4.7(ต่อ) ผลการออกแบบแบบส่วนผสม

ตารางที่ 4.10 ผลการออกแบบส่วนผสม

ออกแบบส่วนผสม	Material Proportion				
	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Foam Asphalt (%)	4.1	3.8	3.2	3.0	2.9



รูปที่ 4.8 ผลการออกแบบส่วนผสม

ผลการออกแบบพบว่าส่วนผสม RAP0, RAP25, RAP50, RAP75 และ RAP100 ต้องการปริมาณโฟมแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 4.1, 3.8, 3.2, 3.0 และ 2.9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่มีวัสดุของผิวทางแอสฟัลต์ ผสมอยู่ในปริมาณมากจะต้องการปริมาณโฟมแอสฟัลต์ลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.8

4.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

จากการออกแบบส่วนผสมทำให้ทราบปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่ต้องการของแต่ละส่วนผสม โดยจะนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมโดยการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ แช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C โดยทำการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม ทดสอบค่าการรับ

กำลังอัดแกนเดียว ทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว และทดสอบการยุบตัวแบบถาวร โดยทดสอบแบบไม่แช่น้ำ

4.4.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ก้อนตัวอย่างของแต่ละส่วนผสม จะได้รับการป้อนน้ำหนักเพื่อให้เกิดการยุบตัวคงที่ในอัตรา 50 มิลลิเมตรต่อนาทีผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

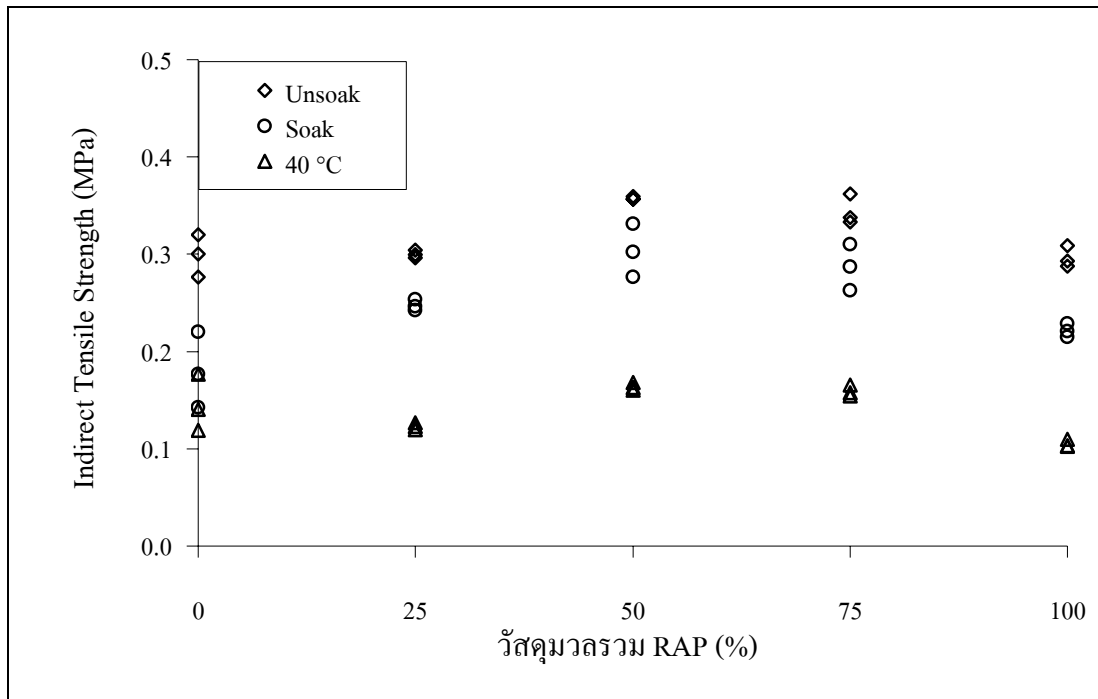
Indirect Tensile Strength : σ_T		Material Proportion				
		RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Foam Asphalt (%)		4.1	3.8	3.2	3.0	2.9
σ_T (kPa)	Unsoak	300	300	358	344	296
	Soak	180	247	303	287	221
	Temperature 40 °C	145	126	164	159	105
TSR* (%)	TSR _{Soak} *	60	82	85	83	75
	TSR _{40 °C} *	48	42	46	46	35

หมายเหตุ TSR* หมายถึง Tensile Strength Retained

TSR_{Soak}* หมายถึงอัตราส่วนร้อยละ $\sigma_{T(\text{Soak})} / \sigma_{T(\text{Unsoak})}$

TSR_{40 °C}* หมายถึงอัตราส่วนร้อยละ $\sigma_{T(\text{Temperature } 40 \text{ oC})} / \sigma_{T(\text{Unsoak})}$

ผลการทดสอบพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุรวมรวมทั้ง 5 ชนิด โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ก้อน ให้ค่าที่สอดคล้องกันคือ การทดสอบแบบไม่แช่น้ำมีค่าสูงสุดและการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C จะได้ค่าต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

จากการเปรียบเทียบค่า TSR ของวัสดุรวมพบว่าในการเปรียบเทียบ TSR_{Soak} วัสดุรวม RAP0 ให้ค่าต่ำสุด แต่เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 40 °C พบว่า RAP0 จะให้ค่าสูงสุดโดยที่วัสดุรวม RAP100 จะให้ค่าต่ำสุด

จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมแบบไม่แช่น้ำผ่านข้อกำหนดที่แนะนำโดย Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004 และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุรวมที่ผสม โฟมแอสฟัลต์ทั้ง 5 ส่วนผสมที่ใช้วัสดุจากโครงสร้างทางเดิมสามารถให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมได้

4.4.2 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียว

การทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียวผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.10 พบว่าค่ากำลังอัดแบบแกนเดียวของวัสดุรวมทุกอัตราส่วนแบบไม่แช่น้ำ สามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าการทดสอบแช่น้ำและทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C

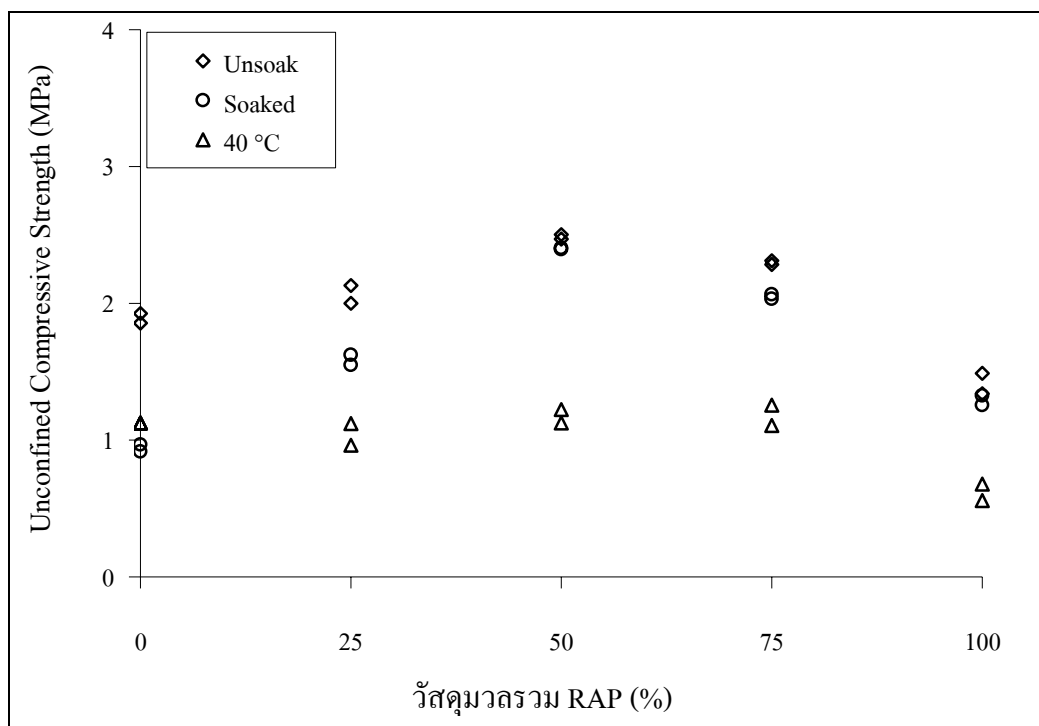
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียว

Unconfined Compressive Strength : q		Material Proportion				
		RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Foam Asphalt (%)		4.1	3.8	3.2	3.0	2.9
q (MPa)	Unsoak	1.89	2.07	2.48	2.30	1.41
	Soak	0.94	1.59	2.40	2.05	1.29
	Temperature 40 °C	1.13	1.04	1.17	1.18	0.62
UCSR* (%)	UCSR _{Soak}	50	77	97	89	91
	UCSR _{40 °C}	60	50	47	51	44

หมายเหตุ UCSR* หมายถึง Unconfined Compressive Strength Retained

UCSR_{Soak}* หมายถึงอัตราส่วนร้อยละ $q_{(Soak)} / q_{(Unsoak)}$

UCSR_{40 °C}* หมายถึงอัตราส่วนร้อยละ $q_{(Temperature 40 °C)} / q_{(Unsoak)}$



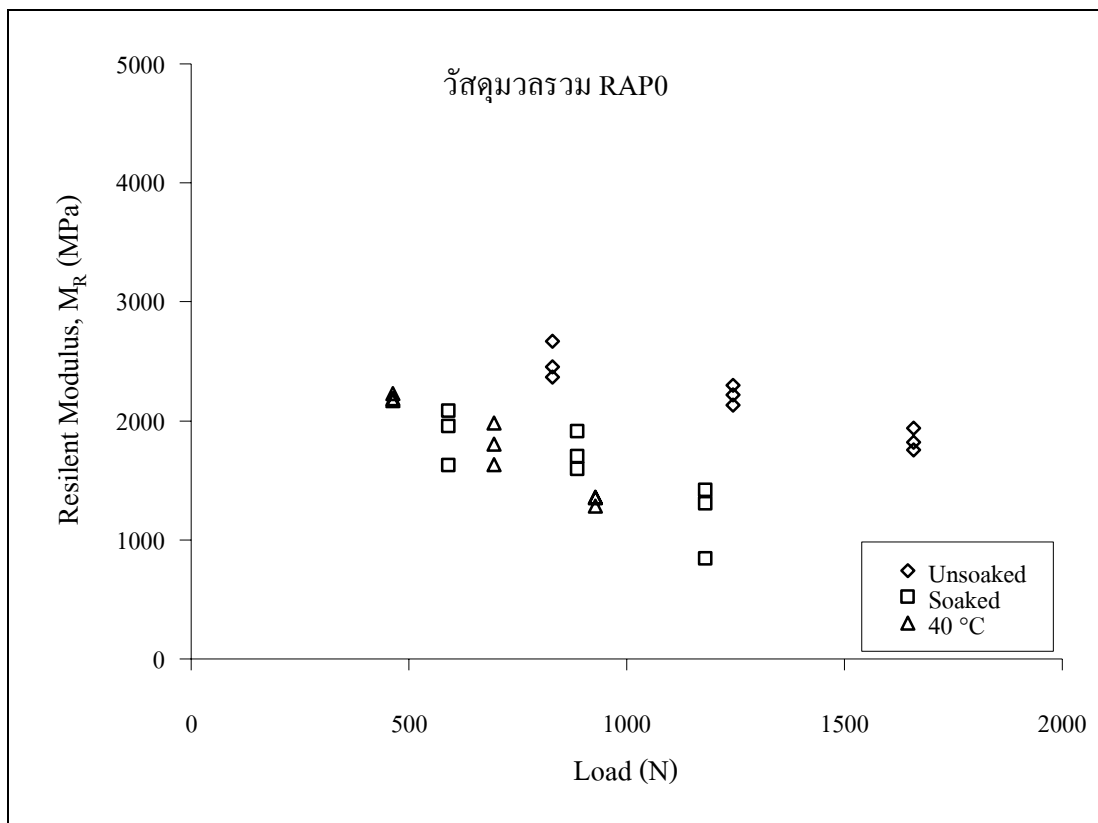
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียว

ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแบบแกนเดียวพบว่าวัสดุ RAP50 สามารถรับกำลังได้สูงสุดเท่ากับ 2.48 MPa สำหรับการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ

4.4.3 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

จากการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม นำมาทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยให้น้ำหนักกระทำร้อยละ 20, 30 และ 40 ของค่าแรงดึงทางอ้อม

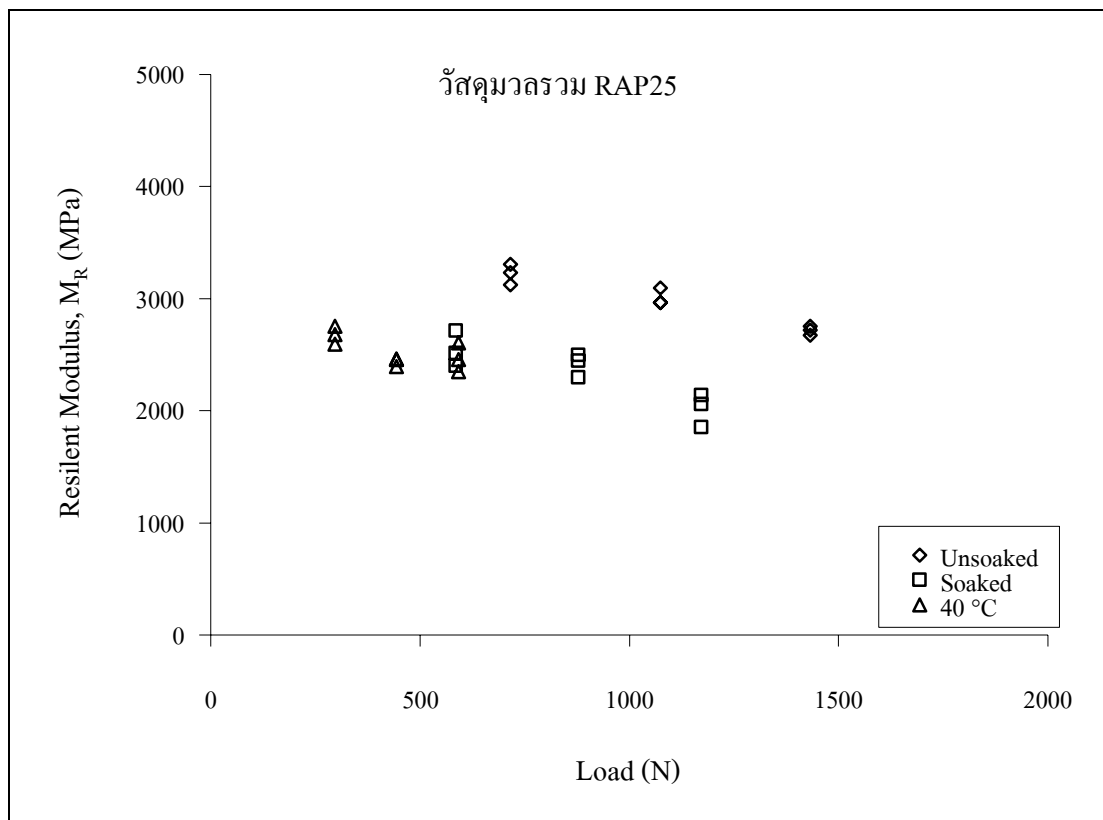
ผลจากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวในการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ การทดสอบแบบแช่น้ำ และการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C มีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันคือค่าโมดูลัสจะลดลงเมื่อมีแรงกระทำเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.15



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP0

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวม RAP0

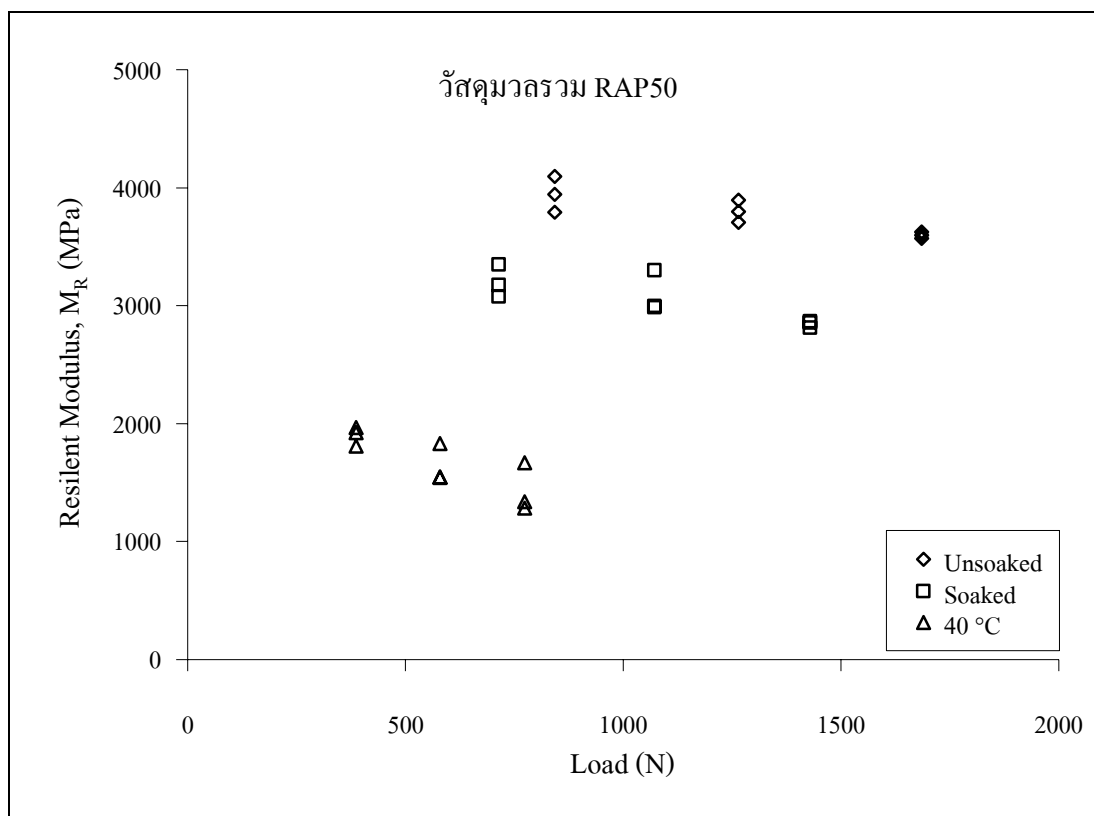
วัสดุรวม	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว				
RAP0	Unsoak	Load (N)	829	1244	1659
		M_R (MPa)	2497	2217	1839
	Soak	Load (N)	591	886	1181
		M_R (MPa)	1889	1736	1188
	40 °C	Load (N)	464	696	928
		M_R (MPa)	2197	1807	1334



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวม RAP25

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวม RAP25

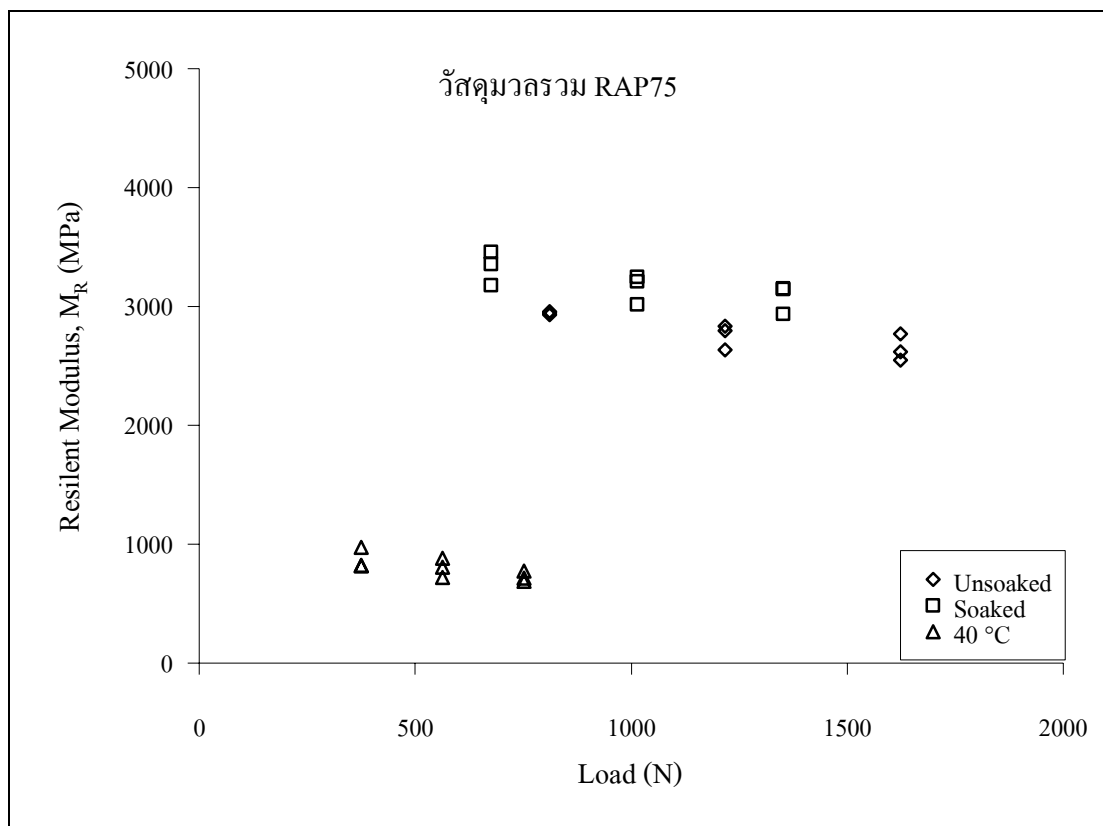
วัสดุรวม	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว				
RAP25	Unsoak	Load (N)	716	1074	1432
		M_R (MPa)	3220	3008	2718
	Soak	Load (N)	586	879	1172
		M_R (MPa)	2544	2414	2016
	40 °C	Load (N)	296	444	592
		M_R (MPa)	2675	2439	2471



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวม RAP50

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP50

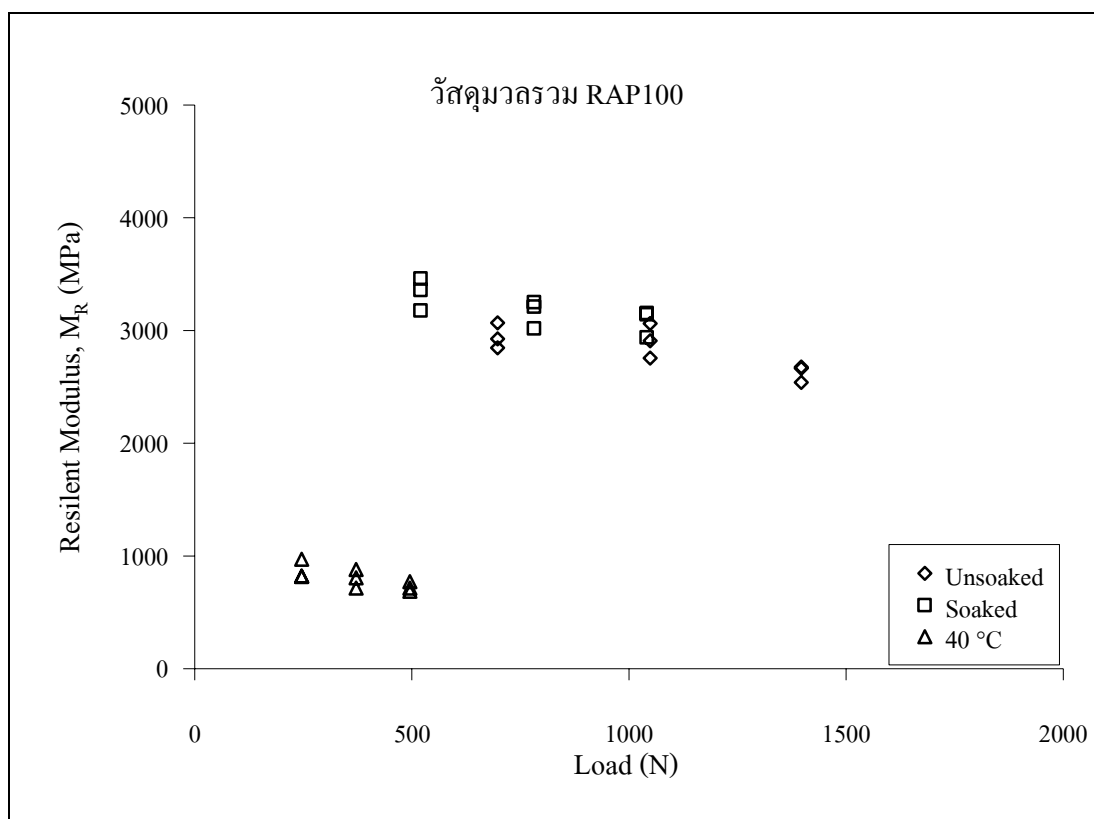
วัสดุมวลรวม	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว				
RAP50	Unsoak	Load (N)	843	1264	1686
		M_R (MPa)	3943	3799	3597
	Soak	Load (N)	715	1072	1430
		M_R (MPa)	3199	3093	2844
	40 °C	Load (N)	386	580	773
		M_R (MPa)	1900	1640	1429



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP75

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวม RAP75

วัสดุรวม	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว				
RAP75	Unsoak	Load (N)	811	1217	1623
		M_R (MPa)	2946	2754	2646
	Soak	Load (N)	676	1014	1351
		M_R (MPa)	3331	3157	3077
	40 °C	Load (N)	376	563	751
		M_R (MPa)	872	803	726

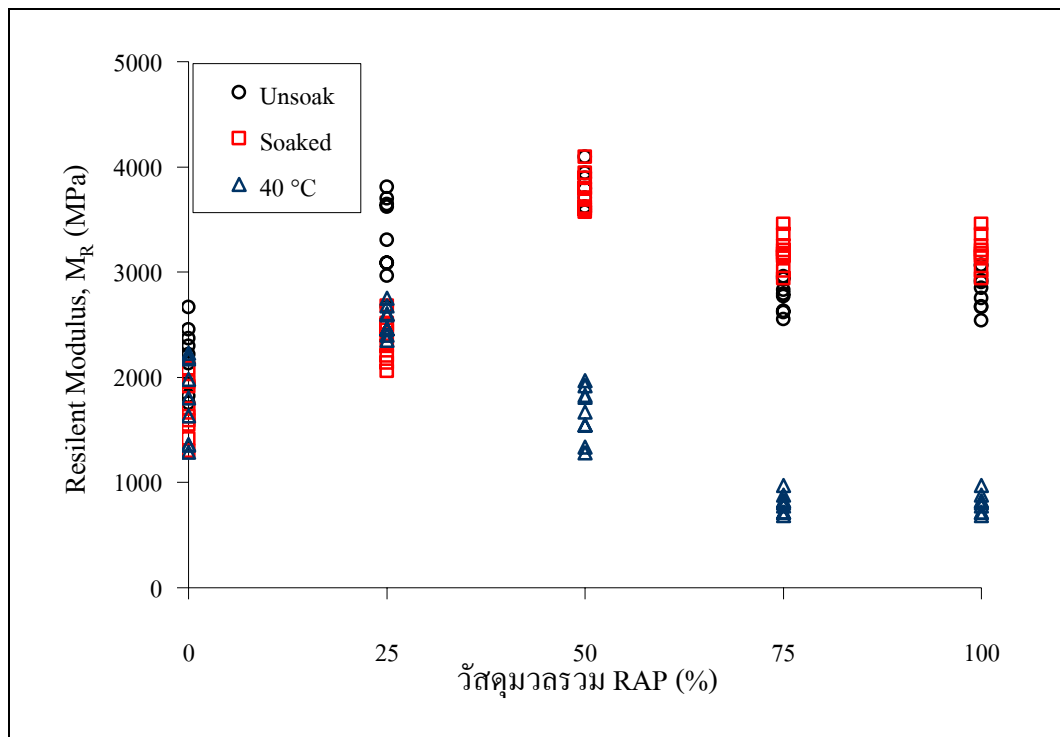


รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวม RAP100

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP100

วัสดุมวลรวม	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว				
RAP100	Unsoak	Load (N)	698	1048	1397
		M_R (MPa)	2948	2908	2626
	Soak	Load (N)	521	782	1042
		M_R (MPa)	3331	3157	3077
	40 °C	Load (N)	247	372	495
		M_R (MPa)	872	803	726

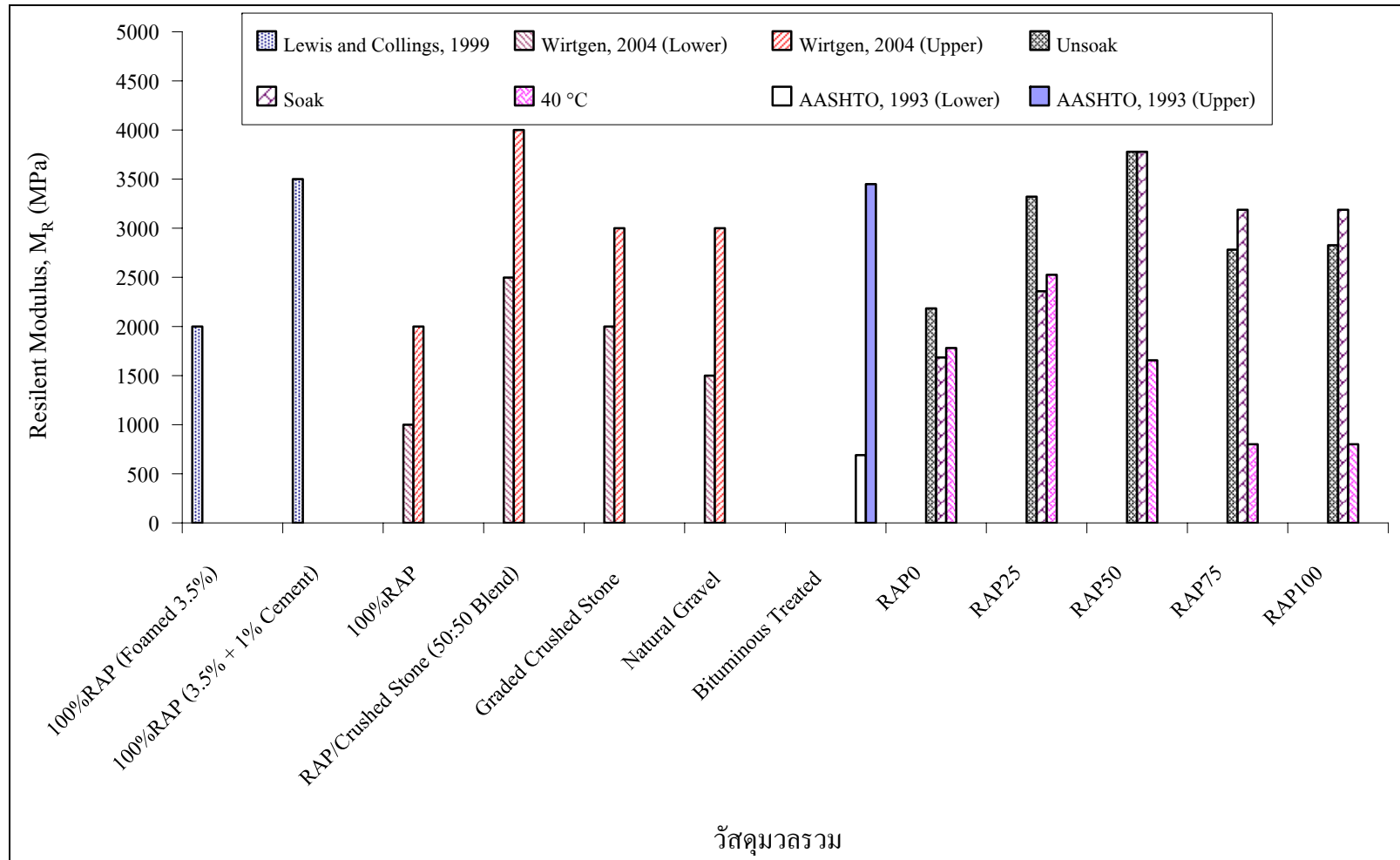
จากผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวจะลดลงเมื่อมีแรงกระทำมากขึ้น ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวพบว่าของวัสดุมวลรวม RAP50 ให้ค่าโมดูลัสคืนตัวสูงสุดสำหรับการทดสอบแบบไม้น้ำและทดสอบแบบแช่น้ำ แต่วัสดุมวลรวม RAP0 และ RAP25 ผลการทดสอบแบบไม้น้ำสูงกว่าแบบแช่น้ำ ซึ่งต่างจากวัสดุมวลรวม RAP75 และ RAP100 ที่ผลการทดสอบแบบแช่น้ำใกล้เคียงกับผลการทดสอบแบบไม้น้ำ และการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ที่พบว่าเมื่อส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสคืนตัวมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวมทั้ง 5 สัดส่วนมีค่าสอดคล้องกับที่นำเสนอโดย Lewis and Collings, 1999 และ Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004 และอยู่ในช่วงการออกแบบโครงสร้างถนนชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ โดยวิธีการออกแบบของ AASHTO, 1993 ดังแสดงในรูปที่ 4.17

เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตจะเห็นว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยโพลีแอสฟัลต์ในครั้งนี้ความสอดคล้องกับงานศึกษาของ Lewis and Collings, 1999 และ Wirtgen Cold Recycling Manual, 2004 ดังแสดงในตารางที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัว

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการวิจัยจากแหล่งอ้างอิงอื่นๆ

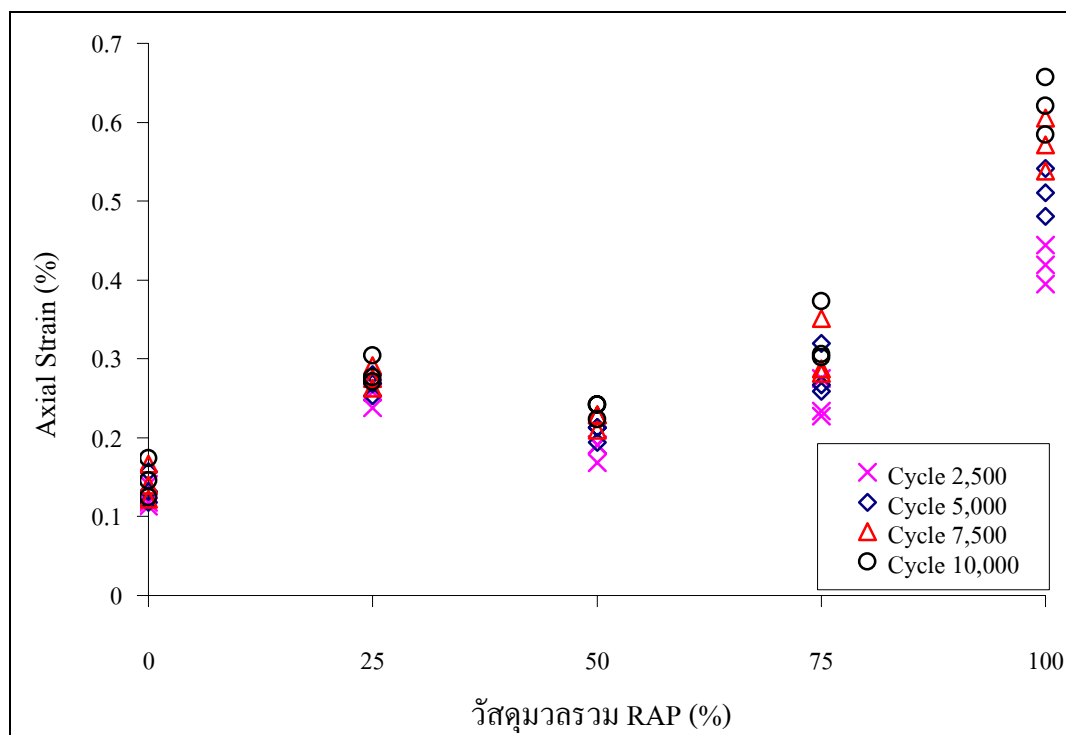
Name	Material Type	UCS (Mpa)	IDT, Dry (kPa)	IDT, Soaked (kPa)	Resilient Modulus (MPa)
Wirtgen, 2004	RAP/CR (50/50 Blend)	n/a	250-600	n/a	2,500-4,000
	Crushed Stone	n/a	200-500	n/a	2,000-3,000
	Natural Gravel (PI<10, CBR>30)	n/a	150-450	n/a	1,500-3,000
Lewis and Collings, 1999	RAP100	n/a	200	80	2000
	RAP100	n/a	500	300	3500
ชั้นวิน สวัสดิศานต์ และ จิต ติมา อังษานาม, 2551	RAP100 (Lab)	n/a	202-285	178-239	n/a
	RAP60:หินฝุ่น40 (Lab)	n/a	258-339	165-270	n/a
	RAP100 (Field)	1.70	317-371	394-419	n/a
	RAP60:หินฝุ่น40 (Field)	1.16	521-594	507-677	n/a
ณรงค์ อุทัยรัตน์, 2552	RAP0	1.89	300	180	2,184
	RAP25	2.07	300	247	2,982
	RAP50	2.48	358	303	3,780
	RAP75	2.3	344	287	2,782
	RAP100	1.41	296	221	8,482

4.4.4 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร

ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวรโดยให้น้ำหนักกระทำก่อนตัวอย่างที่ 200 kPa และทำการทดสอบจำนวน 10,000 รอบ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานการยุบตัวของถาวร

Deformation Test	Cycle	Material Proportion				
		RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Axial Strain (%)	2,500	0.124	0.253	0.183	0.245	0.420
	5,000	0.136	0.267	0.207	0.282	0.511
	7,500	0.143	0.276	0.223	0.307	0.572
	10,000	0.148	0.284	0.236	0.327	0.621



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานการยุบตัวของถาวร

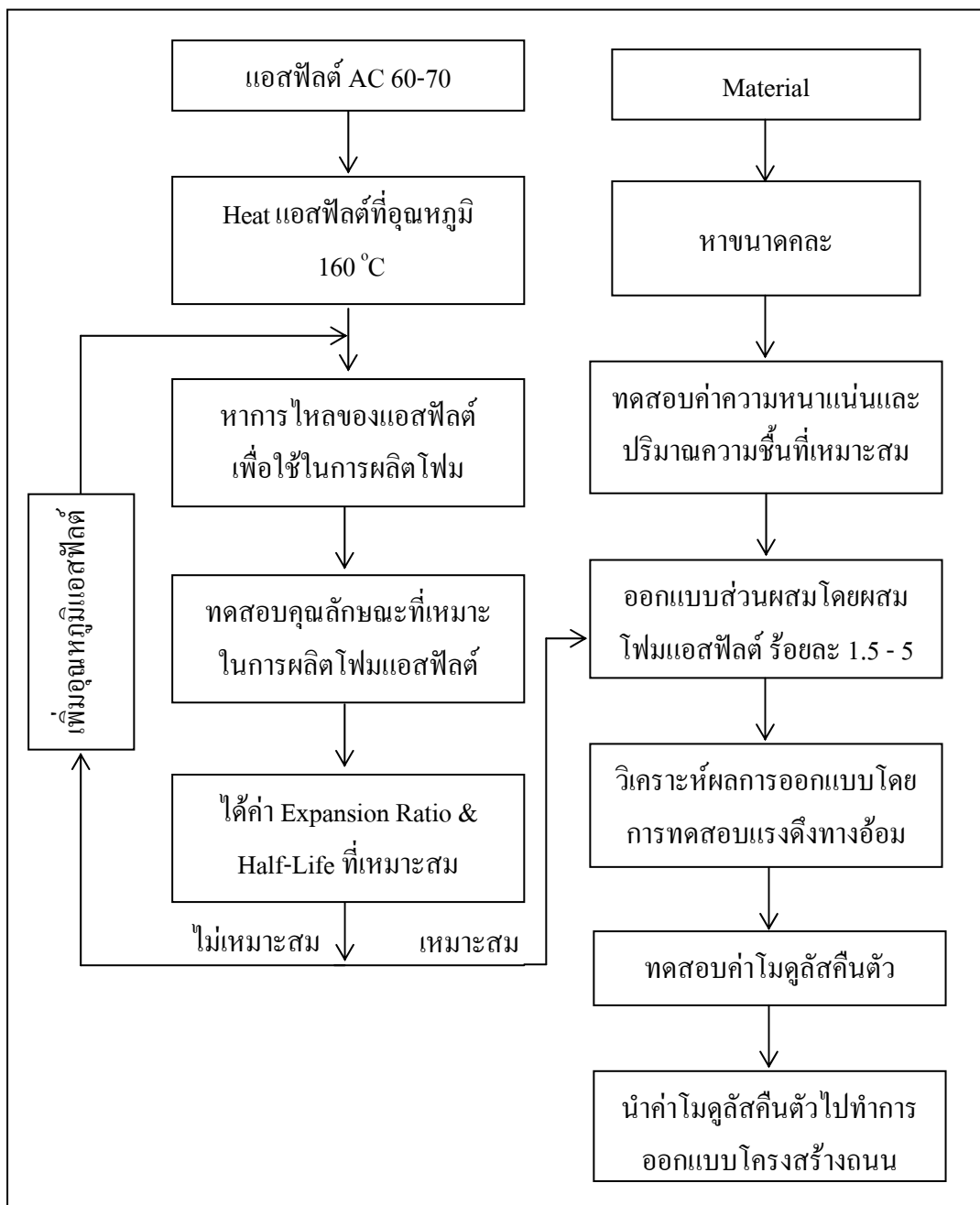
ผลการทดสอบที่ 10,000 รอบ พบว่าค่าการยุบตัวสะสมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามวัสดุมวลรวมที่มีส่วนผสมของฟิวทางแอสฟัลต์เดิมเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวสะสมของวัสดุมวลรวมที่มากทำให้ทราบว่าเมื่อถูกน้ำหนักกระทำซ้ำเป็นระยะเวลาต่างๆ จะมีโอกาสที่จะพัวติมากกว่า

4.4.5 แนวทางการออกแบบ

สำหรับแนวทางการออกแบบโครงสร้างทางในการศึกษาครั้งนี้มีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยโพลีแอสฟัลต์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.19 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ใช้แอสฟัลต์ AC เกรด 60-70 ตามมาตรฐาน มอก.851
- 2) ทำการ Heat แอสฟัลต์ในตู้อบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลาประมาณ 30 นาที ก่อนนำเข้าเครื่องผลิตโพลีแอสฟัลต์
- 3) ทำการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 160 °C โดยทำการซังน้ำหนัของแอสฟัลต์จากเครื่องผลิตโพลี โดยทำการเปรียบเทียบน้ำหนักของแอสฟัลต์ที่ไหลในช่วงเวลา 1-6 วินาที เพื่อหาเวลาที่ทำให้แอสฟัลต์ปริมาณ 500 กรัม
- 4) นำเวลาที่ได้จากการทดสอบการไหลของแอสฟัลต์ที่ปริมาณ 500 กรัม ทดสอบคุณลักษณะที่เหมาะสมของโพลีแอสฟัลต์ สำหรับกระบวนการผลิตโพลีจะฉีดน้ำร้อยละ 2-5 ของปริมาณแอสฟัลต์ โดยที่ใช้ความดันน้ำที่ 4-6 บาร์และความดันอากาศที่น้อยกว่าความดันน้ำ 1 บาร์
- 5) ทำการวัดค่าการขยายตัวของแอสฟัลต์จากถึงรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร และจับเวลาที่ทำให้แอสฟัลต์ยุบตัวลดครึ่งหนึ่ง(ค่าครึ่งชีวิต)
- 6) นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัว/ค่าครึ่งชีวิตกับปริมาณน้ำ โดยพิจารณาปริมาณน้ำที่เหมาะสมบริเวณเส้นกราฟค่าการขยายตัวตัดกับค่าครึ่งชีวิต จะทำให้ได้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตและค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสม
- 7) พิจารณาผลการผลิตโพลีแอสฟัลต์ที่เหมาะสมต้องมีค่าการขยายตัวไม่น้อยกว่า 8 เท่า และค่าครึ่งชีวิตไม่น้อยกว่า 6 วินาที ในการผลิตโพลีแอสฟัลต์ที่ได้ค่าไม่เหมาะสมให้ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแอสฟัลต์แล้วทำตามขั้นตอนในข้อ 3-6 แต่อุณหภูมิของแอสฟัลต์ที่ใช้ไม่ควรเกิน 180 °C

- 8) นำวัสดุมวลรวมที่ใช้ทำการทดสอบการหาขนาดคละ ทดสอบค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม
- 9) ทำการออกแบบส่วนผสมโดยนำวัสดุมวลรวมผสมกับโพลีเอสเตอร์โดยใช้ปริมาณโพลีเอสเตอร์ร้อยละ 1.5-5 ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม
- 10) ทำการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory Compaction แล้วนำมาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงแล้วนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม
- 11) วิเคราะห์ผลการออกแบบส่วนผสมของวัสดุมวลรวมโดยการทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยพิจารณาปริมาณโพลีเอสเตอร์ที่ผสมแล้วทำให้ได้ค่าแรงดึงทางอ้อมที่สูงที่สุด
- 12) นำวัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยโพลีเอสเตอร์ทำการทดสอบค่าโมดูลัสกันตัว แล้วนำไปออกแบบโครงสร้างชั้นทางต่อไป



รูปที่ 4.19 แนวทางการออกแบบส่วนผสม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาวิธีการใช้โฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการใช้โฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยได้นำวัสดุโครงสร้างทางเดิมจากทางหลวงหมายเลข 35 (ธนบุรี-ปากท่อ) บริเวณหลักกิโลเมตรที่ 80 โดยทำการเก็บแยกระหว่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Reclaimed Asphaltic Concrete : RAP) กับหินคลุก (Reclaimed Crushed Base : RCR) แล้วมาผสมกันระหว่าง RAP:RCR ในสัดส่วน 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, และ 100:0 ซึ่งต่อไปนี้เรียกว่าวัสดุ RAP0, RAP25, RAP50, RAP75 และ RAP100 ตามลำดับ ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษานี้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC60/70 เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ ผลการทดสอบพบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์อุณหภูมิ 170 °C ปริมาณน้ำร้อยละ 2.6 ของปริมาณแอสฟัลต์และความดันน้ำที่ 6 บาร์ ทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ที่ดีที่สุดกล่าวคือมีค่าการขยายตัวเท่ากับ 9.5 เท่า และค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 9.8 วินาที

2. การออกแบบส่วนผสมโดยนำวัสดุรวม RAP0, RAP25, RAP50, RAP75 และ RAP100 ผสมกับโฟมแอสฟัลต์ พบว่าต้องใช้ปริมาณโฟมแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 4.1, 3.8, 3.2, 3.0 และ 2.9 เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงทางอ้อมสูงสุด แสดงให้เห็นว่าวัสดุรวมที่มีส่วนผสมของ RAP มากต้องการปริมาณโฟมแอสฟัลต์ในปริมาณที่น้อย เนื่องจากวัสดุผิวทางมีส่วนผสมของแอสฟัลต์อยู่ทำให้การดูดซึมแอสฟัลต์ใหม่ของวัสดุรวมทำได้น้อยลง

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุรวมที่ผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยทำการทดสอบตัวอย่างในสถานะแบบไม่แช่น้ำ แบบแช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C พบว่าค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) และผลการทดสอบค่าการรับน้ำหนักแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) มีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันคือ การทดสอบในสถานะไม่แช่น้ำมีผลการทดสอบสูงกว่า การทดสอบแบบแช่น้ำ และการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C

4. เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบสัดส่วนการรับแรงดึงทางอ้อม (Tensile Strength Ratio, TRS) พบว่าวัสดุมวลรวมมีค่า TSR_{Soak} ในช่วงร้อยละ 60 - 85 และมีค่า $TSR_{40^{\circ}C}$ ในช่วงร้อยละ 35 - 48 บ่งบอกว่าวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยโพลีเอสเตอร์มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายในช่วงที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ มากกว่าที่อยู่ในสภาวะการแช่น้ำ

5. ค่าสัดส่วนกำลังรับอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength Ratio, UCSR) พบว่าค่า $UCSR_{Soak}$ อยู่ในช่วงร้อยละ 50-97 และค่า $UCSR_{40^{\circ}C}$ อยู่ในช่วงร้อยละ 44-60 บ่งบอกว่าวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยโพลีเอสเตอร์มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายในสภาวะที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ มากกว่าที่อยู่ในสภาวะการแช่น้ำ แต่สำหรับวัสดุมวลรวม RAP0 มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายในสภาวะแช่น้ำมากกว่าสภาวะที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ เพราะมีค่า $UCSR_{Soak}$ มากกว่าค่า $UCSR_{40^{\circ}C}$

6. ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวสำหรับการศึกษาครั้งนี้ พบว่าวัสดุมวลรวม RAP0, RAP25 และ RAP50 การทดสอบในสถานะไม่แช่น้ำมีผลการทดสอบสูงกว่าการทดสอบในสถานะแช่น้ำ แต่สำหรับวัสดุมวลรวม RAP75 และ RAP100 กลับพบว่าการทดสอบในสถานะแช่น้ำจะผลการทดสอบสูงกว่าการทดสอบในสถานะไม่แช่น้ำ สำหรับการทดสอบในสถานะที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมวลรวม RAP0 และ RAP25 ค่าใกล้เคียงกับการทดสอบในสถานะแช่น้ำ แต่สำหรับวัสดุมวลรวม RAP50, RAP75 และ RAP100 มีค่าโมดูลัสลดเมื่อเทียบกับการทดสอบในสถานะแช่น้ำ บ่งบอกว่าวัสดุมวลรวม RAP50, RAP75 และ RAP100 ที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยโพลีเอสเตอร์มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายในช่วงที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ มากกว่าที่อยู่ในสภาวะการแช่น้ำ

7. การทดสอบการยุบตัวอย่างถาวรของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยโพลีเอสเตอร์ สำหรับการทดสอบค่าการยุบตัวที่ 10,000 รอบ พบว่าค่าการยุบตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามส่วนผสมของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้น วัสดุที่ส่วนผสมของแอสฟัลต์มากมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายมากกว่า

8. ผลการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพลีเอสเตอร์ จะเห็นได้ว่าวัสดุมวลรวม RAP50 จะให้ค่าแรงดึงทางอ้อม ค่าการรับน้ำหนักแกนเดียว และค่าโมดูลัสคืนตัวสูงสุด

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสม RAP50 มีค่าดีขึ้น ขนาดละเอียดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้โครงสร้างของวัสดุแต่ละส่วนผสมมีการยึดเกาะดีขึ้น จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะเห็นว่าวัสดุผสม RAP50 มีขนาดละเอียดดีกว่าวัสดุชนิดอื่นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) สูงกว่าวัสดุผสมชนิดอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการตัดวัสดุแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆนั้น ควรจะให้มีความหนาของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดคละกันเท่าๆกัน
2. ในการบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์ควรใช้ปริมาณแอสฟัลต์อย่างน้อย 3 ลิตรในกระบวนการผลิต และควรมีไม่น้อยกว่า 2 ลิตรในเครื่องผลิตโฟม
3. จากการผสมด้วยเครื่องผสมแอสฟัลต์ปรากฏว่ามีโฟมแอสฟัลต์ติดที่แกนผสมจำนวนมากทำให้ได้ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมไม่ตรงกับที่ต้องการ ดังนั้นควรผสมด้วยมือ
4. การสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่ทดสอบแบบ Indirect Tensile ค่าอัตราส่วนปัวซองที่ใช้ในการทดสอบควรที่จะทำการทดสอบหาค่าจากก้อนตัวอย่างที่ผสมโฟมแอสฟัลต์ในแต่ละส่วนผสมและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ
5. การทดสอบค่ายุบตัวถาวรควรติดตั้งเครื่องมือวัดค่าการทรุดตัวบริเวณกึ่งกลางก้อนตัวอย่างเนื่องจากบริเวณด้านบนบนก้อนก้อนตัวอย่างอาจจะมีผิวที่ไม่เรียบทำให้การวัดค่าการทรุดตัวอาจผิดพลาดได้
6. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในวัสดุโครงสร้างทางซึ่งมีชั้นพื้นทางเป็นวัสดุผสมผสมซีเมนต์หรือแอสฟัลต์อิมัลชัน

บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม. 2520. วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. 58 หน้า.
- กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม. 2543. มาตรฐานการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.doh.go.th/dohweb/standard/dhs/dhs213-43.pdf> [21/07/50]
- ชยชนวี พรหมศร. 2541. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี **Indirect Tensile Test** เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. รายงานฉบับที่ วพ. 167 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และมีฤกษ์ พัชร. 2544. การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าโดยใช้ปูนซีเมนต์. สัมมนาวิศวกรรมทาง ครั้งที่ 1, 16-17 กรกฎาคม 2544, กรุงเทพมหานคร, หน้า 173-192.
- วรภัทร เกตุนุติ. การประยุกต์เทคนิคโฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่ **ในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 127 หน้า
- วัชรินทร์ วิทยกุล. 2547. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สุรพล เกตุแก้ว. 2551. การปรับปรุงคุณภาพวัสดุพื้นทางเดิมด้วยอิมัลชันสำหรับการรีไซเคิลผิว **ถนนลาดยางแบบเย็นในที่**. สัมมนาวิศวกรรมทาง ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. หน้า 409-427.
- Atkinson, P.W. 1995. **Advacrete/Cement Additive for Stabilisation**. Pavement Rehabilitation Workshop. 24 & 25 August 1995. Queensland, pp. 1-38.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, DC, 1993.
- American Association of Highway and Transport Offices. **Method of Sampling and Testing**. AASHTO T27.
- American Association of Highway and Transport Offices. **Method of Sampling and Testing**. AASHTO T312.
- American Society for Testing and Material. **Annual Book of ASTM Standards**. ASTM D4123.
- American Society for Testing and Material. **Annual Book of ASTM Standards**. ASTM D6931.

- Australian Standard. 1995. **Methods of Sampling and Testing Asphalt**. AS 2891.12.1.
- Black, D.J., 1995. **Towards a Specification for Deep Lift In Situ Pavement Stabilisation**, Road & Traffic Authority, Vol. 10, No. 5, pp. 1-4.
- Chiu, C.T., Huang, M.Y. and Lu, L.C., 2002. **A Study on The Application of Foamed Asphalt in Taiwan**. Department of Civil Engineering, Chung Hua University, Taiwan.
- Giummara, G.J., 1995, **Lastest Developments in Roothing Technologies**. Pavement Rehabilitation Workshop. 24 & 25 August 1995, Queensland, pp. 1-11.
- Hogentogler, C.A., 1938. **Engineering Properties of the Soils**. New York, Mc Graw-Hill, pp. 9-18.
- Kennedy, J. and Oleson, R.W.. 1987. **Mix-in-place Recycling with Cement**. The Journal of the Institution of Highways and Transportation, Vol. 34, No. 2, pp. 5-13.
- Koender, B.G., Stoker, D.A., Robertus, C., Larsen, O., and Johansen, J.. **Ninth International Conference on Asphalt Pavement**. 2002.
- Kandhal, P.S., Mallick, R.B., 1997. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Washington. December 1997.
- Kuhlman, R.H., 1989, "Soil-Cement from Recycled Pavement" *Concrete International Design and Construction*, Vol. 11, No. 5, pp. 35-38.
- Lee, H.D., 2007. **Manual of Laboratory Mix Design Procedure for Cold In-place Recycling using Foamed Asphalt (CIR-foam)**., June 2007.
- Lewis, A. J. N., and Collings, D.C., Cold in place recycling : A relevant for road rehabilitation and upgrading, **7th conference on asphalt pavement for South Africa**, 1999
- Matthews, D.M., 2007, **Asphalt Recycling in Pavement Preservation**, California. July 2007.
- Rammanujam, J.M.. 1995. **Performance Monitoring of Thin Lift (Cement/Bitumen) and Deep Lift (Cement/Flyash, Cement/Slag) Pavement Recycling Project**. Pavement Rehabilitation Workshop. 24 & 25 August 1995. Queensland. pp. 1-20.
- Reeves, I.N.. 1995. **Innovations Impacting Pavement Recycling Options**. Pavment Rehabilitation Workshop. 24 & 25 August 1995. Queensland. pp. 1-11.
- Robert, F.L., Engelbrecht, J.C. and Kennedy, T.W. 1984. **Evaluation of Recycled Mixtures Using Foamed Asphalt**. Transportation Research Record. Vol.968: 78-85.
- Ruckel, P.J., Acott, S.M., and Bowering, R.H. 1983. **Foamed-Asphalt Paving Mixture: Preparation of Design Mixture and Treatment Test Specimens**. Transportation Research Record. Vol.911: 88-95.
- Tabensky, W.. 1990. **Road Recycling in US," Shir of Buln Buln Memo**. No. 83. pp. 66-73.

- University of New Mexico. 2003. **Indirect Tension Test For Resilient Modulus Of Bituminous Mixtures**. Search : http://civilx.unm.edu/laboratories_ss/bituminous/Lab%20Procedures/CE305_ResModD4123.doc. [21/07/50]
- Walton, J.E., 1995. **Cold In Place Recycling Results and Procedures Most Often Ask Questions and Answers**. Pavement Rehabilitation Workshop. 24 & 25 August 1995. Queensland. pp. 1-15.
- Wijk, A.V. and Wood, L.e.. 1983. **Use of Foamed Asphalt in Recycling of an Asphalt Pavement**. Transportation Research Record. Vol.911: 96-103.
- Winerkorn, H.F.. 1955. **The Science of Soil Stabilization**. Highway Research Board. Bulletin 108. pp. 1-24.
- Wirtgen Group. 2004. **Wirtgen Cold Recycling Manual**. 2nd edition November 2004. Germany. 249 pp.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์และหินคลุก

ตารางผนวกที่ ก-1 ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุ RAP100 โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง

SIEVE ANALYSIS					RAP100		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพลีแอสฟัลต์						
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)						
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์						
Sieve No.	Sieve Diameter (mm)	Wt. of Sieve (gm)	Wt. of Sieve + Soil (gm)	Total Weight of Soil (gm)	Wt. of Soil Retained (gm)	% Retain	% Finer
1"	25	-	-	-	2785.7	-	100.00
3/4"	19	543.5	695.0	151.5	2785.7	5.44	94.56
3/8"	9.5	610.1	1216.6	606.5	2785.7	21.77	72.79
4"	4.75	486.3	1173.1	686.8	2785.7	24.65	48.14
10	2	537.5	1267.6	730.1	2785.7	26.21	21.93
20	0.85	400.4	801.2	400.8	2785.7	14.39	7.54
40	0.425	571.1	688.3	117.2	2785.7	4.21	3.33
100	0.15	512.8	571.3	58.5	2785.7	2.10	1.23
200	0.075	300.5	315.7	15.2	2785.7	0.55	0.69
Pan	0	450.4	469.50	19.1	2785.7	0.69	0.00

ตารางผนวกที่ ก-2 ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุ RAP75 โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง

SIEVE ANALYSIS					RAP75		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพนแอสฟัลต์						
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)						
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์						
Sieve No.	Sieve Diameter (mm)	Wt. of Sieve (gm)	Wt. of Sieve + Soil (gm)	Total Weight of Soil (gm)	Wt. of Soil Retained (gm)	% Retain	% Finer
1"	25	-	-	-	2550.0	-	100.00
3/4"	19	543.5	646.30	102.80	2550.0	4.03	95.97
3/8"	9.5	610.1	1230.40	620.30	2550.0	24.33	71.64
4"	4.75	486.3	1117.40	631.10	2550.0	24.75	46.89
10	2	537.5	1120.70	583.20	2550.0	22.87	24.02
20	0.85	400.4	704.50	304.10	2550.0	11.93	12.10
40	0.425	571.1	700.90	129.80	2550.0	5.09	7.01
100	0.15	512.8	610.10	97.30	2550.0	3.82	3.19
200	0.075	300.5	342.10	41.60	2550.0	1.63	1.56
Pan	0	450.4	490.20	39.80	2550.0	1.56	0.00

ตารางผนวกที่ ก-3 ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุ RAP50 โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง

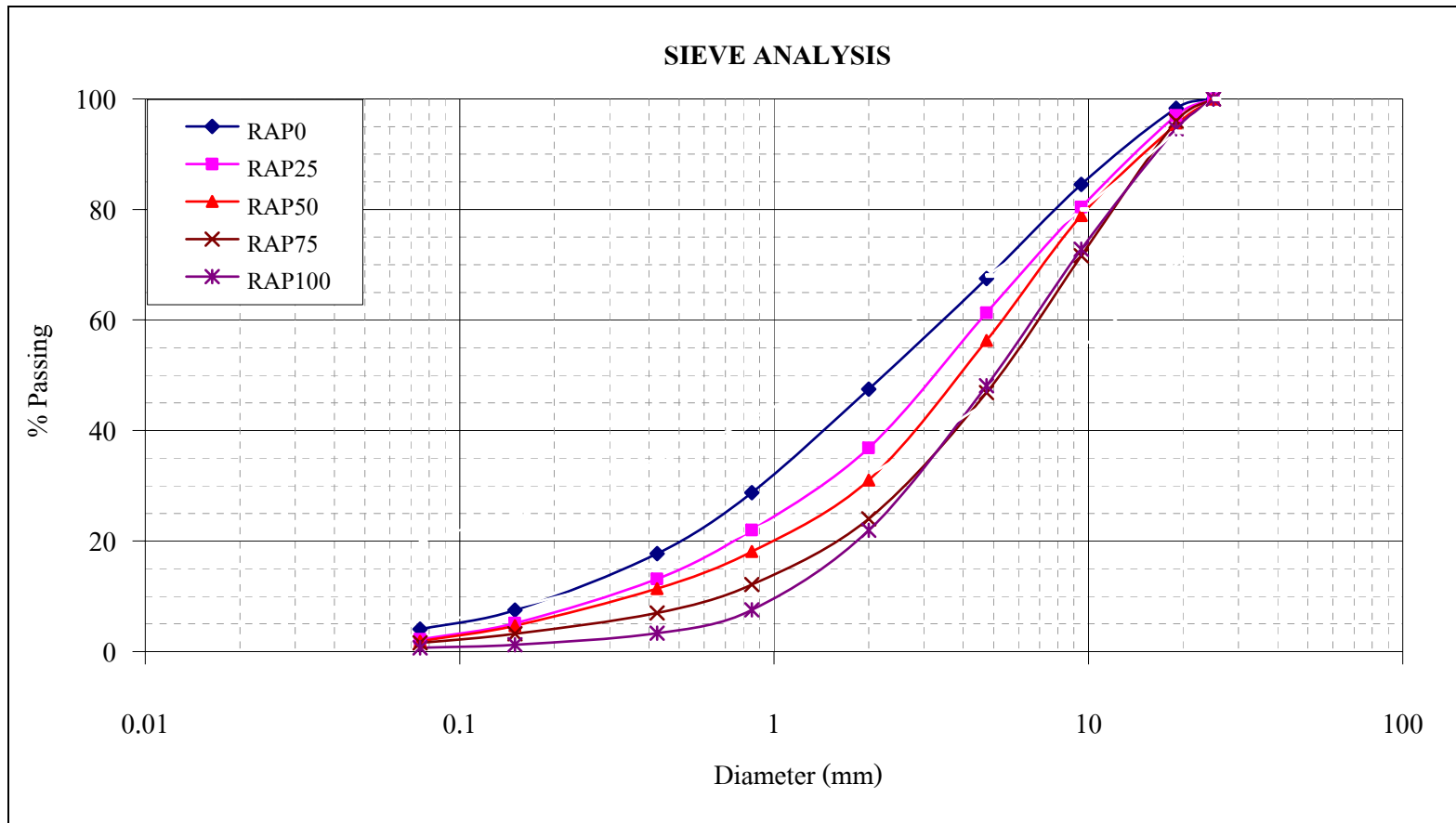
SIEVE ANALYSIS					RAP50		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพลีแอสฟัลต์						
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)						
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์						
Sieve No.	Sieve Diameter (mm)	Wt. of Sieve (gm)	Wt. of Sieve + Soil (gm)	Total Weight of Soil (gm)	Wt. of Soil Retained (gm)	% Retain	% Finer
1"	25	-	-	-	3577.2	-	100.00
3/4"	19	543.5	744.3	200.8	3577.2	5.61	94.39
3/8"	9.5	610.1	1415.1	805.0	3577.2	22.50	71.88
4"	4.75	486.3	1258.8	772.5	3577.2	21.60	50.29
10	2	537.5	1227.3	689.8	3577.2	19.28	31.00
20	0.85	400.4	862.0	461.6	3577.2	12.90	18.10
40	0.425	571.1	811.1	240.0	3577.2	6.71	11.39
100	0.15	512.8	752.0	239.2	3577.2	6.69	4.70
200	0.075	300.5	402.8	102.3	3577.2	2.86	1.85
Pan	0	450.4	514.20	63.8	3577.2	1.78	0.06

ตารางผนวกที่ ก-4 ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุ RAP25 โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง

SIEVE ANALYSIS					RAP25		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพลีแอสฟัลต์						
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)						
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์						
Sieve No.	Sieve Diameter (mm)	Wt. of Sieve (gm)	Wt. of Sieve + Soil (gm)	Total Weight of Soil (gm)	Wt. of Soil Retained (gm)	% Retain	% Finer
1"	25	-	-	-	1900.0	-	100.00
3/4"	19	543.5	600.1	56.6	1900.0	2.98	97.02
3/8"	9.5	610.1	925.5	315.4	1900.0	16.60	80.42
4"	4.75	486.3	849.2	362.9	1900.0	19.10	61.32
10	2	537.5	1002.4	464.9	1900.0	24.47	36.85
20	0.85	400.4	682.6	282.2	1900.0	14.85	22.00
40	0.425	571.1	739.6	168.5	1900.0	8.87	13.13
100	0.15	512.8	664.6	151.8	1900.0	7.99	5.14
200	0.075	300.5	356.4	55.9	1900.0	2.94	2.20
Pan	0	450.4	492.2	41.8	1900.0	2.20	0.00

ตารางผนวกที่ ก-5 ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุ RAP0 โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง

SIEVE ANALYSIS					RAP0		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพลีแอสฟัลต์						
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)						
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์						
Sieve No.	Sieve Diameter (mm)	Wt. of Sieve (gm)	Wt. of Sieve + Soil (gm)	Total Weight of Soil (gm)	Wt. of Soil Retained (gm)	% Retain	% Finer
1"	25	-	-	-	1913.5	-	100.00
3/4"	19	716	748.4	32.4	1913.5	1.69	98.31
3/8"	9.5	549.3	812.7	263.4	1913.5	13.77	84.54
4"	4.75	758.0	1083.4	325.4	1913.5	17.01	67.54
10	2	440.7	824.1	383.4	1913.5	20.04	47.50
20	0.85	400.3	758.4	358.1	1913.5	18.71	28.78
40	0.425	400.1	611.9	211.8	1913.5	11.07	17.72
100	0.15	513.2	708.8	195.6	1913.5	10.22	7.49
200	0.075	293.4	359.2	65.8	1913.5	3.44	4.06
Pan	0	450.4	528.00	77.6	1913.5	4.06	0.00



รูปที่ ก-1 ขนาดละเอียดของวัสดุรวมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตารางผนวกที่ ก-6 ผลการหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP0

Modified Compaction Test				RAP0		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพลีเอสเตอร์					
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ธนบุรี - ปากท่อ)					
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์					
DENSITY						
Mold Diameter	10.135	cm	Height	11.900	cm	
Volume	960.029	cm ³				
Wt. Mold + Soil	kg	7,110.40	7,261.00	7,321.00	7,323.90	7,326.00
Wt. Mold	kg	4,942.50	4,942.50	4,942.50	4,942.50	4,942.50
Wt. Soil	kg	2,167.90	2,318.50	2,378.50	2,381.40	2,383.50
Wet. Density	kg/cm ³	2.26	2.42	2.48	2.48	2.48
Dry Density	kg/cm ³	2.19	2.32	2.36	2.34	2.31
WATER CONTENT						
container No.		1	2	3	4	5
Wt.Can + Wet Soil	gm	346.70	314.30	320.00	312.6	380.80
Wt.Can+Dry Soil	gm	337.20	303.10	306.10	296.7	357.10
Wt. Water	gm	9.50	11.20	13.90	15.90	23.70
Wt. Can	gm	36.50	36.00	36.60	35.9	36.40
Wt. Dry Soil	gm	300.70	267.10	269.50	260.80	320.70
Water Content	%	3.16	4.19	5.16	6.10	7.39

ตารางผนวกที่ ก-7 ผลการหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP25

Modified Compaction Test				RAP25		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพนแอสฟัลต์					
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)					
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์					
DENSITY						
Mold Diameter	10.135	cm	Height	11.900	cm	
Volume	960.029	cm ³				
Wt. Mold+Soil	kg	6,919.10	6,910.10	7,101.90	7,196.80	7,020.20
Wt. Mold	kg	4,877.60	4,877.60	4,877.60	4,877.60	4,877.60
Wt. Soil	kg	2,041.50	2,032.50	2,224.30	2,319.20	2,142.60
Wet. Density	kg/cm ³	2.12	2.11	2.31	2.41	2.22
Dry Density	kg/cm ³	2.09	2.06	2.20	2.26	2.05
WATER CONTENT						
container No.		1	2	3	4	5
Wt. Can+Wet Soil	gm	482.80	364.70	380.80	352.40	419.90
Wt. Can+Dry Soil	gm	476.30	356.60	365.40	333.50	390.80
Wt. Water	gm	6.50	8.10	15.40	18.90	29.10
Wt. Can	gm	36.30	36.30	36.00	37.40	36.70
Wt. Dry Soil	gm	440.00	320.30	329.40	296.10	354.10
Water Content	%	1.48	2.53	4.68	6.38	8.22

ตารางผนวกที่ ก-8 ผลการหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP50

Modified Compaction Test				RAP50		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพนแอสฟัลต์					
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)					
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์					
DENSITY						
Mold Diameter	10.123	cm	Height	11.980	cm	
Volume	964.196	cm ³				
Wt. Mold+Soil	kg	7,045.50	7,083.20	7,130.80	7,185.50	7,212.50
Wt. Mold	kg	4,979.30	4,979.30	4,979.30	4,979.30	4,979.30
Wt. Soil	kg	2,066.20	2,103.90	2,151.50	2,206.20	2,233.20
Wet. Density	kg/cm ³	2.14	2.18	2.23	2.29	2.32
Dry Density	kg/cm ³	2.10	2.11	2.14	2.16	2.14
WATER CONTENT						
container No.		1	2	3	4	5
Wt. Can+Wet Soil	gm	359.20	352.30	358.60	357.30	357.30
Wt. Can+Dry Soil	gm	352.70	341.30	344.70	339.60	333.00
Wt. Water	gm	6.50	11.00	13.90	17.70	24.30
Wt. Can	gm	36.30	36.10	36.40	36.50	36.60
Wt. Dry Soil	gm	316.40	305.20	308.30	303.10	296.40
Water Content	%	2.05	3.60	4.51	5.84	8.20

ตารางผนวกที่ ก-9 ผลการหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP75

Modified Compaction Test				RAP75		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพนแอสฟัลต์					
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)					
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์					
DENSITY						
Mold Diameter	10.123	cm	Height	11.980	cm	
Volume	964.196	cm ³				
Wt. Mold+Soil	kg	6,810.00	6,929.00	6,999.70	7,065.30	7,093.10
Wt. Mold	kg	4,877.60	4,980.20	4,980.20	4,980.20	4,980.20
Wt. Soil	kg	1,932.40	1,948.80	2,019.50	2,085.10	2,112.90
Wet. Density	kg/cm ³	2.00	2.02	2.09	2.16	2.19
Dry Density	kg/cm ³	1.98	1.96	2.01	2.04	2.03
WATER CONTENT						
container No.		1	2	3	4	5
Wt. Can+Wet Soil	gm	410.20	404.40	428.50	414.30	473.50
Wt. Can+Dry Soil	gm	406.00	393.90	412.20	393.40	441.60
Wt. Water	gm	4.20	10.50	16.30	20.90	31.90
Wt. Can	gm	36.30	36.70	36.20	36.50	36.20
Wt. Dry Soil	gm	369.70	357.20	376.00	356.90	405.40
Water Content	%	1.14	2.94	4.34	5.86	7.87

ตารางผนวกที่ ก-10 ผลการหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP100

Modified Compaction Test				RAP100		
PROJECT	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโพนแอสฟัลต์					
LOCATION	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)					
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์					
DENSITY						
Mold Diameter	10.123	cm	Hight	11.980	cm	
Volume	964.196	cm ³				
Wt. Mold+Soil	kg	6,708.10	6,781.00	6,830.80	6,895.40	6,852.00
Wt. Mold	kg	4,877.60	4,877.60	4,877.60	4,877.60	4,877.60
Wt. Soil	kg	1,830.50	1,903.40	1,953.20	2,017.80	1,974.40
Wet. Density	kg/cm ³	1.90	1.97	2.03	2.09	2.05
Dry Density	kg/cm ³	1.88	1.92	1.94	1.98	1.89
WATER CONTENT						
container No.		9	16	7	5	1
Wt. Can+Wet Soil	gm	342.40	314.70	317.00	336.10	323.20
Wt. Can+Dry Soil	gm	339.30	306.90	305.70	319.40	300.60
Wt. Water	gm	3.10	7.80	11.30	16.70	22.60
Wt. Can	gm	36.30	36.30	36.00	37.40	36.70
Wt. Dry Soil	gm	303.00	270.60	269.70	282.00	263.90
Water Content	%	1.02	2.88	4.19	5.92	8.56

ตารางผนวกที่ ก-11 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม						
Type	Simple	D (mm.)	T (mm.)	P_{max} (kN)	σ_T (kPa)	Average IDT (kPa)
RAP0	1	100	68	0.449	42.20	43.09
	2	100	71	0.481	43.10	
	3	100	72	0.495	43.97	
RAP25	1	100	68	0.272	25.46	26.21
	2	100	68	0.280	26.22	
	3	100	68	0.289	26.93	
RAP50	1	100	68	0.156	14.61	14.95
	2	100	68	0.159	14.91	
	3	100	69	0.167	15.32	
RAP75	1	100	68	0.146	13.67	14.34
	2	100	68	0.161	15.07	
	3	100	69	0.156	14.27	

ตารางผนวกที่ ก-12 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว

Unconfined Compressive Strength : q						
Type	Simple	D (mm.)	t (mm.)	P_{max} (kN)	q (kPa)	Average UCS (kPa)
RAP0	1	100.74	122.0	1.06	133	126
	2	100.94	121.9	0.95	119	
RAP25	1	101.68	122.0	0.94	116	113
	2	101.70	121.6	0.89	110	
RAP50	1	101.79	122.0	0.79	97	101
	2	101.78	120.1	0.86	106	
RAP75	1	101.67	122.0	0.69	85	83
	2	101.70	122.0	0.66	81	

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบการผลิตโฟมएसพีเอส

ตารางที่ ข-1 ผลการหาน้ำหนักของแอสฟัลต์ที่เปลี่ยนแปลงความดันน้ำ

อุณหภูมิแอสฟัลต์ 170 °C							
ความดันน้ำ 4 bar							
เวลา(วินาที)		1	2	3	4	5	5.5
น้ำหนักแอสฟัลต์(g)	1	130	235	345	450	555	615
	2	135	230	345	455	555	620
เฉลี่ย		133	233	345	453	555	618
ความดันน้ำ 5 bar							
เวลา(วินาที)		1.0	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
น้ำหนักแอสฟัลต์(g)	1	130	175	285	395	500	615
	2	130	175	285	395	500	615
เฉลี่ย		130	175	285	395	500	615
ความดันน้ำ 6 bar							
เวลา(วินาที)		1	2	3	4	5	5.5
น้ำหนักแอสฟัลต์(g)	1	130	235	340	450	560	615
	2	125	240	345	450	560	620
เฉลี่ย		128	238	343	450	560	618

ตารางที่ ข-2 ผลการหาน้ำหนักของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิแอสฟัลต์ 160 °C							
เวลา(วินาที)		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
น้ำหนักแอสฟัลต์(g)	1	120	235	345	455	560	670
	2	125	235	345	455	565	670
เฉลี่ย		123	235	345	455	563	670
อุณหภูมิแอสฟัลต์ 170 °C							
เวลา(วินาที)		1.0	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
น้ำหนักแอสฟัลต์(g)	1	130	175	285	395	500	615
	2	130	175	285	395	500	615
เฉลี่ย		130	175	285	395	500	615
อุณหภูมิแอสฟัลต์ 180 °C							
เวลา(วินาที)		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
น้ำหนักแอสฟัลต์(g)	1	120	235	340	450	555	665
	2	125	235	340	450	555	665
เฉลี่ย		123	235	340	450	555	665

ตารางที่ ข-3 ผลการหาค่า Expansion และ Hafe – Life ของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 160 °C

Asphalt Temperatures : 160 °C						
Water Pressure 4 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	4	5	7	10	11
	Hafe - Life (sec)	15.9	12.24	8.11	5.86	4.94
Water Pressure 5 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	5	6	8	9	12
	Hafe - Life (sec)	14.20	10.84	7.29	6.51	5.69
Water Pressure 6 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	4	6	9	12	12
	Hafe - Life (sec)	15.83	10.15	6.44	7.2	6.13

ตารางที่ ข-4 ผลการหาค่า Expansion และ Hafe – Life ของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C

Asphalt Temperatures : 170 °C						
Water Pressure 4 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	6	5	9	11	13
	Hafe - Life (sec)	12.5	12.24	7.7	7.2	6.4
Water Pressure 5 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	5	6	8	7	9
	Hafe - Life (sec)	11.2	12.8	8.3	6.51	9.69
Water Pressure 6 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	4	6	9	8	7
	Hafe - Life (sec)	15.83	10.15	6.44	7.2	10.63

ตารางที่ ข-5 ผลการหาค่า Expansion และ Hafe - Life ของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 180 °C

Asphalt Temperatures : 180 °C						
Water Pressure 4 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	5	8	9	10	13
	Hafe - Life (sec)	13.3	7.83	6.85	6.03	5.3
Water Pressure 5 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	4	7	10	12	14
	Hafe - Life (sec)	14.62	9.83	7.03	6.02	5.00
Water Pressure 6 bar	Foaming Water Content (%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	Expansion (times)	4	7	11	12	16
	Hafe - Life (sec)	15.72	10.28	7.26	5.00	3.66

ภาคผนวก ค

การออกแบบส่วนผสม

ตารางที่ ค-1 ผลการออกแบบส่วนผสมวัสดุ RAP0

ออกแบบส่วนผสม				วัสดุมวลรวม RAP0				
Project	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์							
Location	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)							
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์							
Foam Asphalt (%)	Simple	Diameter (mm)	Height (mm)	Wet of Soil (g)	Density (T/m ³)	P _{max} (kN)	IDT (kPa)	Avg. IDT (kPa)
2.5	1	100	65.2	1169.2	2.374	2.60	253.96	273.542
	2	100	65.1	1166.5	2.377	2.60	254.8	
	3	100	65.1	1165.6	2.385	3.19	311.86	
3.0	1	100	65.4	1170	2.369	3.4	331.17	347.338
	2	100	65.2	1167.7	2.377	3.68	359.1	
	3	100	65.2	1170.4	2.373	3.60	351.75	
3.5	1	100	65.2	1164.3	2.366	3.87	378.4	376.335
	2	100	65.4	1169.7	2.363	3.89	379.34	
	3	100	65.2	1165.1	2.374	3.8	371.26	
4.0	1	100	65.2	1162.2	2.37	3.8	370.98	378.477
	2	100	65.2	1162.9	2.371	3.89	380.37	
	3	100	65.2	1162.4	2.371	3.93	384.08	
5.0	1	100	65.2	1162.4	2.371	3.71	362.3	376.757
	2	100	65.2	1162.4	2.371	3.93	383.89	
	3	100	65.2	1162.4	2.371	3.93	384.08	

ตารางที่ ค-2 ผลการออกแบบส่วนผสมวัสดุ RAP25

ออกแบบส่วนผสม				วัสดุมวลรวม RAP25				
Project	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์							
Location	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)							
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์							
Foam Asphalt (%)	Simple	Diameter (mm)	Height (mm)	Wet of Soil (g)	Density (T/m ³)	P _{max} (kN)	IDT (kPa)	Avg. IDT (kPa)
2.5	1	100	70.3	1218.2	2.206	3.027	274	294
	2	100	71.9	1220.5	2.161	3.512	311	
	3	100	70.7	1219.5	2.196	3.29	296	
3.0	1	100	72.7	1238.7	2.169	3.532	309	303
	2	100	71.6	1217.5	2.165	3.282	292	
	3	100	72.3	1218.5	2.146	3.491	307	
3.5	1	100	70.2	1215.4	2.204	3.579	325	337
	2	100	70.5	1217.3	2.198	3.971	356	
	3	100	70.3	1218.5	2.207	3.635	329	
4.0	1	100	70.8	1221.7	2.197	4.076	367	365
	2	100	69.9	1224.4	2.23	3.757	342	
	3	100	70	1220	2.219	4.258	387	
5.0	1	100	70	1221.8	2.222	3.825	348	346
	2	100	70	1228.3	2.234	3.956	360	
	3	100	70	1220.7	2.22	3.634	330	

ตารางที่ ค-3 ผลการออกแบบส่วนผสมวัสดุ RAP 50

ออกแบบส่วนผสม				วัสดุมวลรวม RAP50				
Project	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์							
Location	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)							
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์							
Foam Asphalt (%)	Simple	Diameter (mm)	Height (mm)	Wet of Soil (g)	Density (T/m ³)	P _{max} (kN)	IDT (kPa)	Avg. IDT (kPa)
2.5	1	100	70.3	1189.6	2.248	3.713	336	333
	2	100	70	1197.1	2.262	3.773	343	
	3	100	70.3	1189.9	2.248	3.538	320	
3.0	1	100	70	1187.2	2.247	4.002	364	353
	2	100	71.3	1185.4	2.211	3.823	341	
	3	100	71.3	1187.2	2.211	3.955	353	
3.5	1	100	70.4	1185.3	2.232	4.124	373	385
	2	100	70.3	1185.8	2.236	4.306	390	
	3	100	71.1	1185.6	2.213	4.393	393	
4.0	1	100	70.2	1183.9	2.239	4.599	417	388
	2	100	70.1	1185.5	2.243	4.127	375	
	3	100	70	1187.3	2.245	4.099	373	
5.0	1	100	70	1185.9	2.235	4.105	373	370
	2	100	70.1	1188.7	2.233	4.22	383	
	3	100	70	1185.1	2.233	3.889	354	

ตารางที่ ค-4 ผลการออกแบบส่วนผสมวัสดุ RAP75

ออกแบบส่วนผสม				วัสดุมวลรวม RAP75				
Project	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์							
Location	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)							
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์							
Foam Asphalt (%)	Simple	Diameter (mm)	Height (mm)	Wet of Soil (g)	Density (T/m ³)	P _{max} (kN)	IDT (kPa)	Avg. IDT (kPa)
2.5	1	100	70.3	1181.2	1120.2	2.139	328	328
	2	100	70.3	1182.3	1119.1	2.141	318	
	3	100	70.3	1180	1118.1	2.137	338	
3.0	1	100	70.3	1176.4	1124.8	2.131	336	343
	2	100	70.3	1175.3	1119.2	2.129	342	
	3	100	70.3	1175.7	1115.6	2.129	350	
3.5	1	100	70.3	1177.4	1115	2.132	353	360
	2	100	70	1176.8	1117.1	2.14	364	
	3	100	70.3	1179.3	1125.2	2.136	361	
4.0	1	100	70.3	1174.2	1120.6	2.127	347	366
	2	100	70	1175.9	1113.3	2.139	380	
	3	100	70.3	1175.4	1115.4	2.129	370	
5.0	1	100	70.3	1176.2	1125.7	2.13	372	363
	2	100	70	1175.8	1124.2	2.139	366	
	3	100	70.3	1174.2	1108.2	2.127	352	

ตารางที่ ค-5 ผลการออกแบบส่วนผสมวัสดุ RAP100

ออกแบบส่วนผสม				วัสดุมวลรวม RAP100				
Project	การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์							
Location	ทางหลวงหมายเลข 35 (ชนบุรี - ปากท่อ)							
Test By	นายณรงค์ อุทัยรัตน์							
Foam Asphalt (%)	Simple	Diameter (mm)	Height (mm)	Wet of Soil (g)	Density (T/m ³)	P _{max} (kN)	IDT (kPa)	Avg. IDT (kPa)
1.5	1	100	70.8	1144.8	1098.8	2.06	241	235
	2	100	70.8	1145.2	1096.3	2.059	218	
	3	100	70.8	1148.1	1102.6	2.065	247	
2.0	1	100	70.3	1144.8	1097.5	2.073	275	265
	2	100	70.3	1143	1094.9	2.07	249	
	3	100	70.3	1151.2	1093.7	2.085	273	
2.5	1	100	70.3	1144.2	1095.1	2.072	291	282
	2	100	70.2	1142.2	1089	2.072	265	
	3	100	70.1	1141.6	1087.7	2.074	290	
3.0	1	100	70.2	1147.1	1092.6	2.081	274	278
	2	100	70.2	1147.7	1092.8	2.082	270	
	3	100	70.2	1146.2	1091.3	2.079	289	
4.0	1	100	70.2	1144.4	1089.9	2.076	280	277
	2	100	70.2	1152.9	1103.7	2.091	280	
	3	100	70.2	1145.4	1096.1	2.077	270	

ภาคผนวก ง

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ตารางที่ ง-1 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP0

Indirect Tensile Strength (IDT)			RAP0								
Test		Unsoak			Soak			40 °C			
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Foam Asphalt	%	4.1									
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Height	mm	75.2	75.1	75.0	75.1	75.0	75.0	75.2	75.2	75.3	
Wet of Soil	g	1340	1328	1245	1379	1300	1290	1241	1245	1248	
P _{max}	kN	3.576	3.266	3.767	2.601	2.083	1.677	1.663	2.089	1.405	
IDT	kPa	302.8	276.7	319.7	220.4	176.8	142.3	140.7	176.8	118.7	
Average IDT	MPa	0.300			0.180			0.145			

ตารางที่ ง-2 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25

Indirect Tensile Strength (IDT)			RAP25								
Test		Unsoak			Soak			40 °C			
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Foam Asphalt	%	3.8									
Diameter	mm	100.3	100.4	100.3	100.3	100.2	100.2	100.3	100.3	100.4	
Height	mm	75.5	75.3	76.0	75.3	75.1	75.2	77.0	75.5	76.5	
Wet of Soil	g	1270	1265	1273	1312	1310	1317	1274	1266	1272	
P _{max}	kN	3.624	3.524	3.590	2.875	2.994	2.921	1.489	1.523	1.531	
IDT	kPa	304.2	296.5	299.6	242.3	253.3	246.6	122.6	128.0	126.8	
Average IDT	MPa	0.300			0.247			0.126			

ตารางที่ ง-3 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP50

Indirect Tensile Strength (IDT)			RAP50							
Foam Asphalt		Unsoak			Soak			40 °C		
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Foam Asphalt	%	3.2								
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Height	mm	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Wet of Soil	g	1246	1250	1245	1308	1300	1290	1241	1245	1248
P _{max}	kN	4.206	4.233	4.203	3.563	3.262	3.898	1.982	1.923	1.891
IDT	kPa	357.0	359.3	356.7	302.4	276.8	330.8	168.2	163.2	160.5
Average IDT	MPa	0.358			0.303			0.164		

ตารางที่ ง-4 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP75

Indirect Tensile Strength (IDT)			RAP 75							
Test		Unsoak			Soak			40 °C		
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Foam Asphalt	%	3.0								
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Height	mm	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0
Wet of Soil	g	1267	1267	1267	1267	1267	1267	1267	1267	1267
P _{max}	kN	3.928	4.264	3.980	3.099	3.381	3.656	1.820	1.859	1.954
IDT	kPa	333.4	361.9	337.8	263.0	286.9	310.3	154.4	157.8	165.8
Average IDT	MPa	0.344			0.287			0.159		

ตารางที่ ง-5 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP 100

Indirect Tensile Strength (IDT)			RAP 100								
Test		Unsoak			Soak			40 °C			
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Foam Asphalt	%	2.9									
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Height	mm	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	
Wet of Soil	g	1173	1170	1177	1208	1207	1209	1172	1167	1167	
P _{max}	kN	3.388	3.450	3.637	2.53	2.69	2.59	1.21	1.29	1.21	
UCS	MPa	287	292	308	214	228	220	102	109	103	
Average IDT	MPa	0.296			0.221			0.105			

ตารางที่ ง-6 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุ RAP0

Unconfined Compressive Strength (UCS)			RAP 0								
Test		Unsoak			Soak			40 °C			
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Foam Asphalt	%	4.1									
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Height	mm	116.8	116.8	116.8	116	116.3	117.3	117.2	117.2	117.3	
Wet of Soil	g	2007	2007	2016	2100	2100	2104	2004	2004	2006	
P _{max}	kN	15.18	14.85	14.61	7.67	7.38	7.21	8.84	9.03	8.75	
UCS	MPa	1.92	1.88	1.85	0.97	0.93	0.91	1.13	1.15	1.11	
Average IDT	MPa	1.89			0.94			1.13			

ตารางที่ ง-7 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุ RAP25

Unconfined Compressive Strength (UCS)		RAP 25								
Test		Unsoak			Soak			40 °C		
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Foam Asphalt	%	3.8								
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Height	mm	114.2	114.2	113.6	112.6	112.6	114.4	114	114	114
Wet of Soil	g	1915	1915	1905	1969	1969	1984	1907	1907	1898
P_{max}	kN	16.32	17.00	15.71	12.24	12.80	12.6	7.59	8.32	8.75
UCS	MPa	2.07	2.15	1.99	1.55	1.62	1.60	0.96	1.05	1.11
Average IDT	MPa	2.07			1.59			1.04		

ตารางที่ ง-8 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุ RAP50

Unconfined Compressive Strength (UCS)		RAP 50								
Test		Unsoak			Soak			40 °C		
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Foam Asphalt	%	3.2								
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Height	mm	112.5	112.5	112.5	112.	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5
Wet of Soil	g	1813	1813	1816	1875	1875	1876	1810	1810	1810
P_{max}	kN	19.39	19.48	19.64	18.8	18.7	18.8	9.60	9.16	8.75
UCS	MPa	2.47	2.48	2.50	2.40	2.39	2.40	1.22	1.17	1.11
Average IDT	MPa	2.48			2.40			1.17		

ตารางที่ ง-9 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุ RAP75

Unconfined Compressive Strength (UCS)		RAP 75								
Test		Unsoak			Soak			40 °C		
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Foam Asphalt	%	3.0								
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Height	mm	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5	112.	112.	112.5
Wet of Soil	g	1831	1831	1816	1875	1875	1876	1810	1810	1810
P _{max}	kN	18.16	18.06	17.93	15.95	16.02	16.24	8.69	9.23	9.86
UCS	MPa	2.31	2.30	2.28	2.03	2.04	2.07	1.11	1.17	1.25
Average IDT	MPa	2.30			2.05			1.18		

ตารางที่ ง-10 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแกนเดียวของวัสดุ RAP100

Unconfined Compressive Strength (UCS)		RAP 100								
Test		Unsoak			Soak			40 °C		
Simple		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Foam Asphalt	%	2.9								
Diameter	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Height	mm	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5	112.	112.	112.
Wet of Soil	g	1735	1735	1735	1804	1804	1804	1605	1605	1612
P _{max}	kN	10.50	11.71	11.10	10.41	10.13	9.88	4.80	4.42	5.32
UCS	MPa	1.34	1.49	1.41	1.33	1.29	1.26	0.61	0.56	0.68
Average IDT	MPa	1.41			1.29			0.62		

ตารางที่ ง-11 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP0 แบบไม่แช่น้ำ

RAP0										
TEST		Unsoak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	829	1,244	1,659	829	1,244	1,659	829	1,244	1,659
M _R #1	MPa	2,471	2,238	1,958	2,384	2,314	1,839	2,687	2,151	1,771
M _R #2	MPa	2,433	2,200	1,920	2,346	2,276	1,801	2,649	2,113	1,733
Avg. M _R	MPa	2,454	2,221	1,941	2,367	2,297	1,822	2,670	2,134	1,754
Average M _R	MPa	2,205			2,162			2,186		

ตารางที่ ง-12 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP0 แบบแช่น้ำ

RAP0										
TEST		Soak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	591	886	1,181	591	886	1,181	591	886	1,181
M _R #1	MPa	2,102	1,718	1,320	1,971	1,930	1,861	1,645	1,611	1,434
M _R #2	MPa	2,064	1,680	1,282	1,933	1,892	1,823	1,607	1,573	1,396
Avg. M _R	MPa	2,085	1,701	1,303	1,954	1,913	1,844	1,628	1,594	1,417
Average M _R	MPa	1,696			1,904			1,546		

ตารางที่ ง-13 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP0 ที่อุณหภูมิ 40 °C

RAP0										
TEST		40 °C								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	464	696	928	464	696	928	464	696	928
M _R #1	MPa	2,208	1,656	1,307	2,252	2,004	1,377	2,193	1,825	1,381
M _R #2	MPa	2,160	1,608	1,259	2,204	1,956	1,329	2,145	1,777	1,333
Avg. M _R	MPa	2,187	1,635	1,286	2,231	1,983	1,356	2,172	1,804	1,360
Average M _R	MPa	1,703			1,857			1,779		

ตารางที่ ง-14 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP25 แบบไม่แช่น้ำ

RAP25										
TEST		Unsoak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	716	1074	1432	716	1074	1432	716	1074	1432
M _R #1	MPa	3,143	2,983	2,777	3,253	3,117	2,743	3,328	2,988	2,696
M _R #2	MPa	3,095	2,935	2,729	3,205	3,069	2,695	3,280	2,940	2,648
Avg. M _R	MPa	3,122	2,962	2,756	3,232	3,096	2,722	3,307	2,967	2,675
Average M _R	MPa	2,947			3,017			2,983		

ตารางที่ ง-15 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP25 แบบแช่น้ำ

RAP25										
TEST		Soak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	586	879	1172	586	879	1172	586	879	1172
M _R #1	MPa	2,737	2,521	2,079	2,536	2,469	1,876	2,422	2,316	2,157
M _R #2	MPa	2,689	2,473	2,031	2,488	2,421	1,828	2,374	2,268	2,109
Avg. M _R	MPa	2,716	2,500	2,058	2,515	2,448	1,855	2,401	2,295	2,136
Average M _R	MPa	2,425			2,273			2,277		

ตารางที่ ง-16 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP25 ที่อุณหภูมิ 40 °C

RAP25										
TEST		40 °C								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	296	444	592	296	444	592	296	444	592
M _R #1	MPa	2,680	2,754	2,592	2,397	2,462	2,458	2,458	2,604	2,350
M _R #2	MPa	2680	2575	2525	2575	2462	2531	2525	2531	2350
Avg. M _R	MPa	2,680	2,397	2,458	2,754	2,462	2,604	2,592	2,458	2,350
Average M _R	MPa	2,512			2,607			2,467		

ตารางที่ ง-17 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP50 แบบไม่แช่น้ำ

RAP50										
TEST		Unsoak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	843	1,264	1,686	843	1,264	1,686	843	1,264	1,686
M _R #1	MPa	3,811	3,725	3,593	4,118	3,916	3,643	3,964	3,820	3,618
M _R #2	MPa	3,763	3,677	3,545	4,070	3,868	3,595	3,916	3,772	3,570
Avg. M _R	MPa	3,790	3,704	3,572	4,097	3,895	3,622	3,943	3,799	3,597
Average M _R	MPa	3,689			3,871			3,780		

ตารางที่ ง-18 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP50 แบบแช่น้ำ

RAP50										
TEST		Soak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	715	1,072	1,430	715	1,072	1,430	715	1,072	1,430
M _R #1	MPa	3,368	3,320	2,834	3,097	3,005	2,886	3,195	3,018	2,876
M _R #2	MPa	3,320	3,272	2,786	3,049	2,957	2,838	3,147	2,970	2,828
Avg. M _R	MPa	3,347	3,299	2,813	3,076	2,984	2,865	3,174	2,997	2,855
Average M _R	MPa	3,153			2,975			3,009		

ตารางที่ ง-19 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP50 ที่อุณหภูมิ 40 °C

RAP50										
TEST		40 °C								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	386	580	773	386	580	773	386	580	773
M _R #1	MPa	1,944	1,563	1,358	1,989	1,850	1,691	1,830	1,569	1,303
M _R #2	MPa	1,896	1,515	1,310	1,941	1,802	1,643	1,782	1,521	1,255
Avg. M _R	MPa	1,923	1,542	1,337	1,968	1,829	1,670	1,809	1,548	1,282
Average M _R	MPa	1,601			1,822			1,546		

ตารางที่ ง-20 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP75 แบบไม่แช่น้ำ

RAP75										
TEST		Unsoak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	811	1,217	1,623	811	1,217	1,623	811	1,217	1,623
M _R #1	MPa	2,953	2,816	2,642	2,979	2,655	2,570	2,969	2,854	2,790
M _R #2	MPa	2,905	2,768	2,594	2,931	2,607	2,522	2,921	2,806	2,742
Avg. M _R	MPa	2,932	2,795	2,621	2,958	2,634	2,549	2,948	2,833	2,769
Average M _R	MPa	2,783			2,714			2,850		

ตารางที่ ง-21 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP75 แบบแช่น้ำ

RAP75										
TEST		Soak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	676	1,014	1,351	676	1,014	1,351	676	1,014	1,351
M _R #1	MPa	3,481	3,270	3,165	3,198	3,036	2,959	3,379	3,230	3,172
M _R #2	MPa	3,433	3,222	3,117	3,150	2,988	2,911	3,331	3,182	3,124
Avg. M _R	MPa	3,460	3,249	3,144	3,177	3,015	2,938	3,358	3,209	3,151
Average M _R	MPa	3,284			3,043			3,239		

ตารางที่ ง-22 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP75 ที่อุณหภูมิ 40 °C

RAP75										
TEST		40 °C								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	376	563	751	376	563	751	376	563	751
M _R #1	MPa	993	903	796	845	739	710	841	829	737
M _R #2	MPa	960	870	763	812	706	677	808	796	704
Avg. M _R	MPa	972	882	775	824	718	689	820	808	716
Average M _R	MPa	876			744			781		

ตารางที่ ง-23 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP100 แบบไม่แช่น้ำ

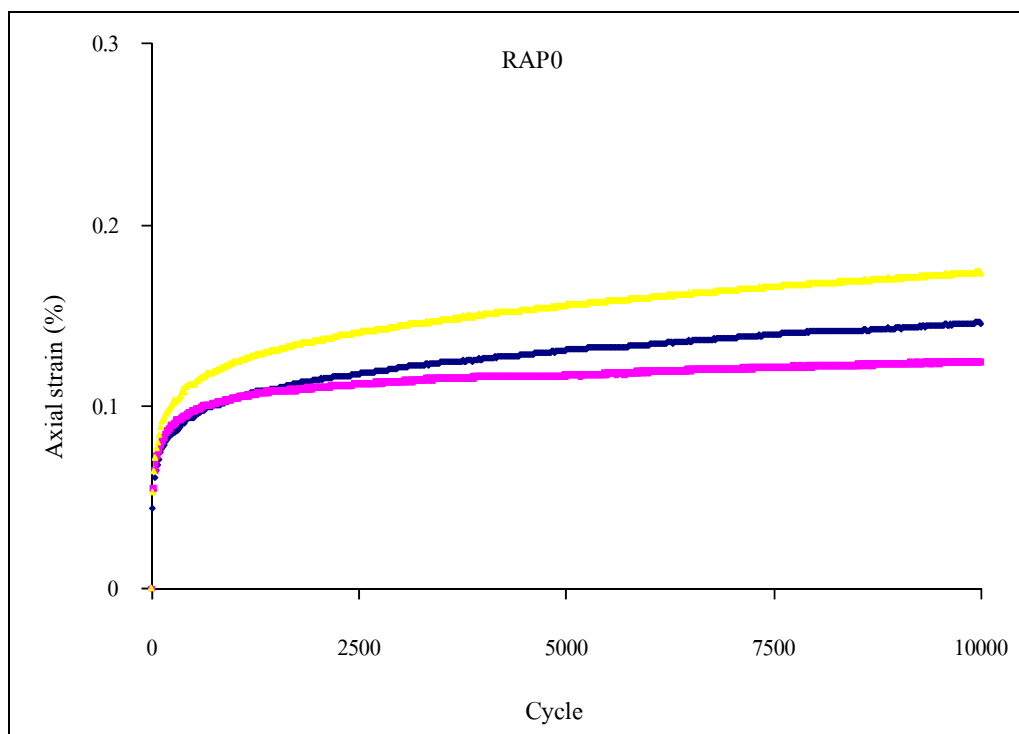
RAP100										
TEST		Unsoak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	698	1,048	1,397	698	1,048	1,397	698	1,048	1,397
M _R #1	MPa	3,091	3,086	2,695	2,946	2,928	2,687	2,870	2,775	2,559
M _R #2	MPa	3,058	3,053	2,662	2,913	2,895	2,654	2,837	2,742	2,526
Avg. M _R	MPa	3,070	3,065	2,674	2,925	2,907	2,666	2,849	2,754	2,538
Average M _R	MPa	2,936			2,833			2,714		

ตารางที่ ง-24 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP100 แบบแช่น้ำ

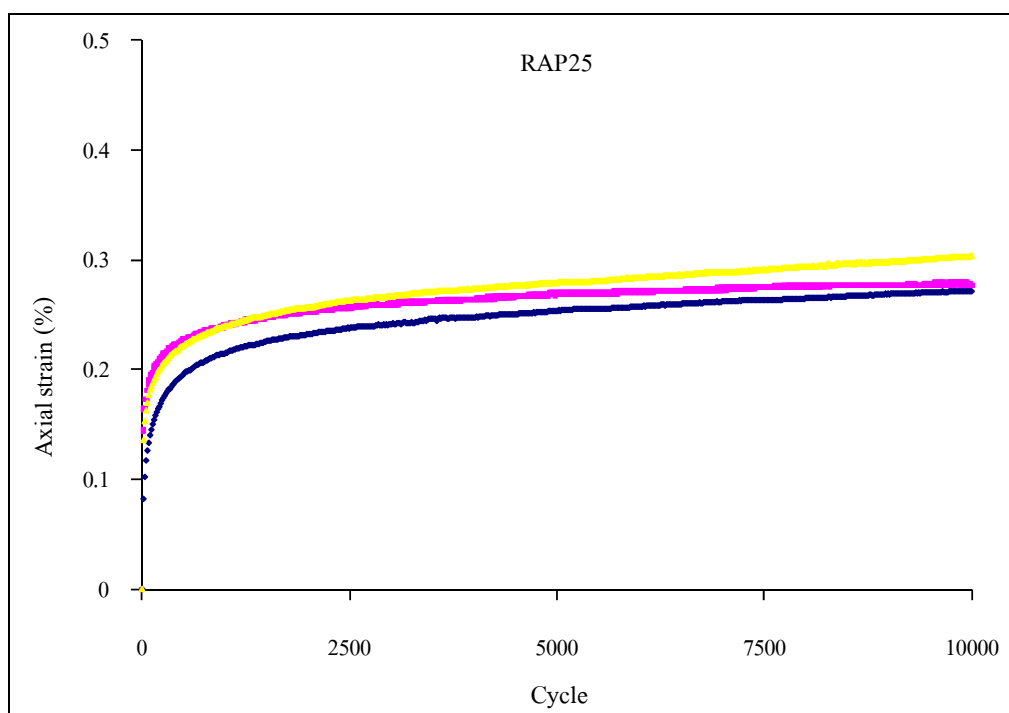
RAP100										
TEST		Soak								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	521	521	521	782	782	782	1,042	1,042	1,042
M _R #1	MPa	3,481	3,270	3,165	3,198	3,036	3,230	3,379	2,959	3,172
M _R #2	MPa	3,448	3,237	3,132	3,165	3,003	3,197	3,346	2,926	3,139
Avg. M _R	MPa	3,460	3,249	3,144	3,177	3,015	3,209	3,358	2,938	3,151
Average M _R	MPa	3,284			3,134			3,149		

ตารางที่ ง-25 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัววัสดุ RAP100 ที่อุณหภูมิ 40 °C

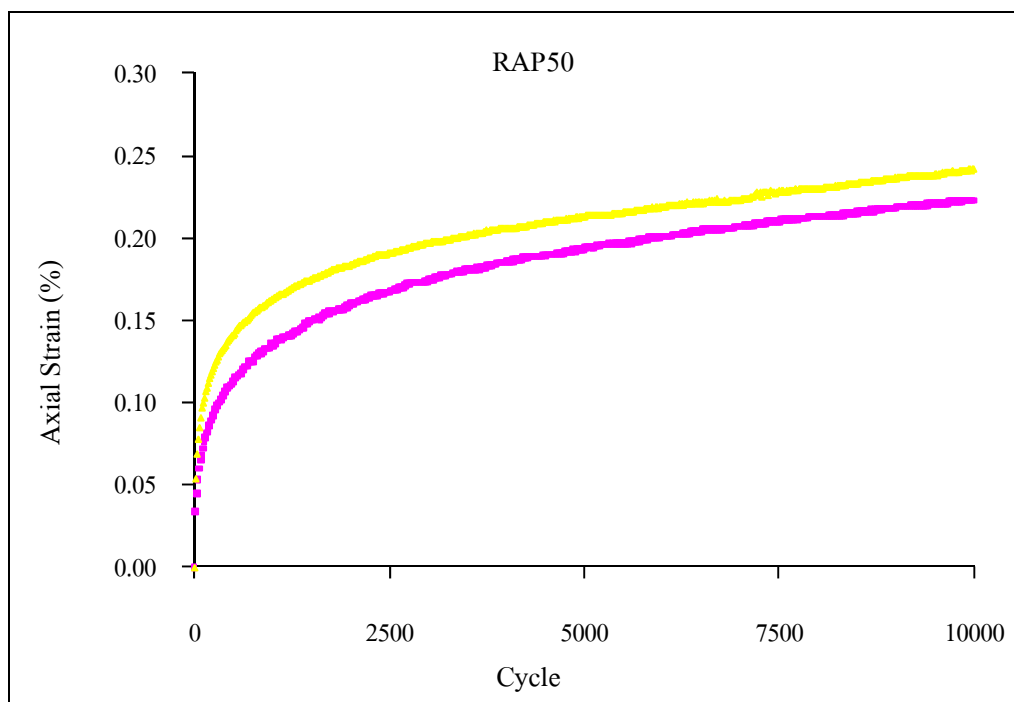
RAP100										
TEST		40 °C								
Simple		Ex11			Ex7			Ex8		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Avg. Diameter	mm	100.1			100.1			100.1		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Avg. Height	mm	75.5			75.5			75.5		
Wet of Soil	g	1269.8			1270.7			1274		
Density	kg/cm ³	2.138			2.139			2.144		
Load	N	247	372	495	247	372	495	247	372	495
M _R #1	MPa	987	897	790	839	733	704	835	823	731
M _R #2	MPa	960	870	763	812	706	677	808	796	704
Avg. M _R	MPa	972	882	775	824	718	689	820	808	716
Average M _R	MPa	876			744			781		



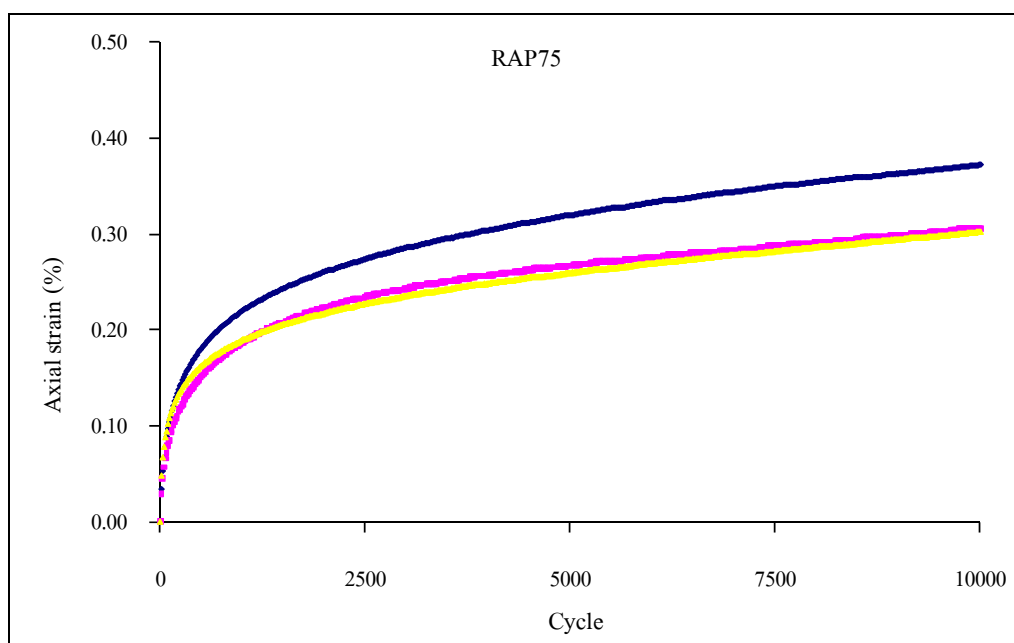
รูปที่ ง-1 ผลการทดสอบค่าการยวบตัวถาวรของวัสดุ RAP0



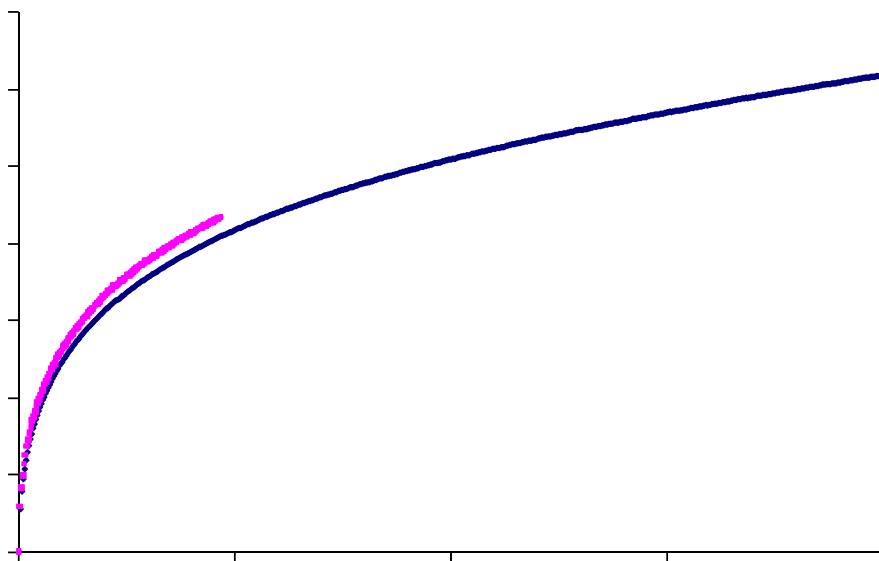
รูปที่ ง-2 ผลการทดสอบค่าการยวบตัวถาวรของวัสดุ RAP25



รูปที่ ง-3 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวถาวรของวัสดุ RAP50



รูปที่ ง-4 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวถาวรของวัสดุ RAP75



การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์
การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14



การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์

Stabilization of Reclaimed Highway Materials with Foam Asphalt

ณรงค์ อุทัยรัตน์ (Narong Uthairath)¹

ธนิศ เฉลิมยานนท์ (Tanit Chalermyanont)²

จุฑา สุนิตย์สกุล (Jutha Sunitsakul)³

ทิพัตน์ ทองฉิม (Pipat Thongchim)⁴

เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ (Sekchai Anuvechsirikiat)⁵

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Narong_goe2@hotmail.com

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ tanit.c@psu.ac.th

³วิศวกรโยธาชำนาญการ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง sjutha@gmail.com

⁴อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ pipat_thongchim@yahoo.com

⁵วิศวกรโยธาชำนาญการ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง sekchai.doh@hotmail.com

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำหนดวัสดุโครงสร้างชั้นทางเก่า นำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำวัสดุ โฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้เป็นตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง โดยทำการเก็บตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเก่าจากโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 35 (ธนบุรี-ปากท่อ) โดยได้ทำการเก็บแยกแยะระหว่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ (RAP) และ หินคลุก (CR) เพื่อทำการศึกษาคูสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ โครงสร้างทางเก่าที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยโฟมแอสฟัลต์ ดังนี้ การทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว และการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว ในการศึกษาได้นำวัสดุ โครงสร้างทางทั้งสองชนิดมาผสมกันระหว่าง RAP:CR ในสัดส่วน 0:100 (RAP0), 25:75 (RAP25), 50:50 (RAP50), 75:25 (RAP75), และ 100:0 (RAP100) ผลการออกแบบส่วนผสมพบว่าต้องใช้อัตราส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 4.3, 3.8, 3.2, 3.0 และ 2.9 ตามลำดับ ในการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว แบบไม่แช่น้ำ มีค่าสูงกว่า แบบแช่น้ำ และมีค่าลดลงเมื่อได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ พบว่าวัสดุ RAP75 และ RAP100 ค่าโมดูลัสคืนตัวแบบแช่น้ำสูงกว่าแบบไม่แช่น้ำ ในขณะที่วัสดุ RAP50, RAP25 และ RAP0 ค่าโมดูลัสคืนตัวแบบไม่แช่น้ำสูงกว่าแบบแช่น้ำ และการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C พบว่าวัสดุที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางมากขึ้นค่าโมดูลัสคืนตัวจะลดลง

ABSTRACT : This paper studies the reclaimed highway materials by stabilization of foam asphalt. The reclaimed highway materials were picked up from the highway 35 (Tonburi-Baktor) and these were separated reclaimed asphalt pavement; RAP and reclaimed crushed rock; CR. Improved RAP and improved CR by foam asphalt were tested to find the engineering properties : indirect tensile strength test, unconfined compressive strength test and resilient modulus test. The proportion of two materials RAP and CR consisted of 0:100(RAP0), 25:75(RAP25), 50:50(RAP50), 75:25(RAP75) and 100:0(RAP100). The foam asphalt were used to mix with two materials at 4.3%, 3.8%, 3.2%, 3.0% and 2.9 % respectively. The indirect tensile strength and unconfined

compressive strength of unsoaked samples were more than soaked samples, and when were tested at higher temperature, these results were increased. The resilient modulus of unsoaked samples and soaked samples found that the material of RAP75 and RAP100 of soaked samples were more than unsoaked samples. The test at temperate of 40 °C found that RAP increased, resilient modulus decreased.

KEYWORDS : Foam asphalt, Indirect tensile strength, Unconfined compressive strength and Resilient modulus

1. บทนำ

การก่อสร้างถนนเป็นการพัฒนาประเทศทางด้านการคมนาคมขนส่งรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจ และความมั่นคงของประเทศ การก่อสร้างถนนเมื่อใช้งานระยะเวลาหนึ่ง ถนนก็จะเกิดความเสียหายตามอายุการใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการซ่อมแซมหรือปรับปรุงใหม่ให้มีสภาพการใช้งานที่ดีเสมอ

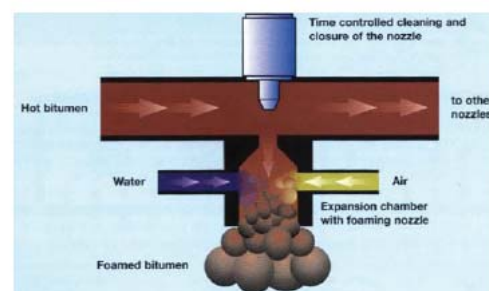
ความเสียหายของถนนอันเนื่องมาจากโครงสร้างของถนน เช่น การทรุดตัวของผิวทางตามแนวล้อ ผิวทางแตกหลายหนึ่งจะเห็น ชำรุดเนื่องจากแรงเฉือนทำให้ถนนอยู่ในสภาพที่ไม่ดีส่งผลให้การขับเคลื่อนยานพาหนะผ่านไปมาไม่สะดวก จำเป็นต้องปรับปรุงโครงสร้างของถนน วัสดุที่นำมาใช้งานนับวันจะยิ่งหายากขึ้น และอยู่ห่างไกลจากบริเวณก่อสร้าง ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเพิ่มขึ้น จึงมีแนวความคิดที่จะนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่ที่เรียกว่า Pavement Recycling เพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างทางต่อไป

ในกระบวนการนำวัสดุโครงสร้างเดิมกลับมาใช้ใหม่สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการผสมร้อน(Hot Recycling) วิธีนี้ต้องอาศัยความร้อนมาใช้ในการผสมส่วนผสมต่างๆ วิธีที่ 2 คือ วิธีการผสมเย็น (Cold Recycling) วิธีนี้ในปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลาย และใช้งานมากยิ่งขึ้น การนำวัสดุโครงสร้างเดิมกลับมาใช้ใหม่ เป็น โครงสร้างชั้นพื้นทาง (Base Course) โดยการใช้น้ำมันซีเมนต์ หรืออิมัลชันแอสฟัลต์ แต่จากการทำงานที่ผ่านมาพบว่ามีข้อจำกัดในการใช้งาน คือปริมาณที่ปูนซีเมนต์สูงเกินไปทำให้ชั้นผิวทางเปราะและลดความต้านทานการล้าของชั้นพื้นทาง [1] สำหรับอิมัลชันแอสฟัลต์จะต้องให้ความชื้นแก่วัสดุมวลรวมในปริมาณที่สูงเพื่อช่วยในการผสมของส่วนผสมได้ง่ายขึ้น จะส่งผลให้เกิดปัญหาในการบดอัดได้

2. โฟมแอสฟัลต์

โฟมแอสฟัลต์ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Prof. Ladis Csanyi จาก Iowa State University ในปี ค.ศ. 1956 ภายหลังเทคโนโลยีนี้ได้รับพัฒนาต่อโดย Mobil Oil Organization ซึ่งได้สิทธิบัตรจาก Prof. Ladis Csanyi การผลิตโฟมแอสฟัลต์ ทำได้โดยการฉีดแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนอุณหภูมิประมาณ 160-200 °C และน้ำในปริมาณที่พอเหมาะเข้าไปผสมกัน [2]

คุณสมบัติของโฟม (Foaming Properties) อันประกอบด้วย ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และ ค่าครึ่งชีวิต (Half-Life) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะบ่งชี้ถึงคุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ ค่าการขยายตัว นั้นแสดงถึงจำนวนเท่าที่เพิ่มขึ้นของปริมาตรสูงสุดภายหลังการเติมน้ำเข้าไปในแอสฟัลต์ร้อน ส่วน ค่าครึ่งชีวิต เป็นค่าที่แสดงถึงเวลาเป็นวินาทีที่ปริมาตรสูงสุดของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การผลิตโฟมแอสฟัลต์ [2]

3. วิธีการทดสอบ

การศึกษาการวิจัย ในครั้งนี้จะนำวัสดุจากโครงสร้างชั้นทางเดิมมาทำการปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำกลับ ไปใช้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นทางใหม่ แต่การจะนำวัสดุที่ทำการปรับปรุงคุณภาพมาใช้ในงานก่อสร้างทางได้นั้น วัสดุจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม สำหรับการใช้งาน

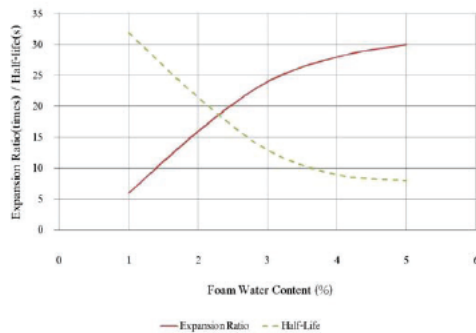
3.1 การทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม

กระบวนการผลิต โฟมแอสฟัลต์ใช้แอสฟัลต์ Penetration Grade AC60-70 โดยใช้อุณหภูมิ 160 °C, 170 °C และ 180 °C โดยใช้เครื่องผลิตโฟมแอสฟัลต์ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ชุดเครื่องมือผลิตโฟมแอสฟัลต์

การทดสอบคุณลักษณะของ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำร้อยละ 1-5 ของปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ทดสอบ โดยทำการวัดค่าการขยายตัว และ ค่าครึ่งชีวิต นำผลที่ได้นำไปสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมต่อไปดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และ ค่าครึ่งชีวิต (Half-Life) ของโฟมแอสฟัลต์ [2]

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างวัสดุผสมรวมที่ซุคหรือ จากทางหลวงหมายเลข 35 (ธนบุรี - ปากท่อ) โดยทำการขุดลอกผิวทางแอสฟัลต์ (RAP)

และหินคลุก (CR) ดังภาพที่ 4 แล้วนำวัสดุทั้ง 2 ชนิด มาทำการผสมกันใน 5 อัตราส่วนดังนี้

- ส่วนผสม 1 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 0:100 (RAP0)
- ส่วนผสม 2 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 25 : 75 (RAP25)
- ส่วนผสม 3 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 50 : 50 (RAP50)
- ส่วนผสม 4 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 75 : 25 (RAP75)
- ส่วนผสม 5 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์ : วัสดุหินคลุก 100 : 0 (RAP100)



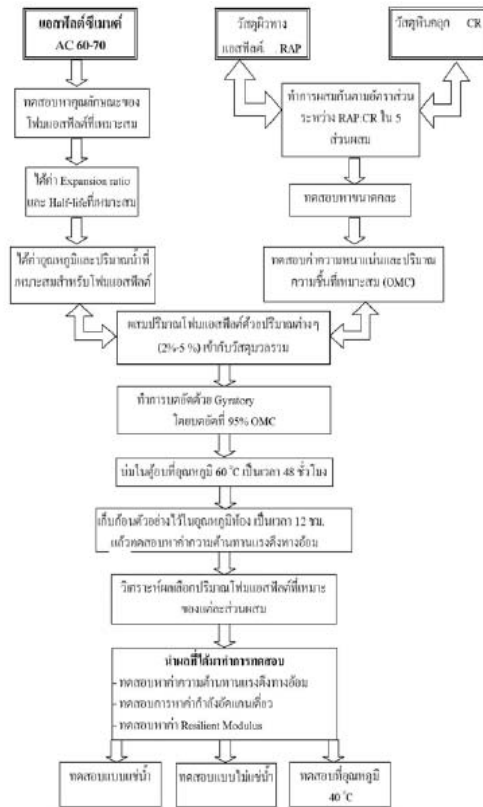
ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต

3.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุผสมรวม

- ทดลองหาขนาดคลด (Gradation) วิธีการทดลองอ้างอิงตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ท. 205/2517 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้า่ง”
- การทดลองการบดอัด (Compaction) วิธีการอ้างอิงตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท.108/2517 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

4. การออกแบบส่วนผสม

จากกระบวนการผลิต โฟมแอสฟัลต์ที่มีปริมาณน้ำและอุณหภูมิที่เหมาะสมตามที่หาได้จากข้อ 3.1 กับวัสดุผสมรวม จะถูกนำมาออกแบบส่วนผสม โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาปริมาณ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัสดุผสมรวมทั้ง 5 ส่วนผสม วิธีการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ สรุปดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมโพลีเอสเตอร์

5. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโพลีเอสเตอร์

ปริมาณโพลีเอสเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุรวมรวมทั้ง 5 ส่วนผสมแล้ว ก้อนตัวอย่างของแต่ละส่วนผสม จะถูกเตรียมขึ้นเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม โดยทดสอบแบบแช่น้ำ แบบไม่แช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C คือ

5.1 การทดสอบหาความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม
วิธีการทดสอบ อ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ASTM D6931 “Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures”

5.2 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว
โดยวิธีการอ้างอิงตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท.105/2517 “วิธีการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน”

5.3 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)
โดยวิธีการอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4123 “Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures”

การทดสอบจะป้อนน้ำหนักที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม โดยน้ำหนักเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ทุกๆ 1 วินาที จนกระทั่งเมื่อจำนวนครั้งของการกดน้ำหนักถึงรอบที่ 100

สมการในการคำนวณหาค่าโมดูลัสคืนตัว, M_R

$$M_R = \frac{P(0.27 + \nu)}{(\Delta H)t} \tag{1}$$

เมื่อ

P = Load ที่ใช้กระทำ (N)

t = The Specimen Thickness (mm.)

ΔH = Recoverable Horizontal Deformation (mm.)

ν = Poisson's ratio

โดยที่ค่า Poisson's ratio ของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ [3]

ตารางที่ 1 ค่า Poisson's ratio ที่ใช้ในการทดสอบ

Temperature, °C	Poisson's Ratio, ν
15 - 25	0.35
35 - 45	0.40

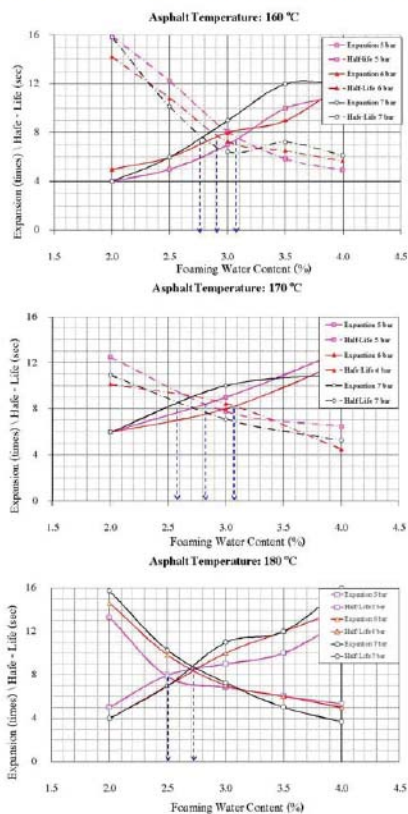
ตารางที่ 2 ค่าแนะนำสำหรับการออกแบบส่วนผสมโพลีเอสเตอร์ โดยทั่วไป [2]

Material Type	IDT ₅₀ (kPa)	IDT _{min} (kPa)	M_R (MPa)
RAP/Crushed stone(50:50)	250 - 600	0.8 - 1.0	2500-4000
Graded Crushed stone	200 - 500	0.6 - 0.9	2000 - 3000
Gravel (PI<10, CBR<30)	150 - 450	0.3-0.75	1500 - 3000

6. ผลการวิจัย

6.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม

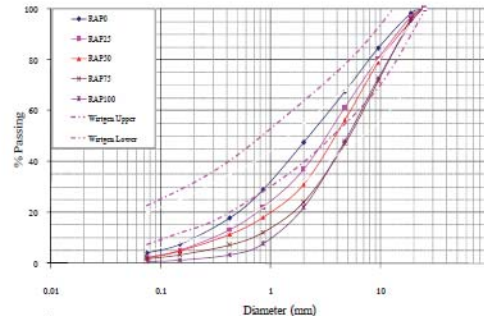
การทดสอบคุณสมบัติของ โฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมพบว่าแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C จะ ได้ปริมาณ โฟมแอสฟัลต์ 8.3 เท่าและค่า Half - Life 8.3 วินาที และปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิต โฟมแอสฟัลต์ คือร้อยละ 2.6 ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ค่า Expansion Ratio และ ค่า Half Life เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C 170 °C และ 180 °C

6.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสมรวม

การทดสอบการหาขนาดผลของวัสดุผสมรวมสรุปได้ว่า วัสดุที่เป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตมีขนาดเม็ดหยาบกว่า หินคลุก ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 7 และค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมรวมจะพหุพันธ์กับส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต คือความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเมื่อวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังตารางที่ 3



ภาพที่ 7 ขนาดผลของวัสดุผสมรวมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

Compaction Test	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Maximum Dry Density (t/m ³)	2.36	2.27	2.16	2.04	1.98
Optimum Moisture Content (%)	5.20	6.00	5.80	5.80	5.60

6.3 ผลการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

จากผลการออกแบบพบว่า ส่วนผสม RAP0, RAP25, RAP50, RAP75 และ RAP100 ต้องการปริมาณ โฟมแอสฟัลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 4.3, 3.8, 3.2, 3.0 และ 2.9 ตามลำดับ ผลที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมนำมาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมพบว่า การทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมของวัสดุทั้ง 5 ส่วนผสมที่ทำการทดสอบแบบไม่แช่น้ำจะมีค่าสูงสุดและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C จะมีค่าต่ำสุด ค่าที่ได้จากการทดสอบนี้สอดคล้องกับคำแนะนำสำหรับการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์โดยทั่วไป [2] ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม

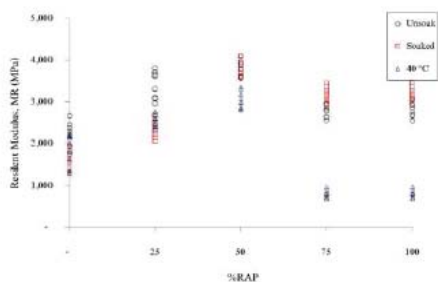
Indirect Tensile Strength	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Foam Asphalt (%)	4.30	3.80	3.20	3.00	2.90
Unsoaked (MPa)	0.30	0.30	0.36	0.34	0.30
Soaked (MPa)	0.18	0.25	0.30	0.29	0.22
40 °C (MPa)	0.15	0.12	0.16	0.16	0.11

และผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม สอดคล้องกับผลการทดสอบการหาค่าการรับกำลังอัดแบบแกนเดียวดังตารางที่ 5 คือการทดสอบแบบไม่แช่น้ำจะมีค่าสูงสุด

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการหาค่ากำลังอัดแกนเดียว

Unconfined Compressive Strength	RAP0	RAP25	RAP50	RAP75	RAP100
Unsoaked (MPa)	1.89	2.07	2.49	2.30	1.41
Soaked (MPa)	0.94	1.59	2.40	2.05	1.29
40 °C (MPa)	1.13	1.04	1.18	1.18	0.62

การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวหรือ Resilient Modulus โดยใช้การทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม แสดงผลการทดสอบดังภาพที่ 8 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุ RAP50 จะให้ค่า Resilient Modulus ที่สูงกว่าอีก 4 ส่วนผสม ในขณะที่ส่วนผสม RAP75 และ RAP100 ค่าที่ได้จากการทดสอบแบบแช่น้ำจะสูงกว่าไม่แช่น้ำ ซึ่งต่างจากวัสดุ RAP0 และ RAP25 ที่มีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำสูงกว่าแบบแช่น้ำ และค่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ของวัสดุ RAP75 และ RAP100 จะมีค่าลดลงอย่างมาก ผลการทดสอบที่ต่างกัน เป็นการแสดงให้เห็นว่าปริมาณผิวทางแอสฟัลต์มีผลต่อค่า Resilient Modulus



ภาพที่ 8 ผลการทดสอบการหาค่า Resilient Modulus

7. สรุปผลการทดสอบ

จากการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์ของทางหลวงหมายเลข 35 (ธนบุรี-ปากท่อ) พบว่าในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์ต้องใช้ความร้อนที่ 170 °C และใช้น้ำปริมาณร้อยละ 2.6 ของน้ำหนักแอสฟัลต์จึงทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ที่มีค่าการขยายตัว 8.3 เท่า

จากการนำโฟมแอสฟัลต์มาผสมเพิ่มในวัสดุ RAP0, RAP25, RAP50, RAP75 และ RAP100 ในการออกแบบจะต้องใช้ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ร้อยละ 4.3, 3.8, 3.2, 3.0 และ 2.9 ตามลำดับ ผลที่ได้จากการออกแบบนำมาทดสอบคุณสมบัติทางทางวิศวกรรมโดยการทดสอบแบบแช่น้ำ, ไม่แช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C

ผลการทดสอบการหาค่าแรงดึงทางอ้อมพบว่าวัสดุการทดสอบแบบไม่แช่น้ำจะให้ค่าสูงสุดและการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C จะให้ค่าต่ำสุดและสอดคล้องกับผลการทดสอบการหาค่ารับกำลังอัดแบบแกนเดียว

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวพบว่าผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C มีค่าต่ำสุด ในการออกโครงสร้างชั้นจำเป็นอย่างยั้งที่ต้องนำค่าโมดูลัสคืนตัวมาพิจารณาและใช้งานด้วย

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ตลอดจนวิศวกรประจำสำนักวิจัยและพัฒนาทางที่ให้คำปรึกษา

9. เอกสารอ้างอิง

[1] วีระชาติ รื่น ไกรฤกษ์ และมิถุนัน พิษระ. 2544. การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าโดยใช้ปูนซีเมนต์. สัมมนาวิศวกรรมทางหลวงครั้งที่ 1, หน้า 173-192. 16-17 กรกฎาคม 2544. กรุงเทพมหานคร.

[2] Wirtgen Group. 2004. Wirtgen Cold Recycling Manual. 2nd edition November 2004. Germany.

[3] กระทรวงคมนาคม. กรมทางหลวง, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง. 2545. คู่มือทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยเครื่องมือ UTM-5P. สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายณรงค์ อุทัยรัตน์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120013	
วุฒิการศึกษา		
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน
	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้(สงขลา)
		ปีที่สำเร็จการศึกษา
		2544

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนผู้ช่วยสอน (Teaching Assistantship) ปีการศึกษา 2549

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ข้าราชการ ตำแหน่ง นายช่างโยธา 4

ฝ่ายเคราะห์วิจัยและพัฒนามาตรฐานการก่อสร้าง กองช่าง

องค์การบริหารส่วนจังหวัดสงขลา

โทรศัพท์ 0-7430-3104-5

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

ณรงค์ อุทัยรัตน์, ธนิต เกลิมยานนท์, จุฑา สุนิตสกุล, พิพัฒน์ ทองฉิม และ เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ

(2552). การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมเอสโฟลต์.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. 13-15 พฤษภาคม 2552.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา. หน้า 1649 - 1654