



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น

Cold Mix Pavement Recycling with Asphalt Emulsion

นามผู้วิจัย นางสาวธัญรดี ก่อตั้งสัมพันธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์พิพัฒน์ สอนวงษ์, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ดิบุญญ เมธากุลชาติ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จุฑา สุนิตย์สกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทวางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น

Cold Mix Pavement Recycling with Asphalt Emulsion

โดย

นางสาวรัชฎรดี ก่อตั้งสัมพันธ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

รัฐศิริ ก่อตั้งสัมพันธ 2552: การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยเอสฟัลต์
อิมัลชันชนิดผสมเย็น ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์พัฒน์ สอนวงษ์, วศ.ม. 143 หน้า

ในการศึกษาการนำวัสดุโครงสร้างผิวทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยเอสฟัลต์อิมัลชันชนิด
ผสมเย็น โดยเปรียบเทียบระหว่างเอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 และ CSS-1 เพื่อให้ทราบถึง
คุณสมบัติทางวิศวกรรมวัสดุโครงสร้างทางเดิม เปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ
โครงสร้างทางเดิมและที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม และการนำวัสดุโครงสร้างผิว
ทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยเอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็นเพื่อใช้ในวิศวกรรมงานทาง ซึ่งในการ
ศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้วัสดุมวลรวมโครงสร้างถนนทางหลวงหมายเลข 2 (นครราชสีมา –
ชัยภูมิ) และวัสดุเชื่อมประสานได้แก่เอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 และ CSS-1 นำมาออกแบบ
ส่วนผสมโดยการหาปริมาณเอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสมและหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของอัตรา
ส่วนผสม 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 จากนั้นจึงจะสามารถทำการทดสอบคุณสมบัติ
ทางด้านวิศวกรรมได้แก่ การหาค่าความต้านทานรับแรงอัด ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม
ค่าโมดูลัสคืนตัว โดยมีค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ 90, 95 และ 100 เปอร์เซ็นต์
ของความหนาแน่นสูงสุด โดยมีวิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ ไม่แช่น้ำและทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C

จากผลการทดสอบหาค่าความต้านทานรับแรงอัดพบว่า อัตราส่วนผสมที่ต้านทานรับ
แรงอัดได้ดีที่สุดของวัสดุมวลรวมที่ใช้เอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 และ CSS-1 คือ 50:50, 25:75
ตามลำดับ สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของวัสดุมวลรวมที่ใช้เอสฟัลต์
อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วนผสม 100:0 และเอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วนผสม 75:25
สามารถต้านทานแรงดึงทางอ้อมได้ดีที่สุด ส่วนค่าโมดูลัสคืนตัวจากการทดสอบพบว่าการ
ทดสอบโดยวิธีแช่น้ำจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าการทดสอบโดยวิธีไม่แช่น้ำ และเมื่อทดสอบที่
40 °C ก็จะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวลดลง

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมพบว่าที่อัตราส่วนผสมเหมือนกันโดยใช้
วัสดุเชื่อมประสานเอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 สามารถรับกำลังได้ดีกว่าเอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2

Thanradee Kortangsumpan 2009: Cold Mix Pavement Recycling with Asphalt Emulsion. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Piphat Sornwong, M.Eng. 143 pages.

The purpose of the research, cold mix pavement recycling with asphalt emulsion between emulsified asphalt type CMS-2 and CSS-1, That to be informed the property of old pavement, to compare between old and improve of pavement and design old pavement to recycling with asphalt emulsion to use in the work of highway engineering. This research use the pavement from Nakhonrachasima-Chaiyaphoom at sta. 183+000 and then the old pavement is mixed by emulsified asphalt type CMS-2 and CSS-1 at mix ratio are 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0. After that to be test engineering property in the laboratory such as; Unconfined compressive test, Indirect tensile test and Resilient Modulus by the dry density of sample are 90, 95 and 100 percent by maximum density. The sample test in soak condition, unsoak condition and at 40 celcius degree of temperature.

The result of Unconfined compressive test the mix ratio of old pavement aggregate with CMS-1 is 50:50 and CSS-2 is 25:75 have the highest compressive strength. The highest Indirect tensile strength of emulsified asphalt type CMS-1 is mix ratio 100:0 and emulsified asphalt type CSS-2 is mix ratio 75:25. Then the Resilient Modulus in soak condition higher than unsoak condition but the Resilient Modulus at 40 celcius degree of temperature is decrease.

The conclusion of research, the property of engineering while the same mix ratio that to cement with emulsified asphalt type CMS-1 is better than emulsified asphalt type CSS-2.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์พัฒน์ สอนวงษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทาง ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิบุญ เมธากุลชาติ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล กรรมการที่ปรึกษาร่วม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรรัตน์ ผลศิลป์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณอนันต์ น้ำผึ้ง และ คุณบุญเอื้อ แสงทอง เจ้าหน้าที่ห้องทดลองฝ่าย แอสฟัลต์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือเกี่ยวกับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ นายเสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ และ ดร.ธันวิน สวัสดิ์สานต์ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือทางด้านวัสดุอุปกรณ์ตลอดจนสิ่งอำนวยความสะดวก ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำห้องทดลองได้ช่วยเหลือทำงานวิจัยนี้

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชาย อันเป็นที่รักยิ่งของผู้วิจัยที่ให้การ สนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจเสมอมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังใจที่สำคัญ น้องต้อง รวมถึง สักดิ์ เบงค์และเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือมาตลอด จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

ธัญรดี ก่อตั้งสัมพันธ

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	81
สรุป	81
ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบทางด้านวิศวกรรมของอัตราส่วนของผิวทางเดิม และหินคลุกเดิม	87
ภาคผนวก ข ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	131
ภาคผนวก ค การออกแบบโครงสร้างถนน	136
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	143

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเกรดยางแอสฟัลต์อิมัลชัน	15
2	ค่า Poisson's ratio ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
3	การจำแนกวัสดุรวมตามอัตราส่วนต่างๆ	56
4	การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	58
5	การทดสอบ CBR	59
6	การทดสอบปริมาณน้ำในแอสฟัลต์อิมัลชัน	61
7	การทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสม	62
8	การทดสอบปริมาณน้ำและแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสมของอัตราส่วนผสมที่กำหนด	65
9	ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ของแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CMS-2 และ CSS-1	68
10	ผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบแช่น้ำ (Soaked)	71
11	ผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)	72
12	ผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) ที่อุณหภูมิ 40 °C	73
13	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2	77
14	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1	78
 ตารางผนวกที่		
ก1	ผลการทดสอบขนาดผลที่อัตราส่วนผสม 0:100 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	88
ก2	ผลการทดสอบขนาดผลที่อัตราส่วนผสม 25:75 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก3	ผลการทดสอบขนาดผลึกที่อัตราส่วนผสม 50:50 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	90
ก4	ผลการทดสอบขนาดผลึกที่อัตราส่วนผสม 75:25 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	91
ก5	ผลการทดสอบขนาดผลึกที่อัตราส่วนผสม 100:0 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	92
ก6	ผลการทดสอบ Bulk Specific Gravity ของอัตราส่วนผสมต่างๆ โดยกำหนดน้ำ 3.0 เปอร์เซนต์	93
ก7	ผลการทดสอบ Bulk Specific Gravity ของอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่กำหนดแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2	94
ก8	ผลการทดสอบ Bulk Specific Gravity ของอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่กำหนดแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1	95
ก9	ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 0:100	96
ก10	ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 25:75	97
ก11	ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 50:50	89
ก12	ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 75:25	99
ก13	ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 100:0	100
ก14	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 0:100	101
ก15	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 25:75	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก16	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 50:50	107
ก17	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 75:25	110
ก18	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 100:0	113
ก19	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วนผสม 0:100	119
ก20	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วนผสม 25:75	120
ก21	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วนผสม 50:50	121
ก22	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วนผสม 75:25	122
ก23	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วนผสม 100:0	123
ก24	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วนผสม 0:100	124
ก25	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วนผสม 25:75	125
ก26	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วนผสม 50:50	126
ก27	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วนผสม 75:25	127
ก28	ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วนผสม 100:0	128
ก29	การทดสอบ Indirect Tensile Test โดยการผสมหินฝุ่น	129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค1 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของอีมีลชัน CMS-2 ที่อุณหภูมิ 35 °C	138
ค2 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของอีมีลชัน CSS-1 ที่อุณหภูมิ 35 °C	139
ค3 การออกแบบโครงสร้างถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183 ด้วยโปรแกรม Thai-MET	140
ค4 การออกแบบโครงสร้างถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183 ด้วยโปรแกรม Thai-MET	141

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องจักรกลในงานผสมเย็นในที่	4
2	เครื่องจักรกลในงานผสมเย็นภายในโรงงาน	5
3	กระบวนการผสมสารปรับปรุงสภาพเข้ากับวัสดุมวลรวม	6
4	ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	6
5	ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน	7
6	ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้โฟมแอสฟัลต์	7
7	ขนาดและการกระจายของอนุภาคแอสฟัลต์ในอิมัลชัน	17
8	การผลิตแอสฟัลต์อิมัลชัน	18
9	แสดงส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyratory Compactor	23
10	แสดงกลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้กับเครื่อง Superpave Gyratory Compactor	24
11	แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด	25
12	การให้น้ำหนักกระทำและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างทดสอบ	27
13	ลักษณะการกระจายของ Tensile Stress และ Compression Stress ในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test	28
14	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Repeated Load	29
15	วงกลมมอร์จากผลการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด	30
16	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเมื่อถูกบดอัด	32
17	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง	33
18	การวัดขนาดก้อนตัวอย่างและน้ำหนักกระทำ	36
19	เครื่องบดอัด Superpave Gyratory Compactor	43
20	การวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบ	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	เครื่องมือทดสอบก้อนตัวอย่างเครื่อง Load Cell	47
22	การติดตั้งก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)	49
23	ก้อนตัวอย่างหลังการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)	49
24	เครื่องมือ UTM-5P	51
25	การติดตั้งก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบ Resilient Modulus (M_R)	51
26	ขนาดผลของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	57
27	กราฟผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของอัตราส่วนผสม 0:100 และ 25:75	58
28	กราฟผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของอัตราส่วนผสม 50:50, 75:25 และ 100:0	59
29	กราฟของการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 ที่เหมาะสม	63
30	กราฟของการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 ที่เหมาะสม	64
31	กราฟของการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2	66
32	กราฟของการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1	67
33	กราฟค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS)	69
34	กราฟโปรแกรมการทดสอบ Resilient Modulus	70
35	กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)	74
36	กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบแช่น้ำ (Soaked)	75
37	กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) ที่อุณหภูมิ 40°C	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	กราฟแสดงค่าโมดูลัสคืนตัวโดยวิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ ไม่แช่น้ำและอุณหภูมิ 40°C ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด	79
39	กราฟแสดงค่าโมดูลัสคืนตัวโดยวิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ ไม่แช่น้ำและอุณหภูมิ 40°C ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด	80
ภาพผนวกที่		
ก1	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 0:100	103
ก2	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 25:75	106
ก3	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 50:50	109
ก4	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 75:25	112
ก5	ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 100:0	115
ก6	ความหนาแน่นของการบดอัดด้วยเครื่อง SGC ที่ 52 รอบ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ 3.0 เปอร์เซนต์ของแต่ละอัตราส่วนผสม	116
ก7	ความหนาแน่นของการบดอัดด้วยเครื่อง SGC ที่ 52 รอบ โดยกำหนดแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสม	117
ก8	โปรแกรมการบดอัดก้อนตัวอย่างทดสอบของเครื่อง Superpave Gyratory Compactor	118
ก9	การทดสอบ Indirect Tensile Test โดยการผสมหินฝุ่นของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2	129

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก10 การทดสอบ Indirect Tensile Test โดยการผสมหินฝุ่นของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1	130
ข1 การทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน	132
ข2 การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ (Soaked)	133
ข3 เครื่องมือทดสอบ Unconfined Compression Strength (UCS)	133
ข4 เครื่องมือทดสอบ Indirect Tensile Test (IDT)	134
ข5 เครื่องมือทดสอบ Resilient Modulus (M_R)	134
ข6 ความเสียหายของก้อนตัวอย่างหลังการทดสอบ Indirect Tensile Test	135
ค1 โปรแกรมการออกแบบโครงสร้างทาง Thai-MET	142

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น

Cold Mix Pavement Recycling with Asphalt Emulsion

คำนำ

ถนนในประเทศไทยของกรมทางหลวงปัจจุบันมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ แบบ Flexible Pavement และแบบ Rigid Pavement สาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายของถนนนั้น มีหลายสาเหตุ อาทิเช่น การเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ ความล้า การเกิดร่องล้อ ซึ่งปัญหาที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ จะต้องแก้ไขซ่อมแซมให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมงานทาง ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาปรับสภาพวัสดุเพื่อใช้ใหม่ สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้ การปรับสภาพด้วยวิธีผสมร้อน (Hot Recycling) และการปรับสภาพวัสดุด้วยวิธีผสมเย็น (Cold Recycling) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมากในประเทศไทย ทั้งนี้การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผสมร้อนกับผสมเย็น ซึ่งวิธีการผสมเย็นประหยัดเชื้อเพลิงและลดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวิธีการผสมร้อน และจึงสอดคล้องกับผลกระทบต่อปัญหาโลกร้อนอีกด้วย

ในปัจจุบันวิธีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาใช้ใหม่ มีวัสดุที่นำมาใช้ในการปรับปรุงสภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมได้แก่ ปูนซีเมนต์ แอสฟัลต์อิมัลชัน และโฟม เป็นวัสดุปรับปรุงสภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมโดยสามารถรับกำลังได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมของประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา, เยอรมัน, สวีเดน, ฝรั่งเศส, สเปน, แคนาดา และแอฟริกาใต้ เป็นต้น

ในการศึกษานี้ได้ปรับปรุงสภาพวัสดุด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันมาใช้ในห้องทดลอง โดยใช้วัสดุโครงสร้างทางเดิมของถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183 เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งให้เหมาะสมในการปรับปรุงถนนสายทางอื่นๆ ต่อไป

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

1. เพื่อทราบถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมวัสดุ โครงสร้างทางเดิม
2. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ โครงสร้างทางเดิมและที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1

ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 และ CSS-1 ให้เหมาะสมกับการบำรุงโครงสร้างทาง
2. ศึกษาวิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ดังต่อไปนี้ การหาขนาดคละ (Gradation), การบดทับ (Compaction Test), CBR, ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) และการหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)
3. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้ การทดสอบความต้านทานแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Test), การทดสอบต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) และโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)
4. วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จากถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การนำวัสดุเก่ากลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling)

การปรับปรุงสภาพวัสดุเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็น ได้เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกในทศวรรษที่ 50 โดยการนำวัสดุแอสฟัลต์ (Asphalt) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) มาผสมกับโครงสร้างทางเดิมที่ถูกขุดลอกโดยใช้เครื่องจักรกลแล้วผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชั้นทางให้ดีขึ้น ลักษณะที่สำคัญของวิธีการนี้คือ ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม จึงสามารถลดการใช้เชื้อเพลิง และลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง วิธีการนี้จะเก็บตัวอย่างชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพื่อนำไปหาคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ ในวิธีการผสมเย็น สารปรับปรุงสภาพ (Stability Agent) ที่ใช้เพื่อปรับปรุงสภาพวัสดุจะเลือกใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือโพลีเมอร์แอสฟัลต์ ตัวอย่างจะนำมาทดสอบเพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์และวัสดุมวลรวม แล้วนำมาออกแบบส่วนผสมเพื่อหาปริมาณสารปรับปรุงสภาพที่ใช้ผสม เพื่อให้ส่วนผสมมีคุณสมบัติเหมาะสมและมีเสถียรภาพที่สุด เมื่อออกแบบเรียบร้อยแล้วก็จะขุดหรือโครงสร้างทางเดิมพร้อมกับบดวัสดุให้มีขนาดเล็กลง โดยให้มีขนาดใหญ่ไม่เกิน 1.5 นิ้ว หลังจากนั้นจะนำมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพ และวัสดุมวลรวมใหม่ตามปริมาณที่ออกแบบไว้ แล้วจึงนำกลับไปปูและบดอัดให้แน่น

ในงานการปรับปรุงสภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นนั้นสามารถแบ่งวิธีการได้เป็น 2 ประเภทคือ งานผสมเย็นในที่ (Cold in-place recycling) และงานผสมเย็นภายในโรงงาน (Cold in-plant recycling) เนื่องจากงานผสมเย็นในที่เป็นกระบวนการที่ทำแล้วเสร็จในพื้นที่สายทางจึงเป็นวิธีการที่รวดเร็วกว่า ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการขนส่ง อย่างไรก็ตามงานผสมเย็นภายในโรงงาน เป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อมีจุดเสียหายได้ชั้นทางนั้น การแก้ไขจะต้องกระทำก่อน โดยการขุดชั้นทางด้านบนออกแล้วทำการซ่อมแซมจุดนั้น หากบางจุดไม่ได้รับการแก้ไข อาจจะทำให้ถนนใหม่เสียหายหลังจากการใช้งานได้ไม่นาน

การก่อสร้างสำหรับงานผสมเย็นในที่ จะต้องใช้เครื่องจักรพิเศษที่ออกแบบเพื่องานนี้ โดยเฉพาะ เครื่องจักรจะขูดหรือผิวทางและชั้นพื้นทางเดิมตามความลึกที่ได้รับการออกแบบไว้ (สูงสุด 30 ซม.) ตีจนแตกร่วนพร้อมกับฉีดสารปรับปรุงสภาพ และน้ำตามปริมาณที่ได้กำหนด ผสมกับวัสดุชั้นทางที่ขูดขึ้นมาจนผสมเข้ากันดี จากนั้นใช้เครื่องจักรปรับระดับผิวของชั้นทางให้เรียบ วัสดุที่ผสมและปูโดยเครื่องมือชุดดังกล่าวนี้ สามารถทำการบดอัดให้มีความหนาแน่นได้ โดยใช้รถบดสันสะเทือนที่มีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 12 ตัน บดอัดให้มีความหนาแน่นตามข้อกำหนด



ภาพที่ 1 เครื่องจักรกลในงานผสมเย็นในที่

ที่มา: ธีระชาติ และคณะ (2547)

ในการก่อสร้างสำหรับงานผสมเย็นภายในโรงงาน เครื่องจักรจะขูดหรือชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางเก่าตามระดับความลึกที่กำหนด แล้วป้อนวัสดุที่ขูดผ่านทางสายพานลำเลียงไปยังรถบรรทุก เพื่อขนไปกองไว้ในโรงผสม วัสดุโครงสร้างทางเดิมจะนำมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพในโรงผสม แล้วนำกลับมาเทลงที่หน้างานเพื่อก่อสร้างชั้นทางต่อไป

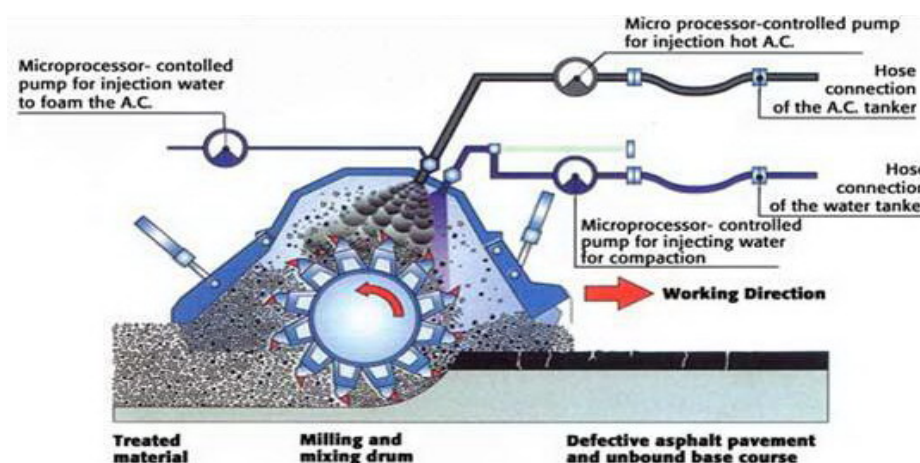


ภาพที่ 2 เครื่องจักรกลในงานผสมเย็นภายในโรงงาน

ที่มา: ชีระชาติ และคณะ (2547)

งานการปรับปรุงสภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นนี้จะช่วยให้ความแข็งแรงของโครงสร้างถนนเพิ่มขึ้น โดยความหนาของถนนใหม่จะเพิ่มเฉพาะความหนาของผิวทางใหม่เพียง 5-10 ซม. เท่านั้นซึ่งนอกจากจะช่วยประหยัดวัสดุงานทางแล้วยังจะช่วยรักษารูปแบบทางเรขาคณิตของสายทางให้คงสภาพเดิมมากที่สุด อีกทั้งยังไม่มีผลกระทบต่ออาคารสองข้างทางให้เห็นอย่างชัดเจน

1.1 กระบวนการปรับปรุงสภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นเครื่องจักรกลสำหรับงานปรับปรุงสภาพโดยวิธีการผสมเย็น ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลาหลายปี จากการพัฒนาทำให้ได้เครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่ มีกำลังสูง และมีกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะในงานการปรับปรุงสภาพในที่ เครื่องจักรดังกล่าวสามารถทำงานได้แล้วเสร็จด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพียงครั้งเดียว ซึ่งถึงสำคัญของการทำงานของขบวนเครื่องจักรอยู่ที่ขนาดและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สามารถขูดหรือโครงสร้างทางเดิมขึ้นมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3 เมื่อกระบวนการขูดหรือโครงสร้างทางเดิมเกิดขึ้น น้ำจากท่อจะฉีดเข้าไปในห้องผสม (Mixing Chamber) เพื่อผสมกับวัสดุโครงสร้างทางเดิมซึ่งปริมาณน้ำจะได้รับการควบคุมให้ได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมพอดีสำหรับการบดอัด จากนั้นสารปรับปรุงสภาพที่อยู่ในรูปของเหลว เช่น น้ำปูน (Cement Slurry) แอสฟัลต์ อิมัลชัน หรือโฟมแอสฟัลต์ จะได้รับการฉีดเข้าผสมกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม

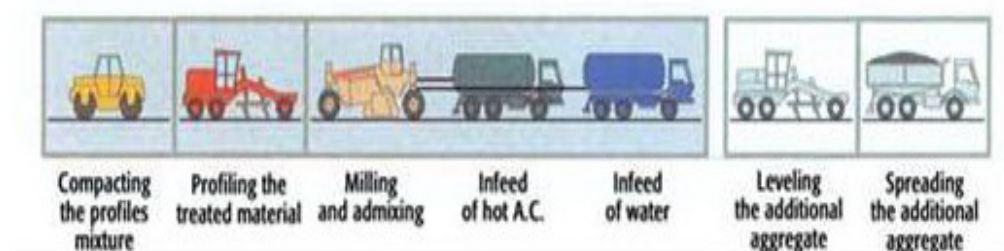


ภาพที่ 3 กระบวนการผสมสารปรับปรุงสภาพเข้ากับวัสดุมวลรวม

ที่มา: Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

สำหรับสารปรับปรุงสภาพที่อยู่ในรูปผง ได้แก่ ปูนขาว และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะโรยลงบนโครงสร้างทางเดิมก่อนที่ขบวนเครื่องจักรจะเคลื่อนตัวผ่าน

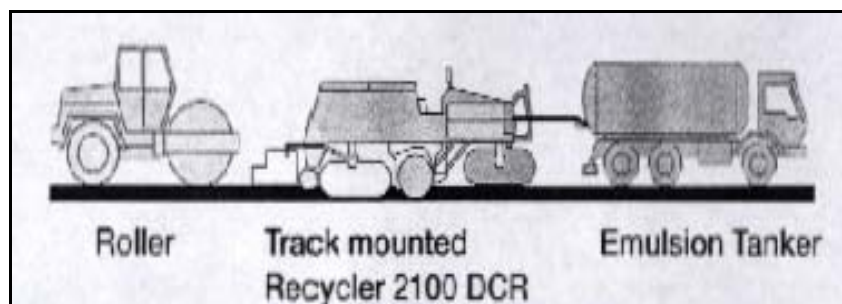
ขบวนเครื่องจักรกลสำหรับงานปรับปรุงสภาพโดยวิธีการผสมเย็น จะมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสารปรับปรุงสภาพที่ใช้ในงาน ขบวนเครื่องจักรกลที่แสดงในภาพที่ 4 ใช้ในงานที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงสภาพ โดยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และน้ำจะผสมกันที่ห้องผสม (Slurry Mixer) ก่อนนำไปผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมต่อไป



ภาพที่ 4 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ที่มา: Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

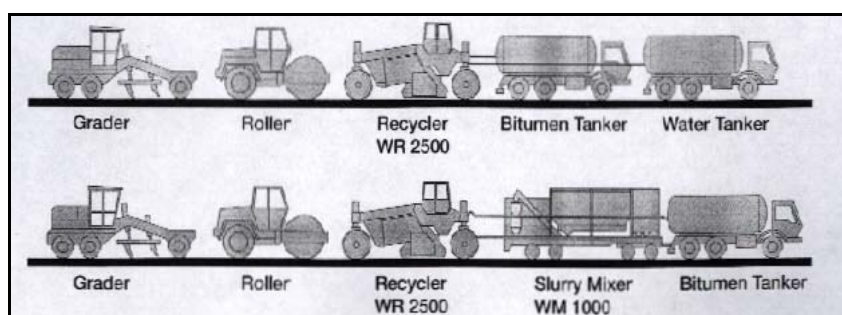
นอกจากนี้ในการปรับปรุงสภาพโครงสร้างทางเดิมยังสามารถใช้แอสฟัลต์อิมัลชันผสมเข้ากับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้โดยการเพิ่มถังบรรจุแอสฟัลต์อิมัลชัน (Emulsion Tanker) ไว้ที่หัวขบวน แต่ถ้าเป็นการใช้ แอสฟัลต์อิมัลชันเพียงชนิดเดียวรูปขบวนจะเป็นดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน

ที่มา: Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

ภาพที่ 6 แสดงรูปขบวนการทำงานด้วยการใช้โฟมแอสฟัลต์อย่างเดียว และการใช้โฟมแอสฟัลต์ผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการปรับปรุงโครงสร้างทางเดิม จากรูปจะเห็นว่าในการใช้โฟมแอสฟัลต์รูปขบวนจะต้องมีรถบรรทุกแอสฟัลต์ร้อนและน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์



ภาพที่ 6 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้โฟมแอสฟัลต์

ที่มา: Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

1.2 สารปรับปรุงสภาพในงานผสมเย็น

สารปรับปรุงสภาพ (Stability Agent) หลายชนิดที่ใช้ในงานปรับปรุงสภาพ โดยวิธีการผสมเย็นนั้นใช้เพื่อจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือเป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานต่อการเสียหายเนื่องจากความชื้น (Moisture Resistance) ให้แก่ส่วนผสม การเลือกชนิดและปริมาณสารปรับปรุงสภาพที่เหมาะสมเป็นส่วนที่สำคัญมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพการณ์ความต้องการ การได้มาของวัสดุ ราคา และสภาพวัสดุมวลรวม สารปรับปรุงสภาพที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ กลุ่มซีเมนต์ (Cementitious Stability Agent) และกลุ่มแอสฟัลต์ (Asphalt Stability Agent)

กลุ่มซีเมนต์ จะประกอบไปด้วยปูนขาว และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สำหรับปูนขาวมักนำมาใช้กับดินที่มีขนาดเม็ดเล็กหรือดินที่มีสภาพพลาสติกสูง ได้แก่ ดินที่ประกอบด้วยเม็ดดินเหนียวในปริมาณสูง เนื่องจากปูนขาวจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับเม็ดดินขนาดเล็ก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ดินจับเป็นก้อนโตขึ้นและเพิ่มกำลังรับน้ำหนักให้แก่ดิน ส่วนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีข้อดีที่ให้กำลังสูงและเร็วกว่าปูนขาว แต่ไม่เหมาะกับดินสภาพพลาสติกสูง อีกทั้งการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้วัสดุมีสภาพเปราะหรือขาดความยืดหยุ่นที่ดีส่งผลให้ลดความต้านทานความล้าของชั้นทาง (Fatigue Resistance) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดรอยแตกกว้างขึ้น การใช้งานปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณที่สูงเกินไปมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดรอยแตกกว้างขึ้นภายในชั้นทางเนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ คือ ประการแรกเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ ส่วนประการที่สองเป็นผลมาจากน้ำหนักกระทำซ้ำของการจราจรที่เคลื่อนผ่านบริเวณนั้น ด้วยเหตุนี้ในการควบคุมการเกิดรอยแตกกว้างในชั้นทางที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จึงต้องควบคุมปัจจัยต่อไปนี้

- ปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ เนื่องจากปริมาณจะแปรผันโดยตรงกับแนวโน้มการแตกกว้าง โดยทั่วไปควรใช้อยู่ในช่วง 2 - 4 %

- ระดับการระเหยของความชื้น ในช่วงระหว่างการบ่มควรจะควบคุมการระเหยของความชื้นไม่ให้สูงเกินไป

สำหรับกลุ่มของแอสฟัลต์ ซึ่งประกอบด้วย แอสฟัลต์อิมัลชันและโพลีเมอร์แอสฟัลต์ นั้นเป็นวัสดุที่เหมาะสมในหลายด้าน ทั้งการมีแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมรับได้ มีความยืดหยุ่นและช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ ข้อดีของการใช้สารปรับปรุงสภาพในกลุ่มนี้คือจะทำให้ชั้นทางมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แต่สำหรับการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน มีข้อเสียคือเกิดความชื้นสูงในส่วนผสม ทำให้เกิดปัญหาในการบดอัดและการพัฒนากำลังช้า

ข้อดีและข้อเสียของสารปรับปรุงสภาพชนิดต่างๆ มีดังนี้

1) พอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ข้อดี มีดังนี้

- สามารถหาใช้ได้ง่ายจากที่ต่างๆ ทั่วโลก
- มีราคาต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์
- สามารถใช้ได้ทั้งรูปผงและในรูปของเหลวที่อยู่ในรูปของน้ำปูน
- ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้างดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์

มาตรฐานรองรับ

- เพิ่มความต้านทานต่อการเสียหายเนื่องจากความชื้นให้วัสดุ

ข้อเสีย มีดังนี้

- ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ (Shrinkage Cracking) แต่สามารถลดการแตกร้าวได้เมื่อให้ปริมาณที่เหมาะสม

- ลดความต้านทานความล้าของวัสดุ เนื่องจากชั้นทางขาดความยืดหยุ่น

- ต้องการการบ่มที่เหมาะสม การเปิดใช้ผิวจราจรทันทีสามารถก่อให้เกิดความเสียหายได้

2) แอสฟัลต์อิมัลชัน

ข้อดี มีดังนี้

- ให้ความยืดหยุ่นที่ดีแก่ชั้นทาง ทำให้ช่วยเพิ่มความต้านทานความล้า
- สะดวกในการปฏิบัติงานปรับปรุงสภาพ
- ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้างดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานรองรับ

ข้อเสีย มีดังนี้

- โรงงานผลิตต้องมีการควบคุมคุณภาพสูง อีกทั้งสารอิมัลซิไฟร์ที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันยังมีราคาที่สูง
- ถ้าวัสดุที่ได้จากโครงสร้างทางเดิมมีปริมาณความชื้นสูงเมื่อผสมเข้ากับแอสฟัลต์อิมัลชันจะทำให้ได้ส่วนผสมที่อยู่ในสภาพอิมัตด้วยน้ำ
- การบ่มใช้เวลานานเนื่องจากกำลังของวัสดุจะพัฒนาขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป

3) โฟมแอสฟัลต์

ข้อดี มีดังนี้

- ปฏิบัติงานปรับปรุงสภาพได้ง่ายและสะดวก

- ให้ความยืดหยุ่นที่ดีแก่ชั้นทาง เนื่องจากโฟมเอสฟัลต์จะไปเป็นตัวยึดเกาะที่ยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคเล็กๆของวัสดุ จึงช่วยเพิ่มทั้งความต้านทานความล้าและความต้านทานยุบตัวถาวร

- โฟมเอสฟัลต์ผลิตจากเอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดมาตรฐาน ทำให้มีราคาต่ำและหาได้ง่าย

- สามารถเปิดทางใช้งานได้ทันทีหลังจากการบดอัดเสร็จ

- สามารถนำไปใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท

- การเก็บส่วนผสมโฟมเอสฟัลต์ไว้ในที่รักษาความชื้น สามารถเก็บส่วนผสมไว้ได้นาน ก่อนการบดอัดโดยไม่เกิดการแยกตัว

ข้อดี มีดังนี้

- จำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะสำหรับการผลิตโฟมเอสฟัลต์

- วัสดุที่อยู่ในสภาพอิมัตัวด้วยน้ำและมีปริมาณฝุ่นละเอียดไม่เพียงพอ จะไม่เหมาะสมกับการใช้โฟมเอสฟัลต์

1.3 ข้อดีของการปรับปรุงสภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็น

1.3.1 โครงสร้างทางเดิมทั้งหมดจะนำมาใช้ในกระบวนการปรับปรุงสภาพ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่สำหรับทิ้งวัสดุเก่า อีกทั้งยังต้องการใช้วัสดุมวลรวมใหม่ในปริมาณน้อย ทำให้ลดค่าวัสดุและค่าขนส่ง

1.3.2 ลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่วัสดุ อีกทั้งช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม

1.3.3 ด้วยเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพทำให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณภาพ สามารถปูและบดอัดชั้นทางได้เป็นอย่างดีสม่ำเสมอและเรียบแน่น

1.3.4 ในกรณีงานผสมเย็นในที่ กระบวนการทำงานส่งจะผลרבกวนโครงสร้างชั้นทางน้อยที่สุดเนื่องจากเครื่องจักรสามารถทำงานได้แล้วเสร็จด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพียงครั้งเดียว

1.3.5 สามารถทำงานให้แล้วเสร็จได้อย่างรวดเร็ว จึงรบกวนต่อการจราจรในเวลาไม่นานนัก

1.3.6 ใช้พื้นที่ในการทำงานเพียง 1 ช่องการจราจร จึงลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุกับขบวนที่เคลื่อนตัวผ่านรวมทั้งลดผลกระทบต่อกระแสดการจราจร (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และคณะ, 2547 : 12-18)

2. แอสฟัลต์

ยางแอสฟัลต์จะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำมีสถานะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็งในอุณหภูมิปกติ และมีความหนืดสูง มีคุณสมบัติยึดประสานของวัสดุให้ยึดติดกันแน่น จะมีส่วนประกอบของบิทูเมนที่เกิดจากธรรมชาติหรือได้จากการกลั่นปิโตรเลียม ซึ่งบิทูเมนเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนและสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลจำพวกไฮโดรคาร์บอน จะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดประสานซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง หรือกึ่งของแข็งและมีความหนืดสูงสามารถละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon Disulphide: CS_2) ส่วนใหญ่เมื่อถูกความร้อนก็จะหลอมเหลวและจะกลับสู่สถานะเดิมเมื่ออุณหภูมิลดลง หากวิเคราะห์ทางกายภาพจะพบว่ายางแอสฟัลต์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

2.1 Asphaltanes มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้มเกือบดำสามารถแยกออกจากแอสฟัลต์ได้แต่เมื่อได้รับความร้อนสูงจะไม่ละลายแต่เมื่อได้รับความร้อนมากถึงจุดจะติดลู่เป็นไฟ

2.2 Asphaltic Rains มีสถานะเป็นของแข็งสีน้ำตาลแก่เปลี่ยนสถานะได้ง่ายเพราะและสามารถละลายเมื่อได้รับความร้อนสูงจนถึง $200^{\circ}F$

2.3 Oily Constituents เป็นส่วนที่เหลือจากการแยก Asphaltane และ Asphaltic ออก มีสถานะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเก่า

ในงานผิวทางเมื่อจะใช้แอสฟัลต์จะทำให้แอสฟัลต์หลอมเหลวชั่วคราวในปัจจุบันทำได้โดยมี 3 วิธีด้วยกันคือ

- 1) หลอมเหลวโดยการให้ความร้อนยางแอสฟัลต์และผ่านการผสมของมวลรวม
- 2) การนำเอาแอสฟัลต์ไปละลายกับตัวทำละลายบางชนิดของปิโตรเลียมเช่น Naptha (Gasoline), Kerosene และ Diesel Oil ใส่เข้าไปในแอสฟัลต์พื้นฐานเพื่อทำให้เป็นของเหลวจะเรียกผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ได้ว่า Cutback Asphalt
- 3) ทำให้แอสฟัลต์การแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กมากและกระจายลอยตัวอยู่ในน้ำด้วยอิมัลซิฟายเออร์ (Emulsifier) ก็จะได้แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion) อนุภาคเล็กๆ ของแอสฟัลต์จะลอยอยู่อย่างสม่ำเสมอในน้ำจนกระทั่งนำอิมัลชันไปใช้งาน

3. แอสฟัลต์อิมัลชัน

แอสฟัลต์อิมัลชันเกิดจากแอสฟัลต์ซีเมนต์แตกตัวเป็นเม็ดเล็กๆ แล้วตีให้แผ่กระจายผสมกับน้ำที่ประกอบด้วยอิมัลซิฟายอิงเอเจนต์ (Emulsifying Agent) ผสมอยู่เล็กน้อยประมาณ 0.25 – 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณ 55 – 70 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นเป็นน้ำ เมื่อผสมกับน้ำเรียบร้อยแล้วส่วนที่เป็นน้ำเรียกว่า ส่วนต่อเนื่อง (Continuous Phase) และส่วนที่เป็นแอสฟัลต์เม็ดเล็กๆ เรียกว่า ส่วนไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Phase) เครื่องมือที่ใช้ในกรรมวิธีนี้เรียกว่า Colloid Mill แอสฟัลต์เม็ดเล็กๆ มีขนาดเล็กมากจนเรียกได้ว่าเป็นขนาดของสารแขวนลอย ดังนั้นจึงพบว่าแอสฟัลต์อิมัลชันมีส่วนประกอบหลักอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือ

3.1 แอสฟัลต์ (Asphalt) เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของแอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งจะมีแอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ประมาณร้อยละ 50 – 70 ของส่วนผสมทั้งหมด และแอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีค่าความแข็งในช่วง 60 – 250 Penetration ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละท้องถิ่นที่จะกำหนดการใช้แอสฟัลต์ที่แข็งกว่าหรืออ่อนกว่า แอสฟัลต์มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ มัลทีน (Maltenes) และแอสฟัลต์ทีน (Asphaltenes)

3.2 น้ำ (Water) เป็นส่วนที่มีมากเป็นอันดับสอง น้ำตามธรรมชาติอาจไม่เหมาะสมเพราะมีสิ่งเจือปนของแร่ธาตุต่างๆ หรือมีสารแขวนลอย จะทำให้มีผลกระทบต่อความคงตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันได้และจะทำให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันเปลี่ยนแปลงไป

3.3 อิมัลซิไฟเอเจนต์ (Emulsifying Agent) คุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ทำอิมัลซิไฟเออร์เป็นอย่างมาก อิมัลซิไฟเออร์คือเอเจนต์ที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณผิวหน้า หรือเรียกว่า สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) อิมัลซิไฟเออร์ช่วยรักษาแอสฟัลต์ให้อยู่ในสภาพเม็ดเล็กๆ ลอยอยู่ในสารแขวนลอยที่เสถียรภาพ และช่วยควบคุมระยะเวลาของการแตกตัว (Breaking Time) สารเคมีที่ผสมมีอยู่หลายชนิด การเลือกใช้แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับ การเข้ากันได้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เมื่อยางแอสฟัลต์อิมัลชันแบ่งตามประเภทของอิมัลซิไฟเออร์ได้ด้วยกัน 2 ชนิดคือ

3.3.1 อิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Anionic) ที่พบมากที่สุดคือกรดไขมัน (Fatty acid) ซึ่งได้จากผลิตภัณฑ์จำพวกไม้ เช่น น้ำมันทอลล์ (Tall Oils) ชันสน (Rosins) และ ลิกนิน (Lignins) แอนไอออนิกอิมัลซิไฟเออร์จะกลับสู่สภาพสบู่โดยการทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์

3.3.2 อิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก (Cationic) ที่พบมากที่สุดคืออะมีนไขมัน (Fatty Amines) เช่น ไดอะมีน (Diamines) อิมิดโซลีน (Imidzolines) และอะมิโดอะมีน (Amidoamines) อะมีนจะกลับคืนสู่สภาพสบู่โดยทำปฏิกิริยากับกรดซึ่งมักเป็นไฮโดรคลอริก อิมัลซิไฟเออร์อิมัลชันชนิดอื่นที่ใช้ผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันคือ เกลีโอแอมโมเนียมควอเตอร์นารีเฟตตี (Fatty Quaternary Ammonium) ซึ่งเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้และไม่ต้องเติมกรด เป็นแอสฟัลต์อิมัลชันอิมัลซิไฟเออร์ที่เสถียรภาพและมีประสิทธิภาพมาก

การเลือกใช้ Emulsifying Agent ที่เหมาะสมและผ่านกรรมวิธีควบคุมการผลิตที่ดี จะสามารถผลิตอิมัลซิไฟด์แอสฟัลต์ได้หลายชนิดและหลายเกรด เมื่อแบ่งอิมัลซิไฟด์ตามการใช้งานจะสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. แอนไอออนิก (Anionic) เม็ดเล็กๆ ของแอสฟัลต์มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ
2. แคทไอออนิก (Cationic) เม็ดเล็กๆ ของแอสฟัลต์มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก

เมื่อจุ่มขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) ลงในของเหลวแล้ว ปลดอยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่าน ขั้วบวกก็จะดูดอนุภาคที่เป็นประจุลบและขั้วลบก็จะดูดกับอนุภาคที่เป็นประจุบวก ดังนั้นถ้าใช้ของเหลวเป็นแอสฟัลต์อิมัลชันที่มีอนุภาคของแอสฟัลต์หุ้มด้วยประจุลบอนุภาคของแอสฟัลต์ก็จะไปเกาะกับขั้วบวก เราเรียกแอสฟัลต์ประเภทนี้ว่า แอนไอออนิก แล้วในทางกลับกันถ้าแอสฟัลต์ที่มีอนุภาคของแอสฟัลต์หุ้มด้วยประจุลบอนุภาคของแอสฟัลต์ก็จะไปเกาะกับขั้วลบ เราเรียกแอสฟัลต์ประเภทนี้ว่า แคทไอออนิก จากการใช้วัสดุและกรรมวิธีที่แตกต่างกัน ทำให้อิมัลซิไฟด์ทั้งชนิดแอนไอออนิกและแคทไอออนิก มีหลายเกรดซึ่ง ASTM และ AASHTO ได้พัฒนาข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเกรดต่างได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเกรดยางแอสฟัลต์อิมัลชัน

แอนไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชัน (ASTM D977 , AASHTO M140)	แคทไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชัน (ASTM D2397 , AASHTO M208)
RS - 1	CRS - 1
RS - 2	CRS - 2
HFRS - 2	-
MS - 1	-
MS - 2	CMS - 2
MS - 2h	CMS - 2h
HFMS - 1	-
HFMS - 2	-
HFMS - 2h	-
HFMS - 2s	-
SS - 1	CSS - 1
SS - 1h	CSS - 1h

โดยที่แอสฟัลต์ที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันจะผลักกัน ดังนั้นเม็ดเล็กๆ ของแอสฟัลต์จะแยกกันอยู่ จนกระทั่งแอสฟัลต์ได้ถูกราดลงบนมวลรวมแล้ว ในช่วงเวลาที่ถูกราดลงบนมวลรวมเม็ดแอสฟัลต์จะแตกตัวกันโดยประจุไฟฟ้ากลับสภาพเป็นกลางหรือน้ำระเหยออกไปหมด การแตกตัวที่เกิดขึ้นเรียกว่า Break หรือ Set

ระดับการรวมตัวกันของอิมัลซิไฟด์แอสฟัลต์ สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ

1. ชนิดแตกตัวเร็ว (Rapid – Setting: RS) ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำแบบอิมัลซิไฟด์อิงเอเจนต์ ที่ทำให้การแตกตัวกันเร็ว จะมีความไวเมื่อสัมผัสกับวัสดุมวลรวมและเปลี่ยนสภาพเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยเร็ว จะทำการเคลือบผิวทันทีหลังจากที่น้ำผสมอยู่ระเหยออกไป ซึ่งเกิดจากการดูดซึมและการบดอัด แอสฟัลต์ชนิดนี้มีทั้งประจุบวกประจุลบส่วนใหญ่ จะใช้ในงาน Surface Treatment

2. ชนิดแตกตัวปานกลาง (Medium Setting: MS) ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำแบบอิมัลซิไฟด์อิงเอเจนต์ ที่ทำให้การแตกตัวกันเร็วปานกลาง จะไม่แตกตัวทันทีที่สัมผัสกับผิวของมวลรวมจะใช้เวลาประมาณ 2 – 3 นาที การที่แอสฟัลต์เคลือบได้ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการระเหยและการดูดซึมของวัสดุมวลรวม นอกจากนี้วัสดุมวลรวมจะต้องมีความชื้นเพียงพอเพื่อช่วยในการผสมและเคลือบวัสดุมวลรวมได้ดีขึ้น ที่ใช้กันอยู่มี CMS, MS นิยมใช้ในการก่อสร้างลักษณะ Cold Mix, Premix และ Patching แต่ปัจจุบันเพิ่มชนิดของแอสฟัลต์อิมัลชันเข้าไปอีกเรียกว่า High Float ซึ่งมีประจุลบอย่างเดียวนั้นมี HFMS-1, HFMS-2 และ HFMS-2h

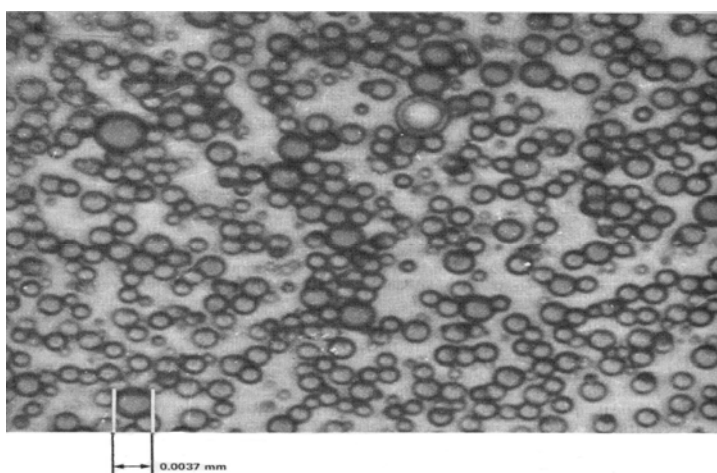
3. ชนิดแตกตัวช้า (Slow Setting: SS) ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำแบบอิมัลซิไฟด์อิงเอเจนต์ ที่ทำให้การแตกตัวกันช้า จะใช้เวลาแตกตัวนานเมื่อสัมผัสกับวัสดุมวลรวมสามารถใช้กับมวลรวมขณะที่มีการเรียงตัวกันดี เมื่อเติมน้ำจะให้ความหนืดลดลงสามารถนำไปทำ Tack Coat หรือกำจัดฝุ่นได้ ถ้าจะเร่งอัตราการแตกตัวก็เติมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวลงไป ใช้สำหรับงานบำรุงรักษาผิวทาง เช่น Slurry Seal ขางประเภทนี้ยังนิยมใช้กับงานพื้นลาดยาง เช่น Prime Coat, Fog Seal และ Dust Binding

4. การผลิตแอสฟัลต์อิมัลชัน

อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้สำหรับเตรียมอิมัลชันประกอบไปด้วยเครื่องที่มีความเร็วสูงและมีแรงเฉือน เช่น Colloid Mill ซึ่งไว้แยกแอสฟัลต์เป็นอนุภาคเล็ก ถึงเก็บสารผสม (Emulsifier Solution Tank) ถึงเก็บแอสฟัลต์ร้อน ปั่น และกำจัดอัตราการไหล Colloid Mill ที่ใช้ต้องมีอัตราการหมุนรอบความเร็วสูงประมาณ 1,000 – 6,000 รอบต่อนาที และตั้งช่องห่างของเครื่องย่อยตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.50 mm. (0.01 ถึง 0.02 นิ้ว) โดยทั่วไปแล้วขนาดเม็ดละอองของแอสฟัลต์อิมัลชันจะเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์ หรือประมาณ 0.001 ถึง 0.010 mm. (0.00004 ถึง

0.0004 นิ้ว) ขนาดเม็ดละอองแอสฟัลต์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นพลังงานเชิงกลของเครื่องย่อยแผ่นไคอะแกรมสำหรับการผลิตอิมัลชัน ภาพที่ 7 ขนาดของอนุภาคแอสฟัลต์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้อิมัลชันมีความเสถียรภาพ ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยดังต่อไปนี้

เล็กกว่า 0.001 มม.	28 เปอร์เซ็นต์
0.001 – 0.005 มม.	57 เปอร์เซ็นต์
0.005 – 0.010 มม.	15 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 7 ขนาดและการกระจายของอนุภาคแอสฟัลต์ในอิมัลชัน

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

ขนาดของอนุภาคแอสฟัลต์เล็กๆ เหล่านี้จะมีการกระจายอยู่ในน้ำ ในลักษณะของสารที่มีแรงดึงดูดที่ผิวรอบตัวที่ล้อมรอบไปด้วยน้ำ ทำให้แอสฟัลต์อยู่ในสถานะของสารแขวนลอย อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกัน จะช่วยให้แอสฟัลต์อยู่ในสถานะแขวนลอยได้ดียิ่งขึ้น

- Sized) เรียงขนาดหยาบ (Coarse - Graded) เรียงขนาดละเอียด (Fined - Graded) และเรียงข้ามขนาด (Gap - Graded)

5.1.2 ความสะอาด (Cleanliness) มวลรวมต้องมีความสะอาดปราศจากสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมอินทรีย์วัตถุและพวกไม่พึงปรารถนาจำพวก วัชพืช เม็ดวัสดุอ่อนร่วน เศษดินดินที่เคลือบเม็ดมวลรวม เป็นต้น การดูความสะอาดหรือสกปรกของมวลรวมอาจพิจารณาได้จาก การดูด้วยตาเปล่าหรือการล้างน้ำแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรง สามารถทำการทดสอบที่ให้ผลอีกแบบหนึ่งคือ Sand – Equivalent Test เป็นการหาปริมาณฝุ่นหรือดินที่ผสมอยู่ในมวลรวมตัวอย่าง

5.1.3 ความคงทน มวลรวมที่จะใช้ทำผิวจราจรจะถูกลบอัดหรืออัดสีจากขบวนการผลิต ขณะเทยังสถานที่ก่อสร้างและบดอัด เมื่อถนนได้เปิดใช้งานซึ่งได้รับการอัดสีจากล้อรถ ดังนั้นมวลรวมจะต้องมีความทนทานต่อการอัดสีได้และมวลรวมที่สัมผัสกับล้อรถโดยตรง การทดสอบความคงทนต่อการอัดสีทดสอบโดยวิธี Los Angeles Abrasion

5.1.4 ความคงทนต่อสภาพอากาศ วัสดุมวลรวมสำหรับผิวจราจรจะต้องมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศหรือสารเคมีที่ไม่แตกตัวออกจากกัน การทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate) หรือแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulphate)

5.1.5 รูปร่างของมวลรวม มีส่วนทำให้การบดอัดได้ความแน่นตามความต้องการ และยังมีผลต่อความสามารถรับน้ำหนักการจราจร ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ความต้านทานต่อการผ่านของน้ำและอากาศ ความสามารถในการแ่นตัวและความต้านทานการเลื่อน เป็นต้น มวลรวมมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุมและมวลรวมที่มีลักษณะกลมเมื่อในขณะบดอัดจะเกาะยึดตัวกันดี ซึ่งมวลรวมหยาบจะมีหน้าที่รับน้ำหนักการจราจรส่วนมวลรวมละเอียดจะทำให้การบดอัดได้แน่นและมีความสามารถในการทำงานได้ง่ายขึ้น

5.1.6 ลักษณะผิวหน้า ผิวหน้าของมวลรวมมีอิทธิพลต่อกำลังและความสามารถในการเทได้ ผิวหน้าที่ขรุขระต้องใช้แอสฟัลต์มากขึ้นเพื่อทำงานได้ง่ายขึ้น แอสฟัลต์จะเกาะยึดแน่นกับมวลรวมชนิดผิวหน้าขรุขระมากกว่ามวลรวมชนิดผิวเรียบ ซึ่งการทดสอบลักษณะรูปร่างและลักษณะผิวหน้ายังไม่มีวิธีการทดสอบที่ยอมรับ อย่างไรก็ตามจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรง (Strength Test) ของแอสฟัลต์เป็นสำคัญ

5.1.7 การดูดซึม วัสดุมวลรวมจะมีความพรุน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซึมหรืออมน้ำได้ ในการผสมกับแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมก็จะดูดซึมแอสฟัลต์ทำให้ผิวถนนเชื่อมติดกัน การใช้วัสดุมวลรวมที่มีรูพรุนมากๆ จะต้องเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์มากขึ้น ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุมวลรวมที่มีรูพรุนมากๆ

การยึดเกาะกับแอสฟัลต์ วัสดุมวลรวมบางชนิดไม่ค่อยยึดเกาะกับแอสฟัลต์ โดยแอสฟัลต์จะหลุดล่อนออกได้เมื่อถูกน้ำ วัสดุมวลรวมชนิดนี้จึงไม่เหมาะสมในการทำผิวจราจร การทดสอบการยึดเกาะหรือการหลุดล่อนของแอสฟัลต์ สำหรับวัสดุมวลรวมบางชนิดทำได้ง่ายคือ แช่วสฟัลต์คอนกรีตที่ยังไม่ได้บดอัดในน้ำแล้วดูส่วนที่แอสฟัลต์เคลือบมวลรวม หรือทดสอบความแข็งแรงก่อนและหลังตัวอย่างแช่น้ำ ค่าความแข็งแรงที่ลดลงไปเมื่อทดสอบหลังการแช่น้ำเป็นค่าที่แสดงผลของแอสฟัลต์ที่หลุดล่อนออกไปจากมวลรวม

5.2 มวลรวมละเอียดที่มีขนาดผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) และต้องมีคุณสมบัติดังนี้

5.2.1 ต้องเป็นหินฝุ่นหรือทราย สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ตะกอน หรืออินทรีย์วัตถุผสม ปะปนอยู่และจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ เพราะจะทำให้คุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมคุณภาพได้

5.2.2 ค่า Sand Equivalent เมื่อทำการทดสอบตามวิธีของ AASHTO T 176 มากกว่าร้อยละ 50 โดยปกติถ้าไม่จำเป็นไม่ควรใช้ทราย ถ้าจะใช้ควรจะใช้เมื่อมีความจำเป็น เช่น ต้องการปรับปรุงขนาดกะของมวลรวม หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของแอสฟัลต์คอนกรีต

6. การออกแบบส่วนผสม

โดยทั่วไปแล้ววิธีการออกแบบส่วนผสมในปัจจุบันมี 2 วิธี คือ แบบผสมร้อน (Hot Mixed Asphalt) และแบบผสมเย็น (Cold Mixed Asphalt) ซึ่งการออกแบบส่วนผสมแบบผสมร้อนส่วนใหญ่แล้วมักใช้กับผิวทางใหม่ ส่วนแบบผสมเย็นนั้นในปัจจุบันใช้ซ่อมแซมผิวทางที่เกิดจากความเสียหายมาจากสาเหตุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermal Cracking) ความล้า (Fatigue Cracking) เกิดร่องล้อ (Rutting) และอื่นๆ ซึ่งต้องใช้ให้เหมาะสมสำหรับแต่ละประเภทของอิมัลชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีแบบผสมเย็น (Cold Mixed Asphalt)

6.1 การผสมแบบร้อน (Hot Mixed Asphalt)

โดยส่วนใหญ่แล้วการผสมแบบร้อน (Hot Mixed Asphalt) มีการออกแบบหลายวิธี แต่ส่วนใหญ่แล้วมักใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชลเป็นที่นิยมนักมากและเป็นที่ยอมรับของ American Society for Testing and Materials (ASTM) และ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) โดยทั่วไปลักษณะของแอสฟัลต์คอนกรีตวัสดุที่ใช้ทำแอสฟัลต์คอนกรีตและการออกแบบส่วนผสมวิธีการออกแบบที่กรมทางหลวงใช้อยู่ในปัจจุบัน

6.2 การผสมแบบเย็น (Cold Mixed Asphalt)

โดยพื้นฐานแล้วการผสมแบบเย็นคือวัสดุที่ได้จากการผสมกันระหว่างวัสดุมวลรวม (Aggregate) และยางแอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งทำการผสมในอุณหภูมิปกติ

พื้นฐานของการออกแบบส่วนผสมนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นวิธีการออกแบบของมาร์แชล วิธีการออกแบบของฮวีม (Hveem Method) และอื่นๆ ซึ่งวิธีของมาร์แชลและฮวีมเหมาะสมสำหรับ Hot Mix Asphalt (HMA) แต่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบของโจราทอร์เป็นวิธีหนึ่งในการออกแบบส่วนผสม และในมินนิโซตา (Minnesota) ได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมปรับปรุงวิธีการและพัฒนาหลักเกณฑ์การออกแบบส่วนผสมโดยพยายามยึดหลักวิธีการออกแบบของมาร์แชลมาประกอบด้วย โดยใช้ข้อกำหนดต่างๆ ตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) และ American Association of State

Highway and Transportation Officials (AASHTO) เป็นมาตรฐานพื้นฐานในการออกแบบส่วนผสมโดยใช้วิธีการทดสอบหาข้อมูลพื้นฐานของวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชันให้ได้ตามข้อกำหนดต่างๆ และในการวิจัยได้มีการทดสอบก้อนตัวอย่างโดยวิธี Indirect Tensile Test, Unconfined Compressive Strength และ Resilient Modulus

วิธีการหาสัดส่วนผสมออกแบบแอสฟัลต์อิมัลชันโดยใช้วิธีการทดสอบของไจราทอรี เป็นการหาปริมาณยางที่ดีที่สุด และหาปริมาณน้ำที่ดีที่สุดที่ทำให้ส่วนผสมของแอสฟัลต์อิมัลชันมีคุณสมบัติต่างๆ เมื่อทดสอบโดยวิธี Indirect Tensile Test, Unconfined Compressive Strength และ Resilient Modulus ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ การทดสอบที่ใช้ในห้องทดสอบจะทำการผสมส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชันและทำการบดอัดโดยใช้เครื่อง Superpave Gyratory Compactor จากก้อนตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดแล้วจะนำไปหาคุณสมบัติทางด้านต่างๆ ทางวิศวกรรม

ซึ่งนักวิจัยได้พัฒนาวิธีการบดอัดในห้องปฏิบัติการ และต้องการบดทับก้อนตัวอย่างเพื่อให้ได้ความหนาแน่นที่เหมือนกับสภาพจริง ตามสภาพจราจรและสภาพอากาศที่ผลต่อพื้นผิวถนนด้วย ซึ่งเครื่องบดทับสามารถบอกถึงพฤติกรรมส่วนผสมที่ระมัดระวังศักยภาพและปัญหาการบดทับที่คล้ายคลึงกันได้ เครื่องบดทับต้องเคลื่อนย้ายได้สะดวกในการปฏิบัติงานที่ควบคุมคุณภาพได้เป็นสิ่งที่สำคัญ จากนั้นจึงได้พัฒนาเครื่องไจราทอรี (SGC) ซึ่ง Superpave Gyratory Compactor ซึ่งมีลักษณะการเตรียมก้อนตัวอย่างโดยพยายามเลียนแบบการบดอัดจริงที่เกิดขึ้นจริงในสนามโดยรถบดถนน

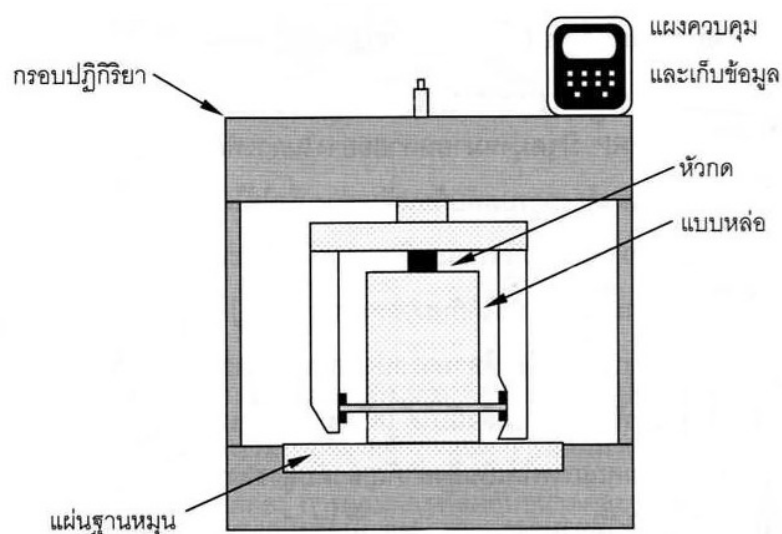
เครื่องมือ SGC มีคุณลักษณะบางอย่างเหมือนกับเครื่องบดอัดไจราทอรีดั้งเดิม แต่มีคุณสมบัติการปฏิบัติงานใหม่ทั้งหมด ในขณะที่วัตถุประสงค์หลักคือการบดอัดตัวอย่างเครื่อง SGC ยังสามารถจัดเตรียมรายละเอียดเกี่ยวกับความสามารถบดอัดของส่วนผสมโดยการเก็บข้อมูลระหว่างการบดอัดได้ด้วย เครื่องมือ SGC สามารถนำมาใช้ออกแบบส่วนผสมที่ไม่แสดงพฤติกรรมส่วนผสมที่อ่อนนุ่มและไม่แน่นอน จนทำให้ช่องว่างอากาศน้อยมากถึงขั้นอันตรายภายใต้การกระทำของการจราจร

หลักพื้นฐานของเครื่อง SGC มาจากเครื่องบดอัดแบบหมุนเท็กซัส (Texas Gyratory Compactor) ซึ่งถูกดัดแปลงเพื่อใช้หลักการบดอัดแบบเครื่องบดอัดไจราทอรีเฟรนช์ (French Gyratory Compactor) เครื่องบดอัดแบบหมุนเท็กซัสที่ถูกดัดแปลงนี้บดอัดก้อนตัวอย่างได้เสมือน

จริงตรงตามวัตถุประสงค์เกี่ยวกับความหนาแน่นของตัวอย่างที่เหมือนสภาพจริงในสนามและเครื่องมือนี้ขนย้ายพกพาได้อย่างสะดวก เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างมีขนาด 6 นิ้ว จึงเหมาะสมที่จะใช้บรรจุส่วนผสมที่มีขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดได้ถึง 50 มิลลิเมตร ผู้วิจัยของ SHRP จึงได้ดัดแปลงเครื่องบดอัดแบบหมุนที่กซัสโดยทำมุมการหมุนให้ต่ำลง ลดความเร็วของการหมุนให้ช้าลงและเพิ่มความสามารถในการบันทึกความสูงของก้อนตัวอย่างให้ตรงกับเวลาที่เกิดขึ้นจริง

ส่วนประกอบของเครื่อง SGC แสดงในภาพที่ 5 ประกอบด้วย

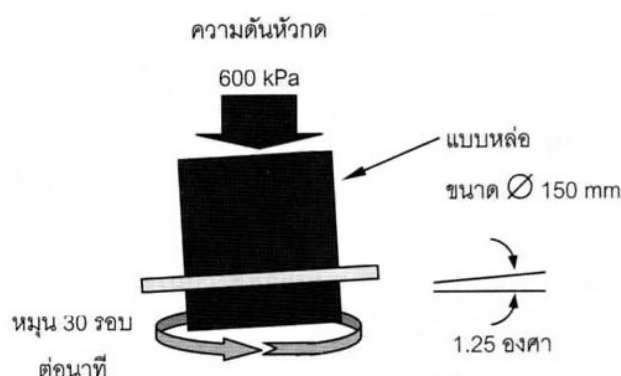
- กรอบปฏิกิริยา ฐานหมุน และมอเตอร์
- ระบบการให้แรงกระทำ หัวกด และน้ำปีดวัดความดัน
- ระบบการวัดความสูง และการบันทึก
- แบบหล่อ และแผ่นฐาน



ภาพที่ 9 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง Superpave Gyratory Compactor

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

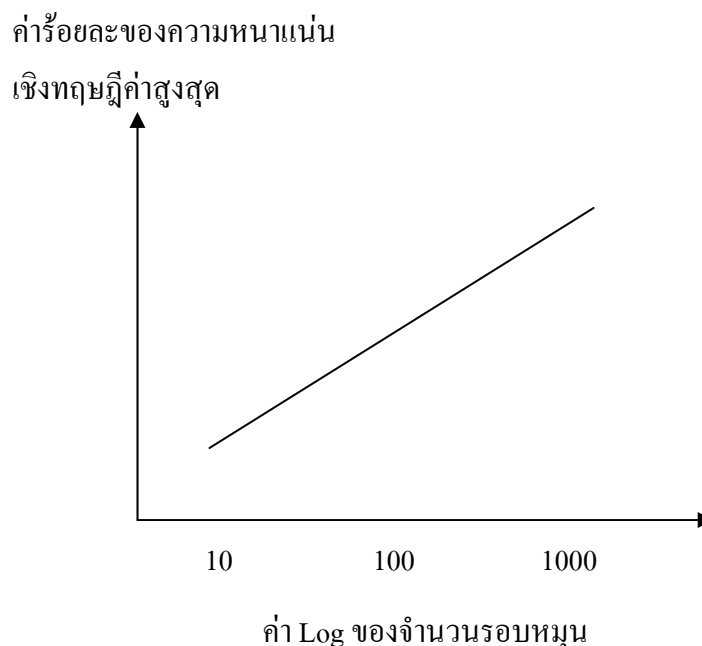
ระบบกลไกการให้แรงกระทำจะทำหน้าที่กดกรอบปฏิกิริยาและถ่ายแรงไปยังหัวกด เพื่อให้เกิดความดันในการบดอัดขนาด 600 กิโลปาสคา บนก้อนตัวอย่าง หน้าปัดวัดความดันจะทำหน้าที่วัดหัวกดให้รักษาความดันไว้คงที่ในช่วงระหว่างการบดอัดนั้น แบบหล่อของ SGC ดังแสดงในภาพที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 มิลลิเมตร และมีแผ่นฐานไว้รองรับกับแบบหล่อ เพื่อให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดในช่วงระหว่างการบดอัดฐานของ SGC หมุนด้วยความเร็วคงที่ขนาด 30 รอบต่อนาที ในระหว่างการบดอัดแบบหล่อซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ทำมุม 1.25 องศา



ภาพที่ 10 แสดงกลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้กับเครื่อง Superpave Gyratory Compactor

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)

การวัดความสูงของก้อนตัวอย่างเป็นฟังก์ชันที่สำคัญของ SGC เมื่อทราบค่ามวลของวัสดุที่บรรจุอยู่ในแบบหล่อ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแบบหล่อ และความสูงของก้อนตัวอย่างก็สามารถคำนวณหาความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างในช่วงระหว่างการบดอัดได้ การวัดความสูงของก้อนตัวอย่างกระทำได้โดยการบันทึกตำแหน่งของหัวกดตลอดช่วงเวลาการทดสอบนั้น จากการที่ใช้ค่าที่วัดได้ต่างๆ เหล่านี้ก็สามารถพัฒนาค่าคุณลักษณะต่างๆ ของการบดอัดก้อนตัวอย่างได้ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบการหมุนกับความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างบดอัด

ที่มา: วชรินทร์ (2547)

7. การทดสอบวัสดุโดยวิธีการต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)

จากอดีตถึงปัจจุบันได้พยายามคิดวิธีการทดสอบที่เหมาะสมกับการทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้คุณสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมของวัสดุ จึงมุ่งเน้นวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าเพราะวิธีการทดสอบได้ทำอย่างต่อเนื่องโดยยึดหลักวิธีการทดสอบที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพในการทดสอบได้อย่างถูกต้อง ซึ่งวิธีการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test มี 2 แบบ คือ แบบอัตราคงที่ (Static Load) และแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) เพื่อประมาณค่าคุณสมบัติ Elastic และ Tensile ของวัสดุ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่สามารถประมาณค่าได้จากการทดสอบแบบอัตราคงที่ Static Load Indirect Tensile Test ได้ค่า Static Modulus of Elasticity, Tensile Strength, Static Poisson's ratio ส่วนแบบกระทำซ้ำ Repeated Load Indirect Tensile Test ได้ค่า Resilient Modulus of Elasticity, Resilient Poisson's ratio, Fatigue characteristics, Permanent Deformation Characteristics นอกจากนี้ในเวลาที่ผ่านมามีเทคนิคการใช้เครื่องมือทดสอบหรือการจัดระบบการทดสอบได้พัฒนาวิธีการทดสอบขึ้นมาจนผลที่ได้รับไม่แตกต่างกัน จึงทำให้วิธีการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test ได้ยอมรับจาก American Society

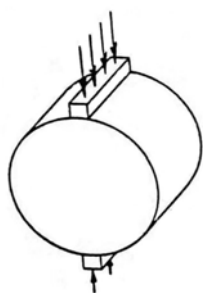
for Testing and Materials (ASTM) และ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ซึ่งได้รับการนำไปใช้ในการทดสอบวัสดุสร้างทางในประเทศต่างๆ

จากการศึกษาค้นคว้าและได้พัฒนาอย่างจริงจังทำให้ศักยภาพของวิธีการทดสอบ Indirect Tensile Test เพื่อวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมของวัสดุขยายออกไปอย่างกว้างขวางครอบคลุมทั้งค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) และยังสามารถตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานต่อการเกิดความล้า (Fatigue) และการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation)

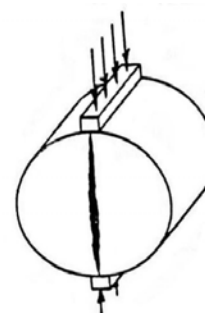
จากทฤษฎีของการที่ความเค้น (Stress) พัฒนาขึ้นเนื่องจากการให้น้ำหนักกระทำต่อก้อนตัวอย่างทรงกระบอก ซึ่งในทางปฏิบัติการยึดการให้น้ำหนักก้อนตัวอย่างด้วยลักษณะเป็นแนวเส้น (Line load) แล้ว จะทำให้จุดแตกร้าวของวัสดุไปเกิดที่ตำแหน่งขอบที่ผิวของก้อนตัวอย่างทดสอบ ที่ทำการให้น้ำหนักเนื่องจาก Compression Stress แทนที่จะเกิดการแตกร้าวที่กึ่งกลางของก้อนตัวอย่างเนื่อง Tensile Stress ซึ่งจะได้ผลที่ไม่ถูกต้องตามคุณสมบัติจริงของวัสดุตามที่ควรจะเป็น

ดังนั้นการให้น้ำหนักต้องกระทำผ่านแท่งก้นน้ำหนัที่เป็นสแตนเลสที่มีขนาดแนะนำให้ใช้ ดังนี้ สำหรับกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร หรือใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร สำหรับกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร โดยที่แท่งก้นน้ำหนัดังกล่าวมีด้านสัมผัสกับผิวของก้อนตัวอย่างทดสอบเป็นส่วนโค้งที่รัศมีเท่ากับรัศมีของก้อนตัวอย่างทำให้สามารถแนบชิดกันได้พอดีเพื่อประโยชน์ในการกระจายน้ำหนักและในการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำให้คงที่ ซึ่งการให้น้ำหนักในลักษณะนี้จะทำให้เกิด Tensile Stress ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการให้น้ำหนักหรือแนวเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวดิ่ง ในที่สุดจะส่งผลให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวขึ้นมาตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางเนื่องจากการให้ Single Load หรือ Repeated Load ก็ตาม โดยที่ลักษณะการกระจายของ Stress ที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่างทดสอบทั้งในแนวนอนและแนวดิ่งขณะทำการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 10 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่บริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่างทดสอบ Compression Stress ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่าของ Tensile Stress ที่เกิดขึ้นในแนวนอน ดังนั้นจึงทำให้แน่ใจได้ว่า ผลการทดสอบที่ได้รับเป็นคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุได้มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวิธีการทดสอบแต่อย่างใด

การทดสอบ Indirect Tensile Test ทำโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็น Compression Load ซึ่งจะเป็นแบบอัตราคงที่ (Static Load) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) แล้วแต่กรณี โดยให้ load กระทำในแนวนอนตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวตั้งของก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 12



(ก) การใช้น้ำหนักกดด้านบนของตัวอย่าง



(ข) ก้อนตัวอย่างที่เสียหาย

ภาพที่ 12 การให้น้ำหนักกระทำและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างทดสอบ

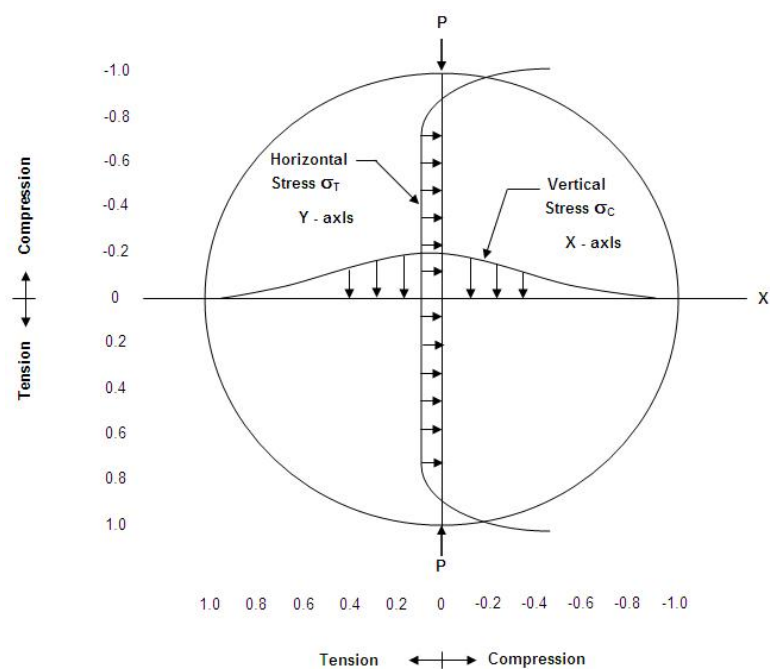
ที่มา: ชยธันว์ (2541)

ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างจากการทดสอบ Indirect Tensile Strength สามารถหาได้จากสมการ

$$IDT = \frac{2P}{\pi D h} \quad (1)$$

เมื่อ	IDT	=	ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) (MPa)
	P	=	น้ำหนักที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (N)
	h	=	ความสูงของก้อนตัวอย่างที่เริ่มทำการทดสอบ (mm)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (mm)

* ในกรณีที่ P เป็นแรงกระทำที่ทำให้ก้อนตัวอย่างวิบัติ (Failure) เนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ค่า stress ได้จากสมการ (1) จะเป็นค่า Indirect tensile Strength (ITS)

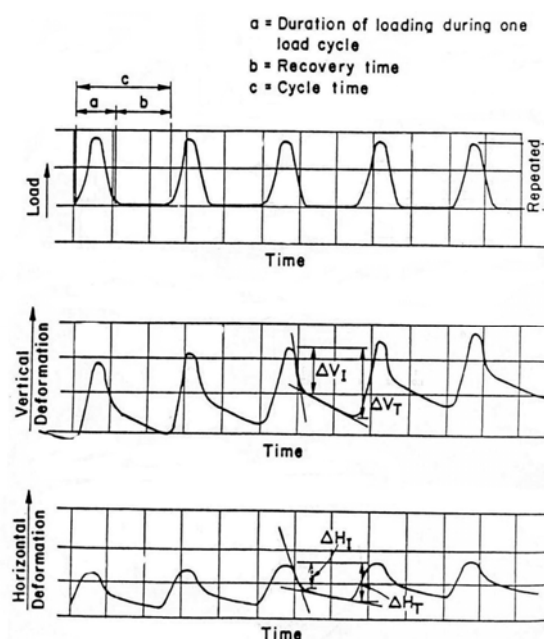


ภาพที่ 13 ลักษณะการกระจายของ Tensile Stress และ Compression Stress ในการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test

ที่มา: ชยธันว์ (2541)

รายละเอียดวิธีการทดสอบโดยทั่วไปของการทดสอบแบบ Indirect Tensile Test นั้น สำหรับการทดสอบแบบ Static ก่อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะได้รับการให้น้ำหนักด้วยอัตรา 50 มิลลิเมตรต่อนาที อย่างไรก็ตามอัตราการให้น้ำหนักที่ช้ากว่านี้อาจได้รับการพิจารณาใช้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่การทดสอบกระทำที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อพิจารณาความต้านทานต่อการเกิด Thermal cracking ของวัสดุ นอกจากนี้อัตราการให้น้ำหนักที่ช้าอาจจำเป็นต้องพิจารณาใช้ทดสอบ วัสดุที่แข็งเปราะ โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นอุณหภูมิห้อง ที่ประมาณ 25°C อย่างไรก็ตามการทดสอบที่อุณหภูมิอื่นก็อาจจะกระทำได้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทดสอบ สำหรับการทดสอบวัสดุจำพวกที่มีคุณลักษณะเฉพาะที่แปรเปลี่ยนคุณสมบัติตามอุณหภูมินั้น การทดสอบควรกระทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 5 ค่า คือที่ 5°C, 15°C, 25°C, 40°C และ 50°C เพื่อที่จะแสดงถึงผลกระทบของความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ ขณะทำการให้น้ำหนักในระหว่างการทดสอบควรตรวจสอบและบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงขนาด (Deformation) ที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทั้งในแนวราบและแล้วดิ่งอย่างต่อเนื่อง สำหรับการทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Dynamic หรือ Repeated Load หลักการพื้นฐานที่ใช้นั้น

ไม่แตกต่างกัน จะต่างกันตรงที่วิธีนี้จะให้น้ำหนักทดสอบที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งที่ไม่ถึงกับทำลายก้อนตัวอย่างทดสอบ และกระทำการให้น้ำหนักสลับกับการหยุดพักน้ำหนักเข้าไปมาโดยตรวจสอบและบันทึกค่า Deformation ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง แต่จะให้ความสนใจเฉพาะในส่วนของค่า Recoverable Deformation ซึ่งพิจารณาได้จากสมมติฐานที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Deformation มีลักษณะเป็นเส้นตรงตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Repeated Load

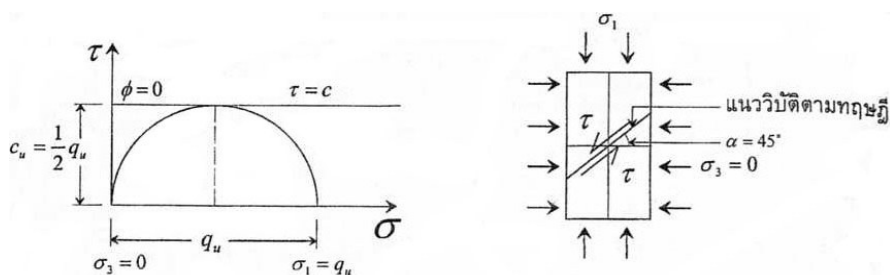
ที่มา: ชยธันว์ (2541)

ค่าเหล่านี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า Resilient Modulus of Elasticity นอกจากนี้การทดสอบแบบนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่า Permanent Deformation ที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจาก Repeated Load ได้อีกด้วย โดยปกติแล้ว Repeated Stress ที่กระทำกับก้อนตัวอย่างทดสอบจะให้ในลักษณะ Haversine โดยจะมีการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อรักษาสภาพในการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งกดน้ำหนักกับผิวของก้อนตัวอย่างแต่ทั้งนี้ควรเลือกช่วงเวลาในการให้น้ำหนักที่สั้นจะให้ค่า Fatigue Life ที่สูงขึ้นเข้าไปใกล้ค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม สำหรับระยะเวลาในการให้น้ำหนักแบบ Repeated Load ที่มักใช้ทดสอบจะอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.4

วินาที ในการศึกษานี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมการทำงาน และเก็บข้อมูลผลการทดสอบได้จากเครื่อง UTM-5P

8. การทดสอบวัสดุโดยวิธีการรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)

ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined Compressive Strength คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแท่งตัวอย่างมีรูปทรงกระบอกหรือรูป Prismatic จะรับได้ การทดสอบจะให้แรงกดในแนวดิ่ง ซึ่งก็คือหน่วยแรงหลัก (Major Principal Stress, σ_1) เพียงอย่างเดียว และกระทำจนกระทั่งก้อนตัวอย่างวิบัติ โดยที่ไม่ให้แรงกระทำด้านข้าง (หน่วยแรงรองหรือ Minor Stress, $\sigma_3 = 0$) ตลอดช่วงที่ทำการทดสอบ ผลการทดสอบจะทำให้ทราบค่ากำลังแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength, q_u) ของวัสดุ ซึ่งนิยามว่าเป็นหน่วยแรงกดในแนวดิ่งสูงสุดเมื่อความเครียดวิบัติ (Strain at Failure, ϵ_f) หรือในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อความเครียด (Strain) ในแนวดิ่งเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ที่ความเครียด 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำไปสร้างกราฟวงกลมมอร์ (Mohr's Circle) โดยใช้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขในการทดสอบภาพที่ 16 จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Untrained Shear Strength, C_u)



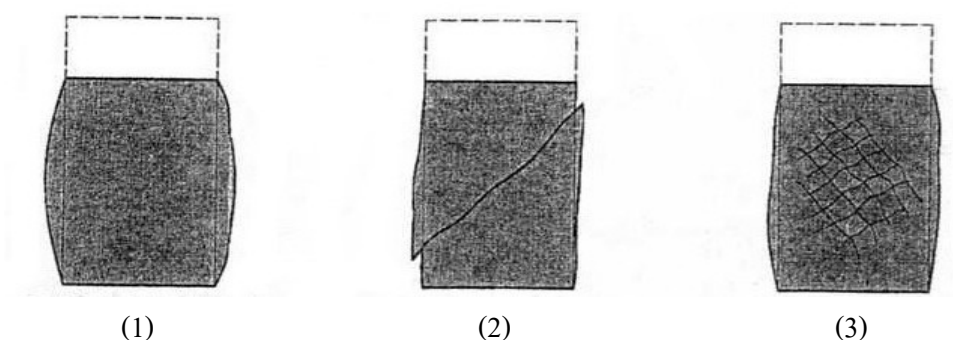
ภาพที่ 15 วงกลมมอร์จากผลการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด

ที่มา: วิไลลักษณ์ และคณะ (2548)

จากสมมติฐานว่า ก้อนตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัดนี้ เป็นดินเหนียวเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Clay Soil) ซึ่งมีความเชื่อมแน่น (Cohesive) และไม่มีแรงเสียดทานภายใน ($\phi = 0$) ดังนั้นวงกลมมอร์ที่ได้จึงมีรัศมีที่ไม่แตกต่างกัน และเส้นสัมผัสวงกลมเป็นเส้นในแนวราบ โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมเป็นค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (q_u) ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ดินรับได้ ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (C_u) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า หน่วยแรงเชื่อมแน่น (Cohesion) มีค่าเท่ากับรัศมีของวงกลมมอร์หรือครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ($C_u = q_u / 2$)

การทดสอบนี้ได้ปรับปรุงจาก AASHTO T 208-70 ให้อธิบายถึงการหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดินในสภาพ Undisturbed และ Remolded อัตราการเพิ่มแรงอัดในระหว่างการทดสอบ จะควบคุมโดยความเครียด (Strain) หรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) ก็ได้รูปแบบการวิบัติ โดยปกติภาวะที่จะถือว่าก้อนตัวอย่างนั้นวิบัติแล้ว ต่อเมื่อก้อนตัวอย่างนั้นไม่สามารถรับน้ำหนักกดได้เพิ่มขึ้นหรือมีการเสียรูปมากเกินไปความสามารถในการใช้งาน ความเค้น (Stress) ที่กระทำในแนวแกน คือ แรงอัดในแนวแกน (Compressive Strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงต่อพื้นที่หน้าตัดรับแรงกด ในการคำนวณค่าความเค้นนี้จะต้องปรับแก้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง ตามความจริงที่ว่าเมื่อก้อนตัวอย่างถูกกดจะสั้นลง และเมื่อเป็นการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำก้อนตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีปริมาตรเท่าเดิม ดังนั้นตัวอย่างดินจะป่องออกด้านข้างทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น รูปแบบของการวิบัติ (Mode of Failure) นี้มีความสำคัญต่อการพิจารณาคูณสมบัติของดินซึ่งมี 3 รูปแบบได้แก่

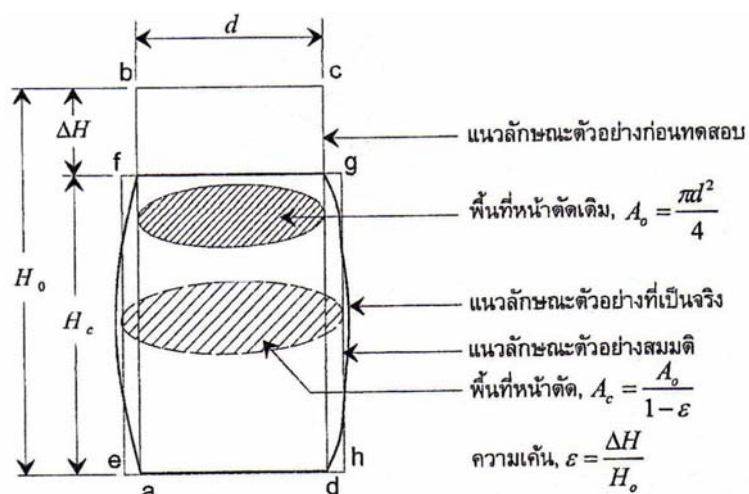
1. วิบัติแบบพลาสติก (Plastic Failure) ก้อนตัวอย่างจะขยายด้านข้างคล้ายถังไม้โดยที่ไม่มีรอยแตก
2. วิบัติแบบเปราะ (Brittle Failure) ก้อนตัวอย่างจะมีรอยร้าวแนวนอนที่เห็นได้ชัดเจนอน ซึ่งตามหลักทฤษฎีจะเป็นแนว 45 องศา กับแนวระนาบ ตำแหน่งประมาณกลางก้อนตัวอย่าง
3. วิบัติแบบพลาสติกและแบบเปราะรวมกัน



ภาพที่ 16 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเมื่อถูกบดอัด

ที่มา: วิไลลักษณ์ และคณะ (2548)

ในการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด ขณะที่ให้แรงกดในแนวตั้งกับก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเครียด (ϵ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ความสูงของก้อนตัวอย่างซึ่งเปลี่ยนแปลงลดลง (ΔH) ต่อความสูงตอนเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบ (H_0) ดังที่กล่าวในตอนต้นถึงรูปแบบการทดสอบแบบไม่มีการระบายน้ำ (Untrained Test) จะไม่ยอมให้น้ำในก้อนตัวอย่างระบายออก ซึ่งหมายถึงว่าปริมาตรของตัวอย่างคงที่ตลอดการทดสอบ ดังนั้นเมื่อก้อนตัวอย่างรับแรงกด ทำให้ความสูงของตัวอย่างลดลง แต่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างขยายตัวแทน และเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น หมายถึงพื้นที่หน้าตัดรับแรงกดที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นหากนำพื้นที่หน้าตัดที่ไม่ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดไปคำนวณจะได้หน่วยความเค้นที่สูงเกิดความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าหน่วยแรงที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง การพิจารณาคำนวณปรับแก้พื้นที่หน้าตัดจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น



ภาพที่ 17 พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

ที่มา: วิไลลักษณ์ และคณะ (2548)

ซึ่งภาพที่ 17 ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างที่ถูกกระทำด้วยแรงกด P โดยพื้นที่ $abcd$ เป็นรูปตัดด้านข้างก่อนเริ่มทดสอบ และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงสมมติให้การยุบตัวภายใต้แรงกดของก้อนตัวอย่างแทนด้วยเส้นทึบในรูป (พื้นที่ $efgh$) แทนด้วย A_c และ A_0 เป็นพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างก่อนที่จะนำไปทดสอบ

เมื่อปริมาตรของวัสดุคงที่ตลอดการทดสอบจะได้ว่า

$$A_0 H_0 = A_c H_c = A_c (H_0 - \Delta H)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$A_c = \frac{A_0 H_0}{H_0 - \Delta H} = \frac{A_c}{1 - \frac{\Delta H}{H_0}}$$

$$\text{เมื่อ} \quad \epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (2)$$

โดย ϵ = ความเครียดตามแนวแกนที่เกิดจากแรงกด

ΔH = ระยะการยุบตัวของตัวอย่างที่ถูกกด (อ่านได้จาก Dial Gauge)

H_0 = ความสูงของก้อนตัวอย่างก่อนเริ่มทำการทดสอบ

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากการรับน้ำหนัก

$$A_c = \frac{A_0}{1 - \epsilon} \quad (3)$$

โดย A_c = พื้นที่หน้าตัดที่เกิดจากการรับน้ำหนัก

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างตอนเริ่มต้นทดสอบ

ซึ่งมีหน่วยแรงต้านทานการกดบนก้อนตัวอย่าง

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} = \frac{R K}{A_c} \quad (4)$$

โดย σ_c = หน่วยแรงต้านทานการกดบนก้อนตัวอย่าง

P = แรงต้านทานการกด

R = ค่าอ่านได้จากมาตรวัดแรง

K = ค่าคงที่ของมาตรวัดแรง

9. การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile) เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ กับก้อนตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้น้ำหนักที่กระทำนั้นเป็นลักษณะรูปคลื่น Harversine หรือคลื่นแบบรูปร่างอื่นๆ น้ำหนักที่กระทำในแนวตั้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของก้อนตัวอย่าง จะทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวในแนวราบ และขณะช่วงเวลาหยุดพักการให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างจะมีการคืนตัวกลับเรียกว่าค่าการคืนตัว (Resilient Strain) เมื่อให้น้ำหนักกระทำซ้ำอีกตามจำนวนครั้งที่กำหนดจนกระทั่งค่าการตัวมีค่า

ค่อนข้างคงที่ ด้วยการกำหนดค่า Poisson's Ratio โดยประมาณของก้อนทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต จะทำให้ได้ค่าโมดูลัสการคืนตัว

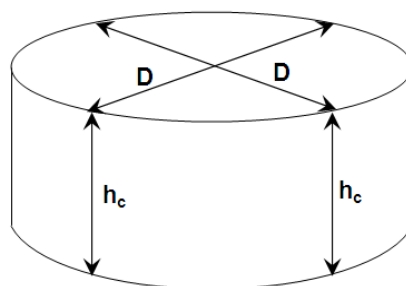
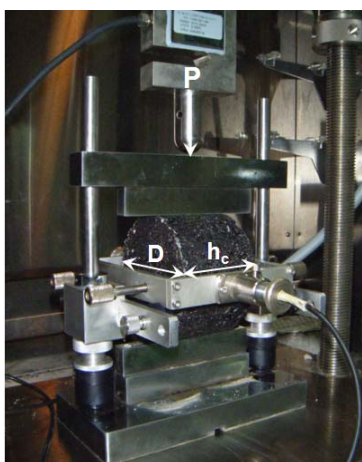
ชยธวัช และคณะ (2546) ได้ศึกษาการทดสอบโมดูลัสคืนตัวตามโครงการ Pavement Technology Project จะใช้เครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM-5P) ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทดสอบจะกระทำที่ความถี่ 1 HZ (1 รอบ/วินาที) ช่วงเวลาการในการกดน้ำหนักคือ 0.1 วินาที (Load Time) และช่วงเวลาหยุดการกดน้ำหนัก 0.9 วินาที (Pulse Repetition Period) และการทดสอบจะกระทำการทดสอบที่ 4 ค่าอุณหภูมิ คือ 5°C, 20°C, 35°C และ 50°C โดยเริ่มจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่าไปหาอุณหภูมิที่สูงกว่า แต่ละค่าอุณหภูมิ จะใช้ค่าน้ำหนักที่กระทำแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมโดยวิธี Indirect Tensile Strength ตามมาตรฐาน ASSHTO T283 (ใช้อัตราการให้แรงเท่ากับ 0.8333 มิลลิเมตร/วินาที หรือ 2 นิ้ว/นาทิต ทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C) จำนวนของการให้น้ำหนักกระทำ 150 ครั้งซึ่งจัดว่าเพียงพอสำหรับการวัดค่าโมดูลัสคืนตัวและผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสคืนตัว 5 ค่าสุดท้าย ในการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวนั้น จำเป็นต้องใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ช่วยในการคำนวณ แต่เนื่องจากข้อจำกัดจากการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เพียงด้านข้างของเครื่องมือทดสอบ รวมทั้งจากที่ทราบว่าค่าสัดส่วนปัวซองนั้นจากการทดสอบโดยปกติจะมีค่าที่ไม่แต่ต่างมากนัก ในการศึกษาจึงกำหนดเลือกใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง 2 ค่า ที่มักได้รับการยอมรับใช้กัน คือ เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 15°C และ 25°C ใช้ 0.35 และที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 35°C และ 40°C ใช้ 0.4

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

$$M_R = \frac{P(v + 0.27)}{h_c H} \quad (5)$$

$$\epsilon_r = \frac{H}{D}$$

เมื่อ	M_R	=	ค่าโมดูลัสคืนตัวโดยประมาณ (MPa)
	P	=	น้ำหนักกระทำสูงสุด (N)
	ν	=	ค่า Poisson's Ratio โดยประมาณ
	h_c	=	ความสูงของก้อนตัวอย่างโดยเฉลี่ย (mm)
	H	=	ระยะการคืนตัวในแนวนอนทั้งหมด (mm)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของก้อนตัวอย่าง (mm)
	ϵ_r	=	ค่าการคืนตัว (Resilient Strain)



ภาพที่ 18 การวัดขนาดก้อนตัวอย่างและน้ำหนักกระทำ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion)

แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion) ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็น แอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CMS-2 และ CSS-1 เป็นวัสดุประสานโดยมีการทดสอบหาปริมาณน้ำในแอสฟัลต์อิมัลชันตาม มาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 411/2522

1.2 วัสดุผสมรวม

วัสดุผสมรวม (Aggregate) ที่ใช้ในการศึกษานำมาจากถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183 โดยมีการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมตามมาตรฐานของ กรมทางหลวง ดังนี้

1.2.1 การทดสอบหาขนาดผละวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง ตามมาตรฐานของ AASHTO T27-70 และ AASHTO T37-70 หรือการทดสอบของกรมทางหลวง ทล.-ท. 204-2516

1.2.2 การทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานของ AASHTO T27-70 หรือการทดสอบของกรมทางหลวง ทล.-ท. 108/2517

1.2.3 การทดสอบเพื่อหาค่า CBR ตามมาตรฐานของ AASHTO T193 หรือ การทดสอบของกรมทางหลวง ทล.-ท. 109/2517

1.2.4 การทดสอบ Unconfined Compression Strength ของดิน ตามมาตรฐาน การทดสอบ ทล.-ท. 105/2515

วิธีการ

1. วิธีการทดสอบวัสดุมวลรวม

1.1 การทดสอบหาขนาดกระจายวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง เพื่อหาขนาดกระจายของมวลรวมหยาบ (Gradation) แล้วเปรียบเทียบมวลรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง หรือที่ค้างบนตะแกรง ขนาดต่างๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ P = เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก

R = มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

T = มวลของตัวอย่างทั้งหมด

1.2 การทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุมวลรวมกับน้ำที่ใช้ในการบดอัด ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

ปริมาณน้ำในวัสดุมวลรวมเป็นร้อยละ

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำในมวลรวมเป็นร้อยละคิดเทียบกับน้ำหนักของมวลรวม
อบแห้ง

M_1 = น้ำหนักของมวลรวมเปียก (gm)

M_2 = น้ำหนักของมวลรวมอบแห้ง (gm)

ค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\sigma_t = \frac{A}{V} \quad (8)$$

เมื่อ σ_t = ความแน่นเปียก (gm/ml)

A = น้ำหนักของมวลรวมเปียกที่บดทับในแบบ (gm)

V = ปริมาตรของแบบ หรือปริมาตรของมวลรวมเปียกที่บดทับในแบบ (mm^3)

ค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (9)$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง (gm/ml)

ρ_t = ความแน่นเปียก (gm/ml)

ω = ปริมาณน้ำในมวลรวมเป็นร้อยละ

1.3 การทดสอบเพื่อหาค่า CBR เพื่อเปรียบเทียบ Bearing Value ของวัสดุตัวอย่างกับวัสดุหินมาตรฐาน เมื่อทำการทดสอบตัวอย่างนั้นโดยใช้ก้อนบดทับในแบบที่ Optimum Moisture Content หรือปริมาณน้ำในมวลรวมใดๆ เพื่อนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างของถนนและใช้ควบคุมงานในการบดทับให้ได้ความแน่นและความชื้นตามต้องการ ซึ่งสามารถคำนวณจากการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน และสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

ค่าการขยายตัว (Swell)

$$\% \text{ Swell} = \frac{S}{H} \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ s = ผลต่างระหว่างการอ่าน Reading ครั้งแรกและครั้งสุดท้ายของ
Dial Gauge ที่วัด Swell (mm)

H = ความสูงเริ่มต้น (Initial Height) ของตัวอย่างก้อนแซ่น้ำ (mm)

1.4 การทดสอบ Unconfined Compression Strength ซึ่งแท่งตัวอย่างวัสดุรวมเป็นรูปทรงกระบอก ถ้าในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อความเครียด (Strain) ในแนวดิ่งเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ความเครียด 20 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นค่า Unconfined Compression Strength อัตราการเพิ่มแรงอัดในระหว่างการทดสอบ จะควบคุมโดยความเครียดหรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) ก็ได้ ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

ความเครียดในแนวดิ่ง สำหรับแรงกดใดๆ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (11)$$

เมื่อ ε = ความเครียดในแนวดิ่ง สำหรับแรงกดใดๆ

ΔL = ระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใดๆ อ่านค่าจาก Dial Gauge

L_0 = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง (mm)

พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใดๆ

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (12)$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใดๆ

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

ε = ความเครียดตามแนวดิ่งที่แรงกดนั้นๆ

ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (13)$$

เมื่อ σ_c = ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ

P = แรงกด

A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้นๆ

2. วิธีการทดสอบแอสฟัลต์อิมัลชัน

2.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำในแอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งคำนวณจำนวนปริมาณน้ำได้จากสมการดังนี้

$$\text{ปริมาณน้ำเป็นร้อยละ} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (14)$$

เมื่อ A = ปริมาณน้ำในที่กักน้ำ (ml)

B = น้ำหนักของตัวอย่าง (gm)

3. วิธีการออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมแบบเย็น (Cold Mix) ได้อ้างอิงจาก Evaluation of Asphalt Binders Used for Emulsions ของ Minnesota ได้นำเอาวิธีการออกแบบของมาร์แชลมาเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมแบบเย็น (Cold Mix) โดยใช้ Superpave Gyratory Compactor (SGC) ซึ่งได้ทดลองเกี่ยวกับการออกแบบส่วนผสมวัสดุของ Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) ของรัฐแคนซัส ออตาวิโอ และคอนเนตทิคัท

ขั้นตอนการทำการก้อนตัวอย่างนั้น ก่อนที่จะทำการก้อนตัวอย่าง จะต้องคำนึงถึงส่วนผสม และ ข้อมูลพื้นฐานที่ต้องการทราบ โดยออกแบบที่อัตราส่วนของผิวทางแอสฟัลต์เก่า (Reclaimed Asphalt Pavement ; RAP) กับหินคลุกเก่า (Reclaimed Crushed Rock; RCR) ที่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยวิธีการออกแบบส่วนผสมนั้นมีขั้นตอนการทำได้ดังนี้

3.1 ทำการทดสอบหาค่าปริมาณอิมัลชันที่เหมาะสม (Optimum Emulsion Content, OEC) มีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ชั่งน้ำหนักวัสดุมวลรวมระหว่างวัสดุผิวทางเดิม (RAP) และหินคลุกเก่า (RCR) ตามอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 โดยใช้วัสดุ มวลรวมปริมาณ 4,000 กรัมต่อการผสม 1 ก้อนตัวอย่าง

3.1.2 เติมน้ำ 3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุมวลรวมทั้งหมด โดยจะต้องหักออกจาก ปริมาณน้ำที่อยู่ในแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละชนิด

3.1.3 เติมแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละชนิดของน้ำหนัสดุมวลรวมทั้งหมด โดยเริ่มใช้ แอสฟัลต์อิมัลชันที่ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัสดุมวลรวมแห้งทั้งหมดและผสมให้เข้ากัน การทำการก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนให้เพิ่มแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละชนิดละ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนั กวัสดุมวลรวมทั้งหมด โดยทำการเตรียมก้อนตัวอย่างจนกว่ามีค่าความหนาแน่นลดลง

3.1.4 ผสมวัสดุมวลรวมให้คละกันจากนั้นพักไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้อิมัลชัน แยกตัวก่อนการบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyratory Compactor ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 เครื่องบดอัด Superpave Gyratory Compactor

3.1.5 ทำก้อนตัวอย่างทดสอบที่ 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) โดยใช้เครื่อง Superpave Gyratory Compactor โดยมีค่ามุมของการหมุน 1.25 องศา และมีน้ำหนักในการบดอัด 600 กิโลปาสคา (kPa) มีจำนวนรอบในการหมุน 56 รอบ ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของตัวอย่างสำหรับการผสมแบบร้อน (Hot Mix Asphalt) ผสมกันที่อุณหภูมิห้อง

3.1.6 นำก้อนตัวอย่างออกจากแบบโมลด์ (Mold) และนำก้อนตัวอย่างเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C ทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง

3.1.7 นำก้อนตัวอย่างออกจากตู้อบ และตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.1.8 ทำการทดสอบก้อนตัวอย่างหาค่า Bulk Specific Gravity ที่อุณหภูมิห้องของก้อนตัวอย่างทดสอบหาค่าปริมาณอิมัลชันที่เหมาะสม

3.2 วิธีการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) มีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 ชั่งน้ำหนักวัสดุรวมระหว่างวัสดุผิวทางเดิมกับหินคลุกเดิม ตามอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 โดยให้มีน้ำหนักวัสดุรวม 4,000 กรัม

3.2.2 เติมแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสมของแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบหาค่าแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสม

3.2.3 เติมน้ำลงไปผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันแต่ละชนิดโดยน้ำหนักของวัสดุรวมทั้งหมด โดยเริ่มปริมาณน้ำที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุรวมแห้งทั้งหมดและผสมให้เข้ากัน การทำก่อนตัวอย่างแต่ละก้อนให้เพิ่มน้ำทีละ 0.5 โดยทำก่อนตัวอย่างจนค่าความหนาแน่นลดลง

3.2.4 ผสมวัสดุรวมให้คลุกกันพักไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัวก่อนการบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyratory Compactor

3.2.5 ทำก่อนตัวอย่างทดสอบที่ 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) โดยใช้เครื่อง Superpave Gyratory Compactor โดยมีค่ามุมของการหมุน 1.25 องศา และมีน้ำหนักในการบดอัด 600 กิโลปาสคา (kPa) มีจำนวนรอบในการหมุน 52 รอบ ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของตัวอย่างสำหรับการผสมแบบร้อน (Hot Mixed Asphalt) ผสมกันที่อุณหภูมิห้อง

3.2.6 นำก่อนตัวอย่างออกจากแบบโมลด์ (Mold) และนำก่อนตัวอย่างเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลาไว้ 6 ชั่วโมง

3.2.7 นำก่อนตัวอย่างออกจากตู้อบ และตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.2.8 นำก่อนตัวอย่างไปหาค่า Bulk Specific Gravity ที่อุณหภูมิห้อง

ในการหาปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสมและหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม จะทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

วิธีทดสอบนี้จะต้องใช้เมื่อตัวอย่างดูดซับน้ำน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรที่แน่นอน

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (15)$$

- เมื่อ G_{mb} = ความถ่วงจำเพาะ
 A = น้ำหนักตัวอย่างแห้ง, (gm)
 B = เคลื่อนย้ายตัวอย่างจากในน้ำ เอาผ้าเช็ดผิวหน้าตัวอย่างทั้งก้อนให้แห้งหมด ๆ และจดค่าน้ำหนักผิวหน้าแห้งเป็น, (gm)
 C = แช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 5 นาที และจดค่าน้ำหนักอย่างแช่, (gm)

วิธีทดสอบนี้จะต้องใช้เมื่อตัวอย่างดูดซับน้ำมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรที่แน่นอน

$$G_{mb} = \frac{A}{D - E - \frac{D - A}{F}} \quad (16)$$

- เมื่อ G_{mb} = ความถ่วงจำเพาะ
 A = น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (gm)
 D = น้ำหนักตัวอย่างที่ฉาบด้วย Para film ที่เคลือบแล้ว (gm)
 E = แช่ตัวอย่างในน้ำที่มีอุณหภูมิ 25 °C และจดค่าน้ำหนักที่แช่ (gm)
 F = ค่าความถ่วงจำเพาะของ Para Film ที่อุณหภูมิ 25 °C

3.3 นำค่าปริมาณอิมัลชันที่เหมาะสมและปริมาณน้ำที่เหมาะสมมาเป็นส่วนผสม โดยใช้เครื่อง Superpave Gyratory Compactor ให้มีขนาดของก้อนตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 104 มิลลิเมตร (4.1 นิ้ว) และสูง 76.2 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ที่มีอุณหภูมิ 25 °C ± 2 °C ซึ่งมีน้ำหนักแรงดันของก้อนตัวอย่างที่ 600 กิโลปาสคา ที่องค์ของการหมุน 1.25 องศา เมื่อได้ก้อนตัวอย่างจะให้อุณหภูมิในตัวอย่างที่ 60 °C เป็นเวลาทั้งหมด 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้นำก้อนตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอีก 12 ชั่วโมง และนำไปทดสอบค่า Unconfined Compression

Strength (UCS) ทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) และทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ต่อไป

การทดสอบก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40° C นั้น จะต้องนำก้อนตัวอย่างแล้วก็นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60° C เป็นเวลาทั้งหมด 48 ชั่วโมง จากนั้นก็ปรับอุณหภูมิไปที่ 40° C จะนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบได้จนกว่าอุณหภูมิในตู้อบเหลือที่ 40° C (Timothy et al., 2003)

4. วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสม

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมแต่ละวิธีการทดสอบนั้นจะต้องวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบทุกครั้ง ดังนี้

4.1 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) มีขนาดก้อนตัวอย่างทดสอบ 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) x 104 มิลลิเมตร (4.1 นิ้ว) ซึ่งขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

4.1.1 วัดขนาดและชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบ

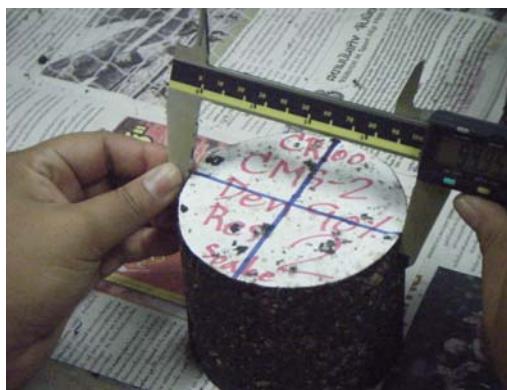
4.1.2 ติดตั้งเครื่อง Load Cell ซึ่งการกดแท่งตัวอย่างมีอัตราความเร็วเท่ากับ 1.16 มิลลิเมตรต่อนาที

4.1.3 เก็บ Water Content หลังการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength)

โดยทำการทดสอบทั้ง 5 อัตราส่วนผสมและที่ความหนาแน่น 90, 95 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นสูงสุดโดยมีการคำนวณจากสมการดังนี้

$$UCS = \frac{4 \times P}{\pi \times d^2} \quad (17)$$

เมื่อ UCS = Unconfined Compressive Strength (ksc)
 P = แรงกด (kg)
 d = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของก้อนตัวอย่าง (cm)



ภาพที่ 20 การวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 21 เครื่องมือทดสอบก้อนตัวอย่างเครื่อง Load Cell

4.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) ในการทดสอบจะมีขนาดของก้อนตัวอย่าง 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) x 76 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) จะกระทำการทดสอบด้วยวิธีแช่น้ำ ไม่แช่น้ำและที่อุณหภูมิ 40° C ซึ่งขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

4.2.1 วัดขนาดและชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบ

4.2.2 ติดตั้งเครื่อง Load Cell ซึ่งการกดแท่งตัวอย่างมีอัตราความเร็วเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเป็นการทดสอบก้อนตัวอย่างแบบแช่น้ำจะต้องนำก้อนตัวอย่างไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนทดสอบก้อนตัวอย่าง และส่วนทดสอบที่ 40° C เมื่อครบกำหนดเวลาของการทำก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60° C แล้ว ให้ปรับอุณหภูมิลดลงที่ 40° C จึงจะสามารถทดสอบได้

4.2.3 เก็บ Water Content หลังการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)

ซึ่งทำการทดสอบทั้ง 5 อัตราส่วนและที่ความหนาแน่น 90, 95 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดโดยมีการคำนวณจากสมการดังนี้

$$ITS = \frac{2P}{\pi \times h \times d} \quad (18)$$

เมื่อ ITS = Indirect Tensile Strength (ksc)
 P = แรงกด (kg)
 d = เส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (cm)
 h = ความสูงของก้อนตัวอย่าง (cm)



ภาพที่ 22 การติดตั้งก่อนตัวอย่างก่อนทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)



ภาพที่ 23 ก่อนตัวอย่างหลังการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)

4.3 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว Resilient Modulus (M_R) จะทดสอบโดยวิธีการใต้น้ำหนักกระทำซ้ำเช่นเดียวกับการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) ใช้เครื่อง UTM - 5P ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้จะใต้น้ำหนักกระทำที่ 20, 30, 40 เปอร์เซ็นต์ของความต้านทานแรงดึงทางอ้อมสูงสุดทั้ง 5 อัตราส่วนผสมและที่ความหนาแน่น 90, 95 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นสูงสุด จะกระทำการทดสอบด้วยวิธีแช่น้ำ ไม่แช่น้ำ ที่อุณหภูมิ 40°C การใต้น้ำหนักกระทำ 100 ครั้ง ซึ่งจัดว่าเพียงพอสำหรับการวัดค่าโมดูลัสคืนตัวและผลการทดสอบหาค่า

โมดูลัสกึ่งตัวนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสกึ่งตัว 5 ค่าสุดท้าย ซึ่งลักษณะนี้จะเป็นการทดสอบที่ไม่ให้ก้อนตัวอย่างเสียรูป

ในงานศึกษานี้ได้อ้างอิงถึงวิธีทดสอบของ ASTM D 4123 – 82 จึงนำมาประยุกต์ใช้ และได้สรุปขั้นตอนวิธีการทดสอบหาค่าโมดูลัสกึ่งตัวดังนี้

- 1) วัดขนาดและชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบ
- 2) นำก้อนตัวอย่างไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิโดยให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง
- 3) ติดตั้งก้อนตัวอย่างเข้ากับเครื่อง UTM-5P
- 4) เลือกเพิ่มน้ำหนัก (Load) ทั้งหมด 3 ครั้ง ต่อหนึ่งก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยเลือกใช้น้ำหนัก (Load) ที่ 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ตามลำดับ และเมื่อทำการทดสอบเลือกใช้น้ำหนัก (Load) ในแต่ละครั้งจะต้องปรับก้อนตัวอย่างทดสอบทำมุม 90 องศา
- 5) กำหนดค่า Poisson's ratio (V) ที่ใช้ดังในตารางที่ 2 ตามอุณหภูมิที่ทำการทดสอบลงในโปรแกรมการทดสอบหาค่าโมดูลัสกึ่งตัว (Resilient Modulus)
- 6) เก็บ Water Content หลังการทดสอบหาค่าโมดูลัสกึ่งตัว (Resilient Modulus)

ตารางที่ 2 ค่า Poisson's ratio ที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (° C)	Poisson's ratio (V)
5	0.30
25	0.35
40	0.40

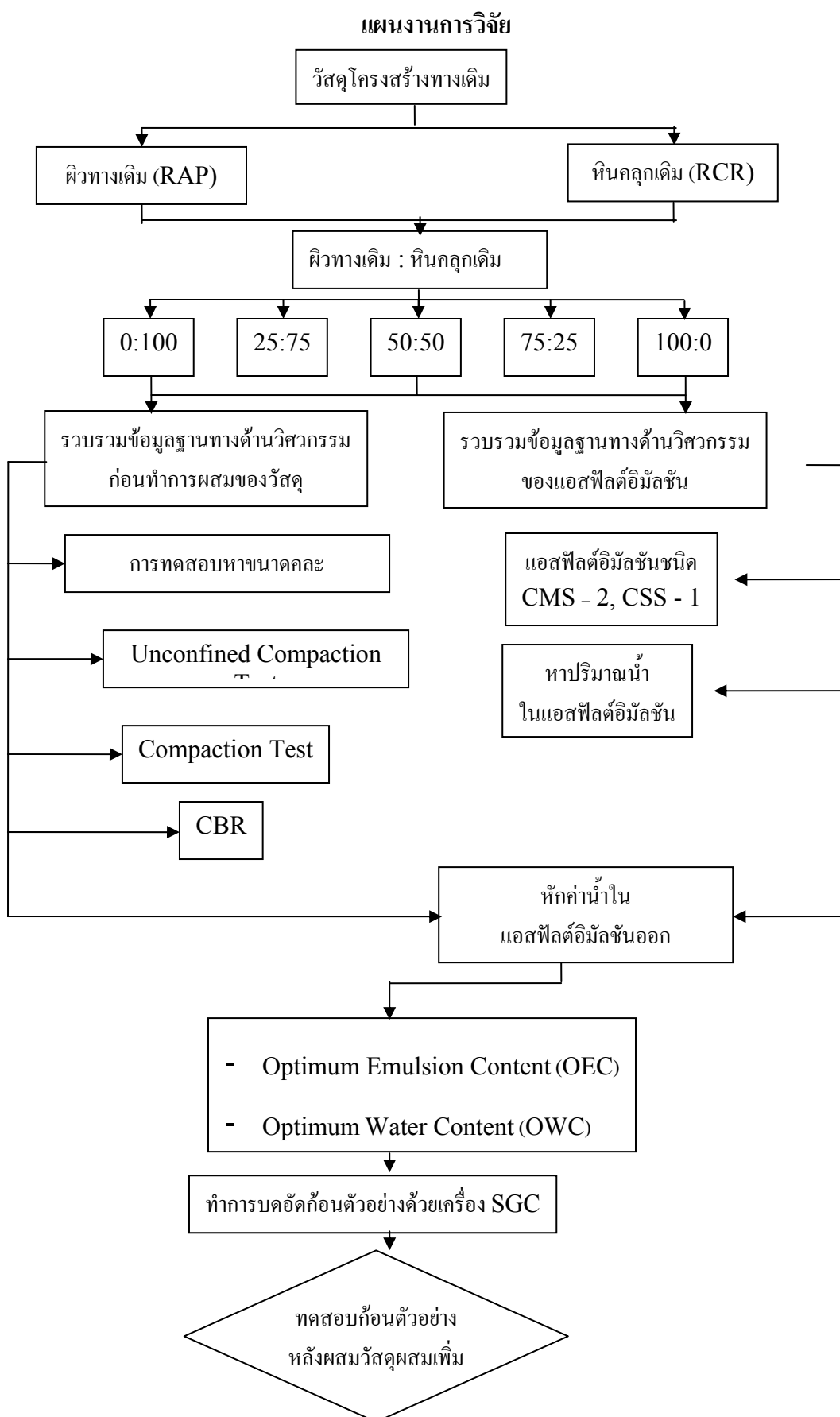
ที่มา: University of New Mexico (2003)

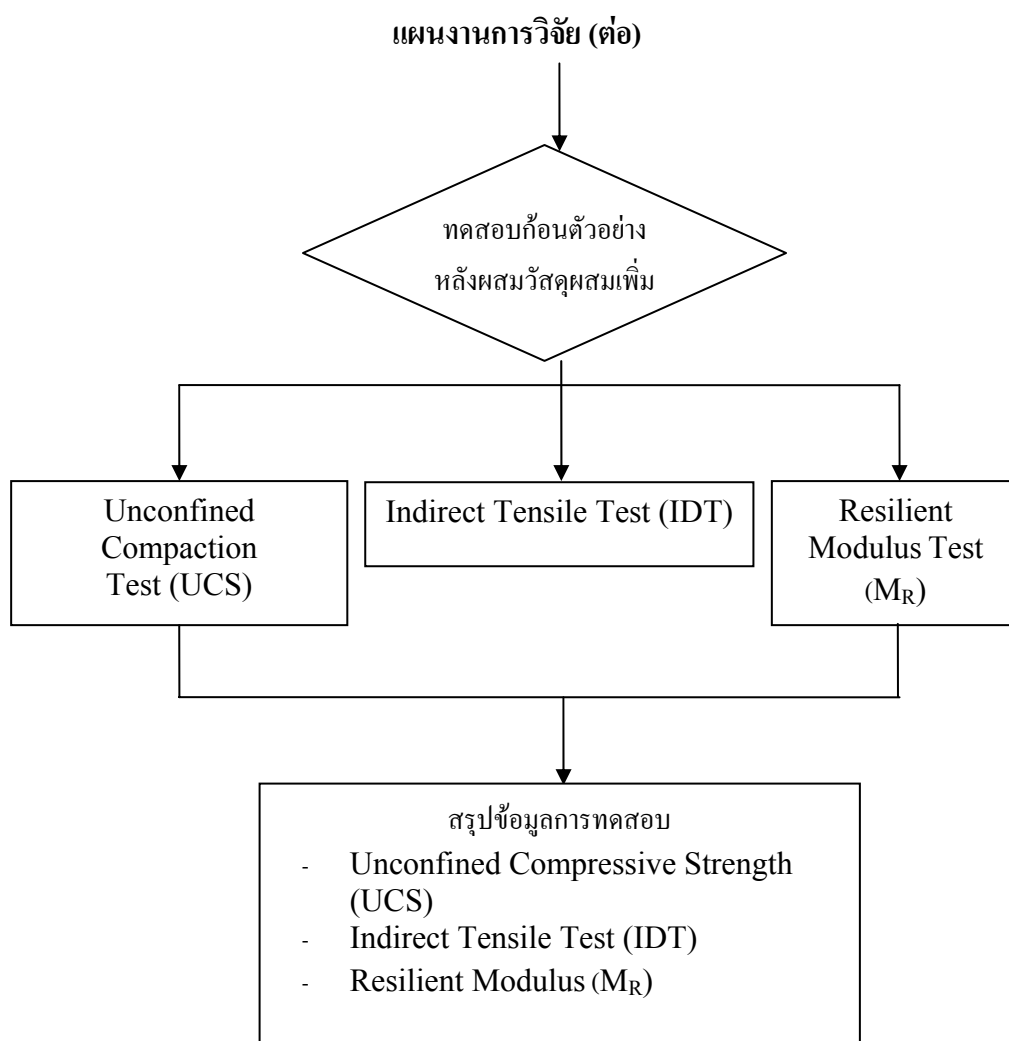


ภาพที่ 24 เครื่องมือ UTM-5P



ภาพที่ 25 การติดตั้งก่อนตัวอย่างก่อนทดสอบ Resilient Modulus (M_R)





ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางการออกแบบส่วนผสมของโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่
2. การใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า
3. เป็นแนวทางในการเลือกใช้แอสฟัลต์อิมัลชันในการปรับปรุงคุณสมบัติของโครงสร้างทางเดิมในงานวิศวกรรมทาง ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ
4. เพื่อลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างทางและการใช้ทรัพยากรอย่างประหยัดและคุ้มค่า

แหล่งทุนสนับสนุน

ในงานศึกษาครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากกรมทางหลวงทางด้านวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและบุคลากรผู้ช่วยทดสอบ

ผลและวิจารณ์

1. ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

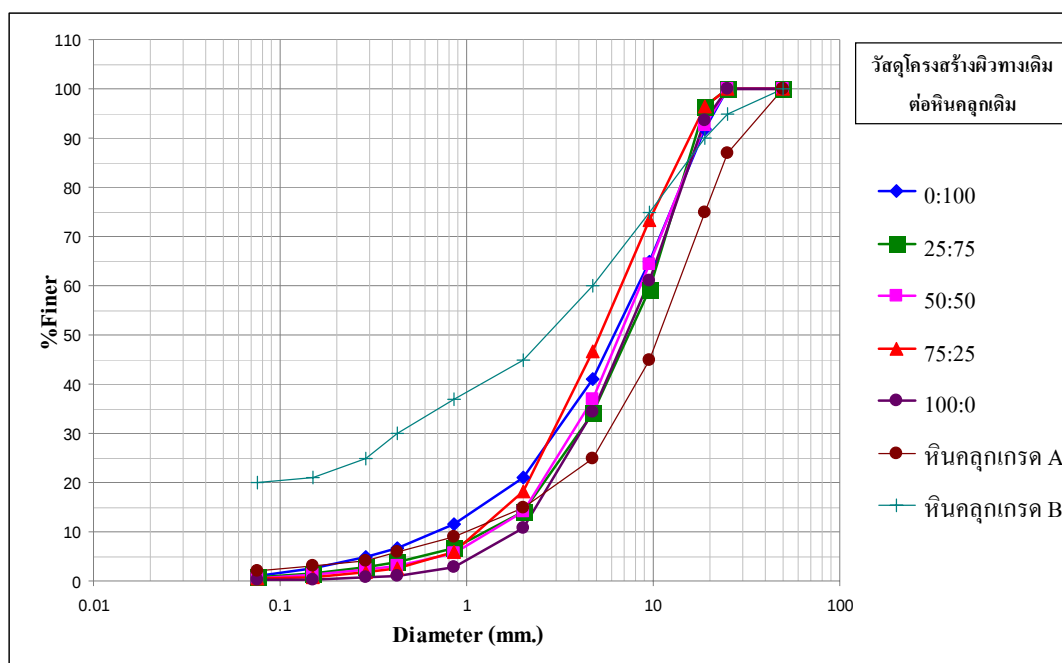
การทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานซึ่งวัสดุในการทำวิจัยนี้ได้นำเอาวัสดุโครงสร้างทางเดิมของทางหลวงหมายเลข 2 (นครราชสีมา – ชัยภูมิ) มาทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆของแต่ละอัตราส่วน ดังนี้

1.1 การหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 การจำแนกวัสดุมวลรวมตามอัตราส่วนต่างๆ จะเห็นได้ว่าวัสดุหินคลุกเดิมมีขนาดหยาบกว่าวัสดุผิวทางเดิม (RAP) โดยมีค่า Median Diameter (D_{50}) ของหินคลุกเดิมมีขนาด 4.86 มิลลิเมตร วัสดุผิวทางเดิม (RAP) มีขนาด 0.72 มิลลิเมตร และเมื่อนำวัสดุทั้ง 2 ชนิด มารวมกันตามอัตราส่วนที่กำหนดจะเห็นได้ว่ามีค่า Median Diameter (D_{50}) ดังแสดงในตารางที่ 3 การจำแนกวัสดุมวลรวมระหว่างวัสดุผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมตามอัตราส่วนต่างๆ คือ 25:75, 50:50 และ 75:25 มีขนาด 2.92, 2.23 และ 1.73 ตามลำดับ และแสดงขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษาวิจัยไว้ในภาพที่ 25

1.2 การจำแนกประเภทของดิน โดยมีวัสดุมวลรวมทั้งหมด 5 อัตราส่วน โดยใช้วิธีการจำแนกประเภทของดินตามระบบของ AASHTO แสดงในตารางที่ 3 การจำแนกวัสดุมวลรวมตามอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งวัสดุมวลรวมทั้ง 5 ส่วนผสมอยู่ในกลุ่ม A-1-a และจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification อยู่ในกลุ่ม GW

ตารางที่ 3 การจำแนกวัสดุรวมตามอัตราส่วนต่างๆ

การจำแนกประเภทของดิน		วัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม				
		0:100	25:75	50:50	75:25	100:0
การหาขนาดผลโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง						
เบอร์ 2" (50 mm)	(%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
เบอร์ 1" (25 mm)	(%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
เบอร์ 3/4" (19 mm)	(%)	91.7	96.3	92.6	96.4	93.0
เบอร์ 3/8" (9.5 mm)	(%)	64.9	59.1	64.2	73.4	60.9
เบอร์ 4" (4.75 mm)	(%)	41.0	34.0	36.8	46.6	34.2
เบอร์ 10 (2 mm)	(%)	21.0	14.1	14.0	18.1	10.8
เบอร์ 20 (0.85 mm)	(%)	11.5	6.6	5.6	5.9	2.7
เบอร์ 40 (0.425 mm)	(%)	6.7	3.9	3.0	2.6	1.0
เบอร์ 50 (0.29 mm)	(%)	4.8	2.9	2.2	1.7	0.7
เบอร์ 100 (0.15 mm)	(%)	2.5	1.6	1.2	0.8	0.4
เบอร์ 200 (0.075 mm)	(%)	1.1	0.8	0.6	0.4	0.2
Median Diameter (D_{50})	(mm)	4.8	2.9	2.2	1.7	0.7
คุณสมบัติของส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (425 mm) :						
ดัชนีพลาสติก	(PI)	NP	NP	NP	NP	NP
การกระจายของเม็ดดิน						
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u)		11.9	7.5	6.5	5.7	5.1
สัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_c)		1.6	1.3	1.2	1.0	1.0
การจำแนกประเภทของดิน						
AASHTO		A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Unified Soil Classification		GW	GW	GW	GW	GW



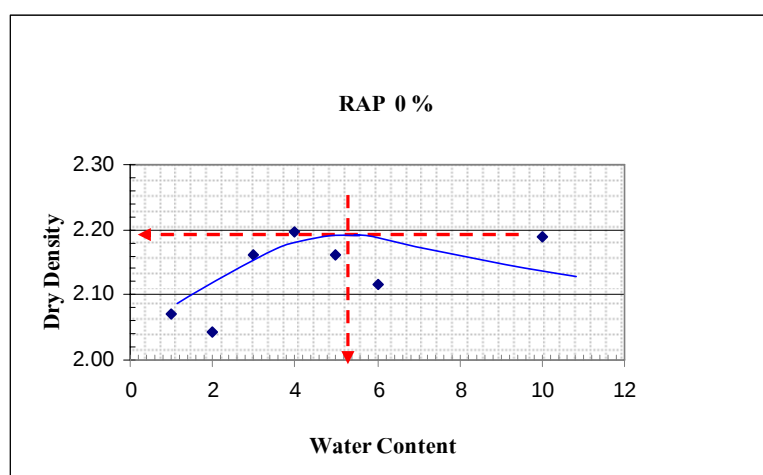
ภาพที่ 26 ขนาดละเอียดของวัสดุรวมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1.3 การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) แสดงในตารางที่ 4 ภาพที่ 26 และภาพที่ 27 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จะเห็นได้ว่าวัสดุรวมผิวทางเดิม ต่อหินคลุกที่ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0 มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดคือ 2.19, 2.10, 2.11, 1.96 และ 1.87 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นลดลง เมื่อมีอัตราส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิม (RAP) เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน ดังนั้นความหนาแน่นของวัสดุส่วนผสมจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและขนาดละเอียดที่เหมาะสมจากเล็กไปหาใหญ่ลดหลั่นกันไปและมีช่องว่างน้อยที่สุด

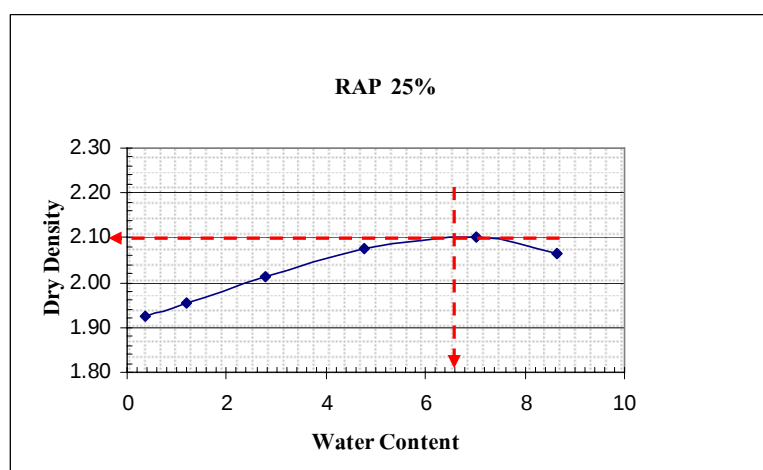
ตารางที่ 4 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

Compaction Test		*RAP:RCR				
		0:100	25:75	50:50	75:25	100:0
Optimum Moisture Content	(%)	5.3	6.6	6.2	5.8	5.6
Maximum Dry Density	(ton/m ³)	2.19	2.1	2.11	1.96	1.87

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

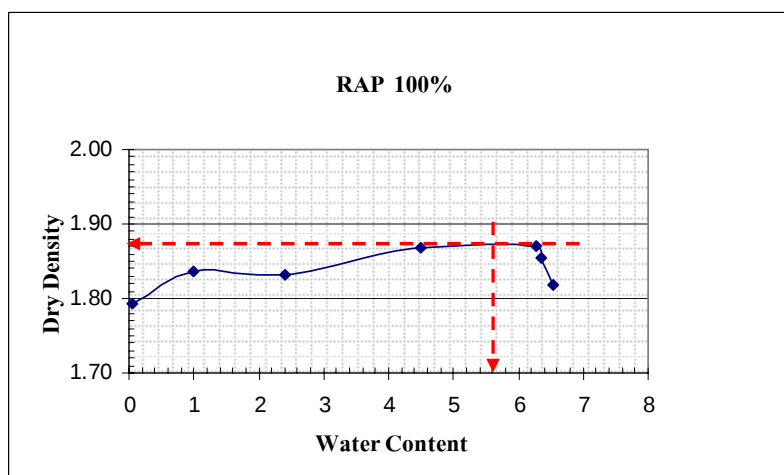
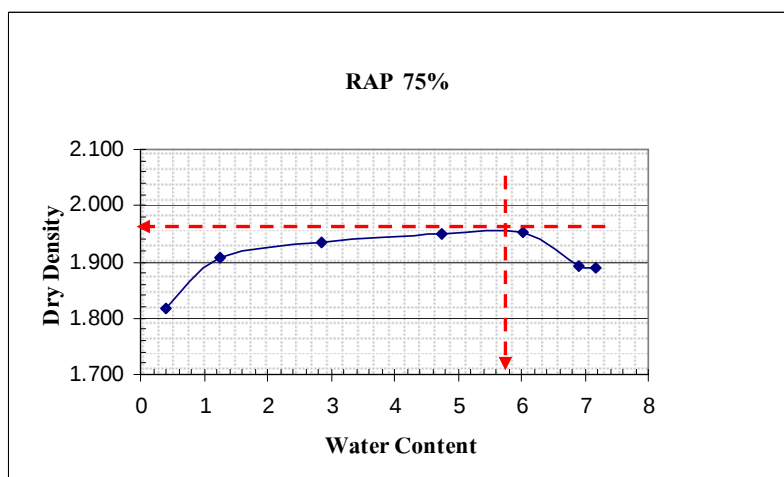
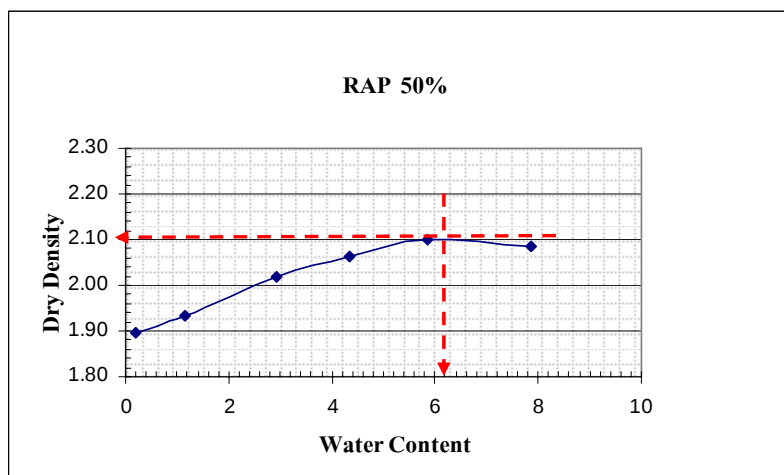


RAP 0%
 OMC = 5.3 %
 MDD = 2.19 ton/m³



RAP 25%
 OMC = 6.6 %
 MDD = 2.1 ton/m³

ภาพที่ 27 กราฟผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของอัตราส่วนผสม 0:100 และ 25:75



ภาพที่ 28 กราฟผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของอัตราส่วนผสม 50:50, 75:25 และ 100:0

1.4 การทดสอบหาค่า CBR โดยการนำเอาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานมาทำการทดสอบหาค่า CBR ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า หินคลุกเดิมที่ค่าความหนาแน่นที่สูงสามารถรับแรงได้มาก

1.5 การทดสอบค่า Unconfined Compression Strength (UCS) ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของวัสดุหินคลุกเดิมสามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าอัตราส่วนที่มีวัสดุผิวทางเดิม (RAP) ผสมเพิ่ม และการทดสอบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการทดสอบหาค่า CBR เมื่อวัสดุหินคลุกเดิมรับแรงได้ดีกว่าวัสดุผิวทางเดิม (RAP) ในการทดสอบวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่อัตราส่วน 100:0 ไม่สามารถทำเป็นก้อนตัวอย่างได้ จึงไม่สามารถทดสอบได้

ตารางที่ 5 การทดสอบ CBR

CBR		*RAP:RCR				
		0:100	25:75	50:50	75:25	100:0
Optimum Moisture Content	(%)	5.3	6.6	6.2	5.8	5.6
Maximum Dry Density	(ton/m ³)	2.19	2.1	2.11	1.96	1.87
Dry Density 95%		2.081	1.995	2.005	1.862	1.777
CBR at 0.1 in		30	15.3	13.5	6.7	4.8
CBR at 0.2 in		35.5	17.8	16.7	9.3	6.4

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

2. ผลการออกแบบส่วนผสมสำหรับการนำวัสดุโครงสร้างผิวทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ชนิดผสมเย็นด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน

2.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำในแอสฟัลต์อิมัลชัน แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 6 ก็จะทราบว่าในปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 จะมีเปอร์เซ็นต์น้ำอยู่ประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ และ 36.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 6 การทดสอบปริมาณน้ำในแอสฟัลต์อิมัลชัน

Emulsion		CMS-2		CSS-1	
Sample Test		1	2	1	2
Weight. of emulsion	(gm)	200	200	200	200
Weight. of Still	(gm)	2332	3003	2334	3004
Weight. of Still & Sample	(gm)	2532	3203	2534	3204
Weight. of Sample	(gm)	2464	3135	2451	3121
Water & oil	(cc)	64.8	68.8	79	82
Water	(cc)	52	56	71.5	74.5
Water content	(%)	26	28	35.75	37.25
Average	(%)	27		36.5	

2.2 การทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันและปริมาณน้ำที่เหมาะสม

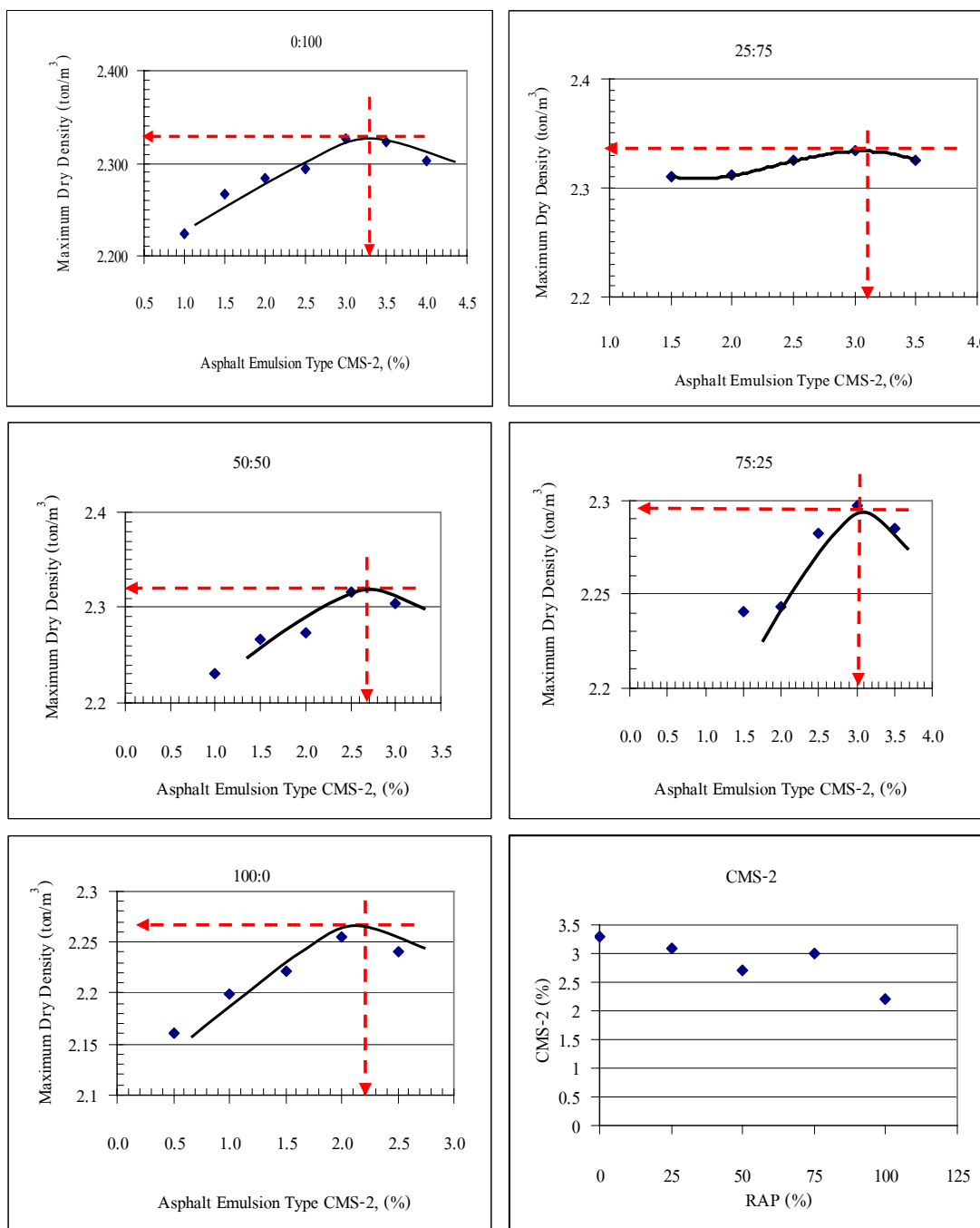
2.2.1 การทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสม

จะแสดงค่าการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสม เมื่อกำหนดค่าปริมาณน้ำที่ 3.0 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุรวมแห้ง ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 7 และแสดงกราฟของการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงในภาพที่ 28 และภาพที่ 29

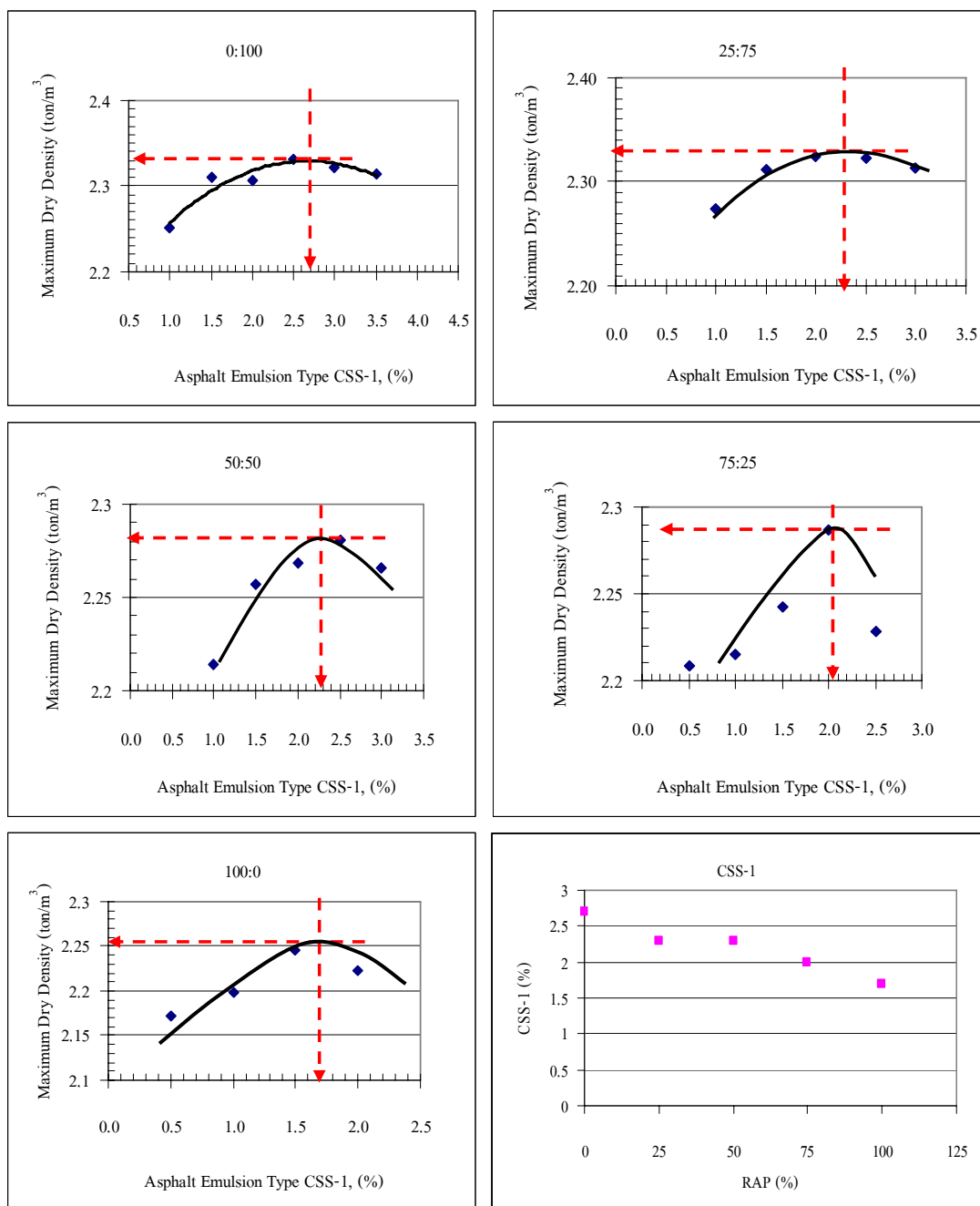
ตารางที่ 7 การทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสม

CMS-2			
*RAP:RCR	Emulsion (%)	Water (%)	Density (ton/m ³)
0:100	3.3	3.0	2.325
25:75	3.1	3.0	2.334
50:50	2.7	3.0	2.315
75:25	3.0	3.0	2.296
100:0	2.2	3.0	2.255
CSS-1			
*RAP:RCR	Emulsion (%)	Water (%)	Density (ton/m ³)
0:100	2.7	3.0	2.322
25:75	2.3	3.0	2.325
50:50	2.3	3.0	2.280
75:25	2.0	3.0	2.286
100:0	1.7	3.0	2.246

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม



ภาพที่ 29 กราฟของการทดสอบปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 ที่เหมาะสม



ภาพที่ 30 กราฟของการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 ที่เหมาะสม

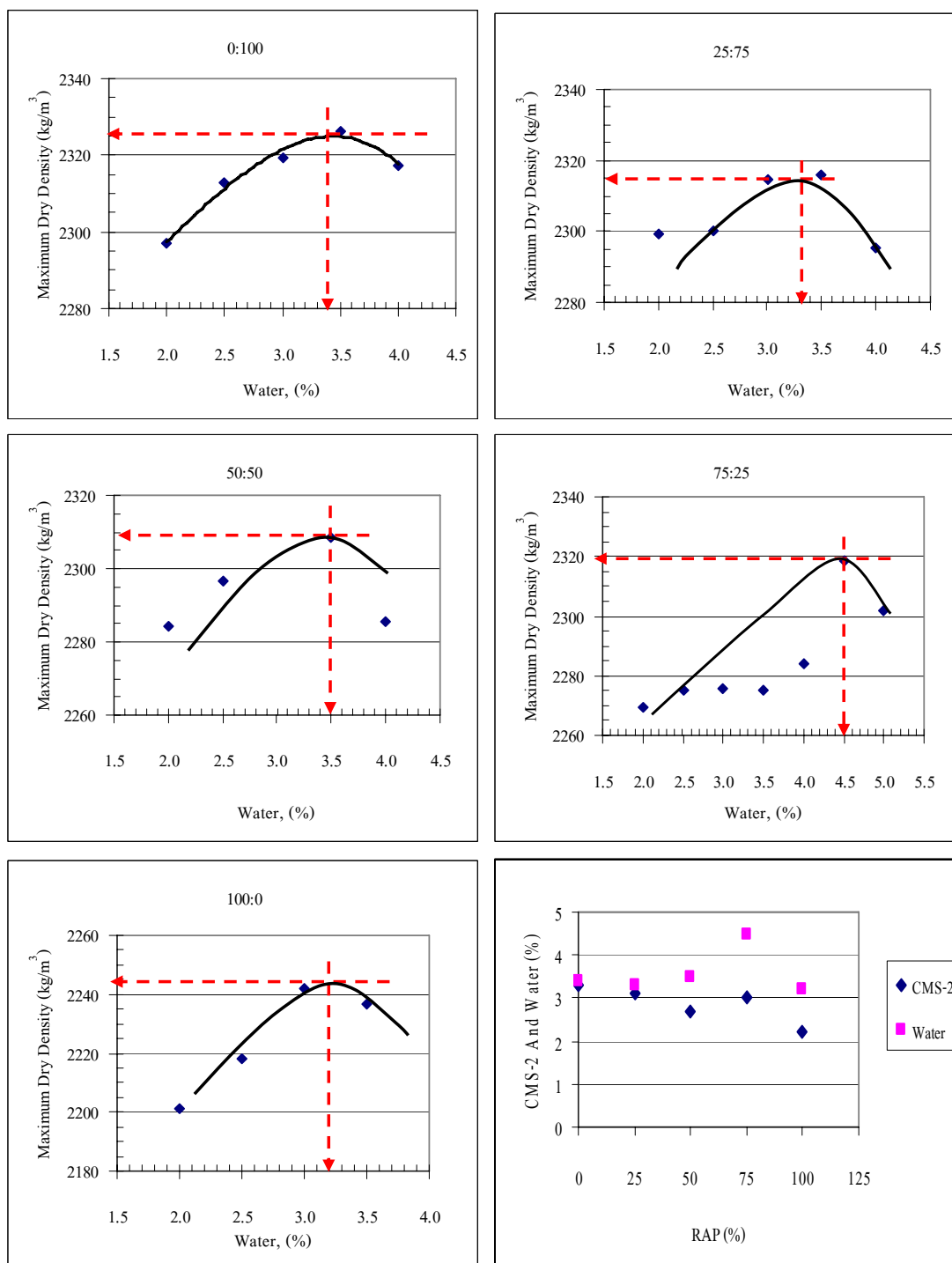
2.2.2 การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม

การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสม ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 8 แสดงค่าการทดสอบปริมาณน้ำและแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสม ในภาพที่ 30 และภาพที่ 31 แสดงกราฟของการทดสอบปริมาณน้ำและแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสม

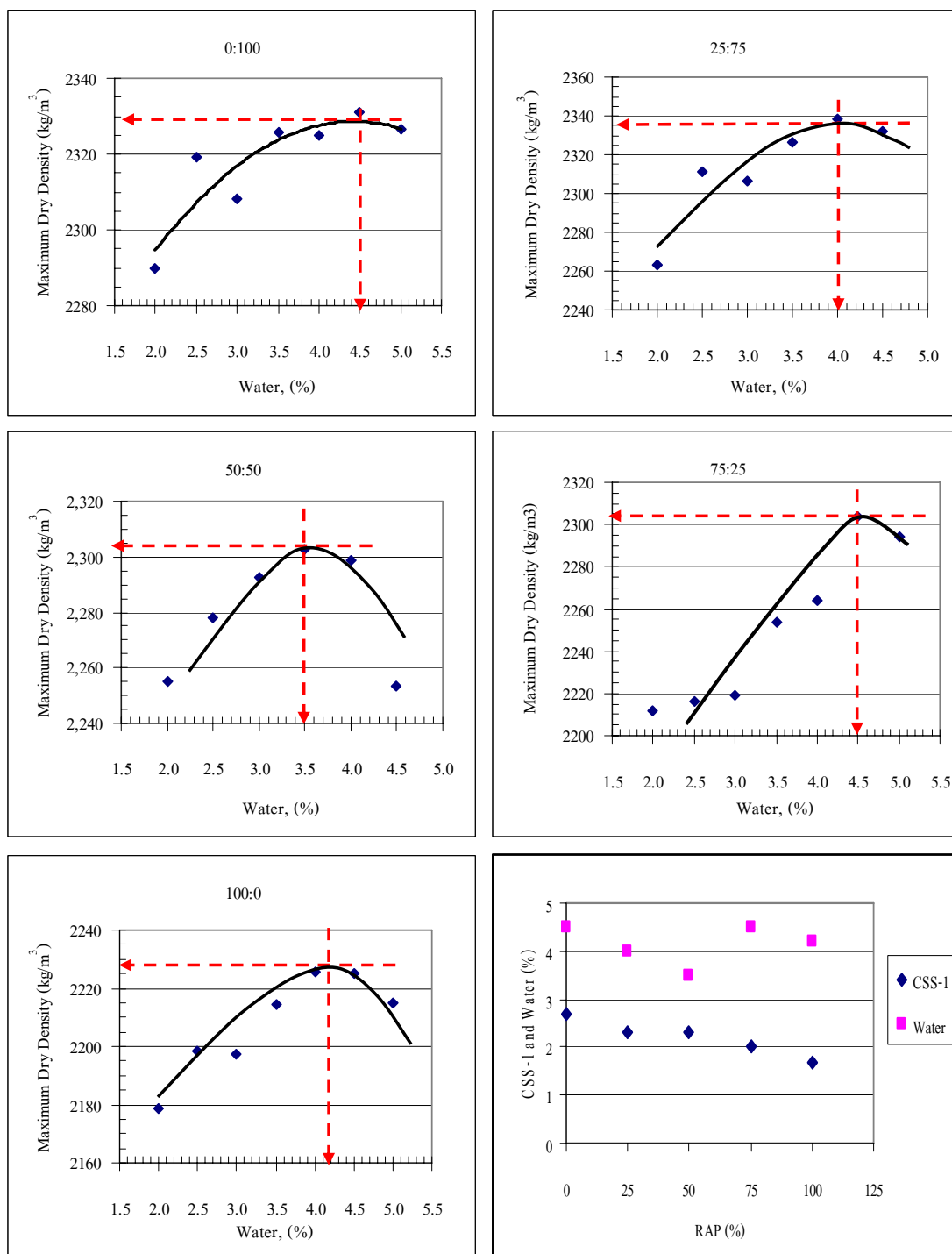
ตารางที่ 8 การทดสอบปริมาณน้ำและแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่เหมาะสมของอัตราส่วนผสมที่กำหนด

CMS-2			
*RAP:RCR	Emulsion (%)	Water (%)	Density (Kg/m ³)
0:100	3.3	3.4	2325
25:75	3.1	3.3	2316
50:50	2.7	3.5	2308
75:25	3	4.5	2318
100:0	2.2	3.2	2240
CSS-1			
*RAP:RCR	Emulsion (%)	Water (%)	Density (Kg/m ³)
0:100	2.7	4.5	2330
25:75	2.3	4	2338
50:50	2.3	3.5	2300
75:25	2	4.5	2308
100:0	1.7	4.2	2225

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม



ภาพที่ 31 กราฟของการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2



ภาพที่ 32 กราฟของการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1

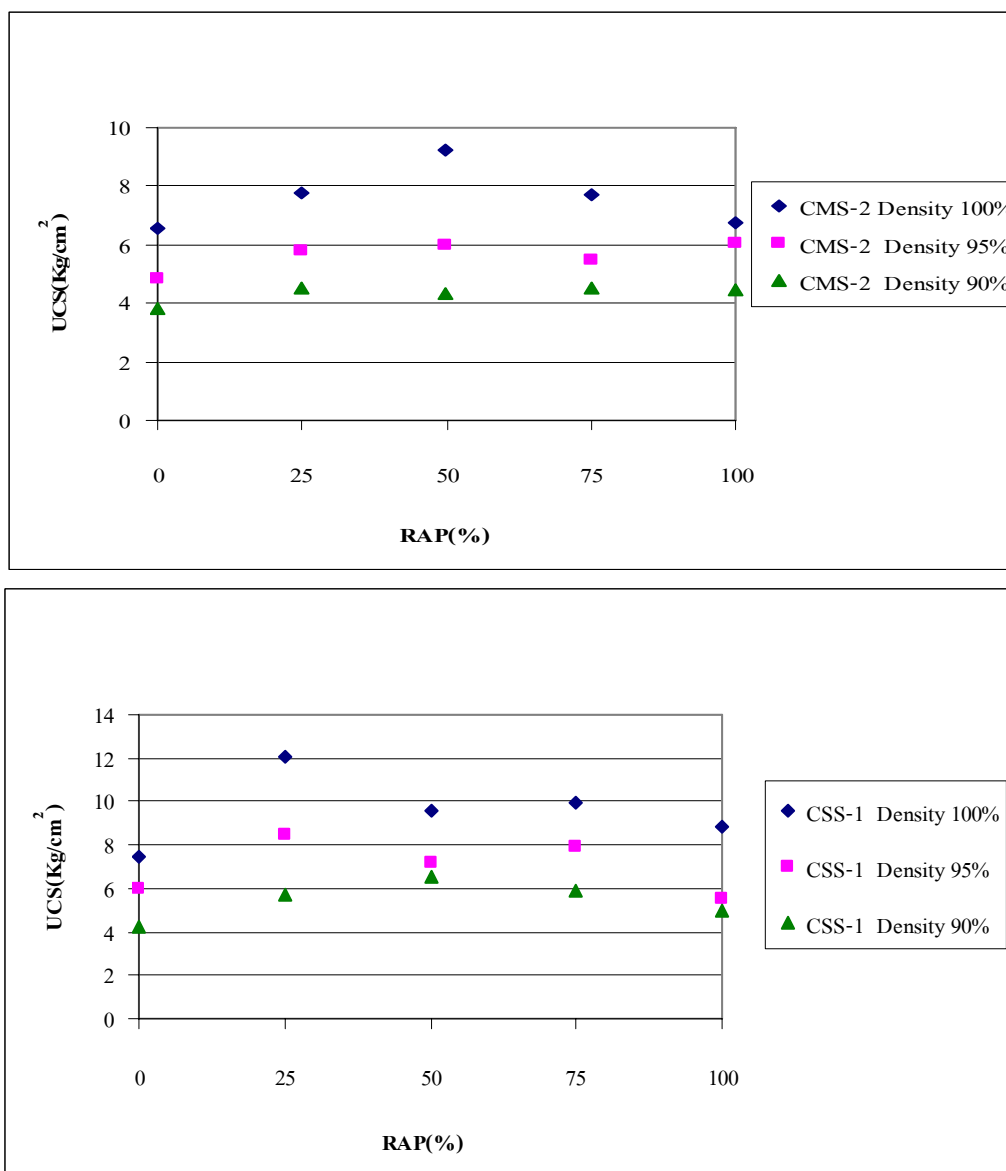
3. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

3.1 การทดสอบค่า Unconfined Compression Strength (UCS) ผลการทดสอบค่า Unconfined Compression Strength (UCS) ของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 มีค่ากำลังต้านทานรับแรงอัดสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมต่อหินคลุกเดิมที่ 50:50 และ 25:75 โดยค่ากำลังต้านทานรับแรงอัดที่มีความหนาแน่น 100 เปอร์เซ็นต์ (Density 100%) เท่ากับ 9.2 และ 12 Kg/cm² ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1

Unconfined Compressive Strength (UCS) (Kg/cm ²)										
CMS-2										
Of Maximum	*RAP:RCR									
Density	0:100		25:75		50:50		75:25		100:0	
(%)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)
100%	535.4	6.5	634.2	7.7	749.7	9.2	626.9	7.7	545.8	6.7
95%	384.1	4.8	467.8	5.7	482.7	5.9	446.9	5.5	488.0	6.0
90%	310.2	3.8	362.6	4.4	352.3	4.3	367.4	4.5	360.7	4.4
CSS-1										
Of Maximum	*RAP:RCR									
Density	0:100		25:75		50:50		75:25		100:0	
(%)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)	Load (Kg)	UCS (Kg/cm ²)
100%	614.0	7.4	981.1	12	775.6	9.5	801.0	9.9	715.5	8.8
95%	481.6	5.9	684.8	8.4	576.4	7.2	636.1	7.8	453.2	5.5
90%	339.7	4.2	459.1	5.6	526.8	6.5	478.7	5.9	400.2	4.9

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม



ภาพที่ 33 กราฟค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS)

3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) ได้ทำการทดสอบวัสดุโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) แบบแช่น้ำ (Soaked) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 และ CSS-1 ผลการทดสอบนั้นแสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 และ CSS-1 ที่มีอัตราส่วนผสมที่กำหนดไว้นั้นโดยมีความหนาแน่น 100 เปอร์เซ็นต์ (Density 100%) จะมีค่าอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุรวมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่เหมาะสมและให้ค่ากำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อมได้ดีคือ 100:0 และ 75:25 โดยมีค่ากำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อมแบบแช่น้ำ (Soaked) และไม่แช่น้ำ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบแช่น้ำ (Soaked)

Indirect Tensile Strength Test (IDT) (Kg/cm ²)						
CMS-2						
*RAP:RCR	Density 100 %		Density 95 %		Density 90%	
	Of Maximum Density		Of Maximum Density		Of Maximum Density	
	Average IDT		Average IDT		Average IDT	
	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT
0:100	163.6	1.3	92.8	0.8	74.8	0.6
25:75	238.1	2.1	194.3	1.6	138.7	1.1
50:50	267.6	2.2	217.8	1.8	154.9	1.3
75:25	219.0	1.8	181.7	1.5	160.3	1.3
100:0	314.8	2.6	214.3	1.7	188.1	1.4
CSS-1						
*RAP:RCR	Density 100 %		Density 95 %		Density 90%	
	Of Maximum Density		Of Maximum Density		Of Maximum Density	
	Average IDT		Average IDT		Average IDT	
	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT
0:100	274.0	2.2	200.3	1.7	133.0	1.1
25:75	337.3	2.9	242.7	2.0	135.1	1.1
50:50	360.5	3.0	261.4	2.2	161.1	1.3
75:25	386.3	3.2	307.7	2.6	215.7	1.8
100:0	370.6	3.1	262.4	2.2	194.7	1.6

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)

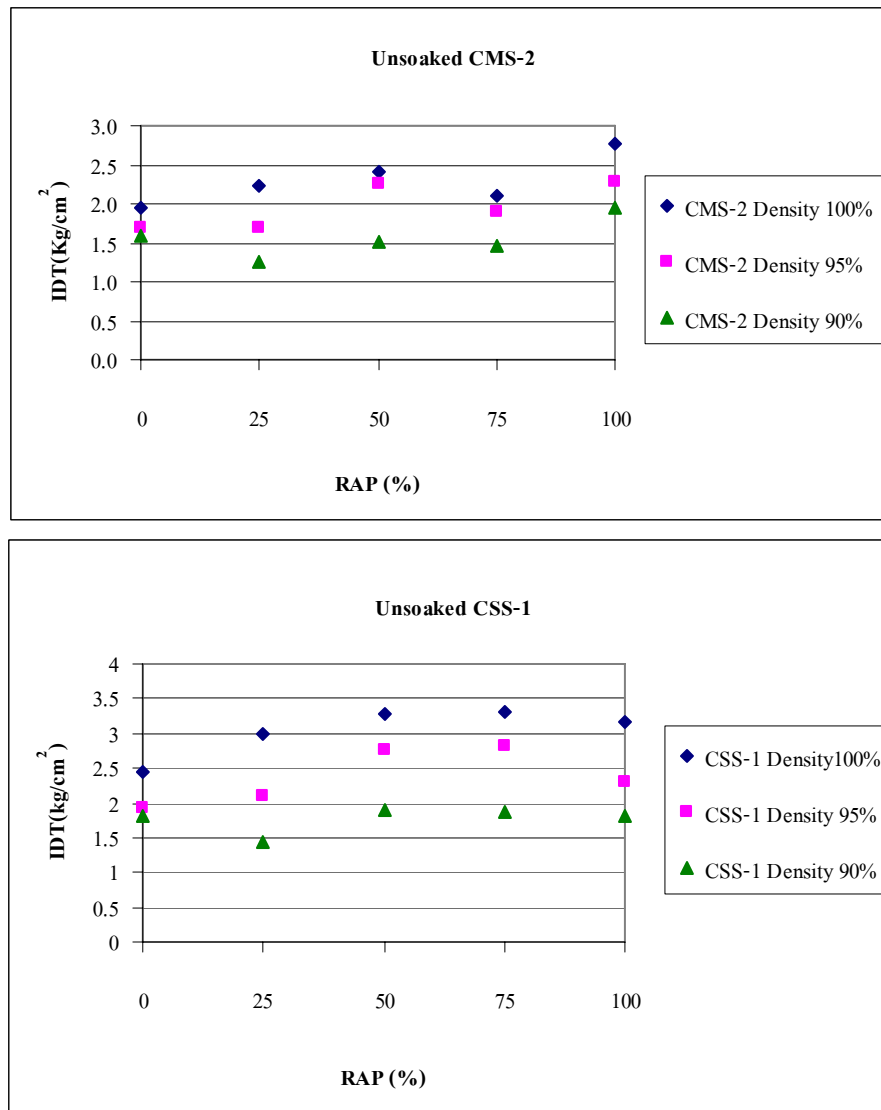
Indirect Tensile Strength Test (IDT) (Kg/cm ²)						
CMS-2						
*RAP:RCR	Density 100 %		Density 95 %		Density 90%	
	Of Maximum Density		Of Maximum Density		Of Maximum Density	
	Average IDT		Average IDT		Average IDT	
	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT
0:100	237.0	1.9	205.2	1.7	190.3	1.6
25:75	270.4	2.2	204.2	1.7	151.8	1.3
50:50	292.7	2.4	269.7	2.3	181.3	1.5
75:25	257.0	2.1	227.8	1.9	169.2	1.4
100:0	332.5	2.8	277.3	2.3	234.7	1.9
CSS-1						
*RAP:RCR	Density 100 %		Density 95 %		Density 90%	
	Of Maximum Density		Of Maximum Density		Of Maximum Density	
	Average IDT		Average IDT		Average IDT	
	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT
0:100	295.9	2.5	231.7	1.9	182.4	1.5
25:75	361.3	3.0	253.6	2.1	176.5	1.4
50:50	384.4	3.2	333.2	2.8	226.5	1.9
75:25	399.2	3.3	339.9	2.8	226.1	1.9
100:0	379.1	3.2	278.5	2.3	217.7	1.8

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

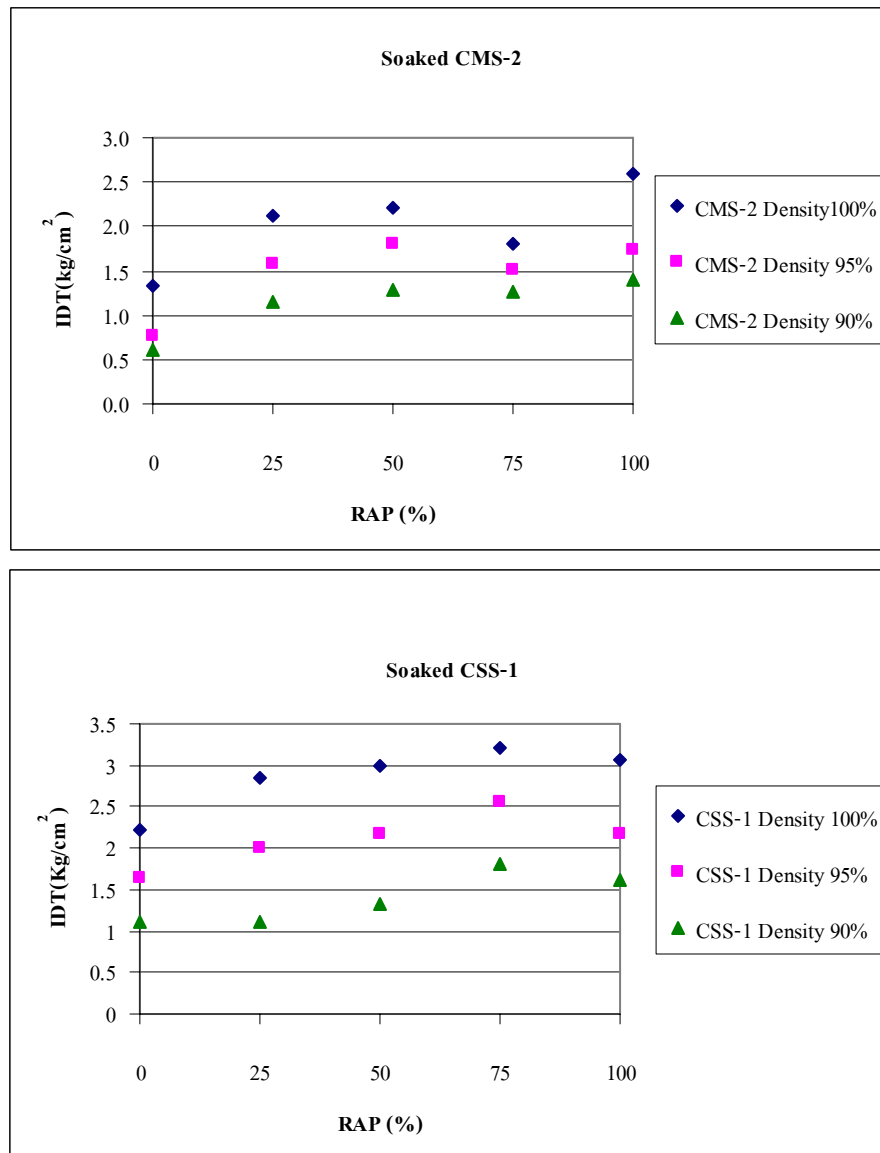
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) ที่อุณหภูมิ 40 °C

Indirect Tensile Strength Test (IDT) (Kg/cm ²)						
CMS-2						
*RAP:RCR	Density 100 % Of Maximum Density		Density 95 % Of Maximum Density		Density 90% Of Maximum Density	
	Average IDT		Average IDT		Average IDT	
	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT
0:100	69.8	0.6	55.6	0.5	37.9	0.3
25:75	79.8	0.7	68.2	0.6	52.4	0.4
50:50	95.7	0.8	72.3	0.6	60.9	0.5
75:25	76.1	0.6	59.0	0.5	42.4	0.4
100:0	103.7	0.9	73.4	0.6	64.2	0.5
CSS-1						
*RAP:RCR	Density 100 % Of Maximum Density		Density 95 % Of Maximum Density		Density 90% Of Maximum Density	
	Average IDT		Average IDT		Average IDT	
	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT	Load (Kg)	IDT
0:100	115.8	1.0	81.4	0.7	48.4	0.4
25:75	105.9	0.9	95.7	0.8	74.8	0.6
50:50	132.4	1.1	95.3	0.8	66.4	0.6
75:25	140.8	1.2	95.5	0.8	66.6	0.6
100:0	113.1	0.9	92.7	0.8	70.7	0.6

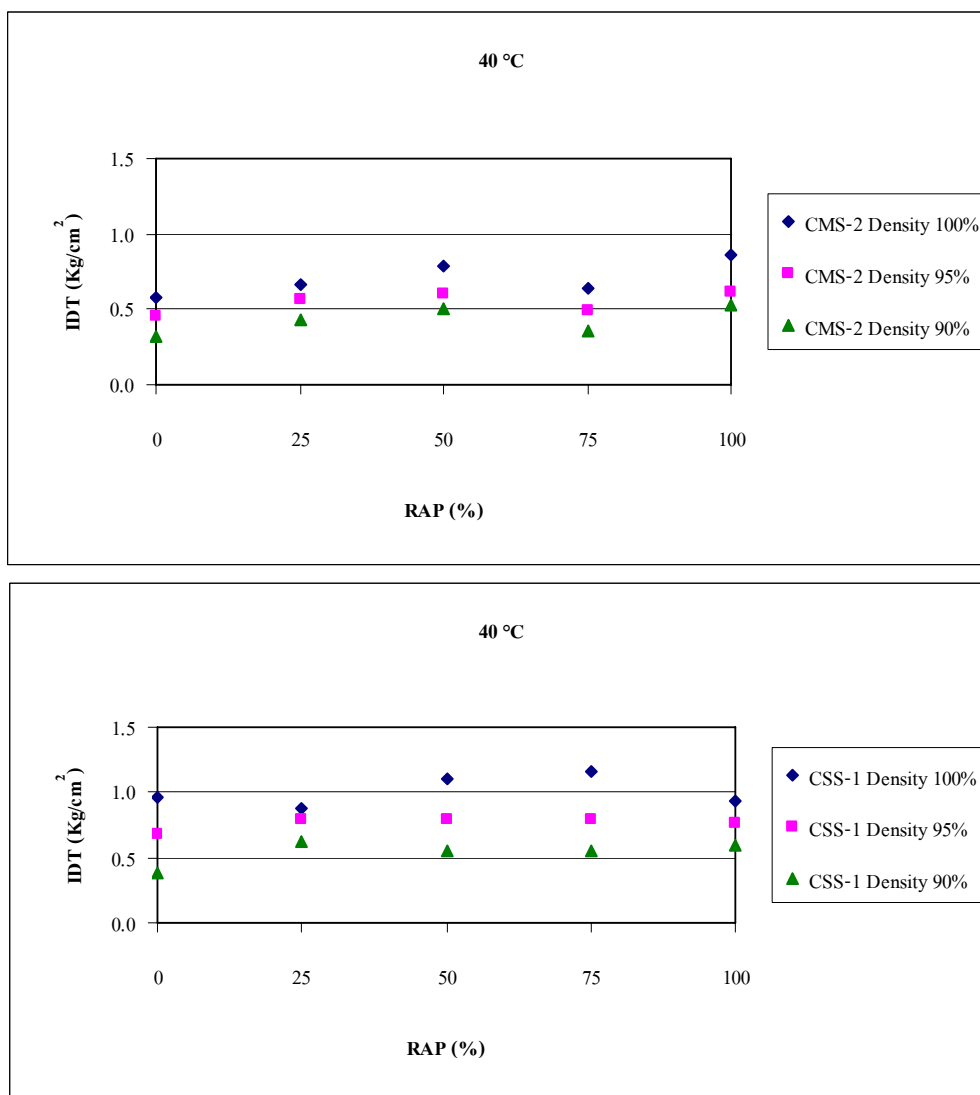
หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม



ภาพที่ 35 กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)



ภาพที่ 36 กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) แบบแช่น้ำ (Soaked)



ภาพที่ 37 กราฟแสดงผลการทดสอบค่า Indirect Tensile Strength Test (IDT) ที่อุณหภูมิ 40 °C

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2

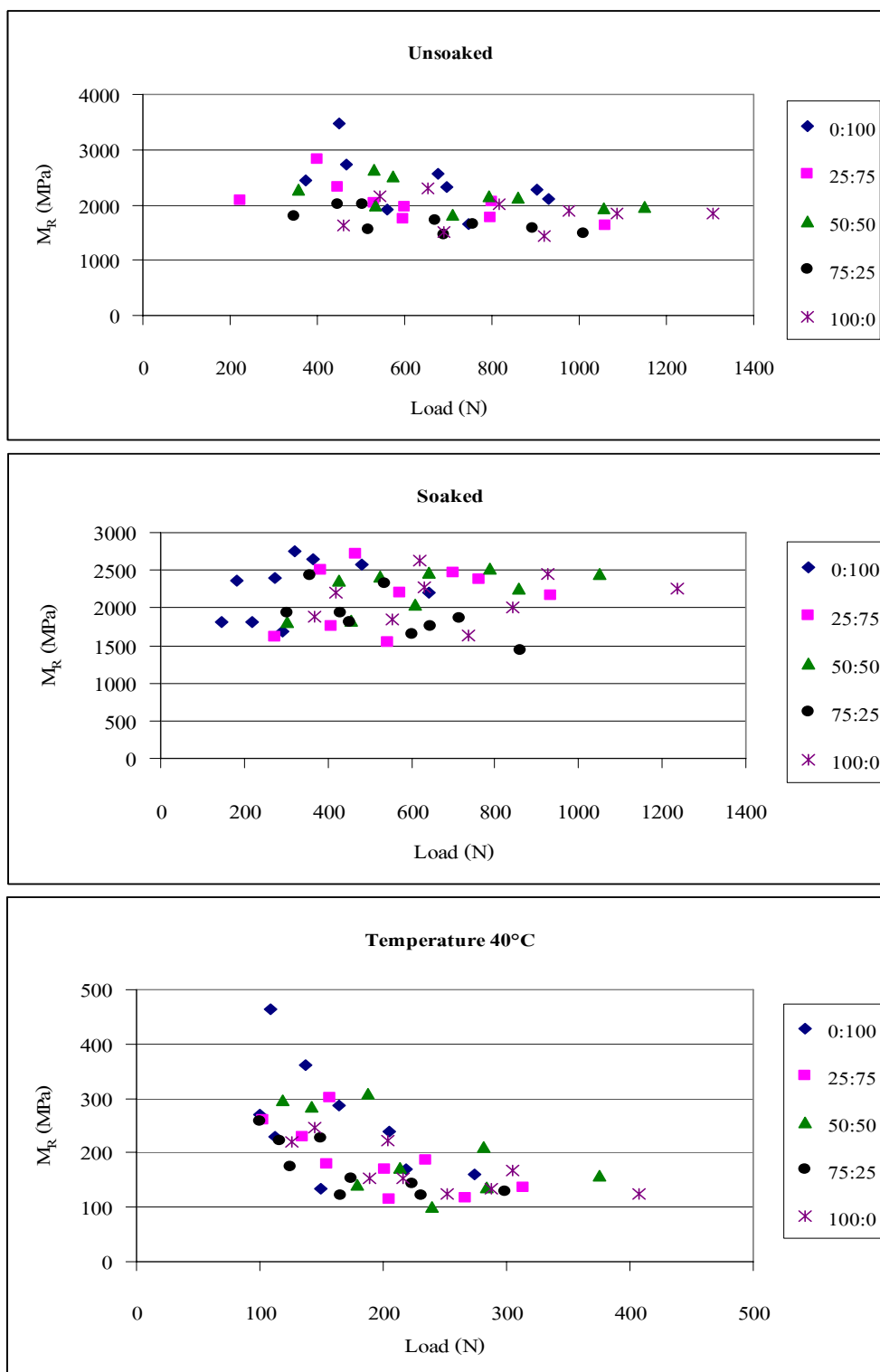
Resilient Modulus (MPa)									
Density 100 % of Maximum Density	Soaked			Unsoaked			Temperature 40 °C		
	Applied Load			Applied Load			Applied Load		
*RAP:RCR	20%	30%	40%	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	2749	2570	2201	2743	2320	2110	362	238	160
25:75	2711	2461	2159	2026	1769	1620	302	187	136
50:50	2406	2522	2458	2504	2129	1970	310	211	159
75:25	1944	1759	1440	2020	1651	1479	227	144	129
100:0	2627	2456	2262	2289	1889	1838	223	168	125
Density 95 % of Maximum Density	Soaked			Unsoaked			Temperature 40 °C		
	Applied Load			Applied Load			Applied Load		
*RAP:RCR	20%	30%	40%	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	2356	2394	2651	3477	2573	2264	465	288	169
25:75	2502	2203	2371	2823	1962	2083	229	171	118
50:50	2358	2469	2250	2639	2156	1947	284	173	136
75:25	2433	2333	1872	2010	1730	1581	223	153	123
100:0	2194	2277	2000	2146	2008	1845	247	154	133
Density 90 % of Maximum Density	Soaked			Unsoaked			Temperature 40 °C		
	Applied Load			Applied Load			Applied Load		
*RAP:RCR	20%	30%	40%	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	1806	1809	1687	2452	1925	1654	271	230	135
25:75	1616	1758	1547	2083	2312	1751	261	180	115
50:50	1805	1837	2048	2265	1999	1828	297	142	101
75:25	1942	1819	1659	1805	1568	1471	259	174	123
100:0	1883	1849	1631	1619	1510	1441	221	154	124

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

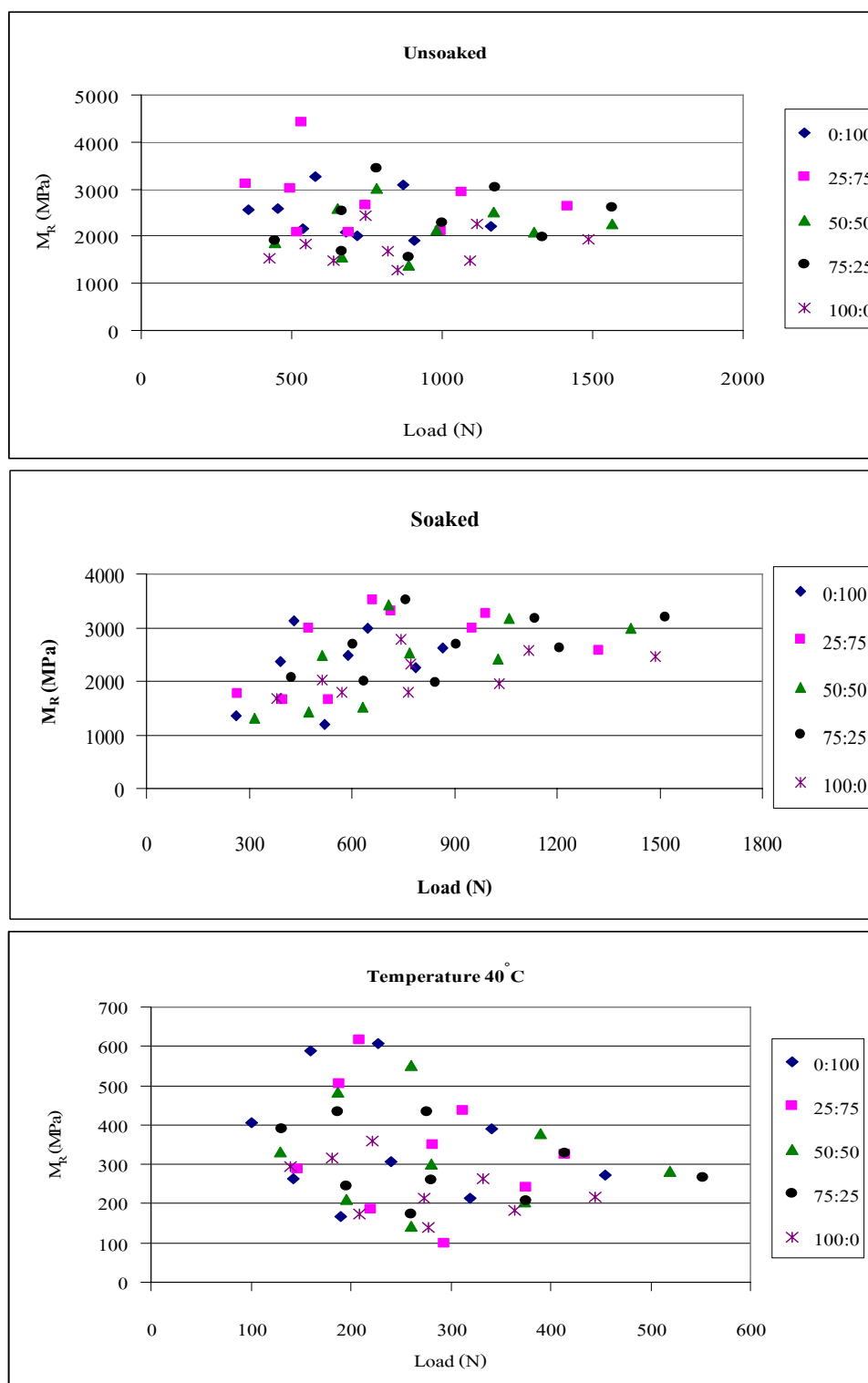
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1

Resilient Modulus, MPa									
Density 100 %	Soaked			Unsoaked			Temperature 40 °C		
of Maximum Density	Applied Load			Applied Load			Applied Load		
*RAP:RCR	20%	30%	40%	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	3131	2997	2612	3276	3089	2217	607	389	274
25:75	3522	3260	2570	4411	2938	2644	618	439	324
50:50	3417	3163	2979	3004	2506	2253	550	379	283
75:25	3524	3166	3202	3441	3044	2604	434	329	267
100:0	2778	2575	2458	2449	2262	1927	358	264	218
Density 95 %	Soaked			Unsoaked			Temperature 40 °C		
of Maximum Density	Applied Load			Applied Load			Applied Load		
*RAP:RCR	20%	30%	40%	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	2360	2492	2248	2589	2074	1914	588	306	212
25:75	2998	3305	2998	3025	2666	2123	506	346	243
50:50	2482	2540	2407	2599	2127	2088	484	300	205
75:25	2696	2693	2609	2533	2284	1974	435	260	207
100:0	2027	2316	1950	1828	1678	1475	315	213	184
Density 90 %	Soaked			Unsoaked			Temperature 40 °C		
of Maximum Density	Applied Load			Applied Load			Applied Load		
*RAP:RCR	20%	30%	40%	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	1362	1671	1207	2573	2166	2022	406	262	166
25:75	1761	1654	1651	3105	2094	2081	287	185	100
50:50	1318	1425	1509	1869	1557	1382	331	212	144
75:25	2062	1996	1967	1904	1683	1554	391	245	175
100:0	1667	1786	1789	1533	1471	1289	294	173	140

หมายเหตุ * RAP:RCR หมายถึงวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม



ภาพที่ 38 กราฟแสดงค่าโมดูลัสกันตัวโดยวิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ ไม่แช่น้ำและอุณหภูมิ 40°C ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด



ภาพที่ 39 กราฟแสดงค่าโมดูลัสกันตัวโดยวิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ ไม่แช่น้ำและอุณหภูมิ 40 °C ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการศึกษาวิธีการออกแบบส่วนผสมสำหรับการนำวัสดุโครงสร้างผิวทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ชนิดผสมเย็นด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งในผลการศึกษาได้ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ตามอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมดังนี้คือ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 โดยได้ทำการทดสอบด้วยวิธีการหาค่าความต้านทานแรงอัด การหาค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม และการหาค่าโมดูลัสคืนตัว ทำให้สามารถสรุปผลในการศึกษาได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด ที่มีความหนาแน่นสูงสุดโดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆที่กำหนดของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยได้ดีที่สุดของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 คือ อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 50:50 มีค่ากำลังเท่ากับ 9.2 Kg/cm^2 และแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 คือ 25:75 มีค่ากำลังเท่ากับ 12.0 Kg/cm^2 จากผลการทดสอบทำให้แสดงให้เห็นว่าขนาดกะของวัสดุมีผลต่อการรับกำลังต่างๆ

2. ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม โดยวิธีการทดสอบเป็นแบบแช่น้ำไม่แช่น้ำ และที่อุณหภูมิ 40°C ที่มีความหนาแน่นสูงสุดโดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆที่กำหนดของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 พบว่าที่อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 100:0 มีค่ากำลังต้านทานแรงดึงทางอ้อมเฉลี่ยได้ดีที่สุดคือมีค่ากำลังเท่ากับ 2.6, 2.7 และ 0.8 Kg/cm^2 ตามลำดับและแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 พบว่าที่อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 75:25 มีค่ากำลังเท่ากับ 3.2, 3.3 และ 1.1 Kg/cm^2 ตามลำดับในการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าน้ำและอุณหภูมิในการทดสอบมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุก่อนตัวอย่างที่ผสมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน

3. ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว ที่มีความหนาแน่นสูงสุดโดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆที่กำหนดของแอสฟัลต์อิมัลชัน พบว่าแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือวัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 100:0 และ 75:25 ตามลำดับมีค่าโมดูลัส

คืนตัวเฉลี่ย ซึ่งให้น้ำหนัก (Load) ที่ 20, 30 และ 40 เปอร์เซนต์ของค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมในแต่ละอัตราส่วนผสม โดยวิธีการทดสอบแบบแช่น้ำของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 ที่อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 100:0 มีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 2627, 2456 และ 2262 MPa แบบไม่แช่น้ำมีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 2289, 1889 และ 1838 MPa วิธีการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C มีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 223, 168 และ 125 MPa ตามลำดับ และแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 ที่อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม 75:25 มีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 3524, 3166 และ 3202 MPa วิธีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำมีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 3441, 3044 และ 2604 MPa วิธีการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C มีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 434, 329 และ 267 MPa ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องเป็นอุณหภูมิ 40 °C ทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสคืนตัว โดยค่าความแข็งแรงของวัสดุลดลงเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น

4. ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุก่อนตัวอย่างที่ทดสอบจะลดลงเมื่อน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงขึ้น

5. ความหนาแน่นและอุณหภูมิในการทดสอบของก้อนตัวอย่าง มีผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัว

6. ผลการทดสอบนั้นชี้ให้เห็นว่าวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 ดีกว่าวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2

7. จากผลการทดสอบวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ 100:0 และที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ 75:25

ข้อเสนอแนะ

1. ในการดักวัสดุแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่าง ๆ นั้น ควรจะให้มีความหนาของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแตกต่างกันเท่าๆกัน

2. ควรใช้แอสฟัลต์อิมัลชันที่บรรจุอยู่ในกระป๋องขนาดไม่ควรเกิน 5 ลิตร เพื่อความสะดวกในการทำงานในห้องทดลอง

3. ควรทำการทดสอบค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านอื่นๆ เพิ่มขึ้นด้วย เช่น การทดสอบเพื่อทราบคุณสมบัติความต้านทานการอ่อนล้าของวัสดุต่อไป เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้เป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบเชิงวิเคราะห์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชยธันว์ พรหมสร. 2541. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี **Indirect Tensile Test** เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. รายงานฉบับที่ วพ. 167 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

_____, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศิลาธรรมย์ และวรภัทร เกตุนิติ. 2546. คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (**Indirect Tensile Strength**) และค่าโมดูลัสคืนตัว (**Resilient Modulus**) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย. รายงานฉบับที่ วพ. 204 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, ชยธันว์ พรหมสร, ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศิลาธรรมย์ และวรภัทร เกตุนิติ. 2547. คุณสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์แอสฟัลต์เมื่อประยุกต์ใช้กับวัสดุชั้นทางเก่าของประเทศไทย. รายงานฉบับที่ วพ. 214 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2547ก. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2547ข. ยางมะตอยน้ำ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิไลลักษณ์ สระมูล, พลช ตั้งฐานทรัพย์ และวัลย์รัตน์ บุญไทย. 2548. ปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, กรุงเทพฯ

Anonymous, B. n.d. **Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures ASTM D 4123**. University of New Mexico Civil Engineering Department.

Timothy R. C., O.M. Mihai and B. Arindam. 2003. **Evaluation of Asphalt Binders used for Emulsion**. Final Report, University of Minnesota Department of Civil Engineering, August 2003.

Wirtgen, G. 2004. **Wirtgen Cold Recycling Manual**. Germany.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบทางด้านวิศวกรรมของอัตราส่วนของผิวทางเดิมและหินคลุกเดิม

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบขนาดละเอียดอัตราส่วนผสม 0:100 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง

Sieve Analysis							
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion							
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (0:100)							
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183							
Date : 14/12/50	Weight. Soil	1700 g.			0:100		ไม่ล้าง
Sieve No.	Sieve Opening mm.	Weight. of Sieve gm.	Weight. of Sieve + Soil gm.	Total. Weight. Soil. gm.	Soil Retained gm.	% Soil Retained gm.	% Finer
2"	50	617.7	617.7	1700	0	0	100
1"	25	560.5	560.5	1700	0	0	100.0
3/4"	19	716.1	856.7	1700	140.6	8.3	91.7
3/8"	9.5	549.3	1005.2	1700	455.9	26.8	64.9
4"	4.75	486.6	891.6	1700	405	23.8	41.1
10	2	686.6	1027.0	1700	340.4	20.0	21.0
20	0.85	624.6	787.1	1700	162.5	9.6	11.5
40	0.425	570.5	651.8	1700	81.3	4.8	6.7
50	0.29	548.8	580.5	1700	31.7	1.8	4.9
100	0.15	513.1	553.2	1700	40.1	2.3	2.5
200	0.075	301.4	324.4	1700	23	1.3	1.2
Pan	0	482.5	502.0	1700	19.5	1.1	0.0

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบขนาดผลที่อัตราส่วนผสม 25:75 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง

Sieve Analysis							
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion							
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (25:75)							
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183							
Date : 14/12/50	Weight. Soil	1700 g.	25:75	ไม่ล้าง			
Sieve No.	Sieve Opening mm.	Weight. of Sieve gm.	Weight. of Sieve + Soil gm.	Total. Weight. Soil. gm.	Soil Retained gm.	% Soil Retained gm.	% Finer
2"	50	617.7	617.7	1700	0	0	100
1"	25	560.5	560.5	1700	0	0	100.0
3/4"	19	716.3	778.5	1700	62.2	3.7	96.3
3/8"	9.5	549.2	1181.8	1700	632.6	37.2	59.1
4"	4.75	486.4	913.0	1700	426.6	25.1	34.1
10	2	686.7	1025.9	1700	339.2	19.9	14.1
20	0.85	624.7	751.4	1700	126.7	7.5	6.7
40	0.425	570.5	617.3	1700	46.8	2.7	3.9
50	0.29	548.8	565.8	1700	17	1.0	2.9
100	0.15	513.3	534.9	1700	21.6	1.3	1.6
200	0.075	301.3	315.4	1700	14.1	0.8	0.8
Pan	0	482.4	496.40	1700	14	0.8	0.0

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบขนาดผลที่อัตราส่วนผสม 50:50 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง

Sieve Analysis							
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion							
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (50:50)							
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183							
Date : 14/12/50	Weight. Soil	1700 g.	50:50	ไม่ล้าง			
Sieve No.	Sieve Opening mm.	Weight. of Sieve gm.	Weight. of Sieve + Soil gm.	Total. Weight. Soil. gm.	Soil Retained gm.	% Soil Retained gm.	% Finer
2"	50	617.7	617.7	1700	0	0	100
1"	25	560.5	560.5	1700	0	0	100.0
3/4"	19	716.3	840.7	1700	124.4	7.3	92.7
3/8"	9.5	549.4	1032.1	1700	482.7	28.4	64.3
4"	4.75	486.4	952.7	1700	466.3	27.4	36.8
10	2	686.5	1074.0	1700	387.5	22.8	14.0
20	0.85	624.5	766.7	1700	142.2	8.4	5.7
40	0.425	570.5	614.7	1700	44.2	2.6	3.0
50	0.29	548.8	563.0	1700	14.2	0.8	2.2
100	0.15	513.3	530.6	1700	17.3	1.0	1.2
200	0.075	301.3	311.9	1700	10.6	0.6	0.6
Pan	0	482.4	492.40	1700	10	0.6	0.0

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบขนาดละเอียดอัตราส่วนผสม 75:25 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง

Sieve Analysis							
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion							
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (75:25)							
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183							
Date : 14/12/50	Weight. Soil	1700 g.	75:25		ไม่ล้าง		
Sieve No.	Sieve Opening mm.	Weight. of Sieve gm.	Weight. of Sieve + Soil gm.	Total. Weight. Soil. gm.	Soil Retained gm.	% Soil Retained gm.	% Finer
2"	50	617.7	617.7	1700	0	0	100
1"	25	560.5	560.5	1700	0	0	100.0
3/4"	19	716.1	776.7	1700	60.6	3.6	96.4
3/8"	9.5	549.7	940.4	1700	390.7	23.0	73.4
4"	4.75	486.5	941.6	1700	455.1	26.8	46.7
10	2	686.7	1171.8	1700	485.1	28.5	18.1
20	0.85	624.6	830.8	1700	206.2	12.1	6.0
40	0.425	570.6	627.8	1700	57.2	3.4	2.6
50	0.29	548.7	563.8	1700	15.1	0.9	1.7
100	0.15	513.2	528.3	1700	15.1	0.9	0.8
200	0.075	301.3	308.8	1700	7.5	0.4	0.4
Pan	0	482.4	489.20	1700	6.8	0.4	0.0

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบขนาดผลที่อัตราส่วนผสม 100:0 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง

Sieve Analysis							
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion							
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (100:0)							
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183							
Date : 14/12/50	Weight. Soil	1700 g.		100:0			ไม่ล้าง
Sieve No.	Sieve Opening mm.	Weight. of Sieve gm.	Weight. of Sieve+Soil gm.	Total. Weight. Soil. gm.	Soil Retained gm.	% Soil Retained gm.	% Finer
2"	50	617.7	617.7	1700	0	0	100
1"	25	560.5	560.5	1700	0	0	100.0
3/4"	19	716.2	825.1	1700	108.9	6.4	93.6
3/8"	9.5	549.3	1105.4	1700	556.1	32.7	60.9
4"	4.75	486.3	939.2	1700	452.9	26.6	34.3
10	2	686.6	1085.8	1700	399.2	23.5	10.8
20	0.85	624.6	761.7	1700	137.1	8.1	2.7
40	0.425	570.5	598.8	1700	28.3	1.6	1.1
50	0.29	548.6	554.6	1700	6	0.3	0.7
100	0.15	513.2	519.0	1700	5.8	0.3	0.4
200	0.075	301.4	304.9	1700	3.5	0.2	0.2
Pan	0	482.3	485.20	1700	2.9	0.2	0.0

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบ Bulk Specific Gravity ของอัตราส่วนผสมต่างๆ โดยกำหนดน้ำ 3.0 เปอร์เซ็นต์

Water 3.0%										
*RAP:RCR	0:100		25:75		50:50		75:25		100:0	
Emulsion Type CMS-2, (%)	3.0	3.5	3	3.5	2.5	3	3	3.5	2.0	2.5
Dry Mass (A), (gm)	4088.6	4136.6	4117.2	4148.8	4106.5	4115.2	4098.1	4147.3	3925.4	3940.1
Immersed Mass (C), (gm)	2298.8	2333	2328.4	2348.5	2301.5	2305.5	2323.4	2327.4	2223.8	2210.2
Surface-dry Mass (B), (gm)	4111.8	4145.8	4124.2	4155.9	4132.9	4137	4111.1	4160.1	3950.8	3952.8
$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$	2.255	2.282	2.293	2.295	2.242	2.247	2.292	2.263	2.273	2.261
$\% W .ab .by .Volume = \frac{B - A}{B - C} \times 100$	1.3	0.5	0.4	0.4	1.4	1.2	0.7	0.7	1.5	0.7
RAP:RCR	0:100		25:75		50:50		75:25		100:0	
Emulsion Type CSS-1, (%)	2.5	3.0	2.0	2.5	2.0	2.5	1.5	2.0	1.5	2.0
Dry Mass (A), (gm)	4156.7	4170.9	4101.1	4121.9	4076	4121.8	4097	4131.5	3865.9	3940
Immersed Mass (C), (gm)	2360.6	2341.3	2319.4	2340.9	2293.5	2332.8	2295.9	2319.1	2170.3	2205
Surface-dry Mass (B), (gm)	4163.6	4183	4108.6	4139.6	4105.5	4149	4125	4142.3	3899.1	3966.9
$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$	2.305	2.265	2.292	2.292	2.249	2.269	2.240	2.266	2.236	2.236
$\% W .ab .by .Volume = \frac{B - A}{B - C} \times 100$	0.4	0.7	0.4	1.0	1.6	1.5	1.5	0.6	1.9	1.5

หมายเหตุ *RAP:RCR = อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดสอบ Bulk Specific Gravity ของอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่กำหนดแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2

CMS-2										
*RAP:RCR	0:100		25:75		50:50		75:25		100:0	
Emulsion Type CMS-2, (%)	(3.3%)		(3.1%)		(2.7%)		(3%)		(2.2%)	
Water, (%)	3.0	3.5	3.0	3.5	3.5	4.0	4.0	4.5	3.0	3.5
Dry Mass (A), (gm)	4166.5	4142.9	4161.2	4144.6	4116.8	4134.2	4130.2	4145.1	4092.6	4099.1
Immersed Mass (C), (gm)	2361.5	2358.4	2359.6	2343.4	2333.7	2340.9	2334.7	2355.4	2303.8	2295.8
Surface-dry Mass (B), (gm)	4190.8	4168.4	4193.3	4171.7	4140.4	4166.2	4156.5	4170.4	4124.8	4129.8
$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$	2.278	2.289	2.269	2.267	2.279	2.265	2.267	2.284	2.247	2.235
$\% W .ab .by .Volume = \frac{B - A}{B - C} \times 100$	1.3	1.4	1.7	1.5	1.3	1.7	1.4	1.4	1.8	1.7

หมายเหตุ *RAP:RCR = อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

ตารางผนวกที่ ก8 ผลการทดสอบ Bulk Specific Gravity ของอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่กำหนดแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1

CSS-1										
RAP:RCR	0:100		25:75		50:50		75:25		100:0	
Emulsion Type CSS-1, (%)	(2.7%)		(2.3%)		(2.3%)		(2%)		(1.7%)	
Water, (%)	4.0	4.5	3.5	4	3.0	3.5	4	4.5	4.0	4.5
Dry Mass (A), (gm)	4089.5	4112.5	4089.9	4127.7	4150.3	4135.7	4134.7	4113.2	4158.5	4113.5
Immersed Mass (C), (gm)	2325.3	2324.4	2318.2	2335.4	2356.7	2347.3	2331.4	2334	2332.5	2311.4
Surface-dry Mass (B), (gm)	4107.7	4141.2	4109	4147.2	4178	4164.7	4169.4	4143.8	4190.1	4149.1
$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$	2.294	2.264	2.284	2.278	2.279	2.276	2.250	2.273	2.239	2.238
$\% W .ab .by .Volume = \frac{B - A}{B - C} \times 100$	1.0	1.6	1.1	1.1	1.5	1.6	1.9	1.7	1.7	1.9

หมายเหตุ *RAP:RCR = อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม

**ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่าง
วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 0:100**

Modified Compaction Test							
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion							
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (100:0)							
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183							
Date : 25/08/2550	Mold Weight. 4978.0 gm			Vol. of Mold		954.62	cm ³
Water Content Determination							
Trial No.	1	2	3	4	5	6	7
Can No.	Y5	Y12	Y3	19	J	Y8	Y11
Weight. of							
Wet Soil + Can (gm)	402.7	380.8	376.1	394.1	239.1	355.6	458.6
Weight. of							
Dry Soil + Can (gm)	400.0	375.8	364.9	378.1	225.1	327.8	424.8
Weight. of Can (gm)	36.5	36.2	36.1	22.7	16.3	23.4	36.4
Weight. of Water (gm)	2.7	5	11.2	16	14	27.8	33.8
Weight. of							
Dry Soil (gm)	363.5	339.6	328.8	355.4	208.8	304.4	388.4
Water Content (%)	0.743	1.472	3.406	4.502	6.705	9.133	8.702
Density Determination							
Test	1	2	3	4	5	6	7
Assumed of							
Water Content (%)	0	1	3	5	7	9	11
Weight. of							
Wet Soil + Mold (gm)	6969.1	6957.6	7110.4	7147.5	7157.6	7162.3	7174.3
Weight. of Mold (gm)	4978.0	4978.0	4978.0	4947.0	4947.0	4947.0	4978.0
Weight. of Wet Soil (gm)	1991.1	1979.6	2132.4	2200.5	2210.6	2215.3	2196.3
Wet Density (gm/cm ³)	2.086	2.074	2.234	2.294	2.305	2.310	2.301
Dry Density (gm/cm ³)	2.070	2.044	2.160	2.196	2.160	2.117	2.117

**ตารางผนวกที่ ก10 ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่าง
วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 25:75**

Modified Compaction Test						
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion						
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (25:75)						
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183						
Date : 25/08/2550	Mold Weight. 4980.2 gm			Vol. of Mold	949.42	cm ³
Water Content Determination						
Trial No.	1	2	3	4	5	6
Can No.	Y15	Y5	Y3	I	G	Y22
Weight. of Wet Soil + Can (gm)	437.6	372.9	364.1	267.2	313.6	444.7
Weight. of Dry Soil + Can (gm)	436.1	368.9	355.2	255.7	293.9	412.2
Weight. of Can (gm)	36.5	36.7	36.1	15	13.8	36.2
Weight. of Water (gm)	1.5	4	8.9	11.5	19.7	32.5
Weight. of Dry Soil (gm)	399.6	332.2	319.1	240.7	280.1	376
Water Content (%)	0.375	1.204	2.789	4.778	7.033	8.644
Density Determination						
Test	1	2	3	4	5	6
Assumed of Water Content (%)	0	1	3	5	7	9
Weight. of Wet Soil + Mold (gm)	6813.7	6857.1	6943.6	7033.1	7104.2	7110.5
Weight. of Mold (gm)	4980.2	4980.2	4980.2	4947.0	4947.0	4980.2
Weight. of Wet Soil (gm)	1833.5	1876.9	1963.4	2086.1	2157.2	2130.3
Wet Density (gm/cm ³)	1.931	1.977	2.068	2.175	2.249	2.244
Dry Density (gm/cm ³)	1.924	1.953	2.012	2.076	2.101	2.065

**ตารางผนวกที่ ก11 ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่าง
วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 50:50**

Modified Compaction Test						
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion						
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (50:50)						
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183						
Date : 25/08/2550	Mold Weight.	4944.1	gm	Vol. of Mold	954.62	cm ³
Water Content Determination						
Trial No.	1	2	3	4	5	6
Can No.	Y12	Y8	Y11	Y4	Y9	Y21
Weight. of						
Wet Soil + Can (gm)	427.9	410.2	404.4	428.5	414.3	473.5
Weight. of						
Dry Soil + Can (gm)	427.1	406.0	393.9	412.2	393.4	441.6
Weight. of Can (gm)	36.3	36.3	36.7	36.2	36.5	36.2
Weight. of Water (gm)	0.8	4.2	10.5	16.3	20.9	31.9
Weight. of Dry Soil (gm)	390.8	369.7	357.2	376	356.9	405.4
Water Content (%)	0.205	1.136	2.940	4.335	5.856	7.869
Density Determination						
Test	1	2	3	4	5	6
Assumed of Water Content (%)	0	1	3	5	7	9
Weight. of Wet Soil + Mold (gm)	6757.1	6810.0	6929.0	6999.7	7065.3	7093.1
Weight. of Mold (gm)	4944.1	4944.1	4944.1	4944.1	4944.1	4944.1
Weight. of Wet Soil (gm)	1813	1865.9	1984.9	2055.6	2121.2	2149
Wet Density (gm/cm ³)	1.899	1.955	2.079	2.153	2.222	2.251
Dry Density (gm/cm ³)	1.895	1.933	2.020	2.064	2.099	2.087

**ตารางผนวกที่ ก12 ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่าง
วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 75:25**

Modified Compaction Test								
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion								
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (75:25)								
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183								
Date : 29/08/2550		Mold Weight. 4943.6 gm		Vol. of Mold		949.42	cm ³	
Water Content Determination								
Trial No.		1	2	3	4	5	6	7
Can No.		Y4	Y10	Y3	34	Y21	Y14	37
Weight. of								
Wet Soil + Can	(gm)	409.4	402.4	425.6	340.1	377.7	378.4	333.2
Weight. of								
Dry Soil + Can	(gm)	407.9	397.9	414.8	325.7	357.5	355.4	312.4
Weight. of Can	(gm)	36.2	36.5	36.1	22.9	22.8	23.0	22.9
Weight. of Water	(gm)	1.5	4.5	10.8	14.4	20.2	23	20.8
Weight. of Dry Soil (gm)		371.7	361.4	378.7	302.8	334.7	332.4	289.5
Water Content	(%)	0.404	1.245	2.852	4.756	6.035	6.919	7.185
Density Determination								
Test		1	2	3	4	5	6	7
Assumed of Water Content (%)		0	1	3	5	7	9	11
Weight. of								
Wet Soil + Mold	(gm)	6677.2	6778.3	6833.0	6906.6	6933.2	6887.9	6890.7
Weight. of Mold	(gm)	4943.6	4943.6	4943.6	4947.0	4947.0	4947.0	4947.0
Weight. of Wet Soil(gm)		1733.6	1834.7	1889.4	1959.6	1986.2	1940.9	1943.7
Wet Density	(gm/cm ³)	1.826	1.932	1.990	2.043	2.071	2.024	2.027
Dry Density	(gm/cm ³)	1.819	1.909	1.935	1.950	1.953	1.893	1.891

ตารางผนวกที่ ก13 ผลการทดสอบค่าการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของอัตราส่วนผสมระหว่าง
วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิมที่ 100:0

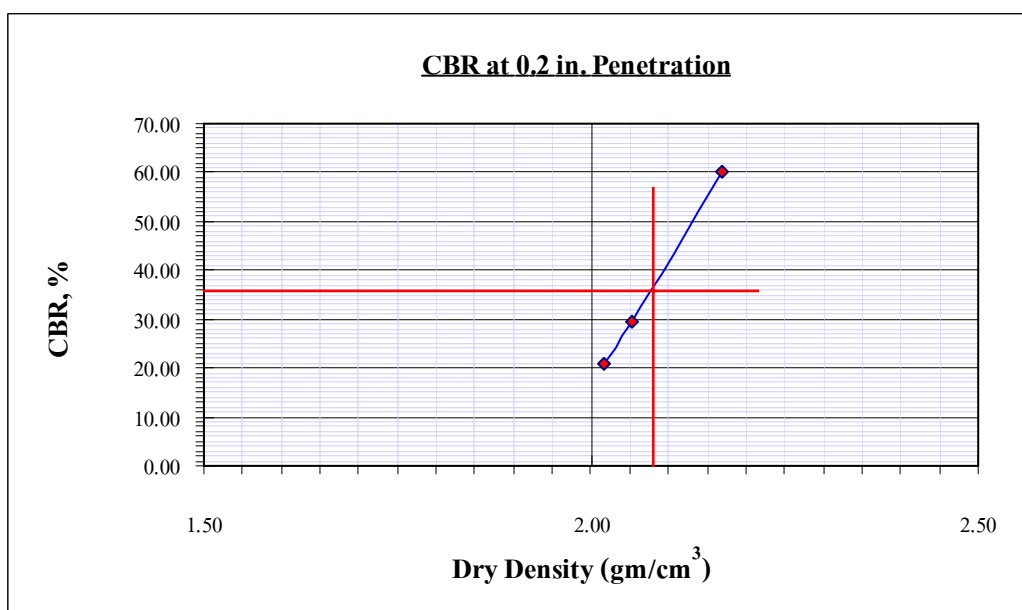
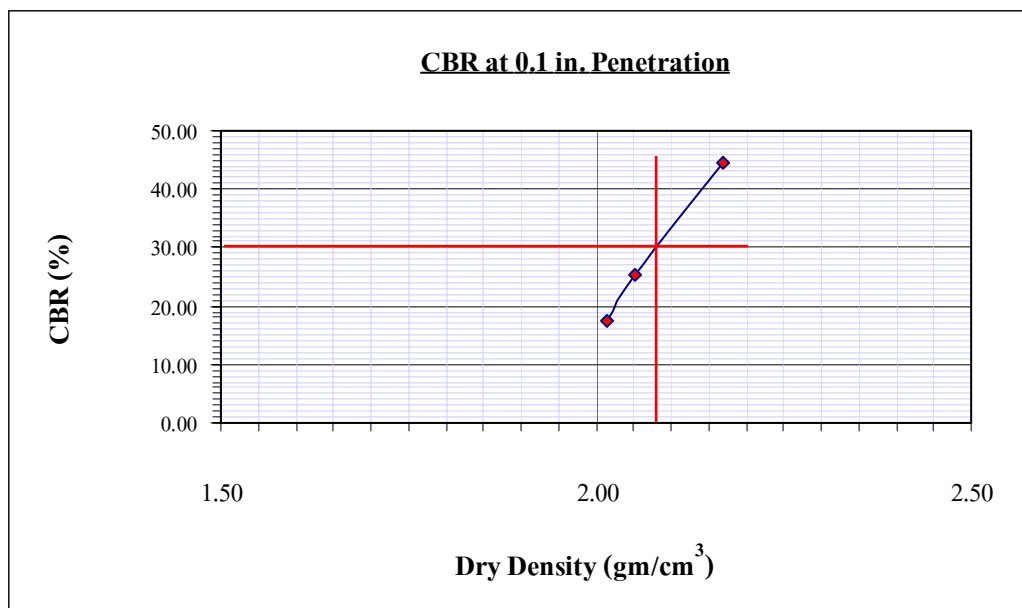
Modified Compaction Test								
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion								
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (100:0)								
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183								
Date : 29/08/2550	Mold Weight.	4943.6	gm	Vol. of mold	954.62	cm ³		
Water Content Determination								
Trial No.		1	2	3	4	5	6	7
Can No.		Y2	Y15	Y13	D	62	142	N-4
Weight. Of								
Wet Soil + Can	(gm)	393.0	420.4	367.7	281.3	282.7	339.0	333.6
Weight. of								
Dry Soil + Can	(gm)	392.80	416.4	359.30	269.90	267.30	319.7	314.2
Weight. of Can	(gm)	14.7	14.8	10.8	16.6	22.2	15.9	17.6
Weight. of Water	(gm)	0.2	4.0	8.4	11.4	15.4	19.3	19.4
Weight. of Dry Soil	(gm)	378.1	401.6	348.5	253.3	245.1	303.8	296.6
Water Content	(%)	0.053	0.996	2.410	4.501	6.283	6.353	6.541
Density Determination								
Test		1	2	3	4	5	6	7
Assumed of								
Water Content	(%)	0	1	3	5	7	9	11
Weight. Of								
Wet Soil + Mold	(gm)	6656.0	6713.7	6735.3	6818.7	6852.8	6837.8	6805.8
Weight. of Mold	(gm)	4943.6	4943.6	4943.6	4947	4947	4947	4947
Weight. of Wet Soil	(gm)	1712.4	1770.1	1791.7	1871.7	1905.8	1890.8	1858.8
Wet Density	(gm/cm ³)	1.794	1.854	1.877	1.952	1.987	1.971	1.938
Dry Density	(gm/cm ³)	1.793	1.836	1.833	1.868	1.870	1.854	1.819

ตารางผนวกที่ ก14 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิม
ต่อหินคลุกเดิมที่ 0:100

0:100		CBR (Soaked)					
Date : 18/12/50		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Mold No.		1		2		3	
Volume of Mold	(cm ³)	2101.7		2109.4		2103.1	
Weight of Mold + Wet Soil	(gm)	11808.6		13399.8		13829.9	
Weight of Mold	(gm)	7301.3		8793.7		9014.1	
Weight of Wet Soil	(gm)	4507.3		4606.1		4815.8	
Wet Density	(gm/ml)	2.145		2.184		2.290	
Dry Density	(gm/ml)	2.016		2.053		2.170	
Water Content (Before Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		34	62	19	y16	y14	y4
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	272.5	290.4	301.7	370.3	352.8	366.1
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	259.5	277	287.3	355.6	336.6	349.8
Weight of Water	(gm)	13.0	13.4	14.4	14.7	16.2	16.3
Weight of Can	(gm)	23.3	23.1	23	36.3	36	36.1
Weight Dry Soil	(gm)	236.2	253.9	264.3	319.3	300.6	313.7
Water Content	(%)	5.5	5.3	5.4	4.6	5.4	5.2
Average Water Content	(%)	5.2					
Water Content (After Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		1		2		3	
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	314.1		367.0		379.1	
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	296.6		346.4		360.5	
Weight of Water	(gm)	17.5		20.6		18.6	
Weight of Can	(gm)	22.6		22.5		22.5	
Weight Dry Soil	(gm)	274		323.9		338	
Water Content	(%)	6.4		6.4		5.5	
Average Water Content	(%)	6.1					

ตารางผนวกที่ ก14 (ต่อ)

Test Results		0:100					
Mold No.		1		2		3	
No. of Blows per Layer		12		25		56	
Pressure at 0.1 in. Penetration (lb/in ²)		173		252		445	
Pressure at 0.2 in. Penetration (lb/in ²)		315		445		900	
CBR at 0.1 in. Penetration	(%)	17.30		25.20		44.50	
CBR at 0.2 in. Penetration	(%)	21.00		29.67		60.00	
Dry Density	(gm/cm ³)	2.02		2.05		2.17	
Water Content	(%)	6.39		6.36		5.50	
Swelling							
Mold No.		1		2		3	
Blows / Layer		12		25		56	
Time		13.00					
Date		Swell mm.	% Swell	Swell mm.	% Swell	Swell mm.	% Swell
18 ธ.ค. 50		0	-	0	-	0	-
19 ธ.ค. 50		40	0.88	45	0.99	16	0.35
20 ธ.ค. 50		55	1.21	45	0.99	16	0.35
21 ธ.ค. 50		60	1.32	46	1.01	16	0.35
Compaction Method		Modified Compaction					
No. of Layers		5.0					
Max. Density	(gm/cm ³)	2.190					
CBR Value at Density 95% (gm/cm ³)		2.081					
CBR at 0.1 in. Penetration		30.0					
CBR at 0.2 in. Penetration		35.5					



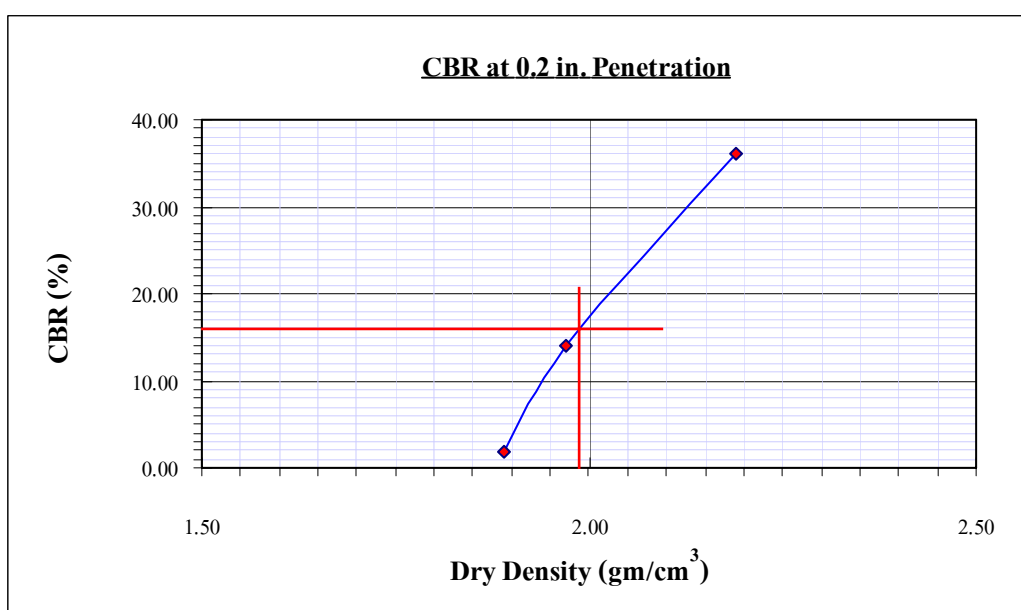
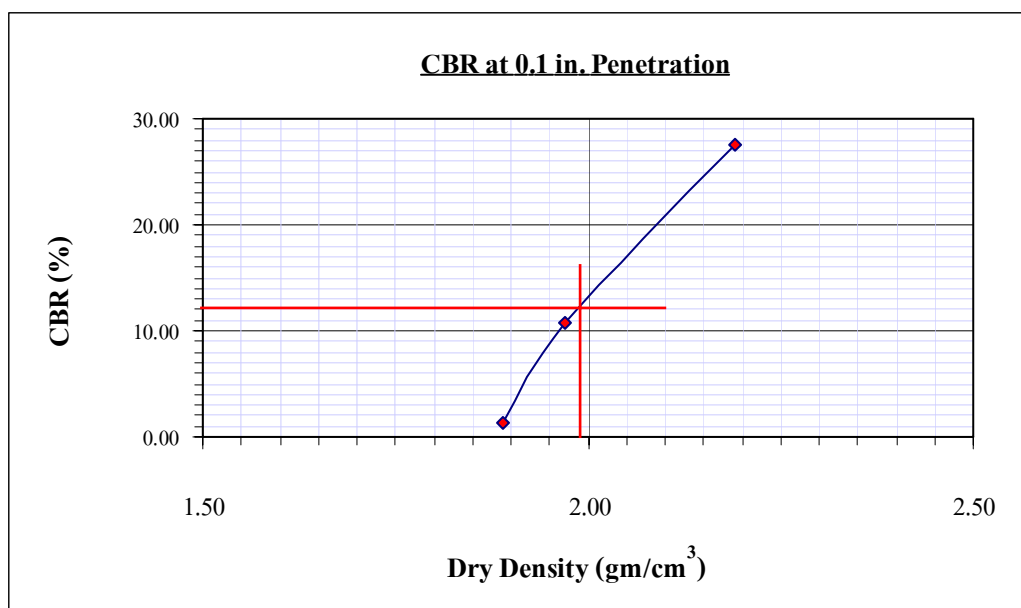
ภาพผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหิน
คลุกลเดิมที่ 0:100

**ตารางผนวกที่ ก15 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อ
หินคลุกเดิมที่ 25:75**

25:75		CBR (soaked)					
Date : 18/12/50		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Mold No.		7		10		11	
Volume of Mold	(cm ³)	2094.0		2100.3		2084.3	
Weight of Mold + Wet Soil	(gm)	11537.9		11746.5		13790.1	
Weight of Mold	(gm)	7307.7		7344.7		8949.8	
Weight of Wet Soil	(gm)	4230.2		4401.8		4840.3	
Wet Density	(gm/ml)	2.020		2.096		2.322	
Dry Density	(gm/ml)	1.890		1.969		2.19	
Water Content (Before Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		y8	y3	y15	y12	y21	y14
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	333.7	318.4	286.2	320.4	305.5	322.6
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	318.4	304.8	273.6	308.0	291.7	309.6
Weight of Water	(gm)	15.3	13.6	12.6	12.4	13.8	13.0
Weight of Can	(gm)	36.7	36.4	36.0	36.0	36.0	37.1
Weight Dry Soil	(gm)	281.7	268.4	237.6	272	255.7	272.5
Water Content	(%)	5.4	5.1	5.3	4.6	5.4	4.8
Average Water Content	(%)	5.1					
Water Content (After Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		1		2		3	
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	434.8		395.2		413	
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	407.8		372.4		390.6	
Weight of Water	(gm)	27.0		22.8		22.4	
Weight of Can	(gm)	16.8		16.9		16.1	
Weight Dry Soil	(gm)	391		355.5		374.5	
Water Content	(%)	6.9		6.4		6.0	
Average Water Content	(%)	6.4					

ตารางผนวกที่ ก15 (ต่อ)

Test Results		25:75					
Mold No.		7		10		11	
No. of Blows per Layer		12		25		56	
Pressure at 0.1 in. Penetration (lb/in ²)		14		108		276	
Pressure at 0.2 in. Penetration (lb/in ²)		26.5		211		540	
CBR at 0.1 in. Penetration (%)		1.40		10.80		27.60	
CBR at 0.2 in. Penetration (%)		1.77		14.07		36.00	
Dry Density (gm/cm ³)		1.890		1.969		2.191	
Water Content (%)		6.91		6.41		5.98	
Swelling							
Mold No.		7		10		11	
Blows / Layer		12		25		56	
Time		13.00					
Date		Swell mm.	% Swell	Swell mm.	% Swell	Swell mm.	% Swell
18 ธ.ค. 50		0	-	0	-	0	-
19 ธ.ค. 50		63	1.39	51	1.12	10	0.22
20 ธ.ค. 50		76	1.67	60	1.32	10	0.22
21 ธ.ค. 50		113	2.49	72	1.58	10	0.22
Compaction Method		Modified Compaction					
No. of Layers		5					
Max. Density (gm/cm ³)		2.10					
CBR Value at Density 95% (gm/cm ³)		1.995					
CBR at 0.1 in. Penetration		12.0					
CBR at 0.2 in. Penetration		16.0					



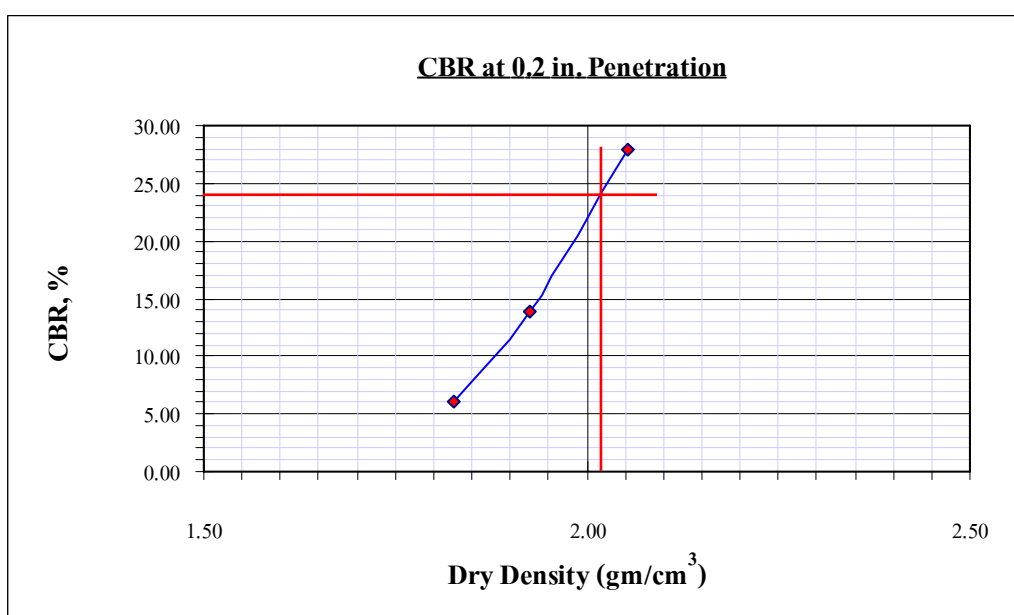
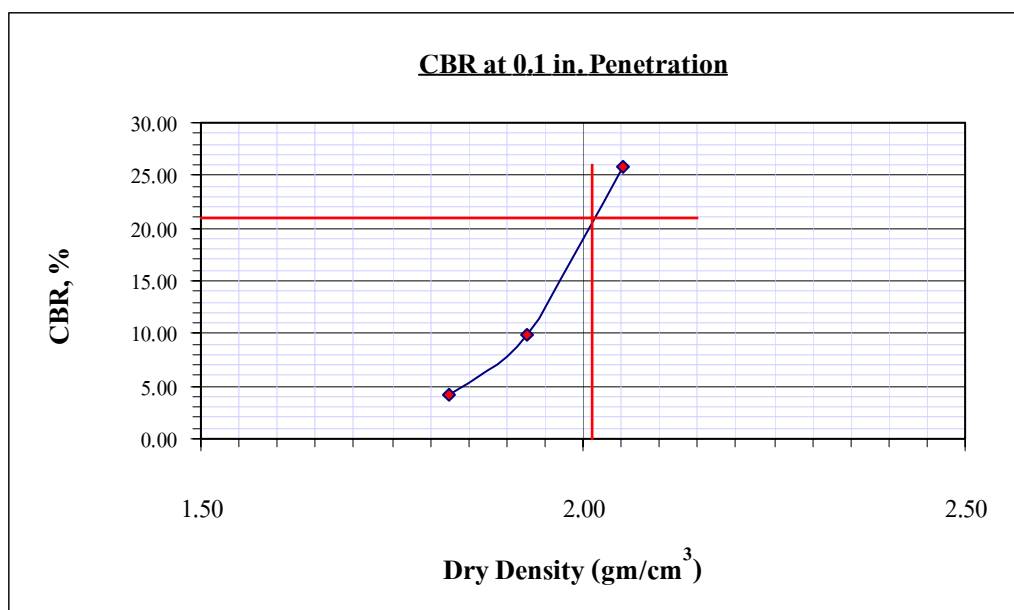
ภาพผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหิน
คลุกลเดิมที่ 25:75

ตารางผนวกที่ ก16 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อ
หินคลุกเดิมที่ 50:50

50:50		CBR (soaked)					
Date : 25/12/50		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Mold No.		1		2		3	
Volume of Mold	(cm ³)	2101.7		2109.4		2103.1	
Weight of Mold + Wet Soil	(gm)	11382.4		13118.1		13609.1	
Weight of Mold	(gm)	7304.8		8797.4		9018	
Weight of Wet Soil	(gm)	4077.6		4320.7		4591.1	
Wet Density	(gm/ml)	1.940		2.048		2.183	
Dry Density	(gm/ml)	1.825		1.926		2.054	
Water Content (Before Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		4	5	6	7	8	9
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	433.3	434.6	446	454.1	483.2	428.4
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	413.1	417	426.7	431.6	457.5	408.7
Weight of Water	(gm)	20.2	17.6	19.3	22.5	25.7	19.7
Weight of Can	(gm)	37	37.3	35.9	37	36.4	36.4
Weight Dry Soil	(gm)	376.1	379.7	390.8	394.6	421.1	372.3
Water Content	(%)	5.4	4.6	4.9	5.7	6.1	5.3
Average Water Content	(%)	5.3					
Water Content (After Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		1		2		3	
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	440		454.2		464.9	
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	416.1		429.3		439.5	
Weight of Water	(gm)	23.9		24.9		25.4	
Weight of Can	(gm)	36.5		37.2		36.7	
Weight Dry Soil	(gm)	379.6		392.1		402.8	
Water Content	(%)	6.3		6.4		6.3	
Average Water Content	(%)	6.3					

ตารางผนวกที่ ก16 (ต่อ)

Test Results		50:50					
Mold No.		1		2		3	
No. of Blows per Layer		12		25		56	
Pressure at 0.1 in. Penetration	(lb/in ²)	41		98		258	
Pressure at 0.2 in. Penetration	(lb/in ²)	92.0		209		420	
CBR at 0.1 in. Penetration	(%)	4.10		9.80		25.80	
CBR at 0.2 in. Penetration	(%)	6.13		13.93		28.00	
Dry Density	(gm/cm ³)	1.825		1.926		2.054	
Water Content	(%)	6.30		6.35		6.31	
Swelling							
Mold No.		1		2		3	
Blows / Layer		12		25		56	
Time		14.30					
Date		Swell	%	Swell	%	Swell	%
		mm.	Swell	mm.	Swell	mm.	Swell
25 ธ.ค. 50		0	-	0	-	0	-
26 ธ.ค. 50		40	0.88	32	0.70	29	0.64
27 ธ.ค. 50		52	1.14	42	0.92	30	0.66
28 ธ.ค. 50		98	2.16	76	1.67	32	0.70
Compaction Method		Modified Compaction					
No. of Layers		5					
Max. Density	(gm/cm ³)	2.11					
CBR Value at Density 95%	(gm/cm ³)	2.005					
CBR at 0.1 in. Penetration		21.0					
CBR at 0.2 in. Penetration		24.0					



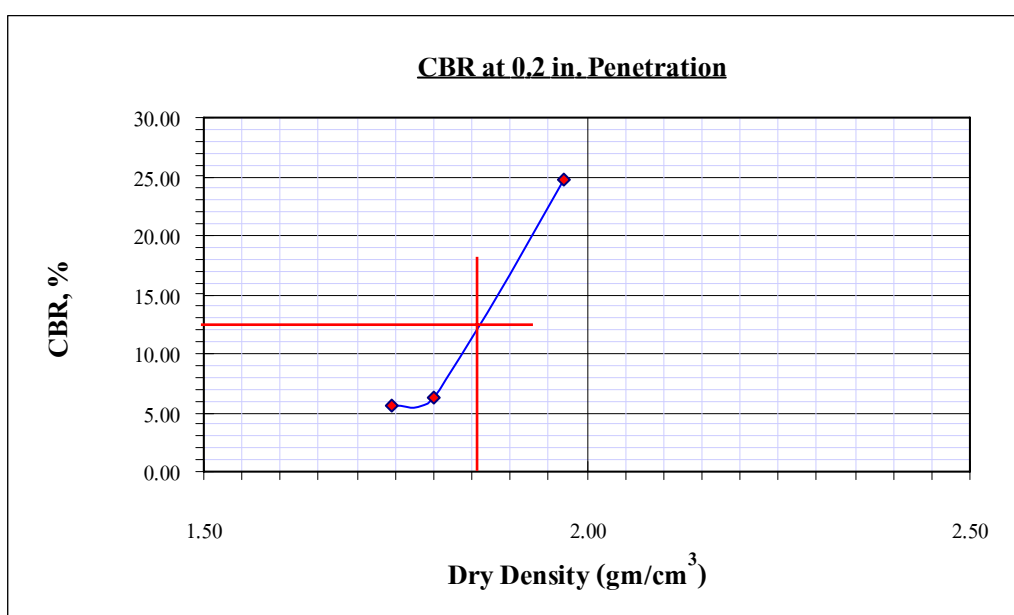
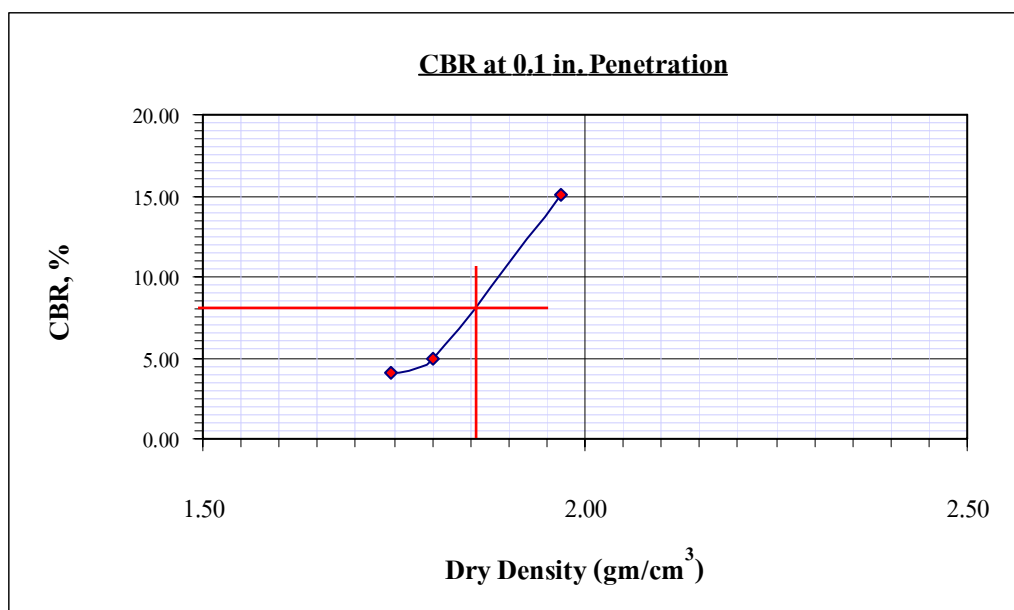
ภาพผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหิน
คลุกลเดิมที่ 50:50

ตารางผนวกที่ ก17 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อ
หินคลุกเดิมที่ 75:25

75:25		CBR (Soaked)					
Date : 25/12/50		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Mold No.		5		7		9	
Volume of Mold	(cm ³)	2101.7		2094		2100.3	
Weight of Mold + Wet soil	(gm)	12918.5		11335.7		11783	
Weight of Mold	(gm)	9020.7		7310.9		7348	
Weight of Wet Soil	(gm)	3897.8		4024.8		4435	
Wet Density	(gm/ml)	1.855		1.922		2.112	
Dry Density	(gm/ml)	1.746		1.800		1.969	
Water Content (Before Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		4	5	6	7	8	9
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	420.4	440.3	431.6	401.2	436.6	448.6
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	399	419.1	412.7	377.7	411.5	425.6
Weight of Water	(gm)	21.4	21.2	18.9	23.5	25.1	23
Weight of Can	(gm)	36.0	36.0	36.0	36.0	36.5	36.5
Weight Dry Soil	(gm)	363.0	383.1	376.7	341.7	375.0	389.1
Water Content	(%)	5.9	5.5	5.0	6.9	6.7	5.9
Average. Water Content	(%)	6.0					
Water Content (After Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		1		2		3	
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	455.6		403.3		433.3	
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	431.1		380.1		406.6	
Weight of Water	(gm)	24.5		23.2		26.7	
Weight of Can	(gm)	36.7		36.7		37	
Weight Dry Soil	(gm)	394.4		343.4		369.6	
Water Content	(%)	6.2		6.8		7.2	
Average. Water Content	(%)	6.7					

ตารางผนวกที่ ก17 (ต่อ)

Test Result		75:25					
Mold No.	5	7	9				
No. of Blows per Layer	12	25	56				
Pressure at 0.1 in. Penetration (lb/in ²)	41	49	151				
Pressure at 0.2 in. Penetration (lb/in ²)	84.0	93	370				
CBR at 0.1 in. Penetration (%)	4.10	4.90	15.10				
CBR at 0.2 in. Penetration (%)	5.00	6.20	24.67				
Dry Density (gm/cm ³)	1.746	1.800	1.969				
Water Content (%)	6.21	6.76	7.22				
Swelling							
Mold No.	5	7	9				
Blows / Layer	12	25	56				
Time	14.30						
Date	Swell mm.	% Swell	Swell mm.	% Swell	Swell mm.	% Swell	
25 พ.ค. 50	0	-	0	-	0	-	
26 พ.ค. 50	82	1.80	23	0.50	35	0.77	
27 พ.ค. 50	104	2.29	35	0.77	37	0.81	
28 พ.ค. 50	114	2.51	44	0.96	38	0.83	
Compaction Method		Modified Compaction					
No. of Layers		5					
Max. Density (gm/cm ³)		1.96					
CBR Value at Density 95% (gm/cm ³)		1.862					
CBR at 0.1 in. Penetration		8.0					
CBR at 0.2 in. Penetration		12.1					



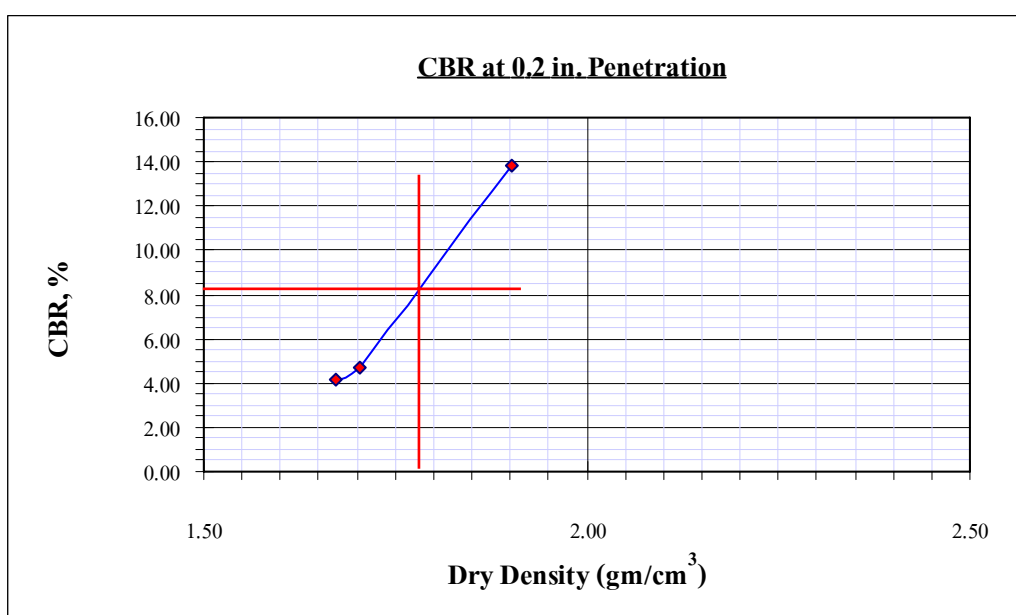
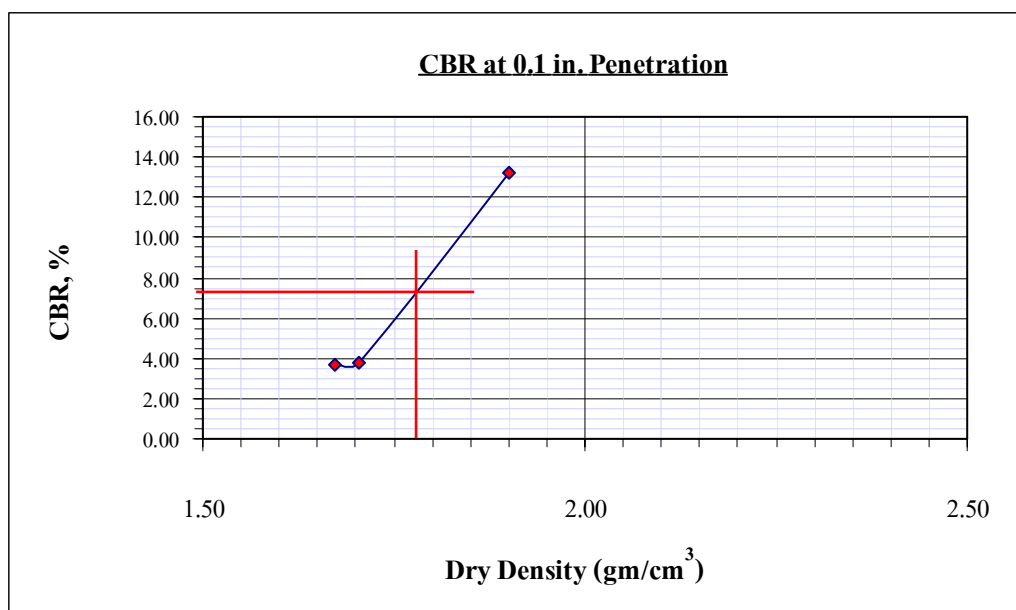
ภาพผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหิน
คลุกลเดิมที่ 75:25

ตารางผนวกที่ ก18 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อ
หินคลุกเดิมที่ 100:0

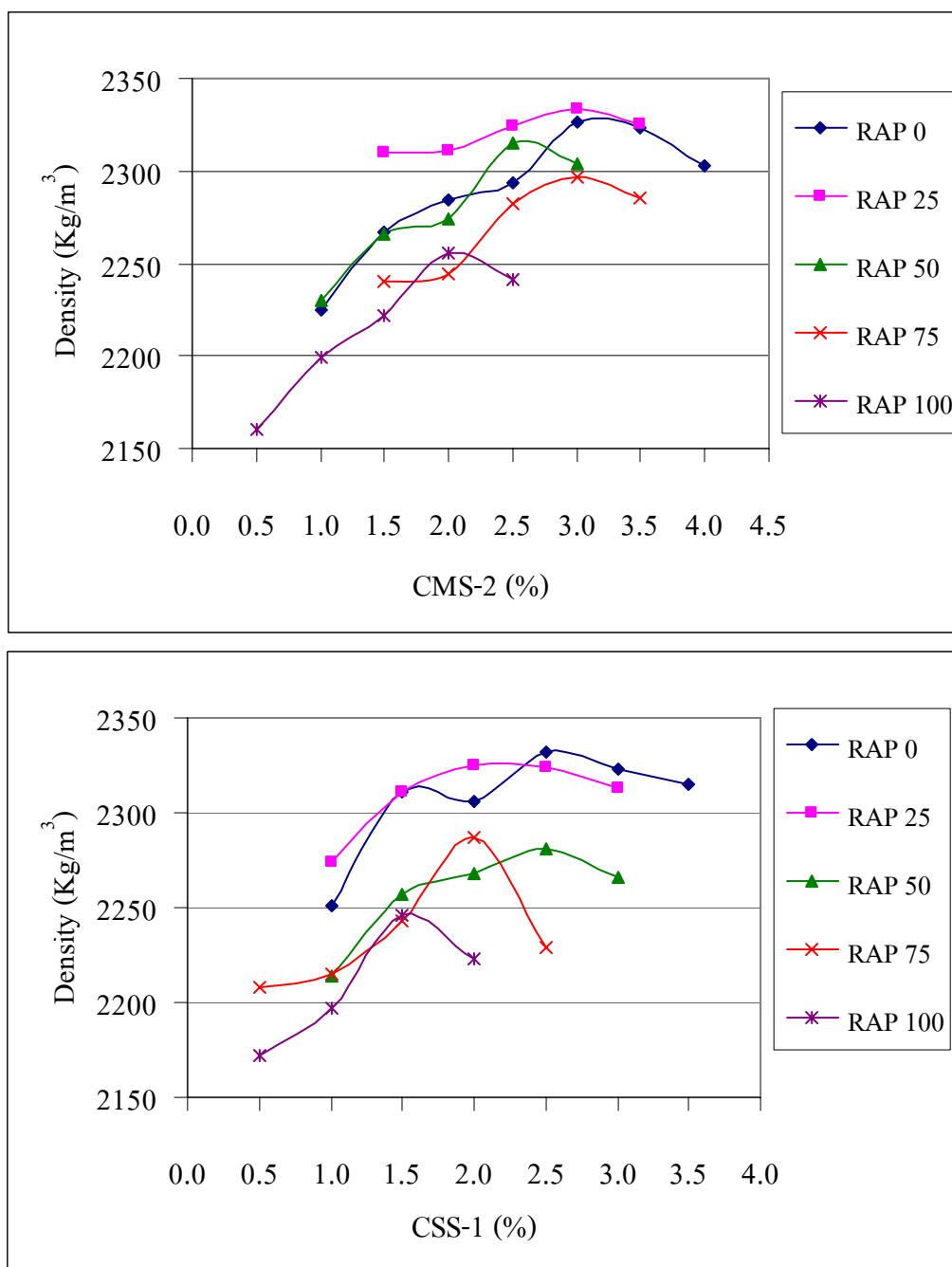
100:0		CBR (Soaked)					
Date : 25/12/50		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Mold No.		4		5		9	
Volume of Mold	(cm ³)	2092.6		2101.7		2104.4	
Weight of Mold + Wet Soil	(gm)	12761.7		12873.5		11824.4	
Weight of Mold	(gm)	9003.4		9016.5		7506.7	
Weight of Wet Soil	(gm)	3758.3		3857		4317.7	
Wet Density	(gm/ml)	1.796		1.835		2.052	
Dry Density	(gm/ml)	1.674		1.704		1.902	
Water Content (Before Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		y22	37	46	J5	11	D5
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	353	349.8	349.3	303.4	303.0	360.8
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	339.5	335.8	332.5	288.2	287.3	345.1
Weight of Water	(gm)	13.5	14	16.8	15.2	15.7	15.7
Weight of Can	(gm)	37	22.8	23.3	16.3	15.1	16.7
Weight Dry Soil	(gm)	302.5	313	309.2	271.9	272.2	328.4
Water Content	(%)	4.5	4.5	5.4	5.6	5.8	4.8
Average Water Content	(%)	5.1					
Water Content (After Soaked)		12 Blows		25 Blows		56 Blows	
Can No.		1		2		3	
Weight of Can + Wet Soil	(gm)	265.3		355.0		360.8	
Weight of Can + Dry Soil	(gm)	248.3		330.8		335.6	
Weight of Water	(gm)	17.0		24.2		25.2	
Weight of Can	(gm)	15.9		17.5		16.4	
Weight Dry Soil	(gm)	232.4		313.3		319.2	
Water Content	(%)	7.3		7.7		7.9	
Average water content	(%)	7.6					

ตารางผนวกที่ ก18 (ต่อ)

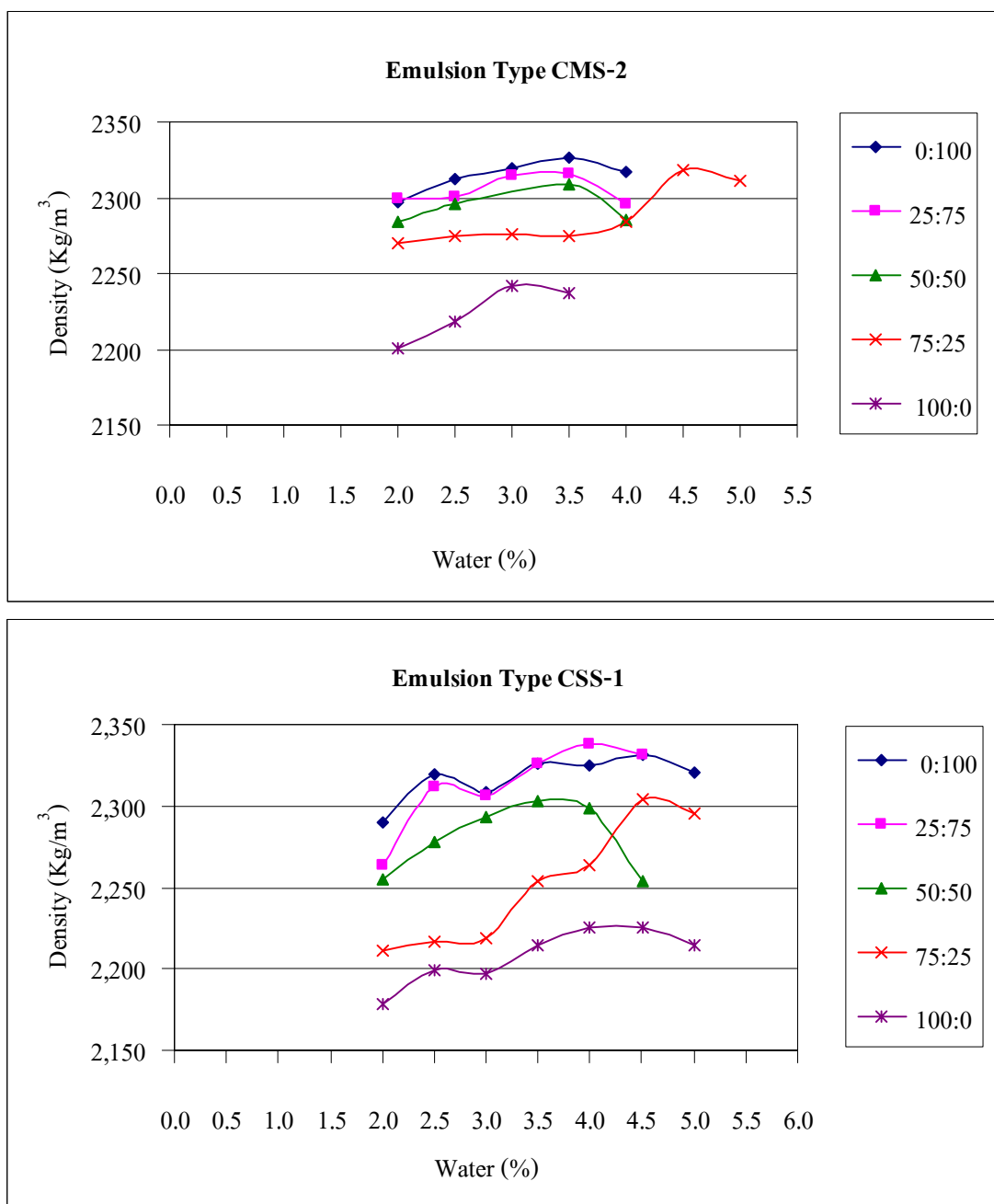
Test Results		100:0					
Mold No.		4		5		9	
No. of Blows per Layer		12		25		56	
Pressure at 0.1 in. Penetration	(lb/in ²)	37		38		132	
Pressure at 0.2 in. Penetration	(lb/in ²)	63.0		71		208	
CBR at 0.1 in. Penetration	(%)	3.70		3.80		13.20	
CBR at 0.2 in. Penetration	(%)	4.20		4.73		13.87	
Dry Density	(gm/cm ³)	1.674		1.704		1.902	
Water Content	(%)	7.31		7.72		7.89	
Swelling							
Mold No.		5		7		9	
Blows / Layer		12		25		56	
Time		14.30					
Date		Swell	%	Swell	%	Swell	%
		mm.	Swell	mm.	Swell	mm.	Swell
25 ธ.ค. 50		0	-	0	0.00	0	-
26 ธ.ค. 50		100	2.20	84	1.84	40	0.88
27 ธ.ค. 50		126	2.77	97	2.13	46	1.01
28 ธ.ค. 50		137	3.01	116	2.54	48	1.05
Compaction Method		Modified Compaction					
No. of Layers		5					
Max. Density	(gm/cm ³)	1.87					
CBR Value at Density 95%	(gm/cm ³)	1.777					
CBR at 0.1 in. Penetration		7.4					
CBR at 0.2 in. Penetration		8.3					



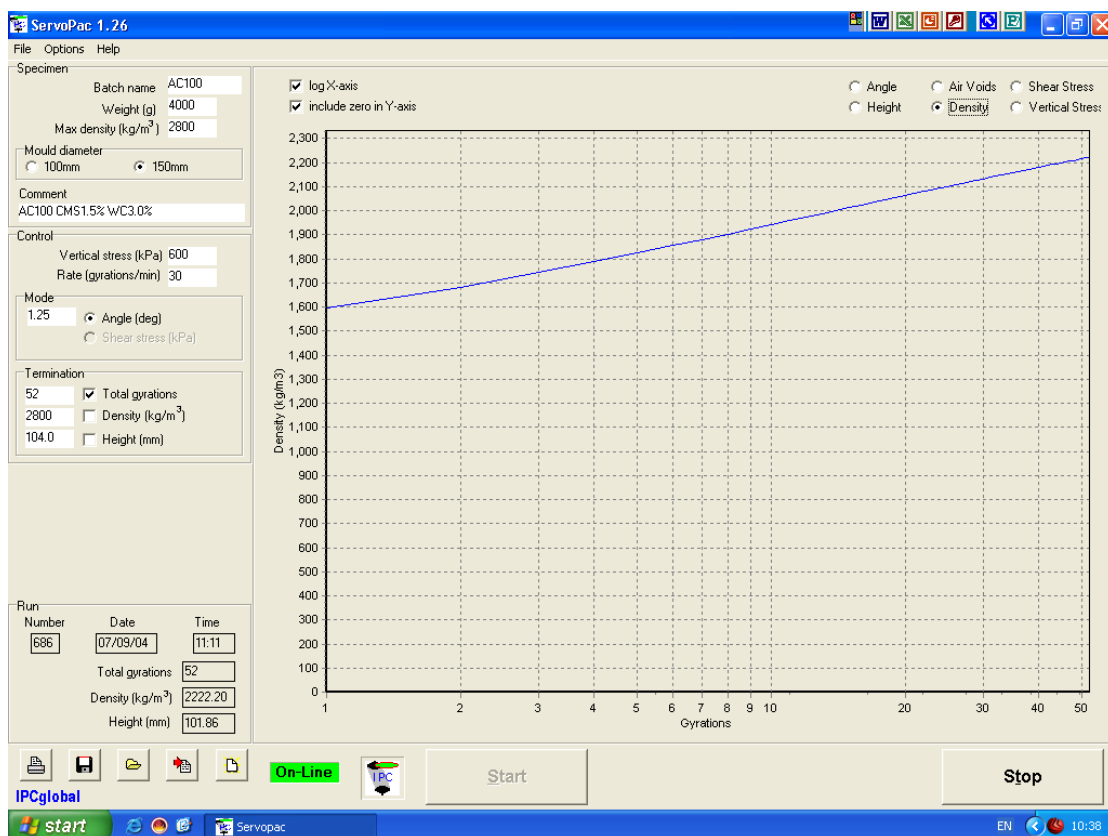
ภาพผนวกที่ ก5 ผลการทดสอบ CBR ของอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหิน
คลุกลเดิมที่ 100:0



ภาพผนวกที่ 6 ความหนาแน่นของการบดอัดด้วยเครื่อง SGC ที่ 52 รอบ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ 3.0 เปอร์เซ็นต์ของแต่ละอัตราส่วนผสม



ภาพผนวกที่ ก7 ความหนาแน่นของการบดอัดด้วยเครื่อง SGC ที่ 52 รอบ โดยกำหนดแอสฟัลต์
อิมัลชันที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสม



ภาพผนวกที่ ๘ โปรแกรมการบดอัดก้อนตัวอย่างทดสอบของเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor

ตารางผนวกที่ ก19 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2
ที่อัตราส่วนผสม 0:100

Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (0:100)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CMS-2									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	465	697	929	321	482	642	137	205	274
M_R No.1 (MPa)	2866	2213	2099	3103	2875	2273	322	247	162
M_R No.2 (MPa)	2619	2427	2121	2388	2266	2129	402	230	157
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	451	677	903	182	273	364	109	164	218
M_R No.1 (MPa)	3300	3012	2559	2368	2409	2633	516	311	170
M_R No.2 (MPa)	3653	2134	1969	2344	2379	2670	415	265	168
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	373	560	747	147	220	293	100	112	149
M_R No.1 (MPa)	2462	2006	1728	1713	1846	1714	235	274	150
M_R No.2 (MPa)	2441	1845	1581	1899	1771	1660	306	187	121

ตารางผนวกที่ ก20 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วน
ผสม 25:75

Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (25:75)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CMS-2									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	531	796	1061	467	701	934	157	235	313
M_R No.1 (MPa)	1834	1611	1462	2711	2461	2159	302	187	136
M_R No.2 (MPa)	2219	1928	1778	-	-	-	-	-	-
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	401	601	801	381	572	762	134	201	267
M_R No.1 (MPa)	2771	2155	2095	2502	2203	2371	229	171	118
M_R No.2 (MPa)	2875	1770	2014	-	-	-	-	-	-
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	223	447	596	272	408	544	103	154	205
M_R No.1 (MPa)	1946	1641	1568	1616	1758	1547	261	180	115
M_R No.2 (MPa)	2219	2984	1933	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก21 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วน
ผสม 50:50

Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (50:50)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CMS-2									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	574	861	1149	525	788	1050	188	282	375
M_R No.1 (MPa)	2242	1875	1822	2337	2395	2261	304	203	165
M_R No.2 (MPa)	2766	2382	2119	2476	2649	2655	316	218	153
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	529	794	1058	427	641	855	142	213	284
M_R No.1 (MPa)	2457	1876	1726	2256	2554	2211	278	183	141
M_R No.2 (MPa)	2820	2437	2167	2460	2384	2290	290	164	131
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	356	534	711	304	456	608	119	179	239
M_R No.1 (MPa)	2314	1937	1774	1635	1748	1860	290	145	95
M_R No.2 (MPa)	2216	2062	1882	1976	1926	2236	305	139	107

ตารางผนวกที่ ก22 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วน
ผสม 75:25

Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (75:25)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CMS-2									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	504	756	1009	430	645	859	149	224	299
M_R No.1 (MPa)	1878	1642	1322	1816	1710	1509	244	145	133
M_R No.2 (MPa)	2162	1661	1636	2072	1808	1372	211	143	125
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	447	670	894	356	535	713	116	174	231
M_R No.1 (MPa)	2092	1878	1635	2352	2225	1889	236	153	123
M_R No.2 (MPa)	1927	1582	1527	2513	2442	1854	210	153	123
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	345	517	690	302	453	603	100	125	166
M_R No.1 (MPa)	1840	1471	1412	1904	1695	1572	277	192	122
M_R No.2 (MPa)	1771	1666	1529	1981	1943	1746	241	155	124

ตารางผนวกที่ ก23 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วน
ผสม 100:0

Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (100:0)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CMS-2									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	652	978	1305	618	926	1235	204	305	407
M_R No.1 (MPa)	2181	1986	1869	2304	2287	2007	224	161	116
M_R No.2 (MPa)	2397	1791	1807	2951	2625	2517	223	174	134
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	544	816	1088	421	631	841	144	216	288
M_R No.1 (MPa)	2053	1907	1799	2405	2188	1953	223	154	139
M_R No.2 (MPa)	2239	2110	1891	1983	2367	2048	270	155	128
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	460	691	921	369	554	738	126	189	252
M_R No.1 (MPa)	1630	1481	1317	1729	1796	1612	243	149	132
M_R No.2 (MPa)	1609	1539	1565	2038	1902	1650	199	159	116

ตารางผนวกที่ ก24 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วน
ผสม 0:100

Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุผสมรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (0:100)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CSS-1									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	581	871	1161	432	648	865	227	341	455
M_R No.1 (MPa)	3610	3648	2936	2442	2730	2221	593	445	307
M_R No.2 (MPa)	2941	2531	1498	3820	3257	3003	622	333	241
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	455	682	909	393	589	786	160	240	320
M_R No.1 (MPa)	2581	2002	1782	2274	2647	2418	699	331	230
M_R No.2 (MPa)	2598	2146	2046	2446	2338	2078	477	281	195
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	358	537	716	261	391	522	100	142	190
M_R No.1 (MPa)	2549	2185	1999	1361	1942	1252	388	255	164
M_R No.2 (MPa)	2598	2146	2046	1363	1401	1162	424	269	169

ตารางผนวกที่ ก26 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วน
ผสม 50:50

Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (50:50)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CSS-1									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	782	1172	1563	707	1061	1414	260	390	520
M_R No.1 (MPa)	3029	2570	2302	3137	2900	2947	679	471	341
M_R No.2 (MPa)	2979	2442	2204	3697	3425	3010	421	288	224
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	654	981	1307	513	770	1026	187	281	374
M_R No.1 (MPa)	2512	2166	2041	2543	2670	2454	505	344	214
M_R No.2 (MPa)	2685	2088	2136	2422	2410	2359	463	257	197
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	444	667	889	316	474	632	130	195	261
M_R No.1 (MPa)	2075	1605	1452	1139	1199	1195	412	245	165
M_R No.2 (MPa)	1664	1510	1312	1497	1651	1822	251	179	124

ตารางผนวกที่ ก27 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วน
ผสม 75:25

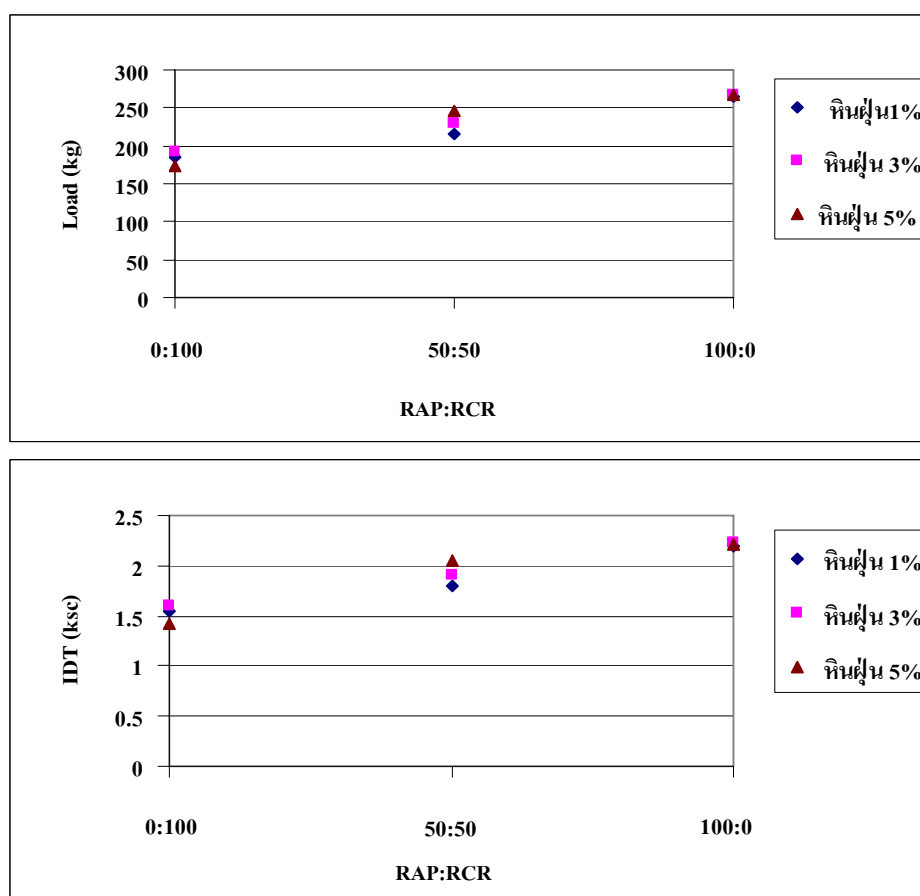
Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (75:25)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CSS-1									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	783	1175	1567	758	1137	1516	276	415	553
M_R No.1 (MPa)	3401	2678	2454	3809	3228	3132	436	320	262
M_R No.2 (MPa)	3497	3409	2754	3240	3105	3271	433	338	272
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	667	1000	1334	604	906	1207	187	281	375
M_R No.1 (MPa)	2436	2218	1894	2736	2746	2636	436	252	206
M_R No.2 (MPa)	2631	2349	2054	2656	2640	2583	435	269	209
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	444	665	887	423	635	846	131	196	261
M_R No.1 (MPa)	1932	1776	1482	2232	2072	2122	422	254	188
M_R No.2 (MPa)	1876	1591	1627	1892	1921	1813	359	236	163

ตารางผนวกที่ ก28 ผลการทดสอบ Resilient Modulus ของแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วน
ผสม 100:0

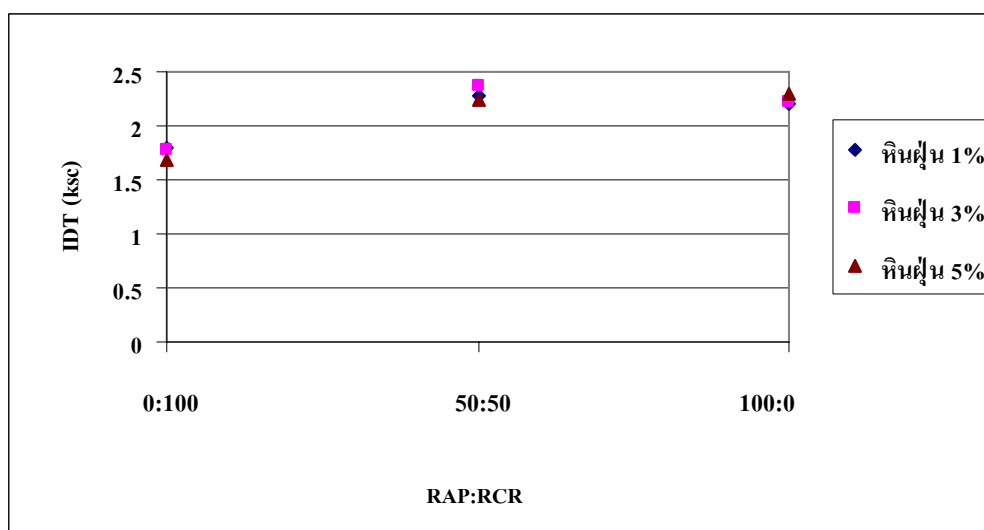
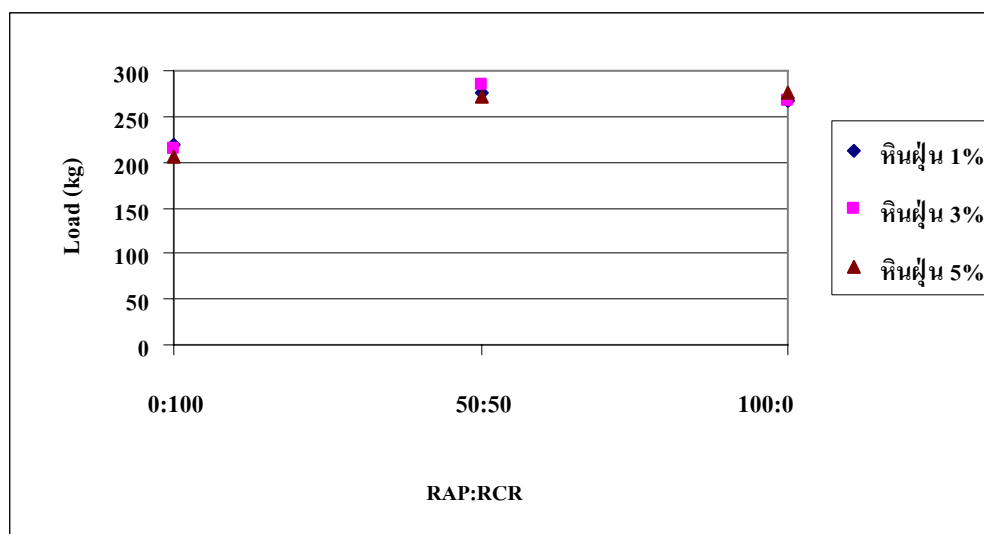
Resilient Modulus (M_R)									
Project : การนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการผสมเย็นในที่ด้วย Emulsion									
Material Description : วัสดุมวลรวมผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม (100:0)									
Location : สายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183									
Asphalt Emulsion type : CSS-1									
Density 100% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	744	1116	1488	744	1116	1488	222	333	444
M_R No.1 (MPa)	2415	2173	1930	2415	2173	1930	379	277	229
M_R No.2 (MPa)	2483	2351	1925	2778	2575	2458	338	250	207
Density 95% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	546	820	1093	515	772	1030	182	273	364
M_R No.1 (MPa)	1819	1636	1412	2080	2110	1913	314	201	170
M_R No.2 (MPa)	1837	1720	1539	1975	2523	1988	317	226	197
Density 90% Of Maximum Density									
Test	Unsoaked			Soaked			Temperature 40 °C		
Applied Load (%)	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Load (N)	427	641	854	382	573	764	139	208	278
M_R No.1 (MPa)	1515	1524	1338	1603	1825	1867	286	172	123
M_R No.2 (MPa)	1551	1418	1239	1732	1747	1712	302	174	158

ตารางผนวกที่ ก29 การทดสอบ Indirect Tensile Test โดยการผสมหินฝุ่น

Density 100 %		CMS-2			CSS-1		
ผสมหินฝุ่น (%)		1	3	5	1	3	5
AC100	Load (kg)	264.1	267.5	266.6	266.4	267.0	275.7
	IDT (ksc)	2.200	2.226	2.217	2.211	2.217	2.291
AC50	Load (kg)	215.4	230.7	245.4	275.6	285.4	270.8
	IDT (ksc)	1.790	1.914	2.044	2.284	2.368	2.242
CR100	Load (kg)	185.9	192.5	172.6	218.0	214.4	204.8
	IDT (ksc)	1.539	1.595	1.425	1.805	1.775	1.694



ภาพผนวกที่ ก9 การทดสอบ Indirect Tensile Test โดยการผสมหินฝุ่นของแอสฟัลต์อิมัลชัน
CMS-2



ภาพผนวกที่ ก10 การทดสอบ Indirect Tensile Test โดยการผสมหินฝุ่นของแอสฟัลต์อิมัลชัน

CSS-1

ภาคผนวก ข

ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพผนวกที่ ข1 การทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน



ภาพผนวกที่ ข2 การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ (Soaked)



ภาพผนวกที่ ข3 เครื่องมือทดสอบ Unconfined Compression Strength (UCS)



ภาพผนวกที่ ข4 เครื่องมือทดสอบ Indirect Tensile Test (IDT)



ภาพผนวกที่ ข5 เครื่องมือทดสอบ Resilient Modulus (M_R)



ภาพผนวกที่ ข6 ความเสียหายของก้อนตัวอย่างหลังการทดสอบ Indirect Tensile Test

ภาคผนวก ค
การออกแบบโครงสร้างถนน

การออกแบบโครงสร้างถนน

จากการทดสอบก่อนตัวอย่างโดยวิธี Indirect Tensile Test (IDT) เพื่อนำค่า IDT ไปปรับใช้ในการให้น้ำหนักกระทำต่อก่อนตัวอย่างทดสอบเพื่อจะหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ให้น้ำหนักที่กระทำต่อก่อนตัวอย่างที่ 20, 30, 40 เปอร์เซ็นต์ของค่า IDT ซึ่งในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวนั้น ได้ใช้วิธีการทดสอบแบบแช่น้ำ ไม่แช่น้ำ และทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมในการออกแบบโครงสร้างถนนด้วยโปรแกรม Thai-MET ของกรมทางหลวง เพื่อหาความหนาของโครงสร้างถนนแต่ละชั้น จึงต้องทราบข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมการออกแบบโครงสร้างถนน Thai-MET ข้อมูลจากผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค1 และ ค2 เป็นข้อมูลที่ใช้ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนน ซึ่งการออกแบบโครงสร้างถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183 ด้วยโปรแกรม Thai-MET ดังภาพผนวกที่ ค1 เมื่อมีอัตราส่วนผสมวัสดุผิวทางเดิมต่อหินคลุกเดิม โดยมีวัสดุเชื่อมประสานแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS - 2 และ CSS - 1 ตามอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งได้นำข้อมูลการออกแบบใส่ในโปรแกรม Thai-MET เช่น น้ำหนักมาตรฐานในการออกแบบ ระยะห่างของล้อรถบรรทุก Lane Factor Truck Factor และกำหนดระยะความสูงต่ำสุดและสูงสุดของชั้นทางแต่ละชั้น เมื่อชั้นโครงสร้างถนนชั้นผิวทางมีความหนาไม่น้อยกว่า 50 - 100 มิลลิเมตร ชั้นพื้นทางมีความหนาไม่น้อยกว่า 150 - 200 มิลลิเมตร และชั้นรองพื้นทางมีความหนาไม่น้อยกว่า 150 - 200 มิลลิเมตร โดยออกแบบโครงสร้างทางด้วยโปรแกรม Thai-MET แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค3

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของอิมัลชัน CMS-2 ที่อุณหภูมิ 35 °C

Resilient Modulus, MPa						
Type CMS-2 of Density 100 %						
Test 35 °C						
RAP:RCR	Soaked			Unsoaked		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	1160	1010	820	1160	980	830
25:75	1105	950	800	890	710	630
50:50	1010	990	925	1045	855	780
75:25	800	695	575	815	645	585
100:0	1010	920	845	910	745	700
Type CMS-2 of Density 95 %						
RAP:RCR	Soaked			Unsoaked		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	1095	990	995	1470	1050	880
25:75	990	890	850	1095	770	785
50:50	1080	830	740	970	940	845
75:25	965	880	710	810	680	610
100:0	1000	860	760	885	780	700
Type CMS-2 of Density 90 %						
RAP:RCR	Soaked			Unsoaked		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	790	765	660	1000	800	645
25:75	715	705	590	875	900	660
50:50	800	700	745	950	775	690
75:25	820	720	630	770	630	575
100:0	770	715	620	695	605	560

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของอิมัลชัน CSS-1 ที่อุณหภูมิ 35 °C

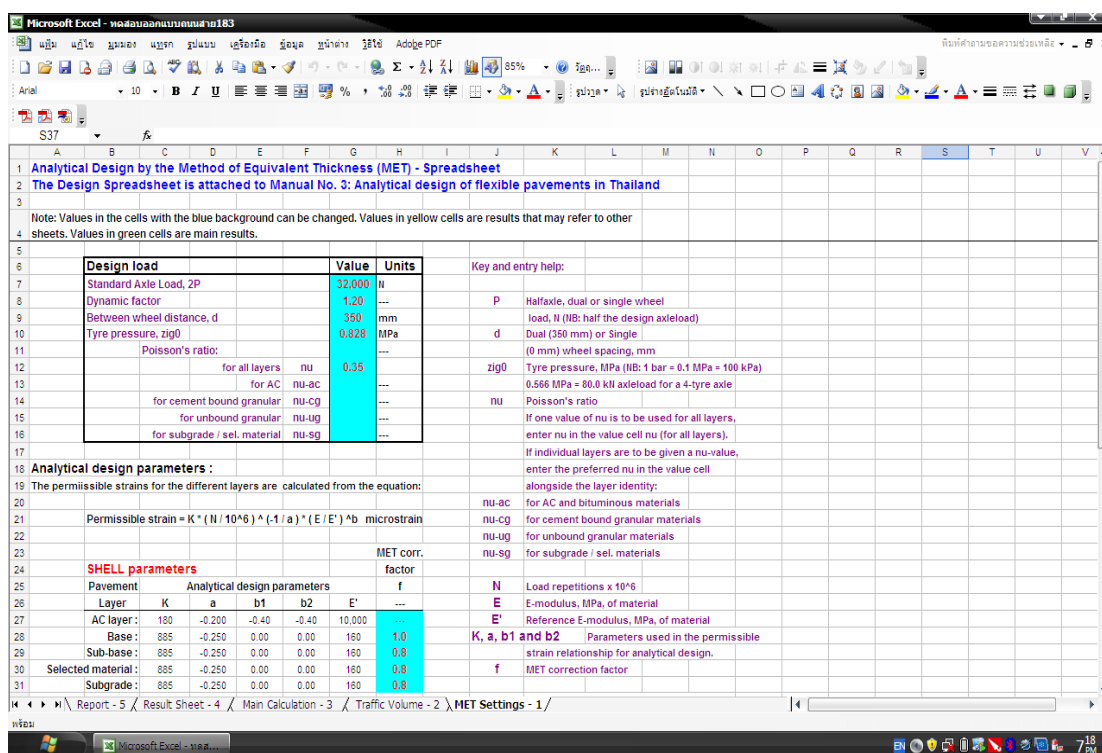
Resilient Modulus, MPa						
Type CSS-1 of Density 100 %						
Test 35 °C						
RAP:RCR	Soaked			Unsoaked		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	1455	1280	1075	1500	1290	910
25:75	1590	1375	1075	1900	1280	1100
50:50	1510	1310	1185	1380	1090	930
75:25	1470	1290	1245	1430	1225	1040
100:0	1040	920	790	1050	930	790
Type CSS-1 of Density 95 %						
RAP:RCR	Soaked			Unsoaked		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	1185	1040	895	1275	895	790
25:75	1335	1335	1160	1340	1110	880
50:50	1150	1060	940	1190	910	840
75:25	1190	1070	1000	1135	935	800
100:0	890	910	780	810	695	610
Type CSS-1 of Density 90 %						
RAP:RCR	Soaked			Unsoaked		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
0:100	725	730	515	1125	900	795
25:75	785	685	615	1235	825	770
50:50	675	615	600	845	660	560
75:25	945	820	770	895	720	625
100:0	750	710	690	700	600	525

ตารางผนวกที่ ค3 การออกแบบโครงสร้างถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183
ด้วยโปรแกรม Thai-MET

Pavement Design with Program Thai-MET						
Soaked						
Type	CMS-2			CSS-1		
Density	100%			100%		
Pavement Layer	AC	Base	Subbase	AC	Base	Subbase
0:100	64	150	150	50	150	150
25:75	66	150	150	50	150	150
50:50	59	150	150	50	150	150
75:25	78	150	150	50	150	150
100:0	63	150	150	66	150	150
Density	95%			95%		
Pavement Layer	AC	Base	Subbase	AC	Base	Subbase
0:100	54	150	150	60	150	150
25:75	63	150	150	50	150	150
50:50	69	150	150	58	150	150
75:25	70	150	150	54	150	150
100:0	68	150	150	67	150	150
Density	90%			90%		
Pavement Layer	AC	Base	Subbase	AC	Base	Subbase
0:100	73	150	150	81	150	150
25:75	77	150	150	76	150	150
50:50	68	150	150	76	150	150
75:25	75	150	150	67	150	150
100:0	75	150	150	67	150	150

ตารางผนวกที่ ค4 การออกแบบโครงสร้างถนนสายทางนครราชสีมา - ทางแยกชัยภูมิ กม. 183
ด้วยโปรแกรม Thai-MET

Pavement Design with Program Thai-MET						
Unsoaked						
Type	CMS-2			CSS-1		
Density	100%			100%		
Pavement Layer	AC	Base	Subbase	AC	Base	Subbase
0:100	64	150	150	59	150	150
25:75	75	150	150	50	150	150
50:50	67	150	150	58	150	150
75:25	77	150	150	51	150	150
100:0	71	150	150	66	150	150
Density	95%			95%		
Pavement Layer	AC	Base	Subbase	AC	Base	Subbase
0:100	61	150	150	66	150	150
25:75	66	150	150	61	150	150
50:50	63	150	150	63	150	150
75:25	76	150	150	66	150	150
100:0	71	150	150	76	150	150
Density	90%			90%		
Pavement Layer	AC	Base	Subbase	AC	Base	Subbase
0:100	74	150	150	66	150	150
25:75	73	150	150	67	150	150
50:50	71	150	150	79	150	150
75:25	78	150	150	75	150	150
100:0	79	150	150	75	150	150



ภาพผนวกที่ ค1 โปรแกรมการออกแบบโครงสร้างทาง Thai-MET

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล

นางสาวธัญรดี ก่อตั้งสัมพันธ

วัน เดือน ปี ที่เกิด

18 พฤศจิกายน 2523

สถานที่เกิด

อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ประวัติการศึกษา

วศ.บ. โยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล