

การปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง



นายวรุฒ เลิศไพฑูริย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF RECYCLED MATERIAL WITH BITUMEN EMULSION AS
BASE LAYER MATERIAL

Mr. Varut Lertpaichaiyon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
โดย	นายวรุฒ เลิศไพฑูริย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม)

วรุศ เลิศไพชยนต์ : การปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (IMPROVEMENT OF RECYCLED MATERIAL WITH BITUMEN EMULSION AS BASE LAYER MATERIAL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม, 117 หน้า.

ในปัจจุบัน กระบวนการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมโดยการผสมในที่เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในประเทศไทย แต่ด้วยการขาดความรู้ความเข้าใจในวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ทำให้วัสดุชนิดนี้ยังไม่ถูกนำมาใช้อย่างจริงจัง ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาวัสดุโครงสร้างทางเดิม ซึ่งประกอบด้วยวัสดุผิวทางเดิม (RAP) และวัสดุชั้นพื้นทางเดิม (RCR) ที่ขูดไสจากถนนที่ผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่ง นำมาผสมในห้องปฏิบัติการในสัดส่วน RAP25%:RCR75% และสัดส่วน RAP50%:RCR50% นำมาทดลองผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และ CSS-1 ในรูปแบบการผสมและการบดอัดที่กำหนด เพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 60 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม เพื่อใช้คำนวณหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม แล้วนำไปผสมก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ซึ่งผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมแสดงค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมที่ 3% ในทุกรูปแบบการผสม เมื่อนำค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมไปผสมก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว จะพบว่าวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนอิมัลชันจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าเฉลี่ย 2 ถึง 4 เท่า ของวัสดุที่ไม่ได้รับการปรับปรุง เมื่อทดลองผสมด้วยปริมาณบิทูเมนที่ต่ำกว่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม ค่าโมดูลัสคืนตัวจะมีค่าลดลงที่ทุกระดับความชื้น และเมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสคืนตัวที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับความชื้น จะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวที่ระดับความชื้นในพื้นที่ตามธรรมชาติจะให้ค่าสูงสุด รองลงมาที่ระดับความชื้นสถานะแช่เย็นและสถานะแห้งตามลำดับ แสดงให้เห็นคุณสมบัติที่ดีขึ้นของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนอิมัลชันในสภาพการใช้งานจริงอย่างชัดเจน

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470360121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: RESILIENT MODULUS / PAVEMENT RECYCLING / BITUMEN EMULSION

VARUT LERTPAICHAYON: IMPROVEMENT OF RECYCLED MATERIAL WITH BITUMEN EMULSION AS BASE LAYER MATERIAL. ADVISOR: ASST. PROF. BOONCHAI SANGPETNGAM, Ph.D., 117 pp.

Today, in Thailand, the in-place pavement recycling using as base layer material is the preferred procedure for pavement rehabilitation. However, the base stabilized material (BSM) has not been adopted yet because of lack of good understanding. In this study, the recycling material from the reclaimed asphalt pavement (RAP) and the reclaimed crushed rock (RCR) obtained from milling an old pavement surface and base layers are blended as ratio RAP25%:RCR75% and RAP50%:RCR50%, and mixed with CSS-1h and CSS-1 bitumen emulsions for various mixing combination and compaction level to produce the 100mm dia. by 60mm height samples. After preparing and curing samples, the indirect tensile tests are conducted to determine the optimum bitumen content of mix which shown 3% bitumen for all mixing combination. Then, the 100mm dia. by 200mm height samples are produced to conducted resilient modulus test. The resilient modulus of BSM is approximately 2 – 4 times higher than the non-stabilized samples. The BSM samples mixed with lower bitumen content show the lower resilient modulus at all moisture condition. Under various moisture condition in BSM samples, the resilient modulus of equilibrium condition is higher than wet condition and dry condition respectively. The improvement of properties of BSM will achieve the better performance as a pavement base layer

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คอยดูแลและให้คำปรึกษาแนวทางดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์ และศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง สำหรับคำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงความกรุณาเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรพงษ์ จิตเสงี่ยมสำหรับคำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงความกรุณาเสียสละเวลา เดินทางจากประเทศออสเตรเลียมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล รองศาสตราจารย์ ดร. สรวิต นฤปิติ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัดร์ บุญญะฐิติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ-ดร.ปิยธิดา เรืองรัมย์ รองศาสตราจารย์ ดร. เกษม ชูจารุกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ ศิริโสภณศิลป์ ดร.สุพัฒน์ สุวรรณการ สำหรับความช่วยเหลือและความเห็นที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนทุนในวิจัย และขอขอบคุณทีมงาน ประกอบด้วย คุณอรุณรัตน์ วุฒิมงคลชัย คุณสุทธิพงษ์ ธีัญญะพิเศษศักดิ์ คุณวิเชียร ดันติธรรมภูษิต คุณปองพล ทวีมา คุณกรเทพ ประเสริฐศิริพันธ์ ดร.วัชชรินทร์ งามพิงพิศ คุณวีรวุฒิ อิมโษษุฒิ คุณเปรมจิตร์ ขอผลกลาง สำหรับความสนับสนุนคำแนะนำและความทุ่มเทช่วยเหลือแก้ปัญหาปัญหาอันมีล้นให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายช่างชาญพินิจ พินิจศักดิ์ ผู้อำนวยการแขวงทางหลวงสุรินทร์ และนายช่างพินันท์ ปรากฏชื่อ แขวงทางหลวงสุรินทร์ สำนักงานหลวงที่ 7 (อุบลราชธานี) กรมทางหลวง และห้างหุ้นส่วนจำกัด อึ้งทงกั ที่อนุเคราะห์วัสดุโครงสร้างชั้นทางเดิมและอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ที่เอื้อเพื่อเครื่องทดสอบ UTM-14P และทีมงาน ประกอบด้วย ดร.อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์ คุณเศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ คุณธัญฤดี ก่อตั้งสัมพันธ์ นางนิตากร สุวรรณมาลา ที่ดูแลผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงชนบทที่เอื้อเพื่อเครื่องทดสอบ UTM-14P และขอขอบคุณ บริษัท บุญเยี่ยมและสหาย จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.วิชากร เฮงษฎ์กุล และคุณสมบุรณ์ รัตนินิ จากบริษัทเวิร์ทเกิน (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับความช่วยเหลือและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์เป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.ธันวิน สวัสดิ์ตานต์ สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวง ผู้สร้างแรงบันดาลใจให้มาเข้าศึกษาระดับปริญญาโท และให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์เป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายศิวารักษ์ อุ่นศิริไย นายจันเพ็ง พรหมมาออน นายชวลิต ชูสุวรรณ นายไพศาล ปุ้ยไชยสอน น.ส.ศิริลักษณ์ จักรเพชร น.ส.ชนิดา อินทเศียร น.ส. ศศิธร ทองทวี ครูเนื่อง เหล็กขนาย ครูสมพงษ์ ขำแจ้ ครูอุดมศักดิ์ เกตุบุตร ครูอรุณพล คำผาง นายวรากรณ์ จิตต์สม ที่ช่วยเหลือจนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และน้องสาวของผู้วิจัย ที่ได้ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ ตลอดงานวิจัยนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 การเก็บตัวอย่างในสนาม.....	25
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม.....	26
3.3 การבודัดก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมผสมบิทูเมนอิมัลชัน	27
3.4 การทดลองชั้นนําร่อง.....	28
3.5 การทดลองชั้นที่ 1	30
3.6 การทดลองชั้นที่ 2	33

3.7	สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย	36
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในการทดลองชั้นนำร่องและชั้นที่ 1	37
4.1	การเก็บตัวอย่างในสนาม	37
4.1.1	การเก็บตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม	37
4.1.2	การเก็บตัวอย่างขนาดคละ	43
4.2	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม	46
4.2.1	การทดสอบหาขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม	46
4.2.2	การเตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิมสำหรับการทดลอง	47
4.2.3	การทดสอบบดอัดวัสดุแบบสูงกว่ามาตรฐาน	49
4.2.4	การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม	51
4.3	ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบพลังงานการบดอัด	53
4.4	ผลการทดลองหาปริมาณบิตูเมนที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วน RAP25%:RCR75%	55
4.5	การทดลองหาความต้องการปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม (Active filler need)	58
4.6	ผลการทดลองหาปริมาณบิตูเมนที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วน RAP50%:RCR50%	61
4.7	ผลการทดลองชั้นที่ 1	63
4.8	การวิเคราะห์ทางสถิติของผลการทดลองชั้นที่ 1	78
4.9	สรุปการดำเนินงานการทดลองชั้นนำร่องและการทดลองชั้นที่ 1	83
บทที่ 5	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลในการทดลองชั้นที่ 2	87
5.1	รายละเอียดการทดลอง	87
5.2	ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)	88
5.2.1	ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว	88
5.2.2	การวิเคราะห์ทางสถิติของผลการทดลองชั้นที่ 2	93
5.2.3	การวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ k	98

5.3 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน (Triaxial Test).....	102
5.4 สรุปการทดลองขั้นที่ 2	108
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	112
6.1 สรุปผลการศึกษา	112
6.2 ข้อเสนอแนะ	113
รายการอ้างอิง	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	117



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1-1 รอยแตกร้าวตามแนวขวางและแนวยาวเป็นลักษณะบล็อก (Block cracking) บนถนนที่บูรณะด้วยวิธีการนำวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) โดยใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม	2
รูปที่ 1-2 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	4
รูปที่ 2-1 เครื่องจักรผสมแบบเย็น	7
รูปที่ 2-2 เครื่องจักรที่ใช้ และลำดับของเครื่องจักร ในการผสมเย็นแบบในที่โดยใช้ทั้ง ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันเป็นสารปรับปรุงคุณภาพ	8
รูปที่ 2-3 การทำงานของเครื่องจักร Recycler	8
รูปที่ 2-4 การผลิตบิทูเมนอิมัลชัน	9
รูปที่ 2-5 แผนภูมิพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางจากการเลือกใช้วัสดุชนิดต่างๆ	10
รูปที่ 3-1 เครื่องจักรรีไซเคิล ยี่ห้อ Wirtgen รุ่น 2200 CR.....	26
รูปที่ 3-2 เครื่อง Automatic Marshall Compactor	27
รูปที่ 3-3 Vibratory hammer ยี่ห้อ Makita รุ่น HM0810TA.....	28
รูปที่ 4-1 แผนที่แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม ทางหลวงหมายเลข 2262	37
รูปที่ 4-2 ลักษณะภาพตัดขวางของทางหลวงหมายเลข 2262.....	38
รูปที่ 4-3 กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการชูดัสน์.....	39
รูปที่ 4-4 ตั้งแนวเครื่องจักรรีไซเคิล.....	39
รูปที่ 4-5 เริ่มการชูดัสน์ชั้นผิวทาง	40
รูปที่ 4-6 ตรวจสอบความลึกของการชูดัสน์	40
รูปที่ 4-7 วัสดุผิวทางเดิมที่ถูกชูดัสน์แล้วกองอยู่กับพื้นถนน.....	40
รูปที่ 4-8 เจ้าหน้าที่หมวดการทางศีขรภูมิ กำลังโกยวัสดุผิวทางเดิมใส่กระสอบ.....	41

รูปที่ 4-9 เจ้าหน้าที่หมวดการทางศรีนครินทร์ กำลังขนกระสอบวัสดุชั้นรถบรรทุก ไปจัดเก็บที่หมวดการทางศรีนครินทร์	41
รูปที่ 4-10 ถอยเครื่องจักรรีไซเคิลมายังตำแหน่งเริ่มต้น เตรียมชุดไสชั้นพื้นทาง	42
รูปที่ 4-11 เช็กระดับความลึกของการชุดไสชั้นพื้นทาง	42
รูปที่ 4-12 เจ้าหน้าที่หมวดการทางศรีนครินทร์ กำลังโยกวัสดุชั้นพื้นทางเดิมใส่กระสอบ	42
รูปที่ 4-13 แสดงลักษณะโครงสร้างทาง ในช่วงที่เก็บตัวอย่าง	43
รูปที่ 4-14 นำวัสดุมาถล่มกลับหลุมที่เกิดจากการชุดไส	43
รูปที่ 4-15 ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการของกรมทางหลวง	44
รูปที่ 4-16 เครื่องจักร Wirtgen W2200 ขณะทำงาน	44
รูปที่ 4-17 เก็บตัวอย่างวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์แล้ว	45
รูปที่ 4-18 ตัวอย่างวัสดุที่เก็บได้	45
รูปที่ 4-19 นำวัสดุฝั่งแดดบนภาคเหล็กให้แห้ง	45
รูปที่ 4-20 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ชุดจากโครงการบูรณะสายทางหลวงหมายเลข 2262	47
รูปที่ 4-21 กราฟขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก่อนตัวอย่างในงานวิจัย	48
รูปที่ 4-22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสม ของวัสดุ RAP25%:RCR75% แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์	49
รูปที่ 4-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม	50
รูปที่ 4-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสม ของวัสดุ RAP50%:RCR50% แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์	50
รูปที่ 4-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP50%:RCR50% ผสมกับปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม	51
รูปที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดและระยะยุบของตัวอย่างที่ 1 ของการทดสอบ CBR	52

รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดและระยะยุบของตัวอย่างที่ 2 ของการทดสอบ CBR.....	52
รูปที่ 4-28 ก่อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS _{dry}	55
รูปที่ 4-29 ก่อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS _{wet}	56
รูปที่ 4-30 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม.....	56
รูปที่ 4-31 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่น และบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h.....	57
รูปที่ 4-32 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่น และบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1.....	58
รูปที่ 4-33 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h.....	60
รูปที่ 4-34 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1.....	61
รูปที่ 4-35 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP50%:RCR50% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h.....	62
รูปที่ 4-36 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP50%:RCR50% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1.....	63
รูปที่ 4-37 (ซ้าย) แบบหล่อและการบดอัดเตรียมก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร (ขวา) ตัวอย่างที่บดอัดเรียบร้อยแล้ว กำลังถูกแกะออกจากแบบ หล่อ.....	64
รูปที่ 4-38 การบ่มก้อนตัวอย่างเพื่อให้มีระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ.....	64
รูปที่ 4-39 (ซ้าย) ก้อนตัวอย่างที่บรรจุในเซลล์ ก่อนเริ่มทดสอบ.....	65
รูปที่ 4-40 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP25%:RCR75% ในแต่ละส่วนผสม (100% ของ modified compaction).....	68
รูปที่ 4-41 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP25%:RCR75% ในแต่ละส่วนผสม (95% ของ modified compaction).....	71

รูปที่ 4-42 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP50%:RCR50% ในแต่ละส่วนผสม (100% ของ modified compaction).....	74
รูปที่ 4-43 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP50%:RCR50% ในแต่ละส่วนผสม (95% ของ modified compaction)	77
รูปที่ 5-1 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างผสมบิทูเมน 2%.....	90
รูปที่ 5-2 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างผสมบิทูเมน 3%.....	92
รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากคำนวณและค่าที่ได้จากทดลอง	102
รูปที่ 5-4 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกนของตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% โดยน้ำหนัก.....	103
รูปที่ 5-5 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน ของตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% โดยน้ำหนัก.....	104
รูปที่ 5-6 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 2% ที่สถานะแห้ง	105
รูปที่ 5-7 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 2% ที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติ.....	105
รูปที่ 5-8 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 2% ที่สถานะแช่น้ำ.....	105
รูปที่ 5-9 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 3% ที่สถานะแห้ง	106
รูปที่ 5-10 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 3% ที่สถานะ ความชื้นตามธรรมชาติ.....	106
รูปที่ 5-11 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 3% ที่สถานะแช่น้ำ	106
รูปที่ 5-12 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	107

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ เมื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มเพียงชนิดเดียว	16
ตารางที่ 2-2 ปริมาณปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ และแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม.....	17
ตารางที่ 2-3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	21
ตารางที่ 3-1 รายการตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองขั้นที่ 1.....	32
ตารางที่ 3-2 รายละเอียดตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองขั้นที่ 2.....	34
ตารางที่ 3-3 จำนวนก้อนตัวอย่างทั้งหมดในงานวิจัยนี้.....	36
ตารางที่ 4-1 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ขุดจากโครงการบูรณะสายทาง ทางหลวงหมายเลข 2262	46
ตารางที่ 4-2 ค่าการขยายตัวของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุง	52
ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบ Penetration test และค่า CBR ของตัวอย่าง RAP25%:RCR75%....	53
ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานการบดอัดของบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h.....	54
ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานการบดอัดของบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1	54
ตารางที่ 4-6 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับ หินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h	56
ตารางที่ 4-7 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับ หินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1	57
ตารางที่ 4-8 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h	60
ตารางที่ 4-9 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1	60

ตารางที่ 4-10 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP50%:RCR50% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h	62
ตารางที่ 4-11 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP50%:RCR50% ผสมกับ ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1.....	62
ตารางที่ 4-12 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างควบคุมวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมโดยไม่เติมบิทูเมนอิมัลชันและปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction	65
ตารางที่ 4-13 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction	66
ตารางที่ 4-14 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction	66
ตารางที่ 4-15 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction	67
ตารางที่ 4-16 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction	67
ตารางที่ 4-17 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction	69
ตารางที่ 4-18 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction	69
ตารางที่ 4-19 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction	70

<p>ตารางที่ 4-20 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction</p>	70
<p>ตารางที่ 4-21 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างควบคุมวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมโดยไม่เติมบิทูเมนอิมัลชันและปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction</p>	72
<p>ตารางที่ 4-22 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction</p>	72
<p>ตารางที่ 4-23 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction</p>	73
<p>ตารางที่ 4-24 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction</p>	73
<p>ตารางที่ 4-25 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction</p>	74
<p>ตารางที่ 4-26 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction</p>	75
<p>ตารางที่ 4-27 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction</p>	76
<p>ตารางที่ 4-28 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction</p>	76

ตารางที่ 4-29 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction	77
ตารางที่ 4-30 รูปแบบการผสมและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ	79
ตารางที่ 4-31 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ของปัจจัยสัดส่วนผสม	80
ตารางที่ 4-32 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test จากปัจจัยชนิดของบิทูเมนอิมัลชัน	81
ตารางที่ 4-33 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test จากปัจจัยประเภทของสารผสมเพิ่ม	82
ตารางที่ 4-34 ผลทดสอบ t-test จากปัจจัยระดับการบดอัด.....	83
ตารางที่ 5-1 รูปแบบการผสมและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองขั้นที่ 2.....	88
ตารางที่ 5-2 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 2% ที่สถานะแห้ง	89
ตารางที่ 5-3 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 2% ที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติ	89
ตารางที่ 5-4 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 2% ที่สถานะแช่น้ำ.....	90
ตารางที่ 5-5 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 3% ที่สถานะแห้ง	91
ตารางที่ 5-6 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 3% ที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติ	91
ตารางที่ 5-7 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 3% ที่สถานะแช่น้ำ.....	92
ตารางที่ 5-8 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test จากปัจจัยปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม	95
ตารางที่ 5-9 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ระหว่างสถานะแห้งกับสถานะแช่น้ำ.....	96
ตารางที่ 5-10 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ระหว่างสถานะแห้ง กับสถานะความชื้นตามธรรมชาติ.....	97
ตารางที่ 5-11 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ระหว่างสถานะแช่น้ำ กับสถานะความชื้นตามธรรมชาติ	98
ตารางที่ 5-12 ผลการวิเคราะห์ค่า k_1 k_2 และ k_3 ของแต่ละรูปแบบส่วนผสม	99
ตารางที่ 5-13 ผลการวิเคราะห์ค่า k_1 k_2 และ k_3 ของวัสดุที่ไม่ได้รับการปรับปรุง	100

ตารางที่ 5-14 ผลการวิเคราะห์ค่า k_1 k_2 และ k_3 พิจารณาสถานะแช่แข็งร่วมกับความชื้น ธรรมชาติ.....	100
ตารางที่ 5-15 รูปแบบการผสมและจำนวนตัวอย่างที่ทดสอบกำลังอัดสามแกน	102
ตารางที่ 5-16 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงยึดเหนี่ยวในช่วง 0-150 กิโลปาสคาล เมื่อกำหนดให้ค่า φ = 0.....	104
ตารางที่ 5-17 ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 และเงื่อนไข ของสมการประมาณกำลัง	111



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถนนลาดยางหรือถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย เมื่อผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่งจะเกิดความเสื่อมสภาพ ทั้งจากปริมาณการจราจรสะสม น้ำหนักรถบรรทุก และสภาพอากาศที่ร้อนมากขึ้น จากงานวิจัยการสำรวจสภาพความเสียหายและหาสาเหตุของความเสียหายหลักของถนนลาดยางในประเทศไทยของกรมทางหลวง พบว่าถนนลาดยางจำนวนมากเกิดความเสียหายก่อนอายุการใช้งานที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีความเสียหายแบบร่องล้อ (Rutting) เป็นความเสียหายหลัก จากการเจาะสำรวจความเสียหายพบว่าเกิดความเสียหายแบบร่องล้อทั้งในโครงสร้างชั้นผิวทางและโครงสร้างชั้นพื้นทาง ในอดีตที่ผ่านมาวิธีการบูรณะเดิมคือการรื้อถนนเดิมและทำการก่อสร้างใหม่ แต่วิธีนี้ทำให้ต้องเสียงบประมาณไปเป็นจำนวนมาก และในปัจจุบันได้เกิดปัญหาการขาดแคลนวัสดุที่มีคุณภาพดีหรือบางครั้งวัสดุก่อสร้างก็อยู่ห่างไกล ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงและเกิดปัญหาตามมาในการขนส่ง ทั้งเรื่องของปัญหาจราจร ฝุ่นละอองจากการขนส่ง จากปัญหาดังกล่าวกรมทางหลวงจึงได้นำวิธีการปรับปรุงวัสดุในชั้นโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) มาใช้ ซึ่งเทคนิคที่กรมทางหลวงนำมาใช้ในปัจจุบันคือวิธีการนำวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) มาใช้ในการก่อสร้างบูรณะถนน โดยใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุผสมเพิ่ม จากการดำเนินการที่ผ่านมา กรมทางหลวงพบว่าประสบผลสำเร็จเป็นอย่างดีในระดับหนึ่ง แต่พบปัญหาที่เกิดขึ้นคือ รอยแตกร้าว (Cracking) ที่ผิวจราจร นอกจากนี้ถ้าวัสดุชั้นผิวทางแอสฟัลต์เดิมมีความหนาเกินไป จะส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเกินไปทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากขึ้น หรืออาจต้องขุดใส่ชั้นผิวทางแอสฟัลต์เดิมออกเพื่อให้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มีความเหมาะสมซึ่งก็เป็นงานที่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

ในต่างประเทศ การนำวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) ยังมีทางเลือกของสารผสมเพิ่มอีก 2 ชนิด คือการใช้ปิทุเมนอิมัลชันและการใช้โฟมปิทุเมน ทางกรมทางหลวงจึงได้เริ่มศึกษาการนำวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้มาใช้งาน โดยมีโครงการทดลองบูรณะทางด้วยเทคนิคนี้เพียง 2 – 3 โครงการตลอดช่วง 6 ปีที่ผ่านมา ซึ่งนับว่ายังไม่เพียงพอต่อการศึกษาถึงคุณสมบัติด้านทางวิศวกรรมเพื่อสรุปไปเป็นแนวทางในการนำไปปฏิบัติ



รูปที่ 1-1 รอยแตกร้าวตามแนวขวางและแนวยาวเป็นลักษณะบล็อก (Block cracking) บนถนนที่บูรณะด้วยวิธีการนำวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) โดยใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม

งานวิจัยนี้จึง มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงการนำบิทูเมนอิมัลชันมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการผสมเย็น ตั้งแต่การศึกษาปัจจัยต่างๆ ในด้านการออกแบบส่วนผสม คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ปรับปรุงแล้ว เพื่อนำไปใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบก่อสร้างและนำไปสู่ข้อแนะนำในการออกข้อกำหนดและมาตรฐานการก่อสร้างสำหรับการบูรณะทางโดยวิธีการนำวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) ในมุมมองของการนำไปปฏิบัติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีออกแบบส่วนผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำกลับมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมทั้งส่วนที่เป็นวัสดุผิวทางเดิมและวัสดุพื้นทางเดิมที่ได้รับการขุดไถจากถนนที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง มาผสมตามสัดส่วนและเตรียมตัวอย่างเพื่อ

ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงแล้วในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีปัจจัยตัวแปรต้นที่จะนำมาศึกษาดังนี้

- สัดส่วนของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ซึ่งเกิดจากการผสมของวัสดุผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) กับวัสดุพื้นทางเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR)
- ชนิดของบิทูเมนอิมัลชัน
- ปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิม
- ชนิดของสารผสมเพิ่ม 2 ระดับคือ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และหินฝุ่น
- ระดับความแน่นของการบดอัดก้อนตัวอย่าง 2 ระดับคือ ระดับเท่ากับและระดับต่ำกว่าค่าความหนาแน่นของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน
- ระดับความชื้นหลังการบดอัดตัวอย่าง 3 ระดับคือ ระดับความชื้นที่สถานะแห้ง ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำ

ตัวแปรตามในการศึกษานี้ คือคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันแล้ว ประกอบด้วย

- ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS)
- ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_r)
- ค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) และค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (angle of internal friction)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

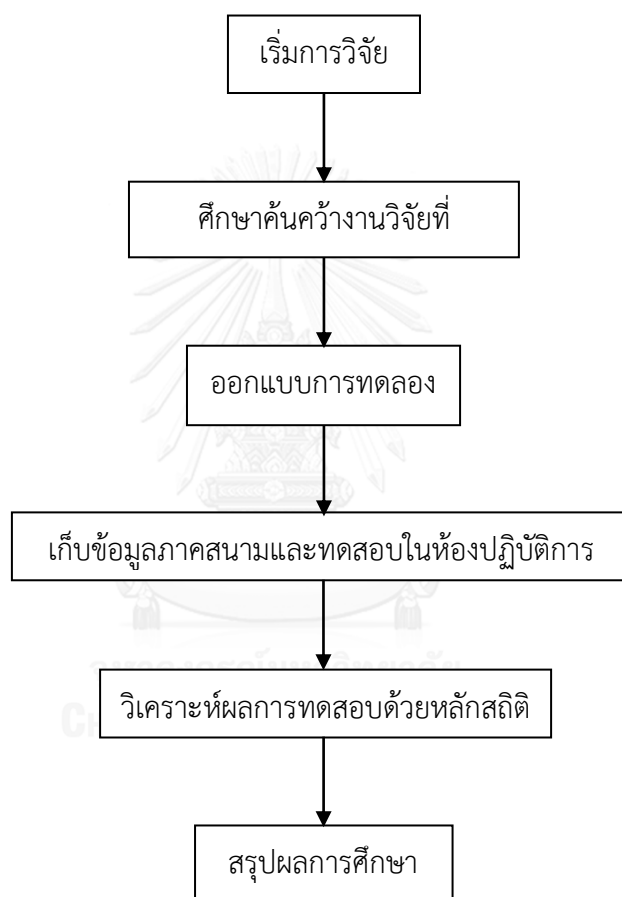
หลังจากงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ สิ่งที่จะคาดว่าจะได้รับจากการดำเนินงานวิจัยนี้ มีดังนี้

1. วิธีการออกแบบส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่จะนำมาปรับปรุงโดยใช้บิทูเมนอิมัลชันเป็นสารผสม
2. ทราบถึงคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมที่ผสมบิทูเมนอิมัลชัน
3. ข้อเสนอแนะในการออกแบบโครงสร้างทาง เพื่อคำนวณหาความหนาของชั้นพื้นทางที่ก่อสร้างด้วยวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมที่ผสมบิทูเมนอิมัลชัน

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) มีทางเลือกของสารผสมเพิ่มอยู่ 2 ชนิด คือการใช้บิทูเมนอิมัลชันและการใช้โฟมบิทูเมน ซึ่งมีวิธีการออกแบบ การเตรียมตัวอย่าง และการก่อสร้างคล้ายคลึงกัน ในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยนี้

เกี่ยวข้องจะดำเนินการศึกษาไปทั้ง 2 รูปแบบ แต่ในการออกแบบการทดลองและการนำไปใช้ จะเลือกใช้เฉพาะบทุเมอนอิมัลชันเพียงชนิดเดียว หลังจากนั้นจะทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมในด้านต่างๆ ทั้งการทดสอบแบบสถิตและการทดสอบแบบพลวัต และนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ สุดท้ายทำการสรุปผลการศึกษาเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้ต่อไป ขั้นตอนการดำเนินงานสามารถแสดงดังรูปที่ 1-2



รูปที่ 1-2 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในยุคปัจจุบัน การพัฒนาทุกสรรพสิ่งในโลก จะต้องกล่าวถึงการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable) การเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental friendly) และการลดต้นทุนเพื่อให้สามารถแข่งขันได้ (Competitiveness) ไม่เว้นแม้แต่การก่อสร้างถนน ในการก่อสร้างถนนขนาดใหญ่ สักโครงการหนึ่ง จะต้องใช้วัสดุต่างๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง วัสดุเหล่านี้ย่อมมีการเสื่อมสภาพ ในการบูรณะด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมคือรีอัสฟัลต์เดิมออกแล้วก่อสร้างด้วยวัสดุใหม่ที่มีคุณภาพดี แต่ด้วยในปัจจุบัน ข้อจำกัดต่างๆ ทั้งการขาดแคลนแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพ ราคาค่าขนส่งที่แพงขึ้นเนื่องจากราคาน้ำมันโลกปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และงบประมาณที่มีจำกัด หากสามารถนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ก็จะช่วยให้เกิดประโยชน์อย่างมหาศาล

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่ไม่ใช่สิ่งใหม่ที่เกิดขึ้นบนโลก จุดเริ่มต้นของการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่เริ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงต้นของคริสต์ทศวรรษที่ 1900 โดยการปรับปรุงถนนเก่าด้วยวิธีผสมเย็นโดยใช้ยางมะตอยในการปรับปรุง หลังจากนั้นก็มีความพยายามจะนำวิธีการนี้มาใช้ แต่มาเริ่มประสบความสำเร็จในช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 1970 ซึ่งมีแรงกระตุ้น 2 ประการ นั่นคือ (1) วิกฤตราคาน้ำมันโลกในปีค.ศ. 1970 และ (2) การพัฒนาเครื่องจักรผสมเย็นขนาดใหญ่ (Large-scale Cold Planing Equipment) และการพัฒนาหัวกัดแบบทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่สามารถถอดเปลี่ยนได้โดยง่ายที่เกิดขึ้นในปีค.ศ. 1975 หลังจากนั้นได้เกิดการพัฒนาและนำไปใช้อย่างแพร่หลายตลอดช่วง 25 ปีต่อมา

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่ในการก่อสร้างถนนในโลกนี้ มีหลากหลายวิธีการ สมาคม Asphalt Recycling and Reclaiming Association แห่งสหรัฐอเมริกาได้แบ่งแยกวิธีการออกเป็น 5 หมวดหมู่ (Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), 2001) ได้แก่

- Cold Planing (CP)
- Hot Recycling
- Hot In-Place Recycling (HIR)
- Cold Recycling (CR)
- Full Depth Reclamation (FDR)

สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญในการแบ่งหมวดหมู่ คือ (1) กระบวนการผสมแบบในที่ (In-Place) หรือการชุดใสแล้วนำกลับไปผสมในโรงงาน (In-Plant) และ (2) การผสมด้วยความร้อน (Hot Recycling) กับ การผสมเย็น (Cold Recycling)

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling)

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น เป็นการนำเอาวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมที่ถูกชุดใสออก มาปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมสารปรับปรุงคุณภาพ แล้วนำกลับไปใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างทาง คุณลักษณะที่สำคัญของวิธีนี้ คือไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม จึงสามารถลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนและลดมลพิษที่เกิดขึ้น ในวิธีการนี้สามารถทำการผสมทั้งในรูปแบบของการผสมในที่ (In-Place) และการนำกลับมาผสมในโรงงาน (In-Plant) ส่วนสารปรับปรุงคุณภาพที่ได้รับความนิยมคือปูนซีเมนต์และบิทูเมน โดยบิทูเมนนั้นมีการใช้งานทั้งที่อยู่ในรูปของบิทูเมนอิมัลชันและโพนบิทูเมน

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่ในชั้นพื้นทางโดยวิธีการผสมเย็น เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างชั้นทาง โดยความหนาของถนนใหม่จะเพิ่มขึ้น 5 – 10 เซนติเมตรเท่านั้น นอกจากนี้จะสามารถประหยัดวัสดุแล้ว ยังช่วยรักษารูปแบบเรขาคณิตของสายทางให้คงเดิม และไม่มีผลกระทบต่ออาคารในแนวสองข้างทางให้เห็นอย่างชัดเจน (วรภัทร เกตุนุติ, 2546)

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาใช้ใหม่โดยการชุดใสแล้วนำไปผสมในโรงงาน (In-Plant Recycling)

วิธีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่รูปแบบนี้ จะดำเนินการชุดใสถนนที่มีอยู่แล้วนำกลับไปทำการปรับปรุงคุณภาพที่โรงงาน จากนั้นจึงนำกลับมาปูที่จุดที่กำหนดไว้ หากเปรียบเทียบระหว่างการนำกลับไปผสมในโรงงาน (In-Plant) กับ การผสมแบบในที่ (In-Place) การผสมในโรงงานจะมีข้อที่ดีกว่าดังนี้

- สามารถควบคุมปริมาณวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงได้ ทำให้วัสดุที่ผ่านการปรับปรุงแล้วมีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอ สามารถกำหนดสัดส่วนผสมของวัสดุมวลรวมในแต่ละชนิดได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงลักษณะของวัสดุมวลรวมได้ เช่น บดย่อยให้ละเอียดขึ้นหรือร้อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ส่วนผสมมีขนาดและสัดส่วนที่เหมาะสม
- สามารถควบคุมคุณภาพในการผสมวัสดุได้ โดยการดำเนินการปรับปรุงวัสดุจะผสมในเครื่องผสม ทำให้สามารถควบคุมการผสมและเวลาในการผสม จนกว่าวัสดุต่างๆ และสารปรับปรุงคุณภาพจะเข้ากันได้ดี

- สามารถผสมเก็บไว้ได้ คือดำเนินการผสมแล้วจัดเก็บไว้ใช้ในภายหลัง โดยเฉพาะการปรับปรุงคุณภาพที่ใช้บิทูเมนเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้ต้องระมัดระวังในเรื่องเวลาในการเก็บวัสดุที่ผสมแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์



รูปที่ 2-1 เครื่องจักรผสมแบบเย็น

(Wirtgen GmbH, 2010)

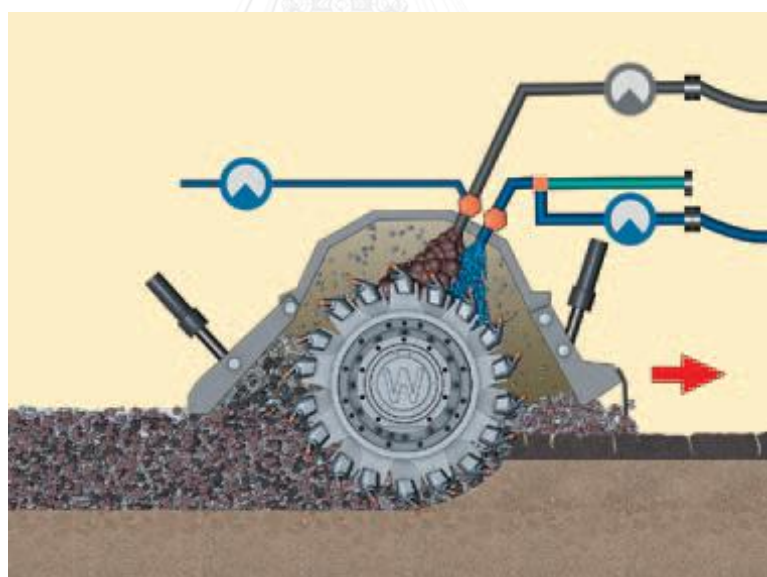
การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยการผสมแบบในที่ (In-Place Recycling)

วิธีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่รูปแบบนี้ ขั้นตอนการทำงานที่สำคัญทั้งหมดจะกระทำโดยเครื่องจักรหลักเพียงเครื่องเดียว ตั้งแต่ชุดไสวัสดุผิวทางและวัสดุพื้นทางเดิม ผิดสารผสมเพิ่ม ทำการผสมวัสดุ และการปูวัสดุกลับ เรียกเครื่องจักรนี้ว่าเครื่องจักรสำหรับหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ มีทั้งแบบล้อติดตะขาบ (Track-mounted recycler) และล้อยาง (Tire-mounted recycler) ปกติแล้วการผสมแบบในที่จะไปกันเป็นขบวน โดยใช้เครื่องจักรสำหรับหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมเป็นตัวดันหรือดึงรถบรรทุกสารผสมเพิ่ม เพื่อเคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมๆ กัน ตามด้วยรถบดถนนและอาจจะมีการเกลี่ยดินทำงานร่วมด้วย รถบรรทุกสารผสมเพิ่มอาจมีจำนวน 1 คันหรือ 2 คันขึ้นกับจำนวนชนิดของสารผสมเพิ่มที่ต้องใช้



รูปที่ 2-2 เครื่องจักรที่ใช้ และลำดับของเครื่องจักร ในการผสมเยนแบบในที่ใช้ทั้ง ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันเป็นสารปรับปรุงคุณภาพ (Wirtgen GmbH, 2010)

การทำงานของเครื่องจักรสำหรับหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycler) เริ่มต้นจากตัมจะทำการขุดรื้อวัสดุในชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง ผสมให้เข้ากันภายในห้องผสม (Mixing chamber) จากนั้นฉีดน้ำและสารปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งอาจเป็นบิทูเมนอิมัลชัน โฟมบิทูเมน หรือปูนซีเมนต์ที่อยู่ในรูปน้ำปูน (Slurry) หรือใช้ร่วมกันหลายชนิดก็ได้ ควบคุมปริมาณสารที่ฉีดเพิ่ม ด้วยระบบไมโครโปรเซสเซอร์โดยทำการฉีดผ่านหัวสเปรย์เพื่อการกระจายตัวของสารปรับปรุงคุณภาพ ที่ดีและควบคุมให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมกับการบดอัด

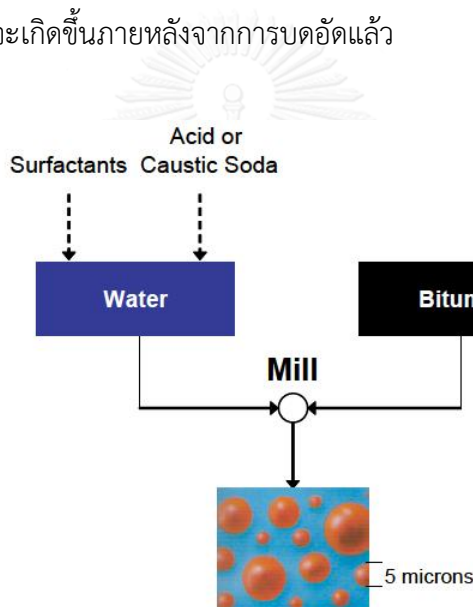


รูปที่ 2-3 การทำงานของเครื่องจักร Recycler (Wirtgen GmbH, 2010)

บิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Emulsion)

บิทูเมนอิมัลชัน เกิดจากการนำวัสดุบิทูเมนไปแขวนลอยในน้ำ โดยใช้สาร Emulsifying agent ช่วยให้แขวนลอยได้ ซึ่งสาร Emulsifying agent นี้จะเป็นตัวกำหนดประจุของบิทูเมนอิมัลชัน โดยปกติแล้วบิทูเมนอิมัลชันจะมีอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการผลิตบิทูเมนอิมัลชันจึงต้องทำในจำนวนที่เหมาะสมกับการใช้งาน

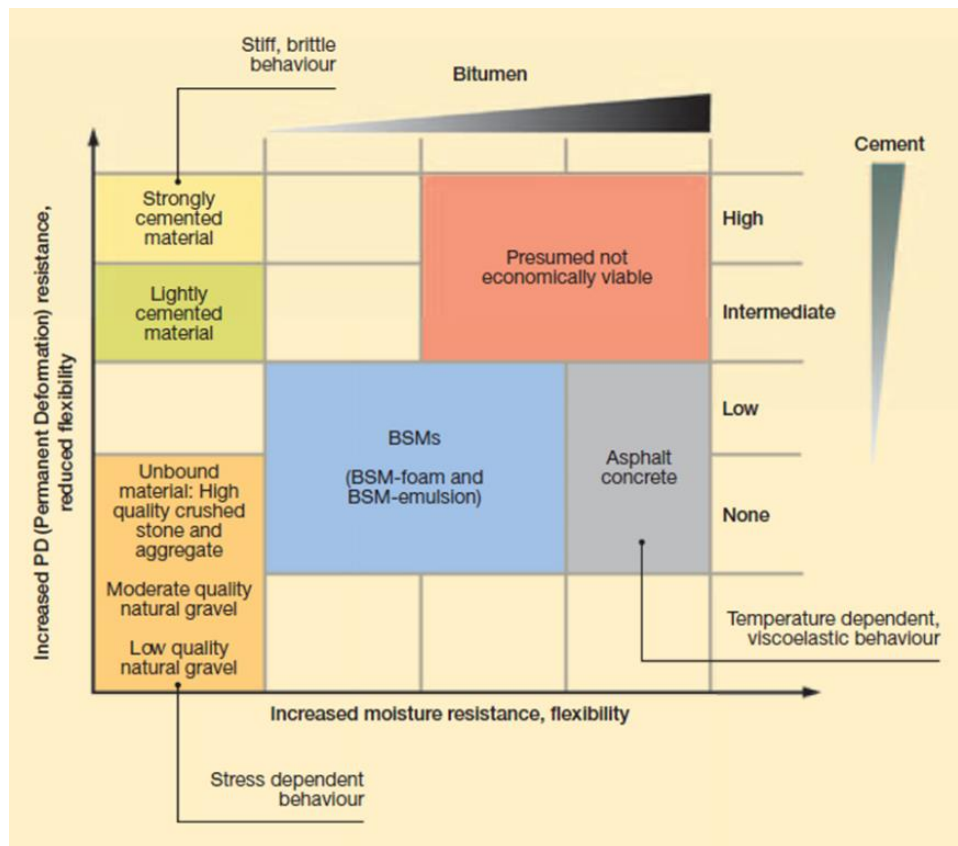
เมื่อบิทูเมนอิมัลชันผสมกับหินแล้ว ประจุของบิทูเมนอิมัลชันจะไปจับกับประจุตรงข้ามกันที่อยู่กับหินทำให้ยางกับหินเกาะกัน เพราะฉะนั้นความชื้นในหินและชนิดของหินจะมีผลอย่างยิ่งต่อการกระจายตัวและการแตกตัว (คือการที่บิทูเมนแยกตัวจากน้ำ) ในขณะผสม เนื่องจากการในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุนี้เรากำหนดให้บิทูเมนอิมัลชันเป็นเหมือนวัสดุหล่อลื่น (Lubricating agent) เพราะฉะนั้นการแตกตัวจะเกิดขึ้นภายหลังจากการบดอัดแล้ว



รูปที่ 2-4 การผลิตบิทูเมนอิมัลชัน

(Asphalt Academy, 2009b)

ในการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนอิมัลชัน จะได้พฤติกรรมของวัสดุที่ปรับปรุงแล้วไม่ต่างจากวัสดุหินคลุก (Unbound granular material) แต่การปรับปรุงเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) และลดผลกระทบที่จะเกิดจากความชื้น (Moisture sensitivity) (Asphalt Academy, 2009b) ซึ่งหนังสือ Wirtgen Cold Recycling Manual (Wirtgen GmbH, 2010) ได้กล่าวถึงพฤติกรรมของวัสดุที่จะเกิดขึ้นจากการเลือกใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพชนิดต่างๆ โดยได้ทำเป็นแผนภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 แผนภูมิพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางจากการเลือกใช้วัสดุชนิดต่างๆ
(Wirtgen GmbH, 2010)

ประโยชน์ของการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่ด้วยวิธีการผสมเย็น

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling) มีประโยชน์หลายประการดังนี้

- เป็นการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานทั้งหมด ทำให้สามารถลดการใช้พลังงาน เนื่องจากการขนส่งวัสดุโครงสร้างทางเดิมจากหน้างานไปทิ้ง และการขนส่งวัสดุใหม่จากแหล่งวัสดุมายังหน้างาน รวมทั้งลดการใช้พลังงานในการให้ความร้อนวัสดุเพื่อผสมบิทูเมน อิมัลชันหรือโพลีบิทูเมนกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย
- สามารถลดความเสียหายของถนนในโครงข่าย ที่เกิดจากรถบรรทุกวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโครงการ
- ด้วยเครื่องจักรที่ทันสมัย ทำให้สามารถทำการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทางที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและสม่ำเสมอได้ดี และยังสามารถก่อสร้างให้ชั้นโครงสร้างทางมีความหนาหลายๆ ได้ในคราวเดียวกัน ลดปัญหาการหลุดร่อนเนื่องจากการก่อสร้างที่ละชั้นบางๆ ได้

- ด้วยกระบวนการก่อสร้างที่เครื่องจักรจะเดินผ่านโครงสร้างทางเพียงครั้งเดียว ทำให้สามารถลดการรบกวนต่อดินเดิมและโครงสร้างชั้นทางอื่นๆ ที่อยู่ใต้ชั้นพื้นทางได้
- ใช้เวลาในการก่อสร้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการซ่อมบำรุงถนนในวิธีอื่น ทำให้สามารถลดเวลาของโครงการลงได้ ส่งผลให้ต้นทุนค่าก่อสร้างลดลง และมีผลกระทบต่อจราจรน้อยกว่า

ในการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น โดยใช้บิทูเมนอิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

- วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจะมีความยืดหยุ่นตัวที่ดี และมีความต้านทานแรงเฉือนที่ดีขึ้นด้วย ทั้งในแง่ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันและความสามารถในการต้านทานร่องล้อ
- ทำการก่อสร้างได้ง่าย สามารถป้อนบิทูเมนอิมัลชันจากรถขน (Tanker) แล้วฉีดไปยังวัสดุผ่านหัวสเปรย์ได้โดยตรง ไม่ต้องใช้เครื่องจักรพิเศษแต่อย่างใด
- บิทูเมนอิมัลชันเป็นวัสดุที่เป็นที่รู้จักในวงการก่อสร้างเป็นอย่างดี วัสดุมีมาตรฐานอุตสาหกรรมและได้รับการควบคุมคุณภาพการผลิตเป็นอย่างดี
- เนื่องจากเป็นการผสมเย็น จึงมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน

ข้อเสีย

- ราคาบิทูเมนอิมัลชัน แพงกว่าวัสดุอื่นๆ ที่สามารถใช้เป็นสารผสมเพิ่มได้ อีกทั้งกระบวนการผลิตบิทูเมนอิมัลชันจะต้องดำเนินการในโรงงานผลิตที่ได้รับการควบคุมคุณภาพเป็นอย่างดี และในการผลิตจะต้องทำการผสมน้ำและสาร Emulsifier เพราะฉะนั้นการขนส่งบิทูเมนอิมัลชันจึงไม่ได้มีค่าใช้จ่ายเฉพาะการขนส่งยางมะตอย แต่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้ำที่ใช้ในกระบวนการบดอัดด้วย
- ในการขนส่งบิทูเมนอิมัลชัน จะต้องรักษาอุณหภูมิภายในถังไว้ตลอดเวลา รถที่ใช้ในการขนส่งจึงต้องเป็นรถที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์รักษาอุณหภูมิไว้เป็นพิเศษ เพื่อให้เหมาะกับการขนส่งบิทูเมนอิมัลชัน
- เมื่อปริมาณความชื้นในวัสดุก่อนทำการปรับปรุงมีค่าเข้าใกล้ค่า OMC ภายหลังปรับปรุงแล้วมักจะเกิดสภาพอิมัตตัวด้วยน้ำ

- เวลาที่ใช้ในกระบวนการบ่มวัสดุที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพไปแล้ว จะมีผลกระทบต่อความสามารถในด้านกำลังของวัสดุ กำลังจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในวัสดุระเหยออกจากวัสดุ
- การปรับปรุงสูตรของบิโทเมนอิมัลชันเพื่อให้เหมาะกับลักษณะเฉพาะของแต่ละโครงการเป็นเรื่องยาก

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตมีการนำบิโทเมนอิมัลชันมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทรายและหินอย่างกว้างขวาง โดย อรุณ เตียวนานิช (อรุณ เตียวนานิช, 2519) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการรับน้ำหนักของดินปนทรายเมื่อผสมด้วยยางมะตอยน้ำและวัสดุผสมอื่นๆ โดยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากงานที่กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง ได้ดำเนินการทดลองวัสดุเดียวกัน ได้แก่ Silty Sand (ได้จากถนนเดชอูตม-บุนทริก จ.อุบลราชธานี) และ Beach Sand (ได้จากจ.สงขลา) ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Hveem Stabilometer และ Cohesionmeter แต่ในการทดลองนี้จะทำการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength และทดสอบ Triaxial Compressive Test เพื่อหาค่า C_u และ ϕ_u เพิ่มเติม โดยใช้ดินทั้ง 2 ชนิดเหมือนกันแต่เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ปริมาณอิมัลชันเป็น 3, 4, 5 เปอร์เซ็นต์ และมีวัสดุผสมเพิ่มคือปูนขาว 3 เปอร์เซ็นต์ และซีเมนต์ชนิดที่ 1 อีก 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอิมัลชันที่ใช้เป็นชนิด Cationic (SS-K) ซึ่งมีค่าของวัสดุเหลืออยู่มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์และค่าการจมตัวของเข็ม (Penetration) ของกากอยู่ในช่วง 100 – 200

จากผลการทดลองพบว่ายางมะตอยน้ำที่เติมลงไป ช่วยเพิ่มค่า C_u ให้กับ Silty Sand ในขณะที่ค่า ϕ_u ลดลง และเมื่อเติมปูนขาวและซีเมนต์ลงไปเพิ่มจะพบว่าทำให้ค่า C_u และ ϕ_u เพิ่มขึ้น แต่สำหรับ Beach Sand นั้นการเติมปูนขาวและซีเมนต์เพิ่มจะส่งผลต่อค่า C_u และ ϕ_u น้อยมาก

เมื่อบ่มตัวอย่างทั้งหมดไว้ในถุงพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำในดินระเหย สำหรับดินที่ผสมยางมะตอยน้ำจะพบว่าเมื่อเติมปูนขาวหรือซีเมนต์จะมีค่า Unconfined Compressive Strength เพิ่มขึ้นตามอายุ อย่างไรก็ตาม ค่า ϕ_u ของทุกวัสดุที่ผสมกัน ไม่ได้ขึ้นกับปัจจัยการบ่มชนิดนี้

เมื่อเปลี่ยนวิธีบ่มตัวอย่าง โดยปล่อยให้อยู่ในอากาศที่น้ำสามารถระเหยได้ ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินที่ผสมยางมะตอยน้ำและของดินที่ผสมยางมะตอยน้ำกับเติมปูนขาวจะมีค่าสูงกว่าการบ่มไว้ในถุงพลาสติก

บัญชา เอกธรรมสุทธิ์ (บัญชา เอกธรรมสุทธิ์, 2519) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ยางมะตอยน้ำชนิด Penemulsion เพื่อใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นพื้นทางของถนนที่มีปริมาณการจราจรไม่สูงนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติในการรับน้ำหนักของดินชนิด Silty sand และดินลูกรังที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วย Penemulsion และ SS-K โดยใช้วิธีการทดลองแบบ Hveem Stabilometer และ Hveem Cohesimeter จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์บิวเมนอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับบิวเมนอิมัลชันแต่ละชนิด หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า Unconfined Compressive Strength โดยบ่มดินที่ได้รับการปรับปรุงแล้วที่ 3 วัน, 7 วัน, 15 วัน และ 28 วันตามลำดับ และเปรียบเทียบค่า Strength Envelop จากการทดสอบ Undrained Triaxial Test

บิวเมนอิมัลชันชนิด SS-K ที่ใช้ในการศึกษา เป็นบิวเมนอิมัลชันที่ผลิตในประเทศไทย ส่วนบิวเมนอิมัลชันชนิด Penemulsion ผลิตโดยบริษัท Penepime International Company จากประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีความพิเศษคือเนื้อยางผลิตจากกรรมวิธีพิเศษด้วยการสกัด gas oil ออกทั้งหมด ผลที่ได้คือได้ยางมะตอยที่มีค่าการจมตัว (Penetration) ต่ำมาก ค่าการจมตัวสูงสุดไม่เกิน 18 (หน่วยเป็น 0.1 มิลลิเมตร) บิวเมนอิมัลชันชนิด Penemulsion นี้ได้รับการออกแบบพิเศษมาเพื่อใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุชั้นพื้นทางโดยเฉพาะ

หลังจากทำการร่อนดิน Silty sand และดินลูกรังเพื่อหาขนาดคละมวลรวมแล้ว ดินจะอยู่ในสภาพแห้ง แล้วจัดเก็บในภาชนะปิดมิดชิด ในการเตรียมตัวอย่างและการผสมเข้ากับบิวเมนอิมัลชัน จึงต้องเริ่มจากการนำดินมาผสมน้ำเล็กน้อยให้พอเปียก จากนั้นจึงผสมกับบิวเมนอิมัลชันชนิดที่กำหนดไว้โดยใช้เครื่องผสม (Mixer) ปั่นให้เข้ากันโดยประเมินการกระจายตัวของดินว่าสม่ำเสมอหรือไม่ หรือมีบิวเมนอิมัลชันเกาะเป็นจุดหรือไม่ ถ้าพบว่าการกระจายตัวไม่ดี จะทำการผสมก่อนใหม่โดยเริ่มด้วยการเติมน้ำในดินให้มากขึ้นกว่าครั้งแรกแล้วจึงเติมบิวเมนอิมัลชัน จากนั้น ก่อนที่จะบดอัดดินจะต้องนำดินที่ผสมแล้วไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพื่อลดปริมาณความชื้นจนถึงจุดที่กำหนดไว้ในแต่ละตัวอย่าง ในการพิจารณาว่าการผสมดินกับบิวเมนอิมัลชันเข้ากันดีหรือไม่ ให้พิจารณาว่าวัสดุส่วนละเอียดจะต้องได้รับการเคลือบด้วยอิมัลชันอย่างสม่ำเสมอ เพราะในขั้นตอนการบดอัด วัสดุส่วนละเอียดที่ผสมกับบิวเมนอิมัลชันจะเข้าเคลือบผิวก้อนดินที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้แต่ละก้อนยึดเกาะกันได้ดี

การบดอัดตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Hveem Stabilometer and Cohesimeter ดินตัวอย่างจะถูกเทลงแบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว แบ่งเป็น 2 ชั้นโดยตำตรงกลางชั้นละ 20 ครั้งและตำที่ขอบแบบชั้นละ 20 ครั้งด้วยแท่งตำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/8 นิ้ว จากนั้นตำด้วยเครื่อง Kneading compaction machine ที่อุณหภูมิห้อง หน้าตำมีลักษณะเป็นส่วนของวงกลมสำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4 นิ้ว มีพื้นที่ในการบดอัดประมาณ 3.1 ตารางนิ้ว โดยตำ 20 ครั้งแรกด้วยแรงกระทำ 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามด้วยการตำ 150 ครั้งด้วยแรง 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หลังการ

ค่าตัวอย่างจะมีความสูงประมาณ 2.5 นิ้ว สำหรับการทดสอบแบบ standard หลังจากบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่อง kneading compaction machine แล้ว นำตัวอย่างไปปรับระดับความสูง โดยกดแรงกระทำ 12,600 ปอนด์ (1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ด้วยความเร็วการกด 0.25 นิ้วต่อนาที จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบแบบ standard ทั้งนี้ แม้ว่าตัวอย่างจะต้องการเวลาบ่มเพื่อพัฒนากำลัง แต่บิทูเมนอิมัลชันชนิด SS-K จะสามารถพัฒนากำลังรับแรงดึงได้อย่างรวดเร็ว หลังจากได้ก้อนตัวอย่างแล้ว จะนำไปทำการทดสอบ Standard method และการทดสอบ Moisture Vapor Susceptibility (M.V.S.) เพื่อหาค่า R-value และ C-value สำหรับดิน Silty sand พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน ค่า R-value จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและจากนั้นจะลดลง ในขณะที่ค่า C-value จะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องและไม่แสดงปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่เหมาะสม และค่า R-value และ C-value ของดิน Silty sand ที่ใช้บิทูเมนอิมัลชันชนิด Penemulsion จะให้ค่าสูงกว่าที่ใช้บิทูเมนอิมัลชันชนิด SS-K และเมื่อทดสอบกับดินลูกรังก็ได้ผลการทดสอบเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

สำหรับการทดสอบค่า Unconfined compressive strength จะผสมตัวอย่างเหมือนกับการทดสอบ Hveem Stabilometer โดยเลือกปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่เหมาะสมจากค่า R_t หลังการทำ Moisture Vapor Susceptibility test ที่ผ่านเกณฑ์ แล้วบดอัดตัวอย่างโดยใช้วิธี Modified AASHTO ในแบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว แบ่งตา 5 ชั้นๆ ละ 25 ครั้ง แล้วบ่มในถุงปิดที่ 3, 7, 15, 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบกำลังด้วยเครื่องทดสอบแรงกดด้วยอัตราการเคลื่อนที่ 0.2 นิ้วต่อนาที บันทึกค่าแรงกระทำสูงสุดโดยค่าที่รายงานคือค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 2 ตัวอย่าง หลังจากทดสอบพบว่าค่า Unconfined compressive strength ของดิน Silty sand ต่ำกว่าของดินลูกรัง และที่ระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังเพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้เพิ่มขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญ โดยวัสดุที่ได้ปรับปรุงแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังได้พัฒนาในช่วงแรกอย่างรวดเร็ว ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วยยาง Penemulsion จะให้ค่ากำลังสูงกว่าชนิด SS-K

สำหรับการทดสอบแบบ Triaxial test จะผสมตัวอย่างด้วยปริมาณบิทูเมนอิมัลชันเหมือนกับการทดสอบ Unconfined compressive strength หลังจากบดอัดความชื้นแล้วจะนำตัวอย่างมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว แล้วบดอัดในแบบหล่อตัวอย่างแบบ Harvard Miniaturesize mold ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.312 นิ้ว สูง 2.816 นิ้ว แบ่งการดำเป็น 3 ชั้นๆ ละ 25 ครั้งด้วยค้อนสปริงขนาด 40 ปอนด์ แล้วนำตัวอย่างไปทำการทดสอบ Triaxial test แบบ Undrained โดยไม่วัดค่า Pore pressure กำหนดแรงกระทำด้านข้างเป็น 20, 40, 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้วสำหรับดิน Silty sand และ 20, 30, 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้วสำหรับดินลูกรัง ให้แรงกระทำคงที่ด้วยอัตรา 1 %strain ต่อนาที ค่าที่รายงานคือค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 2 ตัวอย่าง หลังจากทดสอบจะได้ค่า C_u และ σ_u พบว่าดินทั้ง 2 ชนิดที่ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด Penemulsion จะให้ค่า C_u สูงกว่าการผสม

ด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด SS-K โดยค่า ϕ_u ของดินชนิดเดียวกัน จะมีค่าเท่ากัน แม้ว่าจะเปลี่ยนชนิดของบิทูเมนอิมัลชันในการผสม

ไม่นานมานี้ กรมทางหลวงมีแนวคิดที่จะนำบิทูเมนอิมัลชันมาใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ โดยธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ์ (ธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ์, 2552) ได้ทำการศึกษาการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ โดยปรับปรุงคุณภาพโดยใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ผสมกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) ผสมกับวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจากถนนทางหลวงหมายเลข 2 ช่วงนครราชสีมา – ชัยภูมิ นำมาออกส่วนผสมเพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันและปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด โดยกำหนดสัดส่วนการผสมระหว่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) ต่อวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) เป็น 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:100 แล้วบดอัดก้อนตัวอย่างด้วย Superpave Gyrotory Compactor (SGC) ให้มีความหนาแน่นที่ 90, 95 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาแน่นสูงสุด แล้วบ่มก้อนตัวอย่างในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปหาคุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติในเชิงวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปได้แก่ ขนาดคละมวลรวม ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมได้แก่ ค่า CBR ค่าความต้านทานรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Static Indirect Tensile Strength) ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยทำการทดสอบแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ (Soaked / Unsoaked) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและที่แรงกระทำ 20%, 30% และ 40% ของค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า การใช้ยาง CSS-1 สามารถทำการผสมได้ง่ายกว่ายาง CMS-2 และอัตราส่วนผสมที่ค่าการต้านทานแรงอัดดีที่สุดของยาง CMS-2 และ CSS-1 อยู่ที่ 50:50 และ 25:75 ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนผสมที่ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมดีที่สุดของยาง CMS-2 และ CSS-1 อยู่ที่ 100:0 และ 75:25 ตามลำดับ หากเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเหมือนกัน วัสดุที่ผสมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 สามารถรับกำลังได้ดีกว่าแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2

ณัฐภรณ์ เจริญธรรมและคณะ (ณัฐภรณ์ เจริญธรรม, อัครพัฒน์ สว่างสุริย์, & กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์, 2555) ได้ศึกษาคูณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุชั้นโครงสร้างทางที่ได้รับการบูรณะด้วยวิธี Cold In-place Recycling โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม มาแล้วครั้งหนึ่ง เพื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพอีกครั้งโดยใช้สารผสมเพิ่มได้แก่ (1) ปูนซีเมนต์ (2) แอสฟัลต์อิมัลชัน (3) ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน ในการศึกษานี้ได้เก็บตัวอย่างวัสดุจากถนนที่ได้รับการบูรณะด้วยปูนซีเมนต์มาแล้ว

จำนวน 2 สายทาง โดยเลือกให้ชั้นพื้นทางเดิมก่อนที่จะทำการปรับปรุงครั้งแรกเป็นหินคลุกและดินซีเมนต์ตามลำดับ โดยพื้นทางเดิมที่เป็นหินคลุกได้เลือกเก็บตัวอย่างจากทางหลวงหมายเลข 1 สายทางตาก – กำแพงเพชร ช่วงกิโลเมตรที่ กม. 458+420 ถึง กม.468+126 จากข้อมูลการบุงระยะที่ผ่านมาใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม 3.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพื้นทางเดิมที่เป็นดินซีเมนต์ได้เลือกเก็บตัวอย่างจากทางหลวงหมายเลข 23 สายทางมหาสารคาม – ร้อยเอ็ด ช่วงกิโลเมตรที่ กม.86+000 ถึง 89+000 จากข้อมูลการบุงระยะที่ผ่านมาใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม 3.3 เปอร์เซ็นต์

เมื่อชุดวัสดุในแต่ละชั้นโครงสร้างทางกลับมาในห้องปฏิบัติการ ได้ใช้คนย่อให้มึลลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับวัสดุชั้นทางเดิมที่ได้จากการชุดใส่โดยเครื่องจักรที่หน้างาน วัสดุแต่ละชั้นจะนำมาทดสอบหาขนาดเม็ดโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐาน ทล.-ท.204/2516 หาค่า Liquid Limit (LL) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.102/2515 และวิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plastic Index (PI) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.103/2515 และทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ทล.-ท.108/2517

จากนั้นทำการผสมวัสดุชั้นผิวทางและวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการบุงระยะแล้วด้วยอัตราส่วนชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทาง 25:75 และ 50:50 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำวัสดุที่ผสมได้มาทดสอบหาขนาดเม็ดโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐาน ทล.-ท.204/2516 หาค่า Liquid Limit (LL) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.102/2515 และวิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plastic Index (PI) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.103/2515 ทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ทล.-ท.108/2517 และทดสอบ CBR ตามมาตรฐาน ทล.-ท.109/2517

ในการออกแบบส่วนผสม จะใช้วัสดุชั้นผิวทางและวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการบุงระยะแล้วด้วยอัตราส่วนชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทาง 25:75 และ 50:50 โดยน้ำหนัก แล้วเติมสารผสมเพิ่มได้แก่ (1) ปูนซีเมนต์ (2) แอสฟัลต์อิมัลชัน (3) ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันโดยมีรายละเอียดการผสมดังนี้

ตารางที่ 2-1 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ เมื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มเพียงชนิดเดียว

ชนิดวัสดุพื้นทางเดิมก่อนทำการบุงระยะ	อัตราส่วนผสมชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทางโดยน้ำหนัก	ปริมาณปูนซีเมนต์
หินคลุก	25:75	4%, 5%, 6%, 7%
	50:50	4%, 5%, 6%, 7%
ดินซีเมนต์	25:75	3%, 4%, 5%, 6%
	50:50	3%, 4%, 5%, 6%

ตารางที่ 2-2 ปริมาณปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ เมื่อใช้ปูนซีเมนต์
และแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม

ชนิดวัสดุพื้นทางเดิม ก่อนทำการบурณะ	อัตราส่วนผสมชั้นผิวทางต่อ ชั้นพื้นทางโดยน้ำหนัก	ปริมาณสารผสมเพิ่ม	
		ปูนซีเมนต์	แอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1
หินคลุก	25:75	0%	2%, 3%, 4%
		1%	2%, 3%, 4%
	50:50	0%	2%, 3%, 4%
		1%	2%, 3%, 4%
ดินซีเมนต์	25:75	0%	2%, 3%, 4%
		1%	2%, 3%, 4%
	50:50	0%	2%, 3%, 4%
		1%	2%, 3%, 4%

ในการผสมตัวอย่าง ปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ จะมีปริมาณกาก (Residue Bitumen) อยู่ที่ 60% โดยมวล นั่นคือแอสฟัลต์อิมัลชันที่ 2%, 3%, และ 4% จะมีปริมาณกาก (Residue Bitumen) อยู่ที่ 1.2%, 1.8, และ 2.4% ตามลำดับ เมื่อผสมวัสดุชั้นผิวทางและวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการบурณะแล้วตามอัตราส่วนพร้อมกับแอสฟัลต์อิมัลชันและซีเมนต์ตามปริมาณที่กำหนดในตารางแล้ว จากนั้นทิ้งไว้ให้แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัวโดยสังเกตจากสีของแอสฟัลต์อิมัลชันที่เปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีดำหรือทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อาจมีการคลุกเคล้าบ้างเป็นระยะๆ แล้วจึงทำการบดอัดตัวอย่าง แล้วนำก้อนตัวอย่างไปบ่ม โดยวางตัวอย่างบนตะแกรงเหล็กที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในตู้อบตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนทดสอบ

นำก้อนตัวอย่างที่ได้ มาทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS) โดยก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม จะดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515 ที่อายุบ่ม 7 วัน โดยนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมงก่อนทดสอบ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น วัสดุผสมจะมีค่า UCS เพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกันทั้งวัสดุพื้นทางเดิมที่ได้จากหินคลุกและดินซีเมนต์ ในกรณีที่วัสดุพื้นทางเดิมเป็นหินคลุก ทั้งอัตราส่วนผสมชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทาง 25:75 และ 50:50 จะสามารถหาเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่า UCS ไม่น้อยกว่า 24.5 ksc คือ 4.97% และ 4.94% ตามลำดับและค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่า UCS ไม่น้อยกว่า 28.2 ksc คือ 5.83% และ 5.57% ตามลำดับ ในกรณีที่วัสดุพื้นทางเดิมเป็นดินซีเมนต์ ที่อัตราส่วนผสมชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทาง 25:75 และ 50:50 จะสามารถหาเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่า UCS ไม่น้อยกว่า 24.5 ksc คือ 3.56% และ 3.21% ตามลำดับและค่าเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่า UCS ไม่น้อยกว่า 28.2 ksc คือ 4.33% และ 4.26% ตามลำดับ

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS) โดยก่อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม หลังจากตีบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ก่อนทดสอบจะนำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าค่า UCS ที่ทุกระดับปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ได้ต่ำกว่า 10 ksc ส่วนกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม พบว่าได้ค่า UCS สูงกว่ากรณีใช้แอสฟัลต์อิมัลชันเพียงอย่างเดียว และพบว่าเมื่อปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันเพิ่มขึ้น ค่า UCS มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกันทั้งกรณีวัสดุพื้นทางเดิมที่เป็นหินคลุกและดินซีเมนต์

จากผลการศึกษา สรุปได้ว่าวัสดุพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม แต่จะต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นประมาณ 1-2% จากที่ทำการปรับปรุงคุณภาพครั้งแรก ส่วนกรณีที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันและกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมอิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม ไม่ได้ช่วยเพิ่มค่า UCS ของวัสดุ

Houston and Long (Houston M. & Long F., 2004) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบ ITS และ UCS ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและ 150 มิลลิเมตร สำหรับวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยโพลีบิโทเมน เนื่องจากในอดีต การออกแบบวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยโพลีบิโทเมนจะใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ทำตามวิธีมาร์แชลล์แล้วนำไปทดสอบ Indirect Tensile Strength (ITS) เพื่อหาค่ากำลังที่สภาวะแห้ง และทดสอบที่สภาวะเปียก (Soaked) เพื่อเป็นดัชนีแสดงความต้านทานความไวต่อความชื้น (Moisture sensitivity) แต่ในปี ค.ศ.2002 ได้มีการออกข้อกำหนดในการออกแบบใหม่ เรียกว่า TG2 ของ Asphalt Academy ซึ่งระบุให้ทดสอบด้วยตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร การทดสอบเพื่อยืนยันว่าการใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรดีกว่าจึงเกิดขึ้น

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างจากโครงการก่อสร้างที่ปรับปรุงวัสดุด้วยโพลีบิโทเมนจำนวน 23 โครงการซึ่งมีรายละเอียดปลีกย่อยที่แตกต่างกัน ทั้งสถานที่ตั้ง ลักษณะและส่วนประกอบของวัสดุ ก่อนปรับปรุง ปริมาณโพลีบิโทเมนที่ใช้ ปริมาณปูนซีเมนต์หรือปริมาณปูนขาวที่ใช้ โดยมีรายละเอียดโครงการต่างๆ ดังนี้

ในประเทศ South Africa (MR439, Northern Zululand)

1. Reclaimed calcareous sand: 40% dorbank (G8)
2. Reclaimed calcareous sand: 40% -13.2mm crusher dust (G7)
3. Reclaimed foamed bitumen stabilized calcareous sand: 33% -13.2mm crusher dust (G7)
4. Reclaimed calcareous sand (G8)

ในประเทศ Zambia (Livingstone –Sesheke)

1. Weathered basalt (G6)
2. Weathered basalt: 12% reclaimed cement stabilized Kalahari red dune sand: 8% silty sand (G5)
3. Weathered basalt: 20% silty sand (G5)
4. Weathered basalt: 25% reclaimed Kalahari red dune sand sand:15% reclaimed seal (G5)W
5. eathered basalt: 25% reclaimed cement stabilized silty sand (G5)
6. Weathered basalt: 33% reclaimed cement stabilized silty sand (G5)
7. Weathered basalt: 25% reclaimed cement stabilized silty sand (G5)
8. Weather basalt: 25% reclaimed cement stabilized Kalahari red dune sand (G5)

ในประเทศ Greece (Iliki – Athens – Korinthos)

1. RAP (G8)
2. RAP: 25% graded crushed limestone A (G6)
3. RAP: 50% graded crushed limestone A (G5)
4. RAP: 75% graded crushed limestone A (G6)
5. RAP: 25% reclaimed cement stabilised graded limestone (G6)
6. RAP: 50% reclaimed cement stabilised graded limestone (G5)
7. RAP: 75% reclaimed cement stabilised graded limestone (G5)
8. RAP: 25% graded crushed limestone B (G6)
9. RAP: 50% graded crushed limestone B (G6)
10. RAP: 25% graded crushed limestone C (G6)
11. RAP: 50% graded crushed limestone C (G6)

แต่ละโครงการจะมีปริมาณการใช้งานสารปรับปรุงคุณภาพที่แตกต่างกัน โดยปริมาณการใช้โพลีบิทุเมนจะอยู่ในช่วง 2 – 4.5% ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 0 – 1.5% ปริมาณการใช้ปูนขาวอยู่ในช่วง 0 – 2% โดยภาพรวมวัสดุที่ยังไม่ได้ถูกปรับปรุงจะมีค่า PI น้อยกว่า 14 และหลังจากปรับปรุงด้วยปูนขาวและโพลีบิทุเมนแล้วจะมีค่า PI น้อยกว่า 6 อย่างไรก็ตามในการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาวจะต้องเลือกใช้เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง ไม่สามารถใช้ร่วมกันได้

การเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จะเตรียมโดยวิธีการที่ผ่านมา คือ ทำตามวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลล์แต่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิขณะบดอัดและการบ่ม โดย ตัวอย่างแห้งจะบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างมีความชื้น น้อยกว่า 1% โดยไม่ทำให้บิตูเมนเสียหาย ส่วนตัวอย่างเปียกจะเตรียมเหมือนตัวอย่างแห้ง จากนั้น แช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

สำหรับการเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร จะเตรียมตามวิธีที่ TG2 ระบุไว้ สำหรับตัวอย่างที่จะทดสอบ ITS จากนั้นแล้วบ่มตัวอย่างเพื่อให้ได้ค่าความชื้นที่จุดสมดุล (Equilibrium moisture content) โดยวางไว้ในอากาศ ไม้ใส่ในถุงพลาสติกหุ้ม ตั้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นใส่ถุงพลาสติกแล้วบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ค่าความชื้นหลังบ่มแล้วจะขึ้นกับปริมาณความชื้นที่ใส่บดอัดและชนิดของวัสดุ พบว่าอยู่ ระหว่าง 2.5 – 6% ในการเตรียมตัวอย่างแบบเปียกสำหรับการทดสอบ ITS หลังจากตีบ่มตามวิธี ข้างบนแล้ว นำตัวอย่างไปแช่น้ำในอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนการ เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ UCS จะเตรียมให้ได้ความชื้นที่จุดสมดุลเหมือนกับการเตรียม ตัวอย่างที่จะทดสอบ ITS

จากการศึกษาได้มีข้อเสนอแนะสำหรับวิธีการทดสอบที่แนะนำโดย TG2 คือ

- ตัวอย่างที่มีความสูง 95 มิลลิเมตรที่ระบุไว้ไม่สามารถเตรียมขึ้นได้ด้วยเครื่อง ห้องปฏิบัติการทั่วไป ความสูงที่เหมาะสมคือ 127 มิลลิเมตร
- การตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นใส่ถุงพลาสติกแล้วบ่มใน ตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เป็นกระบวนการจำลองความชื้น ที่เกิดขึ้นในสนามที่จุดความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ได้ดี และ วิธีการที่สะดวกในการทำงานในห้องปฏิบัติการ
- เมื่อนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในถุงใบเดิมโดยไม่เปลี่ยนเป็นถุงใหม่ที่แห้ง พบว่าจะมีน้ำเหลือเพิ่มในตัวอย่างประมาณ 3 กรัม คิดเป็นปริมาณความชื้นที่ 0.1% ซึ่งสามารถละทิ้งได้
- สำหรับตัวอย่างที่ได้จากประเทศ Greece ค้อนดำที่ใช้เป็นรูปพาย เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค้อนบดอัดแบบ Standard Modified AASHTO แล้วพลังงานที่ใช้บดอัดใกล้เคียงกัน
- การผสมให้เครื่องผสมแบบ Twin-shaft pugmill ซึ่งจะให้ความสม่ำเสมอได้ดีกว่าแบบ Blender-type
- การทดสอบทำด้วยตัวอย่าง จำนวน 2 ก้อน (แทนการใช้ 3 ก้อน) เพื่อให้กระบวนการ ทดสอบง่ายขึ้น

เมื่อนำตัวอย่างมาทดสอบค่า ITS และค่า UCS แล้ว นำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่า ITS และค่า UCS ทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) แสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

100 mm		150 mm			Best fit line	Correlation coefficient
ITS _{dry100}	ITS _{wet100}	ITS _{eq150}	ITS _{wet150}	UCS		
x	y				$y = 0.279x + 112$	0.45
x		y			$y = 0.709x - 79$	0.86
x			y		$y = 0.496x - 48$	0.83
x				y	$y = 3.970x - 220$	0.86
	x		y		$y = 0.454x + 80$	0.49
		x	y		$y = 0.670x + 14$	0.92
		x		y	$y = 5.317x + 298$	0.94
			y	x	$y = 0.117x - 8$	0.92

Note: 1. The correlation coefficient is the covariance of the two data sets divided by the product of the standard deviations
2. x and y in kPa

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 2-3 สามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า ITS_{dry100} กับ ITS_{wet100} ได้ 0.47 แสดงว่าค่า ITS_{dry100} ไม่สามารถใช้ในการบ่งชี้ปัจจัยด้าน Moisture sensitivity ของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิวเมนได้
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า ITS_{eq150} กับ ITS_{wet150} ได้ 0.92 แสดงว่าค่า ITS_{wet150} ทำมากเกินไปจนความจำเป็น
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า ITS_{dry100} กับ ITS_{eq150} ได้ 0.83 สามารถกล่าวได้ว่าค่า ITS_{dry100} สามารถเป็นตัวแทนของค่า ITS_{eq150} และ ITS_{wet150} ที่มีความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญ
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า ITS_{eq150} กับ UCS ได้ 0.94 สามารถกล่าวได้ว่าค่า ITS_{eq150} สามารถเป็นตัวแทนของค่า Compressive strength ของวัสดุได้ที่มีความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามค่า UCS จะสามารถแสดงคุณสมบัติได้ดีกว่าค่า ITS_{eq150}

- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า ITS_{wet100} กับค่า ITS_{dry100} ได้ 0.45 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ITS_{wet100} กับและ ITS_{wet150} ได้ 0.49 แสดงให้เห็นว่าค่า ITS_{wet100} เป็นตัวแปรที่เป็นอิสระจากตัวแปรอื่นๆ ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยเรื่องวิธีการบดอัดพลังงานบดอัดที่ใช้ อัตราส่วนขนาดตัวอย่างต่อขนาดคละที่ใหญ่ที่สุด ฯลฯ ทำให้ค่า ITS_{wet100} แสดงระดับความเชื่อมั่นต่ำ
- โดยทั่วไปแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร จะมีค่าดีกว่าของตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สามารถกล่าวได้ว่าผลการทดลองด้วยตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรจะมีความเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร

Zulakmal และคณะ (Sufian Zulakmal, A.Aziz Nafisah, Matori Mohd Yazip, & Hussain Mat Zin, 2009) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสารผสมเพิ่ม (Active filler) ระยะเวลาบ่มและปริมาณความชื้น ที่จะมีผลต่อค่ากำลังของวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันและโพนบิทูเมน โดยค่ากำลังที่เลือกใช้เป็นตัวแปรในการทดลองคือค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ค่า Indirect Tensile Strength (ITS) และค่า Resilient Modulus สัดส่วนในการผสมวัสดุผิวทางเดิม (RAP) ต่อหินคลุก (CR) จะเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนไป โดยใช้อัตราส่วน 100:0 75:25 50:50 25:75 0:100 จากนั้นเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Indirect Tensile Strength (ITS) และ Resilient Modulus ด้วยวิธีมาร์แชลล์ ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ด้วยวิธี Modified proctor ตามมาตรฐาน BS 1377 ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ทั้งหมดผสมให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดโดยใช้ค่า Optimum Moisture Content ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Modified proctor

ในการวิเคราะห์หาผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อค่ากำลัง จะทำการบ่มแห้งเป็นเวลา 3 วัน แต่ในการวิเคราะห์หา Curative period จะกำหนดสารผสมเพิ่มที่ 1% และบ่มที่ 1, 2, 3, 7 และ 28 วัน ส่วนการหาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง Moisture content จะกำหนดสารผสมเพิ่มที่ 1% และบ่มตัวอย่าง 3 วัน ในการทดสอบจะควบคุมขนาดคละในแต่ละสัดส่วนของ RAP:CR ให้คงที่ แล้วเปลี่ยนจากโพนบิทูเมนเป็นบิทูเมนอิมัลชัน จากนั้นหาปริมาณโพนบิทูเมนและปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่เหมาะสมและกำหนดเป็นตัวแปรคงที่

ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่า UCS ต่อเวลาที่บ่ม วัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนและบิทูเมนอิมัลชันให้ผลออกมาคล้ายกัน คือค่า UCS เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น และพบว่าหากเพิ่ม

สัดส่วนของ RAP ให้มากขึ้นค่า UCS จะลดลง เมื่อนำค่า UCS ไปพิจารณาพร้อมกับข้อกำหนดงานก่อสร้างซึ่งได้กำหนดว่าค่า UCS ที่การบ่ม 7 วันอยู่ที่ 0.7MPa และช่วงเวลาที่ปิดการจราจรก่อนทำการปูผิวทางให้อยู่ที่ 2 วัน สำหรับการปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนนั้นค่ากำลังที่ 2 วันสามารถผ่านข้อกำหนดได้ยกเว้นกรณีสัดส่วน RAP ที่ 100% ซึ่งค่า UCS ของ RAP ที่ 100% ไม่ผ่าน 0.7MPa ที่ 7 วัน เพราะฉะนั้นจึงแนะนำว่าสัดส่วนของ RAP สูงสุดไม่ควรเกิน 75% เมื่อพิจารณาวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนอิมัลชัน พบว่าที่สัดส่วน RAP ที่ 0 และ 25% เท่านั้นที่ผ่านข้อกำหนดที่ 2 วัน ที่สัดส่วน RAP 50% ผ่านข้อกำหนดที่ 3 วัน และที่สัดส่วน RAP 75% ผ่านข้อกำหนดที่ 12 วัน ส่วนที่สัดส่วน RAP 100% ไม่ผ่านข้อกำหนดแม้จะปล่อยเวลาถึง 28 วัน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากค่า UCS กับปริมาณสารผสมเพิ่ม พบว่าทั้งโพนบิทูเมนและโพนบิทูเมนอิมัลชันไม่สามารถผ่านข้อกำหนดที่ 0.7 MPa ได้ หากไม่ใส่สารผสมเพิ่ม และค่า UCS สูงขึ้นเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มเพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนสามารถผ่านข้อกำหนดเมื่อเติมสารผสมเพิ่ม 1% ยกเว้นที่สัดส่วน RAP 100% จะต้องใช้ 2% แต่สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนอิมัลชันที่สัดส่วน RAP 100% ต้องใช้สารผสมเพิ่ม 3% ที่สัดส่วน RAP 75% ต้องใช้สารผสมเพิ่ม 1.5% และที่สัดส่วน RAP 50% ต้องใช้สารผสมเพิ่ม 1%

สำหรับผลการทดลองจากค่า UCS กับปริมาณความชื้น สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนให้ค่า UCS สูงสุดที่ OMC ซึ่งไม่เหมือนกับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนอิมัลชันที่ค่า UCS ที่สูงที่สุดจะไม่อยู่ที่ OMC แต่สิ่งที่พบคือค่าความชื้นที่แปรเปลี่ยน +/- 30% ของ OMC ไม่มีผลต่อค่า UCS อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับทั้งโพนบิทูเมนและโพนบิทูเมนอิมัลชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าสามารถผสมได้ในช่วงความชื้นที่ 65 – 85% ของ OMC ซึ่งการทำงานหน้างานทั่วไปในมาเลเซียจะปูและบดอัดชั้นวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนและโพนบิทูเมนอิมัลชันที่ความชื้น +/-20% ของ OMC แสดงให้เห็นว่าค่า UCS เป็นตัวชี้วัดที่ไม่ดีสำหรับค่า moisture sensitivity

ผลการทดลองค่า ITS เมื่อพิจารณาระยะเวลาการบ่ม พบว่าค่า ITS สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ค่า ITS จะเพิ่มขึ้นในช่วง 5 วันแรกของการบ่ม อย่างไรก็ตามก็สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมน ที่สัดส่วน RAP 75% และ 100% ไม่ผ่านข้อกำหนดที่ 200 kPa ที่ 3 วัน และสำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนอิมัลชันที่สัดส่วน RAP 100% ไม่ผ่านข้อกำหนดด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองไม่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน RAP กับค่า ITS ได้ เมื่อพิจารณาค่า ITS กับปริมาณสารผสมเพิ่มพบว่า ค่า ITS เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่ำสุดที่สามารถผ่านข้อกำหนดที่ 200 kPa จะแตกต่างกันเมื่อสัดส่วนของ RAP เปลี่ยนแปลงไป

ผลการทดลองค่า ITS เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้น พบว่าปริมาณความชื้นส่งผลต่อค่า ITS แต่ที่คาดการณ์ว่าค่า ITS จะสูงที่สุดที่ OMC ความจริงเป็นเฉพาะกรณีที่สัดส่วน RAP 50% เท่านั้น

สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิวทเมน ที่สัดส่วน RAP ต่ำกว่า 25% ค่า ITS เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นลดลง ส่วนวัสดุที่ปรับปรุงด้วยบิวทเมนอิมัลชันไม่มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

สำหรับผลการทดลองค่า Resilient Modulus เมื่อพิจารณาระยะเวลาบ่ม พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรก และเมื่อสัดส่วน RAP เพิ่มขึ้น ค่า Resilient Modulus จะมีค่าลดลง ทั้งวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิวทเมนและบิวทเมนอิมัลชัน เมื่อสัดส่วน RAP เป็น 75% และ 100% จะต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อให้ค่า Resilient Modulus พัฒนาไปถึง 2000 MPa ส่วนผลการทดลองค่า Resilient Modulus เมื่อพิจารณาปริมาณสารผสมเพิ่ม พบว่าค่า Resilient Modulus เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มเพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิวทเมน ที่สัดส่วน RAP เป็น 75% และ 100% ปริมาณสารผสมเพิ่มต่ำสุดอยู่ที่ 1.5% เพื่อให้ค่า Resilient modulus ผ่านที่ 2000 MPa ที่ 3 วัน ส่วนวัสดุที่ปรับปรุงด้วยบิวทเมนอิมัลชันพบว่าที่สัดส่วน RAP 100% ปริมาณสารผสมเพิ่มควรจะมีมากกว่า 3% เพื่อให้ค่า Resilient modulus ผ่านที่ 2000 MPa ที่ 3 วัน แต่ที่สัดส่วน RAP 75% ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ 1.2% ก็เพียงพอ

สำหรับผลการทดลองค่า Resilient Modulus เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้น พบว่าความชื้นที่เปลี่ยนไปไม่ส่งผลกระทบต่อค่า Resilient Modulus ที่สัดส่วน RAP สูงๆ สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิวทเมน ที่สัดส่วน RAP ต่ำค่า Modulus สูงสุดจะอยู่ที่ปริมาณความชื้นที่ศึกษา ผลทดลองแสดงให้เห็นว่าสารผสมเพิ่ม 1% ที่สัดส่วน RAP มากกว่า 50% ค่า Resilient Modulus จะไม่ผ่านข้อกำหนดที่ 2000 MPa ซึ่งเป็นค่าที่สมมติเพื่อใช้ในการออกแบบ สำหรับวัสดุที่สัดส่วน RAP ต่ำ ค่า Resilient Modulus ที่ OMC อาจสูงถึง 6000 MPa ดังนั้นจึงแนะนำว่าค่าที่ควรจะใช้ในการออกแบบควรจะคำนึงถึงสัดส่วนของ RAP เป็นสำคัญ สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยบิวทเมนอิมัลชัน ที่สัดส่วน RAP 75% ค่า Resilient Modulus จะสูงกว่า 2000 MPa ที่ความชื้นต่ำกว่า OMC แต่ที่ RAP 100% ค่า Resilient Modulus จะต่ำกว่า 2000 MPa ที่ความชื้นที่ทำการศึกษา

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาการปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางนี้ จะให้ความสนใจกับวิธีการก่อสร้างแบบใช้เครื่องจักรรีไซเคิลผสมในที่ (In-place Recycling) ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลในภาคสนามเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกิดจากเครื่องจักรรีไซเคิล จากนั้นจึงนำมาศึกษาตัวแปรต่างๆ ในขั้นตอนการออกแบบส่วนผสม ไม่ว่าจะเป็น ขนาดคละของส่วนผสม ระดับความหนาแน่นการบดอัด ร้อยละของบิทูเมนอิมัลชัน และตัวแปรอื่นๆ ซึ่งล้วนเป็นตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนและควบคุมในระหว่างการก่อสร้างได้ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงผลของอันตรกิริยาของตัวแปรที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุรีไซเคิลที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทางในสภาพการใช้งานในประเทศ ซึ่งแตกต่างไปจากประเทศอื่นๆ ที่ได้เคยทำการศึกษาวิจัยกันมาแล้ว

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การเก็บตัวอย่างในสนาม การทดลองชั้นนำร่อง การทดลองชั้นที่ 1 และการทดลองชั้นที่ 2 เพื่อแยกศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ให้จำนวนตัวอย่างทดสอบมีความเหมาะสมกับระยะเวลาในการศึกษาวิจัย

3.1 การเก็บตัวอย่างในสนาม

ด้วยการศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงวัสดุโครงสร้างทางที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานมาในระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานต่อไปได้ ฉะนั้นการจัดหาวัสดุโครงสร้างทางที่เสื่อมคุณภาพจึงจำเป็นต้องเก็บตัวอย่างจากถนนที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยมีลักษณะโครงสร้างชั้นทางประกอบไปด้วยชั้นผิวทางเป็นวัสดุชนิดแอสฟัลติกคอนกรีต และชั้นพื้นทางเป็นวัสดุชนิดหินคลุก การเก็บตัวอย่างจะใช้เครื่องจักรในการขูดไสจากถนนเพื่อให้มีสภาพของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการศึกษามีลักษณะใกล้เคียงกับวัสดุที่จะเกิดขึ้นจากเครื่องจักรรีไซเคิลในการผสมในที่

ข้อมูลที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องเก็บตัวอย่างจากในสนาม คือขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลด้วยเครื่องจักรรีไซเคิลผสมในที่ ซึ่งมีความแปรปรวนเนื่องจากรีท้อและชนิดของเครื่องจักร ลักษณะของหัวกัด (Cutting tool) และกระบอกลูก (Cutting drum) ความเร็วการหมุนของกระบอกลูกและความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเครื่องจักรรีไซเคิล ความแข็งและความถี่รวมของชั้นวัสดุที่เครื่องจักรรีไซเคิลต้องขูด ปัจจัยเหล่านี้ล้วนแต่ส่งผลถึงขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่เกิดขึ้นด้วย (Wirtgen GmbH, 2010) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกเก็บข้อมูลจากโครงการบูรณะสายทางของกรมทางหลวง โดยวิธีปรับปรุงคุณภาพแบบทำในที่

โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม และถนนที่เลือกเก็บตัวอย่างจะต้องมีชั้นผิวทางเป็นวัสดุชนิดแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีความหนา 5 เซนติเมตร และวัสดุพื้นทางเป็นชนิดหินคลุก ซึ่งมีระดับความลึกของการขุดรวมที่ 20 เซนติเมตร และกำหนดเครื่องจักรรีไซเคิลที่จะเก็บข้อมูล เป็นยี่ห้อ Wirtgen รุ่น 2200CR หรือเทียบเท่า ใช้ความเร็วเดินทางของเครื่องจักรประมาณ 5 เมตรต่อนาที ทั้งนี้เพื่อให้ได้ตัวอย่างวัสดุที่มีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 3-1 เครื่องจักรรีไซเคิล ยี่ห้อ Wirtgen รุ่น 2200 CR
(Wirtgen GmbH, 2008)

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

การดำเนินการในขั้นนำร่องนี้ เป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ขุดไถมาจากสนาม การหาขนาดผลของตัวอย่างที่เก็บมาจากโครงการบูรณะทางหลวง เพื่อกำหนดค่าตัวแปรต้นที่จะใช้ในการทดลองขั้นต่อไปโดยการนี้จะมีขั้นตอนประกอบด้วย

- การทดสอบขนาดผลของตัวอย่างที่เก็บมาจากโครงการบูรณะทางหลวง ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง ทล.-ท.204/2516 (กรมทางหลวง กองวิเคราะห์และวิจัย, 2516)
- การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง ทล.-ท. 108/2517 (กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, 2517a)
- การทดสอบกำลังของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยวิธี California Bearing Ratio (CBR) ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง ทล.-ท. 109/2517 (กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, 2517b)

ในการเตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิมสำหรับใช้ในการทดลอง จะอ้างอิงขนาดผลจากการทดสอบขนาดผลข้างต้น แต่เนื่องด้วยตัวอย่างที่เก็บได้จากในสนามไม่สามารถบ่งบอกถึงปริมาณวัสดุแต่ละชนิดได้ จึงสมมติให้ใช้สัดส่วนของความหนาของโครงสร้างชั้นทาง เป็นตัวแปรกำหนดสัดส่วน

ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยในการศึกษานี้จะเน้นไปที่สัดส่วนของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้จากถนนที่มีชั้นผิวทาง (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) หนา 5 เซนติเมตร และหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR) หนา 15 เซนติเมตร หรือคิดเป็นสัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75 โดยความหนา และสัดส่วนของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้จากถนนที่มีชั้นผิวทางหนา 10 เซนติเมตร และชั้นพื้นหนา 10 เซนติเมตร หรือคิดเป็นสัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 50:50 โดยความหนา โดยมีสมมติฐานคือ ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมทั้ง 2 สัดส่วนไม่แตกต่างกัน เนื่องจากเครื่องจักรรีไซเคิลใช้พลังงานกำลังในการขุดเท่ากันภายใต้ความหนารวมที่เท่ากัน

3.3 การบดอัดก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมผสมบิทูเมนอิมัลชัน

ในการผลิตตัวอย่างในการทดสอบทั้งหมด จะมีก้อนตัวอย่างอยู่ 2 แบบ คือ แบบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 60 มิลลิเมตร (อีกชื่อคือขนาดก้อนตัวอย่างแบบมาร์แชลล์) สำหรับการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 200 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_r) การบดอัดตัวอย่างที่มีขนาดแตกต่างกัน จึงต้องใช้อุปกรณ์ในการบดอัดที่แตกต่างกันด้วย ทั้งนี้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตำ ประกอบไปด้วย

- การบดอัดก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร ใช้เครื่องตำตัวอย่างมาร์แชลล์แบบอัตโนมัติ ยี่ห้อ Controls รุ่น 76-B4212 ตามมาตรฐาน ASTM D1559 ค่าที่เลือกใช้เป็นค่าควบคุมคือจำนวนครั้งในการตำ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3-2 เครื่อง Automatic Marshall Compactor

- การบดอัดก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ใช้ Vibratory hammer ยี่ห้อ Makita รุ่น HM0810TA และรุ่น HM1200 พร้อมชุดอุปกรณ์ตัดแปลงที่ปลายก้านให้เป็นแผ่นกตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 95 มิลลิเมตร ค่าที่เราเลือกใช้เป็นค่าควบคุมคือค่า γ_{dry}



รูปที่ 3-3 Vibratory hammer ยี่ห้อ Makita รุ่น HM0810TA

3.4 การทดลองชั้นนําร่อง

การทดลองในชั้นนําร่องนี้ เป็นการดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาการผสมระหว่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมกับบิทูเมนอิมัลชันและสารผสมเพิ่มในรูปแบบต่างๆ และทดลองบดอัดตัวอย่างเพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพของก้อนตัวอย่างที่ผลิตได้ให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อใช้เตรียมตัวอย่างในการทดลองขั้นที่ 1 และขั้นที่ 2 ต่อไป

3.4.1 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบพลังงานการบดอัด

เนื่องจากการศึกษาการออกแบบส่วนผสมจะดำเนินการทดลองตามคำแนะนำที่ระบุไว้ใน TG2 Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials (Asphalt Academy, 2009b) ซึ่งกำหนดให้ใช้ก้อนตัวอย่างขนาดประมาณ 100 มิลลิเมตร ตําด้วยอุปกรณ์ตําตัวอย่างแบบมาร์แชลล์ แต่ไม่ได้ระบุจำนวนครั้งที่ตําไว้ จึงต้องทำการศึกษาเพื่อหาจำนวนครั้งของการตําที่จะทำให้ได้ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างเช่นเดียวกับความหนาแน่นที่ได้จากวิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จำนวนครั้งที่ตําที่หาได้จะนำไปใช้ในการบดอัดตัวอย่างเพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับกรทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่จะได้กล่าวถึงในลำดับถัดไป

การทดสอบนี้จะใช้วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้จากถนนที่มีชั้นผิวทาง (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) หนา 5 เซนติเมตร และหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Reclaimed Crushed Rock,

RCR) หนา 15 เซนติเมตร หรือคิดเป็นสัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75 โดยความหนา ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และ CSS-1 โดยควบคุมปริมาณความชื้นให้มีค่าตามที่คำนวณได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แล้วบดอัดด้วยอุปกรณ์ตำตัวอย่างแบบมาร์แชลล์ จำนวน 50 ครั้ง และ 75 ครั้ง โดยตำเพียงด้านเดียว แล้วดันตัวอย่างออกมาเพื่อวัดขนาดและความสูงของก้อนตัวอย่างเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นแบบเปียกและนำไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นแบบเปียกที่ได้จากวิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แล้วจึงเลือกจำนวนครั้งในการตำตัวอย่างสำหรับการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมต่อไป

3.4.2 การทดลองหาปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่เหมาะสมในการผสมกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม ที่มีสัดส่วนผสม 2 รูปแบบ คือ

- วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้จากถนนที่มีชั้นผิวทาง (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) หนา 5 เซนติเมตร และหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR) หนา 15 เซนติเมตร หรือคิดเป็นสัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75 โดยความหนา
- วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้จากถนนที่มีชั้นผิวทาง (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) หนา 10 เซนติเมตร และหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR) หนา 10 เซนติเมตร หรือคิดเป็นสัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 50:50 โดยความหนา

ในการทดลองนี้ จะดำเนินการทดลองตามคำแนะนำที่ระบุไว้ใน TG2 Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials (Asphalt Academy, 2009b) ซึ่งกำหนดให้ทดลองหาปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่เหมาะสมด้วยการผสมก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 มิลลิเมตร แล้วนำไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมงโดยไม่ห่อหุ้มก้อนตัวอย่างใดๆ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องแล้วนำก้อนตัวอย่างครึ่งหนึ่งไปทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) จะได้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะแห้ง (ITS_{dry}) และนำก้อนตัวอย่างอีกครึ่งหนึ่งไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนที่จะทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม โดยจะได้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะเปียก (ITS_{wet}) เพื่อนำมาคำนวณค่า Tensile Strength Retained (TSR) พิจารณาหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับวัสดุโครงสร้างทางเดิมนี้

3.4.3 การทดลองหาความต้องการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม (Active filler)

ในการทดลองนี้ จะดำเนินการทดลองตามคำแนะนำที่ระบุไว้ใน TG2 Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials (Asphalt Academy, 2009b) ซึ่งกำหนดให้ทดลองหา

ความต้องการใช้สารผสมเพิ่มแบบทำปฏิกิริยา (Active filler) เช่นปูนซีเมนต์ เถ้าลอย (Fly ash) และปูนขาว (Lime) โดยให้คำแนะนำไว้ว่าหากใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มแล้ว ควรใช้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 1 ของน้ำหนักวัสดุแห้ง แต่หากเป็นปูนขาว ควรใช้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักวัสดุแห้ง สำหรับในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม โดยกำหนดใช้ที่ร้อยละ 1 ของน้ำหนักวัสดุแห้ง เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนของกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

ในประเด็นนี้ จะพิจารณาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สภาวะเปียก (ITS_{wet}) โดยเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้เติมปูนซีเมนต์ที่ได้ดำเนินการดังหัวข้อ 3.4.2

3.5 การทดลองขั้นที่ 1

การทดลองในขั้นที่ 1 นี้ เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต้นที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ตัวแปรต้นที่สนใจมีดังต่อไปนี้

- เกรดของบิทูเมนอิมัลชัน โดยเลือกใช้เกรดชนิด CSS-1h และ CSS-1
- สัดส่วนวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้จากถนนที่มีชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทาง (RAP:RCR) โดยเลือกใช้สัดส่วน 25:75 และ 50:50 โดยความหนา
- การใช้หรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในปริมาณ 1% ของน้ำหนักหินแห้ง เป็นสารผสมเพิ่ม
- ระดับความแน่นของการบดอัด โดยควบคุมความหนาแน่นแห้งของก้อนตัวอย่างให้ได้ประมาณ 95% และ 100% ของความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดลองการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

โดยในขั้นนี้ ตัวแปรที่ถูกควบคุมในการผสม คือตัวแปรที่โดยปกติจะถูกกำหนดไว้ในข้อกำหนดการก่อสร้าง ซึ่งประกอบด้วย

- ปริมาณสัดส่วนของเหลวที่ใช้ผสม ซึ่งประกอบด้วยน้ำสะอาดและปริมาณสัดส่วนของเหลวจากบิทูเมนอิมัลชันที่ใช้ผสม จะควบคุมให้เท่ากับค่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุมีความหนาแน่นสูงสุด ซึ่งคำนวณได้จากการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน บวกด้วยร้อยละ 1
- ปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม ควบคุมเท่ากับปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นนำร่องดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.2
- ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ผสม ควบคุมเท่ากับขนาดคละที่ได้จากการเก็บตัวอย่างในสนาม ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1

- ระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างหลังจากที่บดอัดและบ่มแล้ว ควบคุมให้เท่ากับระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ซึ่งได้ระบุไว้ใน TG2 Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials (Asphalt Academy, 2009b)

ก้อนตัวอย่างในการทดลองชั้นที่ 1 นี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 200 มิลลิเมตร บดอัดด้วย Vibratory compactor โดยแบ่งการบดอัดเป็น 10 ชั้นๆ ละ 2 เซนติเมตร เพื่อให้ก้อนตัวอย่างมีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั้งก้อน

การควบคุมระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างให้มีระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ทำได้โดยการบดตัวอย่างหลังการบดอัดแล้วเสร็จ เริ่มด้วยการปล่อยให้ตัวอย่างอยู่ในห้องที่อากาศถ่ายเทสะดวกเป็นเวลา 26 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนใส่ในถุงพลาสติก มัดปากถุงโดยให้มีปริมาตรช่องว่างในถุงประมาณ 2 เท่าของปริมาตรก้อนตัวอย่าง แล้วนำก้อนตัวอย่างใส่เตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเปลี่ยนถุงที่เปียกด้วยถุงใหม่ทุก 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้ว นำก้อนตัวอย่างออกจากเตาอบยกก้อนตัวอย่างออกจากถุงและปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงใส่ถุงพลาสติกใบใหม่และมัดถุงให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้สูญเสียความชื้นระหว่างการรอทดสอบ

เมื่อรวมจำนวนตัวแปรและระดับการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดแล้ว สามารถสรุปจำนวนกรณีการทดลองได้ทั้งหมด 16 กรณี โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-1 ก้อนตัวอย่างทั้งหมดจะนำไปทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_r) ตามมาตรฐาน AASHTO T-307 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007) ทั้งนี้จะทำการทดสอบก้อนตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนต่อกรณีการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ในขั้นนี้ ค่าโมดูลัสคืนตัวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสของก้อนตัวอย่างพื้นฐาน (Controlled samples) และวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อประเมินผลจากตัวแปรต่างๆ แล้วนำไปกำหนดตัวแปรต้นสำหรับการทดลองในขั้นที่ 2 ต่อไป

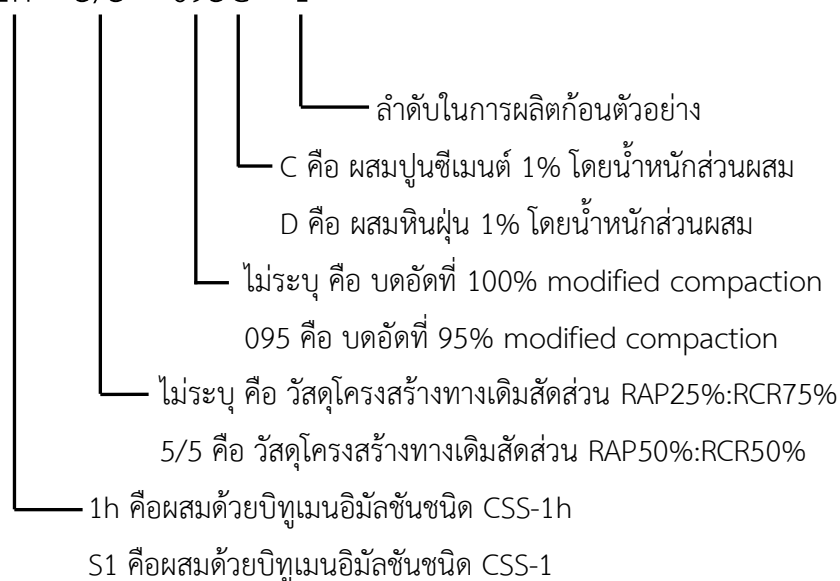
สำหรับก้อนตัวอย่างพื้นฐาน (Controlled samples) คือก้อนตัวอย่างที่เตรียมขึ้นจากวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพใดๆ เพื่อใช้เป็นกรณีฐานสำหรับการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากกรณีทดลองต่างๆ ซึ่งก้อนตัวอย่างพื้นฐานนี้จะถูกเตรียมขึ้นโดยใช้วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่มีสัดส่วน RAP:RCR เหมือนกับกรณีทดลอง ผสมกับน้ำสะอาดด้วยปริมาณเท่ากับค่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุมีความหนาแน่นสูงสุดซึ่งคำนวณได้จากการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน บดอัดด้วย Vibratory compactor ให้ก้อนตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 200 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3-1 รายการตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองขั้นที่ 1

ตัวแปรต้น	ค่าระดับการเปลี่ยนแปลง	ระดับการเปลี่ยนแปลง
เกรดของบิทูเมนอิมัลชัน	CSS-1, CSS-1h	2
สัดส่วน RAP : RCR ในวัสดุผสม	25%:75% และ 50%:50% โดยน้ำหนัก	2
การใช้/ไม่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม	ซีเมนต์ประเภทที่ 1 1% โดยน้ำหนัก ฝุ่นหิน (ไม่ใช้ซีเมนต์) 1% โดยน้ำหนัก	2
ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง	95% ,100% modified compaction	2
ระดับความชื้นที่ใช้เตรียมก้อนตัวอย่าง	น้ำ+ส่วนเหลวของอิมัลชัน เท่ากับ OMC+1%	ไม่เปลี่ยนแปลง
ปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม	ปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่เหมาะสม	ไม่เปลี่ยนแปลง
ขนาดคละของวัสดุรีไซเคิล	กำหนดด้วยความเร็วของเครื่องจักรรีไซเคิล ที่เดินในอัตรา 5 เมตรต่อนาที	ไม่เปลี่ยนแปลง
ระดับความชื้นหลังการบ่ม	ระดับความชื้นธรรมชาติ	ไม่เปลี่ยนแปลง
รวมจำนวนกรณี (2x2x2x2)		16

สำหรับการเรียกชื่อก้อนตัวอย่างในการทดลองขั้นที่ 1 นี้ สัญลักษณ์ตัวย่อต่างๆ จะมีความหมายดังต่อไปนี้

1h – 5/5 – 095C – 1



3.6 การทดลองขั้นที่ 2

หลังจากที่ได้วิเคราะห์จนทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรต้นในการทดลองขั้นที่ 1 แล้ว ในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ตัวแปรต้นในการทดลองขั้นที่ 1 จะถูกกำหนดให้คงที่ และเลือกปรับเปลี่ยนระดับของตัวแปรที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าได้ในระหว่างการก่อสร้าง อันได้แก่

- ปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม แปรเปลี่ยนค่า 2 ระดับคือ 2% และ 3% โดยน้ำหนักของส่วนผสม
- ระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างวัสดุหลังจากที่บดอัดและบ่มแล้ว ควบคุมให้เท่ากับมีความชื้น 3 ระดับคือ ที่สถานะแห้ง, ที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ, และที่สถานะแช่น้ำ เพื่อจำลองสถานการณ์ความชื้นที่แปรเปลี่ยนในรอบ 1 ปีของชั้นพื้นทาง

ส่วนตัวแปรต้นในการทดลองขั้นที่ 1 ที่ถูกระบุ เพื่อให้เป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองในขั้นนี้ คือ

- เกรดของบิทูเมนอิมัลชัน
- สัดส่วนวัสดุโครงสร้างทางเดิม
- การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม
- ระดับความแน่นของการบดอัด คิดเป็นร้อยละของความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดลองการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

กรณีการทดลองในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ จึงสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 3-2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองขั้นที่ 2 นี้จะนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่าตัวแปรในการออกแบบโครงสร้างทางที่ใช้วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

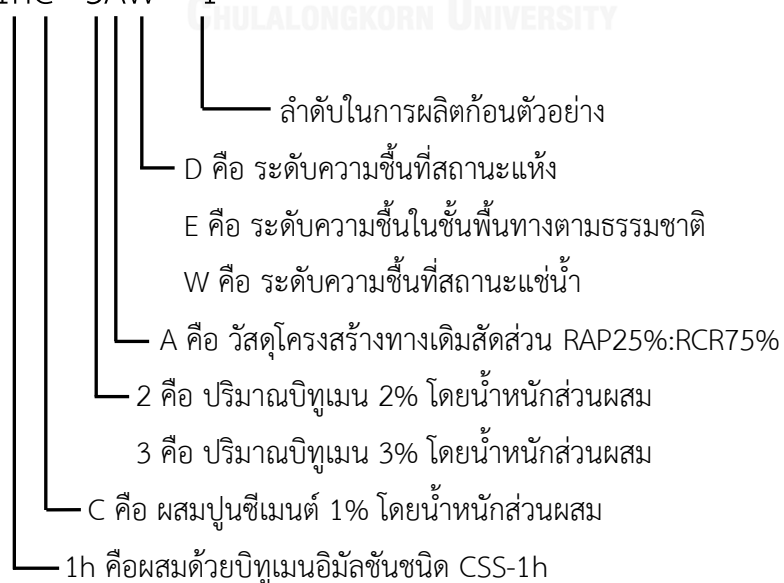
ในการทดลองในขั้นที่ 2 นี้ ก้อนตัวอย่างทั้งหมดผลิตขึ้นเพื่อนำไปทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ตามมาตรฐาน AASHTO T-307 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007) จากนั้นนำก้อนตัวอย่างที่ทดสอบแล้ว ไปทดสอบกำลังอัดสามแกน (Triaxial Test) ตามวิธีการทดสอบ Method 7 – Determination of Triaxial Shear Parameters Using Simple Triaxial Test (Asphalt Academy, 2009a) และข้อแนะนำจาก Stellenbosch University, South Africa โดยกำหนดระดับแรงกระทำด้านข้าง (Confining pressure) ที่แตกต่างกัน 6 ระดับ

ตารางที่ 3-2 รายละเอียดตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดลองขั้นที่ 2

ตัวแปรต้น	ค่าระดับการเปลี่ยนแปลง	ระดับการเปลี่ยนแปลง
เกรดบิทูเมนอิมัลชัน	CSS-1h	ไม่เปลี่ยนแปลง
สัดส่วน RAP : RCR ในวัสดุผสม	25:75	ไม่เปลี่ยนแปลง
การใส่ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม	ใช้ปริมาณซีเมนต์ 1%ของน้ำหนักส่วนผสม	ไม่เปลี่ยนแปลง
ระดับความชื้นที่ใช้เตรียมวัสดุ	น้ำ+ส่วนเหลวของอิมัลชัน เท่ากับ OMC+1%	ไม่เปลี่ยนแปลง
ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง	100% modified compaction	ไม่เปลี่ยนแปลง
ปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่ผสม	2%, 3% ของน้ำหนักส่วนผสม	2
ระดับความชื้นหลังการบ่ม	แห้ง ธรรมชาติ เปียก	3
รวมจำนวนกรณี (2x3)		6

สำหรับการเรียกชื่อก้อนตัวอย่างในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ สัญลักษณ์ตัวอย่างต่างๆ จะมีความหมายดังต่อไปนี้

1hC- 3AW - 1



จากผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้ในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ จะนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรปริมาณบัพทและระดับความชื้นในก้อนตัวอย่าง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์เชิงเส้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 จากการคำนวณโดยความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ตามวิธีของ MEPDG (National Cooperative Highway Research Program, 2004) ซึ่งระบุไว้ในสมการประมาณกำลัง (generalized constitutive model) ดังสมการที่ 3-1

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (\text{สมการที่ 3-1})$$

โดยที่	M_r	=	Resilient Modulus
	P_a	=	ความดันบรรยากาศ
	θ	=	Bulk Stress = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$
	σ_1	=	หน่วยแรงแกนหลัก (major principal stress)
	σ_2	=	หน่วยแรงแกนรอง (intermediate principal stress) ซึ่งจะเท่ากับ σ_3 สำหรับตัวอย่างที่มีรูปทรงกระบอก
	σ_3	=	หน่วยแรงด้านข้าง (minor principal stress / confining pressure)
	τ_{oct}	=	หน่วยแรงเฉือน (octahedral shear stress)
	k_1, k_2, k_3	=	สัมประสิทธิ์จากการคำนวณโดยความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น (Linear regression)

ทั้งนี้ ค่าหน่วยแรงเฉือน (Octahedral shear stress, τ_{oct}) จะคำนวณได้จากสมการที่ 3-2

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (\text{สมการที่ 3-2})$$

สำหรับผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน จะนำมาคำนวณค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, C) และค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (angle of internal friction, φ) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแกนหลัก (major principal stress) กับหน่วยแรงด้านข้าง (confining stress) จะเป็นดังสมการที่ 3-3 และ 3-4 (Asphalt Academy, 2009a)

$$\sigma_{1,f} = A \cdot \sigma_3 + B \quad (\text{สมการที่ 3-3})$$

$$A = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad B = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (\text{สมการที่ 3-4})$$

โดยที่

- $\sigma_{1,f}$ = หน่วยแรงแกนหลัก (major principal stress)
 σ_3 = หน่วยแรงด้านข้าง (confining pressure)
 C = ค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)
 φ = ค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (angle of internal friction)

จากสมการที่ 3-4 นำมากลับสมการเพื่อหาค่า C และค่า φ ได้ตั้งสมการที่ 3-5 และ 3-6

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{A-1}{A+1} \right) \quad (\text{สมการที่ 3-5})$$

$$C = \frac{B(1-\sin \varphi)}{2 \cdot \cos \varphi} \quad (\text{สมการที่ 3-6})$$

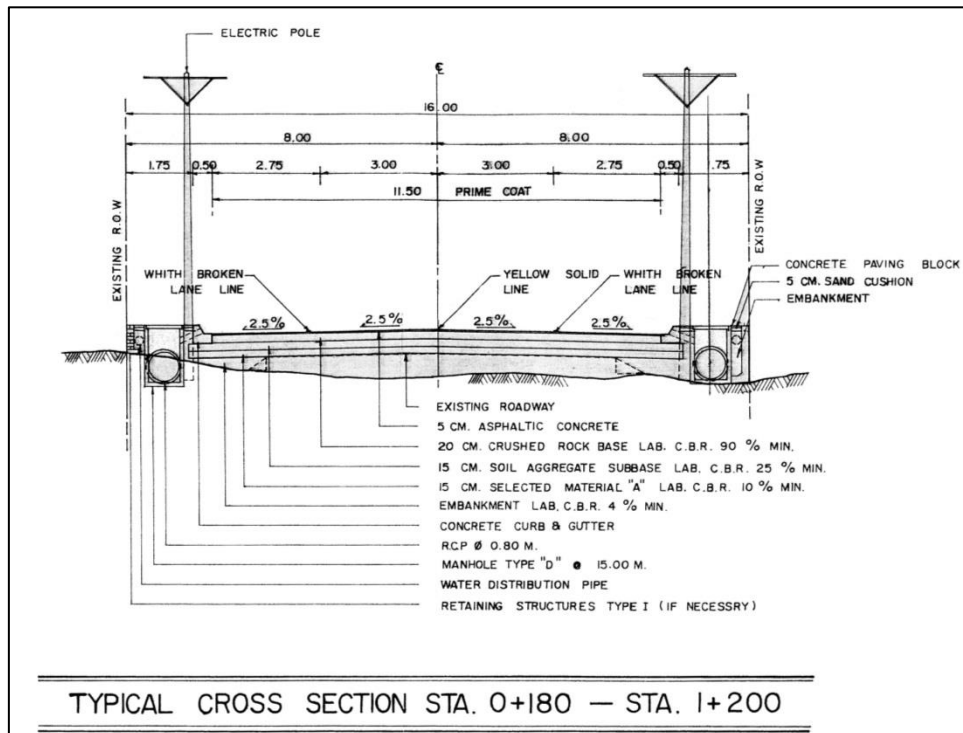
3.7 สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปจำนวนก่อนตัวอย่างทั้งหมดที่จะต้องทำการทดสอบได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 จำนวนก่อนตัวอย่างทั้งหมดในงานวิจัยนี้

ขั้นตอนในงานวิจัย	จำนวนก่อนตัวอย่าง
การทดลองขั้นนำร่อง	147
การทดลองขั้นที่ 1	54
การทดลองขั้นที่ 2	36
รวม	237

จากข้อมูลพื้นฐานทางหลวงหมายเลข 2262 เริ่มต้นก่อสร้างครั้งแรกเมื่อปีพ.ศ. 2539 โดยตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างอยู่ช่วงกม. 1 โดยประมาณ ซึ่งมีลักษณะทางการภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 มีชั้นวัสดุผิวทางเป็นแอสฟัลติกคอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร และชั้นพื้นทางเป็นหินบะซอลต์ ซึ่งเป็นหินชนิดที่มีใช้แพร่หลายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



รูปที่ 4-2 ลักษณะภาพตัดขวางของทางหลวงหมายเลข 2262

(กรมทางหลวง แขวงการทางสุรินทร์ สำนักทางหลวงที่ 7 (อุบลราชธานี), 2539)

จากการสอบถามวิศวกรผู้รับผิดชอบของแขวงการทางสุรินทร์ ได้ให้ข้อมูลว่าทางหลวงในช่วงที่เก็บตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม ยังไม่เคยได้รับการซ่อมบำรุงใหญ่ตั้งแต่ก่อสร้างแล้วเสร็จ

ในการขุดใส่วัสดุโครงสร้างทางเดิม ได้รับความอนุเคราะห์เครื่องจักรรีไซเคิล ยี่ห้อ Wirtgen รุ่น W2200 จากห้างหุ้นส่วนจำกัดอึ้งทงกี ในการดำเนินการขุดใส่ โดยมีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

1. ทำการเลือกช่วงที่จะทำการขุดใส่ โดยช่วงที่ทำการขุดใส่เป็นช่องจราจรกลางฝั่งขวา จากนั้นกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการขุดใส่ โดยการพ่นสีและวางกรวยกำหนดตำแหน่ง ทั้งนี้เครื่องจักรรีไซเคิลต้องการระยะทางตั้งต้นที่จะทำให้เครื่องจักรเดินด้วยความเร็วคงที่และมีระดับความลึกของการขุดใส่เป็นไปตามที่กำหนด การกำหนดตำแหน่งจึงต้องเผื่อระยะดังกล่าวด้วย



รูปที่ 4-3 กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการขุดไส



รูปที่ 4-4 ตั้งแนวเครื่องจักรรีไซเคิล

2. กำหนดความเร็วในการขุดไส เท่ากับ 5 เมตรต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามข้อเสนอแนะทั่วไปของบริษัทผู้ผลิตเครื่องจักร
3. ในการขุดไสวัสดุชั้นผิวทาง กำหนดระดับความลึกในการขุดไส เป็น 5 เซนติเมตร เพื่อเก็บเฉพาะวัสดุชั้นผิวทางเดิม
4. ทำการโกยเก็บวัสดุผิวทางเดิมใส่กระสอบ ทั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่ของหมวดการทางศิขรภูมิ แขวงการทางสุรินทร์ สำนักทางหลวงที่ 7 (อุบลราชธานี) กรมทางหลวง เข้าช่วยเหลือในการเก็บวัสดุและอนุเคราะห์พื้นที่ในการกองเก็บวัสดุเพื่อรอการขนย้ายมากรุงเทพมหานครต่อไป



รูปที่ 4-5 เริ่มการขุดไล่ชั้นผิวทาง



รูปที่ 4-6 ตรวจสอบความลึกของการขุดไล่



รูปที่ 4-7 วัสดุผิวทางเดิมที่ถูกขุดไล่แล้วกองอยู่กับพื้นถนน



รูปที่ 4-8 เจ้าหน้าที่หมวดการทางศรีนครินทร์ กำลังโยยวัสดุผิวทางเดิมใส่กระสอบ

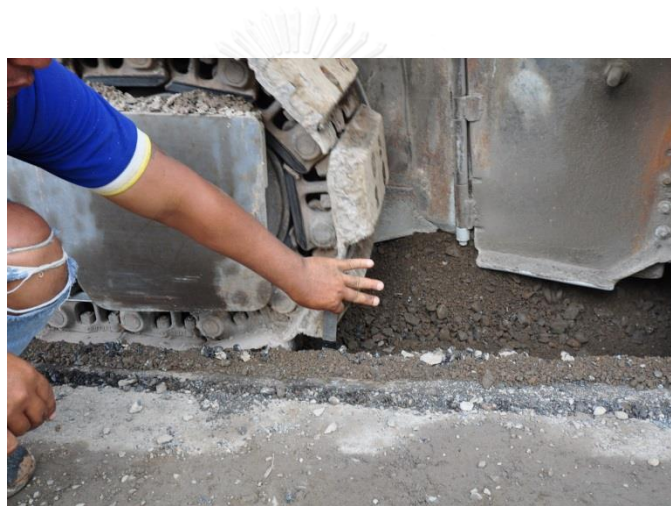


รูปที่ 4-9 เจ้าหน้าที่หมวดการทางศรีนครินทร์ กำลังขนกระสอบวัสดุชั้นรถบรรทุก
ไปจัดเก็บที่หมวดการทางศรีนครินทร์

5. จากนั้น ถอยเครื่องจักรรีไซเคิลกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น และทำการชุดไสวัสดุชั้นพื้นทางต่อไป ทั้งนี้กำหนดความลึกในการชุดไส เป็น 15 เซนติเมตร โดยใช้ความเร็วในการชุดไส เท่ากับ 5 เมตรต่อนาทีเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4-10 ถอยเครื่องจักรรีไซเคิลมายังตำแหน่งเริ่มต้น เตรียมชุดใส่ชั้นพื้นทาง



รูปที่ 4-11 เช็กระดับความลึกของการชุดใส่ชั้นพื้นทาง



รูปที่ 4-12 เจ้าหน้าที่หมวดการทางศรีษะเกษ กำลังโกยวัสดุชั้นพื้นทางเดิมใส่กระสอบ



รูปที่ 4-13 แสดงลักษณะโครงสร้างทาง ในช่วงที่เก็บตัวอย่าง

6. เมื่อจัดเก็บวัสดุเรียบร้อยแล้ว ทางห้างหุ้นส่วนจำกัดอึ้งทงก็ได้โอนุเคราะห์วัสดุเพื่อมาถมกลบหลุมที่เกิดจากการขุดไส และทำการบดอัดเพื่อให้สามารถเปิดการจราจรได้ตามปกติ



รูปที่ 4-14 นำวัสดุมาถมกลบหลุมที่เกิดจากการขุดไส

4.1.2 การเก็บตัวอย่างขนาดคละ

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อหาขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่เกิดจากเครื่องจักรรีไซเคิล มีรายละเอียดที่คำนึงถึงในการดำเนินการดังนี้

- โครงสร้างชั้นทางที่จะเก็บข้อมูล ประกอบด้วยชั้นผิวทางเดิมหนา 5 เซนติเมตร และชั้นพื้นทางเป็นหินคลุกที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร
- เก็บตัวอย่างจากงานปรับปรุงคุณภาพวัสดุแบบในที่ด้วยปูนซีเมนต์ (In-place recycling) ซึ่งใช้เครื่องจักรยี่ห้อ Wirtgen รุ่น 2200CR หรือเทียบเท่า ในการดำเนินงาน
- ความเร็วของเครื่องจักรในการทำงาน วิ่งด้วยความเร็วคงที่ 5 เมตรต่อนาที โดยประมาณ
- มีความลึกในการขุดผสมวัสดุ รวมชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางเท่ากับ 20 เซนติเมตร

ในการเก็บตัวอย่างขนาดคลื่นนี้ ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากโครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 2262 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 2076 (ม่วงหมาก) บรรจบกับทางหลวงหมายเลข 226 อ.สำโรงทาบ ช่วงกม.0+252 ถึงกม.1+265 โดยดำเนินการเก็บตัวอย่างในช่วง กม.0+300 ถึง 0+700 โดยประมาณ



รูปที่ 4-15 ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการของกรมทางหลวง

โครงการปรับปรุงทางหลวงหมายเลข 2262 นี้ เป็นการปรับปรุงโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม โดยได้รับการออกแบบให้ผสมซีเมนต์ 3.8% โดยน้ำหนัก กัดชั้นผิวทางลึก 5 เซนติเมตรและชั้นพื้นทางลึก 15 เซนติเมตร ใช้เครื่องจักร Wirtgen รุ่น W2200 ที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถทำงานรีไซเคิลได้ ซึ่งจะมีรายละเอียดใกล้เคียงกับเครื่องจักรรุ่น 2200CR ความเร็วของเครื่องจักรในการทำงานอยู่ที่ประมาณ 5 เมตรต่ออนาที ช่วงที่ดำเนินการเก็บข้อมูลเป็นถนนช่องทางซ้ายสุด



รูปที่ 4-16 เครื่องจักร Wirtgen W2200 ขณะทำงาน

การเก็บตัวอย่าง ดำเนินการโดยชุดตัวอย่างที่ได้ออกจากด้านหลังเครื่องจักรให้มีความลึก
ใกล้เคียง 20 เซนติเมตร ให้มีปริมาณประมาณ 4 กิโลกรัม จากนั้นนำไปผึ่งแดดบนถาดเหล็กให้แห้ง
แล้วจึงเก็บลงกระสอบแล้วนำกลับมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป



รูปที่ 4-17 เก็บตัวอย่างวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์แล้ว



รูปที่ 4-18 ตัวอย่างวัสดุที่เก็บได้



รูปที่ 4-19 นำวัสดุผึ่งแดดบนถาดเหล็กให้แห้ง

4.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

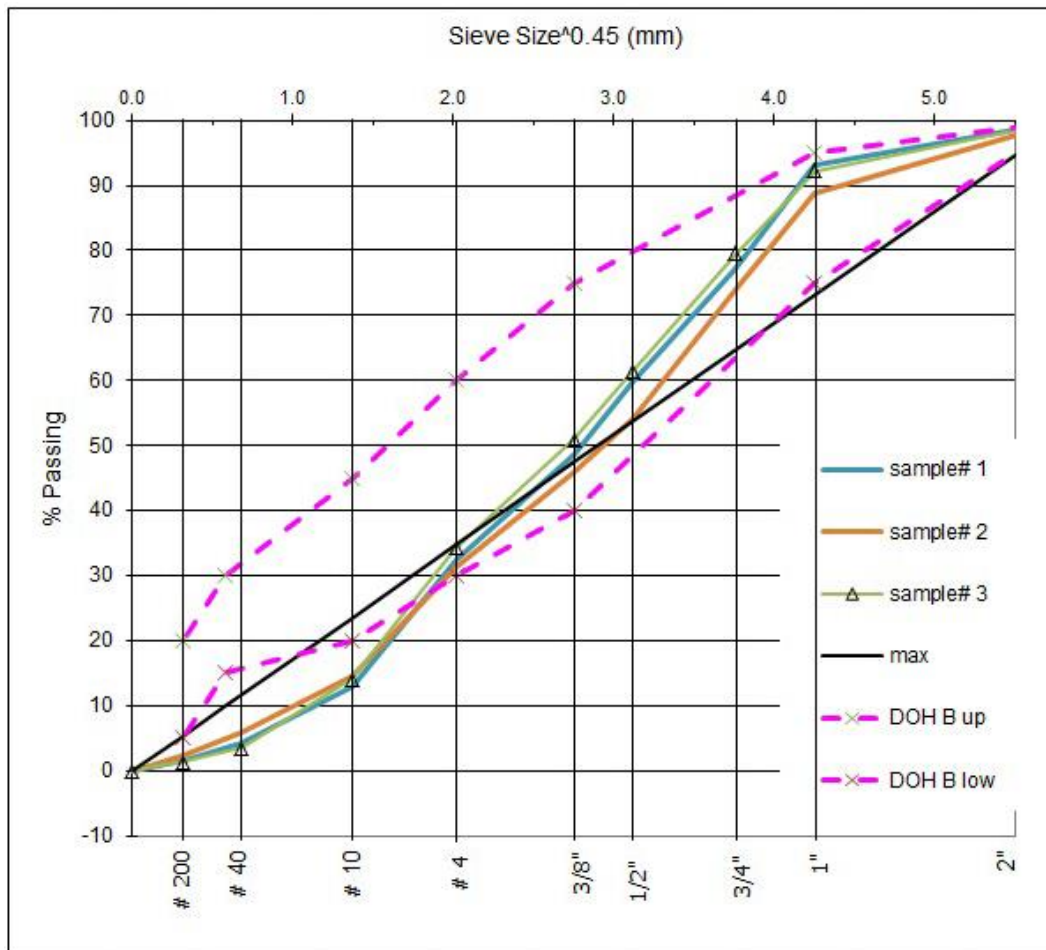
วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ขุดได้จากทางหลวงหมายเลข 2262 และตัวอย่างวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ที่เก็บจากโครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 2262 เมื่อนำกลับมาห้องปฏิบัติการที่กรุงเทพมหานคร จะดำเนินการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน โดยจะทำการทดสอบหาขนาดผลของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ขนาดผลที่ได้จะถูกนำมาอ้างอิงในการผสมวัสดุผิวทางเดิมกับวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิมในสัดส่วนต่างๆ เพื่อใช้ในการผลิตก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการผสมในห้องปฏิบัติการจะได้รับการทดสอบบดอัดวัสดุแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) และการทดสอบ California Bearing Ratio (CBR)

4.2.1 การทดสอบหาขนาดผลของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

เมื่อนำตัวอย่างวัสดุที่เก็บจากโครงการบูรณะสายทางมาทำการหาขนาดผลในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4-1 และสามารถแสดงผลในรูปแบบของกราฟยกกำลัง 0.45 จะได้กราฟดังรูปที่ 4-20

ตารางที่ 4-1 ขนาดผลของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ขุดจากโครงการบูรณะสายทาง
ทางหลวงหมายเลข 2262

ขนาดตะแกรง	ค่าเฉลี่ย %ผ่านตะแกรง
50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)	100
25.0 มิลลิเมตร (1 นิ้ว)	91.36
19.0 มิลลิเมตร (¾ นิ้ว)	76.87
12.5 มิลลิเมตร (½ นิ้ว)	58.4
9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว)	48.61
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	32.72
2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10)	13.92
0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)	4.59
0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200)	1.78



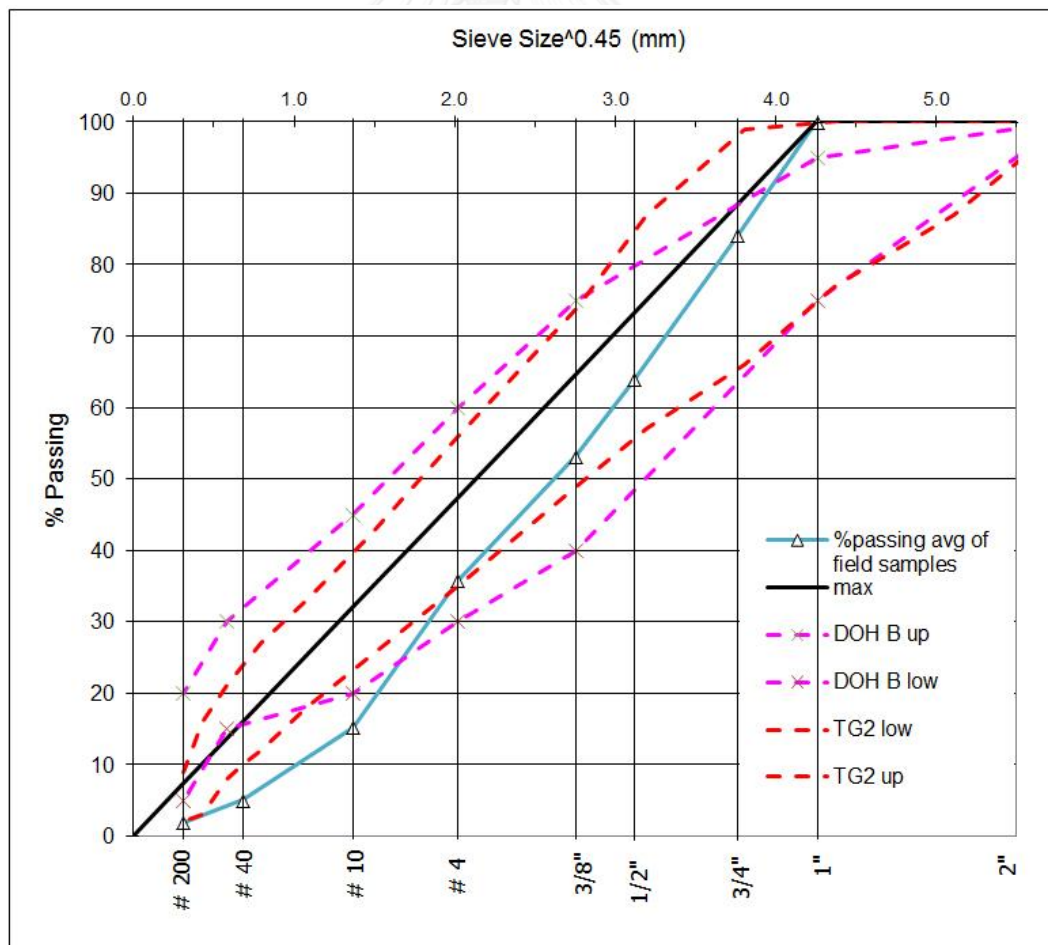
รูปที่ 4-20 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ขุดจากโครงการบูรณะสายทาง
ทางหลวงหมายเลข 2262

4.2.2 การเตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิมสำหรับการทดลอง

วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้ในการศึกษานี้ จะครอบคลุมส่วนผสม 2 สัดส่วน โดยสัดส่วนแรก จะมีวัสดุโครงสร้างทางเดิมในชั้นผิวทาง (RAP) ในปริมาณ 25% โดยน้ำหนัก และมีวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (RCR) ในปริมาณ 75% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นตัวแทนของการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยให้ชั้นผิวทางเดิมมีความหนา 5 เซนติเมตร จากความหนารวม 20 เซนติเมตร และอีกสัดส่วนหนึ่ง จะมีสัดส่วนวัสดุโครงสร้างทางเดิมในชั้นผิวทาง (RAP) ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก และมีวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (RCR) ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นตัวแทนของการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมโดยให้ชั้นผิวทางเดิมมีความหนา 10 เซนติเมตร จากความหนารวม 20 เซนติเมตร ซึ่งสมมุติฐานที่ตั้งไว้ในการวิจัยนี้คือ ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมทั้งสองสัดส่วนไม่แตกต่างกัน เนื่องจากการใช้เครื่องจักรรีไซเคิลที่มีผละกำลังในการขุดย่อยชั้นวัสดุเหมือนกันภายใต้ความหนารวม

ที่เท่ากัน ดังนั้นผลการวิเคราะห์ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมความหนา 20 เซนติเมตร ที่ก่อสร้างด้วยเครื่องจักรรีไซเคิล จะถูกนำมาใช้เป็นขนาดคละอ้างอิงในการจัดเตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิมทั้งสองสัดส่วนในห้องปฏิบัติการ

ผลการวิเคราะห์ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมความหนา 20 เซนติเมตร ที่เก็บตัวอย่างจากในสนามจำนวน 3 ตัวอย่าง แสดงไว้ในรูปที่ 4-20 จากกราฟพบว่าวัสดุโครงสร้างทางเดิมมีขนาดเม็ดใหญ่ที่สุดถึง 50 มิลลิเมตร และมีขนาดคละที่ค่อนข้างหยาบ (coarse grade) โดยมีขนาดคละที่หยาบกว่าช่วงขนาดคละที่ระบุไว้ใน TG2 (Asphalt Academy, 2009b) ในการเตรียมก่อนตัวอย่างสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีขนาดใหญ่มากที่สุดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) เพื่อสามารถใช้ก่อนตัวอย่างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตรได้ โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากขนาดก่อนตัวอย่างเปรียบเทียบกับขนาดของเม็ดวัสดุ (European Standard, 2004) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้คัดแยกเม็ดวัสดุที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 1 นิ้วออก กราฟขนาดคละ (เฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้ในงานวิจัยจึงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4-21



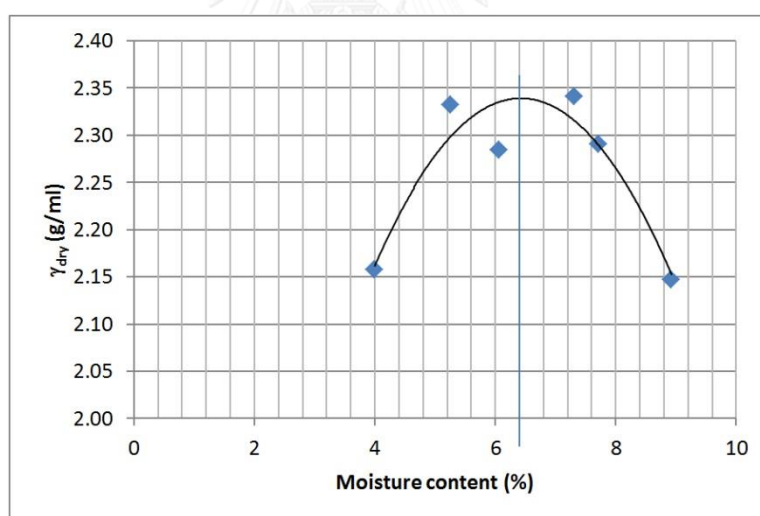
รูปที่ 4-21 กราฟขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก่อนตัวอย่างในงานวิจัย

4.2.3 การทดสอบบดอัดวัสดุแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดสอบบดอัดวัสดุแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) นี้ จะทดสอบตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 108/2517 ของกรมทางหลวง (กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง, 2517a) ใช้วิธี ข. โดยดำเนินการทดสอบกับวัสดุดังนี้

- วัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก ไม่ผสมปูนซีเมนต์
- วัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก และผสมปูนซีเมนต์ 1% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด
- วัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP50%:RCR50% โดยน้ำหนัก ไม่ผสมปูนซีเมนต์
- วัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP50%:RCR50% โดยน้ำหนัก และผสมปูนซีเมนต์ 1% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

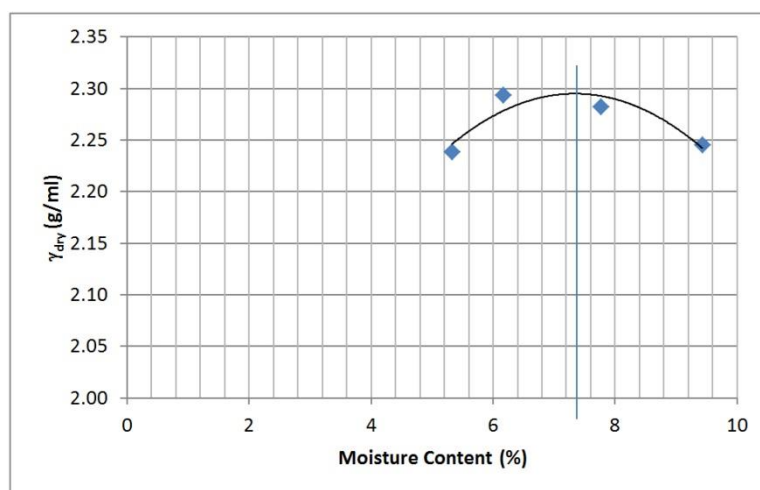
ผลการทดสอบของวัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์ เป็นดังกราฟในรูปที่ 4-22 ซึ่งจะได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่ 6.4% และได้ค่า γ_{dry} สูงสุดเท่ากับ 2.338 กรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 4-22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP25%:RCR75% แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์

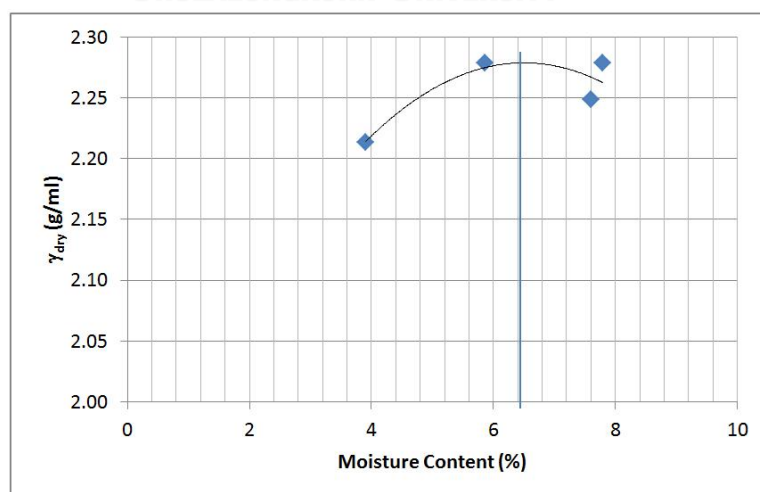
อย่างไรก็ดี มาตรฐานการทดสอบได้ระบุไว้ว่าให้ใช้วัสดุตัวอย่างเดียวกันแล้วเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นไปจนกว่าจะได้ความหนาแน่นลดลงจึงหยุดการทดสอบ แต่ในงานศึกษานี้ จะใช้ตัวอย่างใหม่ในทุกครั้งของการทดสอบ เนื่องจากการตำในช่องที่วัสดุแห้งมาก ทำให้วัสดุก้อนใหญ่แตก ส่งผลให้ขนาดคละเปลี่ยนไปและปริมาณความชื้นที่ได้ก็เปลี่ยนไปด้วย

ผลการทดสอบของวัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก แบบผสมปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม เป็นดังกราฟในรูปที่ 4-23 ซึ่งจะได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่ 7.5% และได้ค่า γ_{dry} สูงสุดเท่ากับ 2.297 กรัมต่อมิลลิลิตร



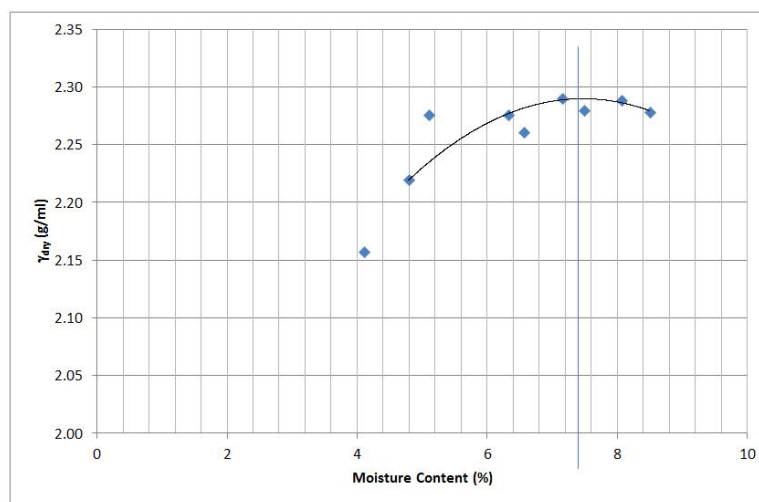
รูปที่ 4-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม

ผลการทดสอบของวัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP50%:RCR50% โดยน้ำหนัก แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์ เป็นดังกราฟในรูปที่ 4-24 ซึ่งจะได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่ 6.5% และได้ค่า γ_{dry} สูงสุดเท่ากับ 2.279 กรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 4-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP50%:RCR50% แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์

ผลการทดสอบของวัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP50%:RCR50% โดยน้ำหนัก แบบผสมปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม เป็นดังกราฟในรูปที่ 4-25 ซึ่งจะได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่ 7.4% และได้ค่า γ_{dry} สูงสุดเท่ากับ 2.289 กรัมต่อมิลลิลิตร



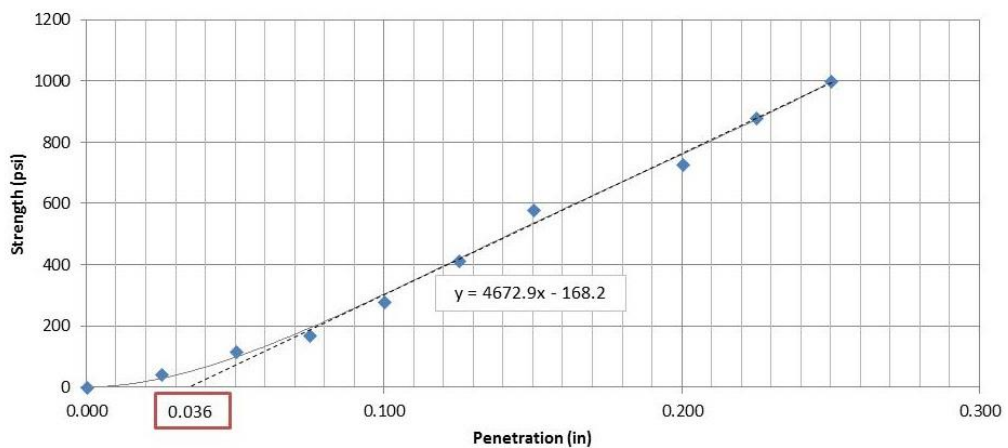
รูปที่ 4-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า γ_{dry} และค่าความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ RAP50%:RCR50% ผสมกับปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม

4.2.4 การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

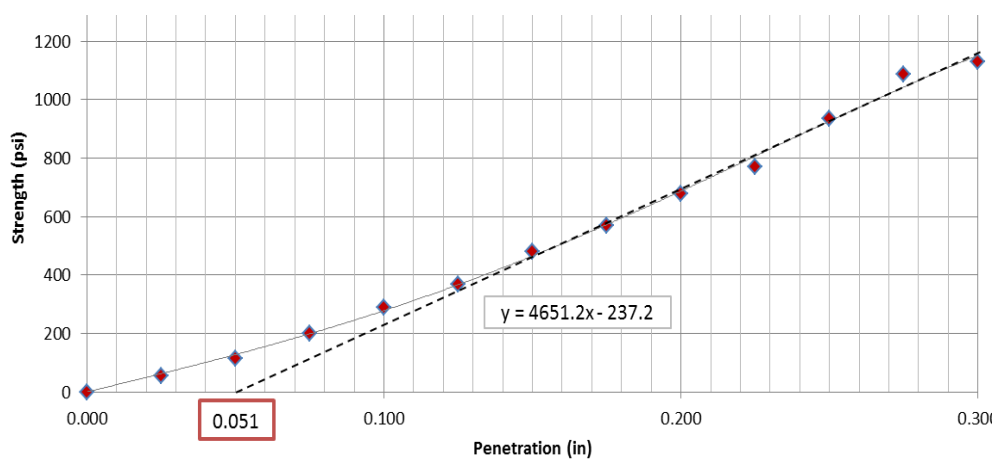
ในการทดสอบนี้ เป็นการทดสอบค่า California Bearing Ratio (CBR) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 109/2517 (กรมทางหลวง สำนักวิศวกรรมหิวิจัยและพัฒนาางานทาง, 2517b) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ โดยจะทดสอบกับวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่มีสัดส่วน RAP25%:RCR75% เพียงสัดส่วนเดียวเท่านั้น เพื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของมาตรฐานพื้นทางหินคลุก ทล.-ม. 201/2544 (กรมทางหลวง, 2544) ซึ่งระบุไว้ว่าค่า CBR จะต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลติกคอนกรีต โดยการเตรียมตัวอย่าง จะแบ่งวัสดุออกเป็น 5 ชั้น ต่ำชั้นละ 56 ครั้ง ใช้ปริมาณน้ำตามที่ได้จากข้อ 4.2.3 จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 4 วันและวัดค่าการขยายตัว (Swell) ไว้ ดังตารางที่ 4-2 แล้วนำไปทดสอบ Penetration test เพื่อหาค่า CBR ได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-2 ค่าการขยายตัวของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

date	time	elapsed time (hr)	Sample#1		Sample#2	
			reading	swell (mm)	reading	swell (mm)
19/12/2555	21:00	00:00	42.44	0	33.68	0
21/12/2555	01:00	28:00:00	42.8	0.36	33.84	0.16
22/12/2555	02:10	53:10:00	42.54	0.1	33.78	0.1
23/12/2555	02:00	77:00:00	42.52	0.08	33.74	0.06
23/12/2555	13:30	88:30:00	42.48	0.04	33.7	0.02
Average			0.03 mm			



รูปที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดและระยะยุบของตัวอย่างที่ 1 ของการทดสอบ CBR



รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดและระยะยุบของตัวอย่างที่ 2 ของการทดสอบ CBR

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบ Penetration test และค่า CBR ของตัวอย่าง RAP25%:RCR75%

ค่ากำลังรับแรงกด	sample#1	sample#2
ค่ากำลังที่ 0.1 นิ้ว (psi)	299	228
ค่ากำลังที่ 0.2 นิ้ว (psi)	766	693
ค่า %CBR		
ที่ 0.1 นิ้ว (Std = 1000 psi)	30%	23%
ที่ 0.2 นิ้ว (Std = 1500 psi)	51%	46%
ค่าเฉลี่ย %CBR	49%	

จากผลการทดสอบ California Bearing Ratio ด้วยวิธีการแบบแช่น้ำ ตามวิธีการทดลอง ที่ ทล.-ท.109 (กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง, 2517b) พบว่าวัสดุโครงสร้างทาง เดิมในสัดส่วน RAP25%:RCR75% ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพใดๆ มีค่าการขยายตัวที่ต่ำมาก หลังจากแช่น้ำผ่านไป 88 ชั่วโมงตัวอย่างมีค่าการขยายตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 0.03 มิลลิเมตร และจากการ คำนวณ พบว่าตัวอย่างมีค่า %CBR เฉลี่ยอยู่ที่ 49% ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานพื้นทางหินคลุก ทล.-ม.201/2544 (กรมทางหลวง, 2544) ที่กำหนดไว้ว่าค่า %CBR สำหรับวัสดุที่จะนำมาก่อสร้างชั้น พื้นทางจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 80%

ดังนั้น วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุง จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ก่อสร้างชั้นพื้น ทาง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิมให้มีความแข็งแรง มากเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง

4.3 ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบพลังงานการบดอัด

ในการเตรียมก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 60 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) ตามที่ระบุไว้ใน TG2 (Asphalt Academy, 2009b) โดยใช้ค้อนตำตัวอย่างแบบมาร์แชลล์ แต่ไม่ได้ระบุถึงจำนวนครั้งใน การตำเพื่อให้ได้ความหนาแน่นตามที่ได้ทดสอบไว้ในข้อ 4.2.3 การทดสอบในส่วนนี้เพื่อให้สามารถ กำหนดจำนวนครั้งในการตำตัวอย่างได้ โดยมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

- เตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิมในสัดส่วน RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก ให้แต่ละตัวอย่างมีน้ำหนักประมาณ 1,000 กรัม
- เติมนูนซีเมนต์ปริมาณ 1% ของน้ำหนักวัสดุแห้ง
- ผสมตัวอย่าง โดยใช้ค่า Optimum moisture content เท่ากับ 7.5% (เท่ากับค่า Liquid content เท่ากับ 8.5%) และใช้ปริมาณ %Bitumen residue เท่ากับ 3% โดยน้ำหนักวัสดุ
- ใช้บิทูเมนอิมัลชันเกรด CSS-1h และ CSS-1 อุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
- กำหนดจำนวนครั้งที่ตำ เป็น 50 และ 75 ครั้ง โดยตำเพียงด้านเดียว (ไม่มีการกลับหน้าตำ)
- เมื่อบดอัดเสร็จ ดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้ววัดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงทันที

ผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h เป็นดังตารางที่ 4-4 และผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 เป็นดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานการบดอัดของบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h

จำนวนครั้งที่ตำ	γ_{wet} (กรัมต่อมิลลิลิตร)
50 ครั้ง	2.282
75 ครั้ง	2.332

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานการบดอัดของบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

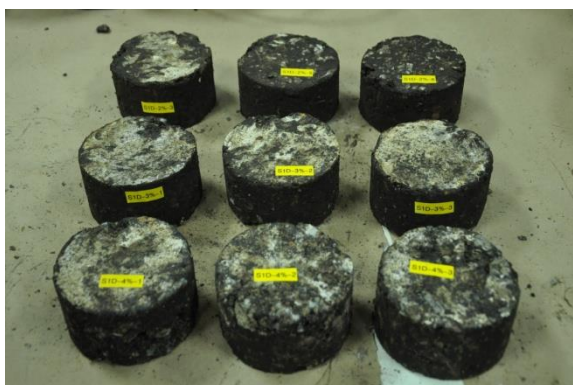
จำนวนครั้งที่ตำ	γ_{wet} (กรัมต่อมิลลิลิตร)
50 ครั้ง	2.292
75 ครั้ง	2.342

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามข้อ 4.2.3 จะได้ค่า γ_{wet} เท่ากับ 2.469 กรัมต่อมิลลิลิตร ฉะนั้นจำนวนครั้งการตำที่ทำให้ได้ค่า γ_{wet} ใกล้เคียงกับที่ทดสอบได้คือการตำ 75 ครั้งเพียงด้านเดียว จึงเลือกการตำจำนวน 75 ครั้งเพียงหน้าเดียวสำหรับการเตรียมตัวอย่างในลำดับต่อไป

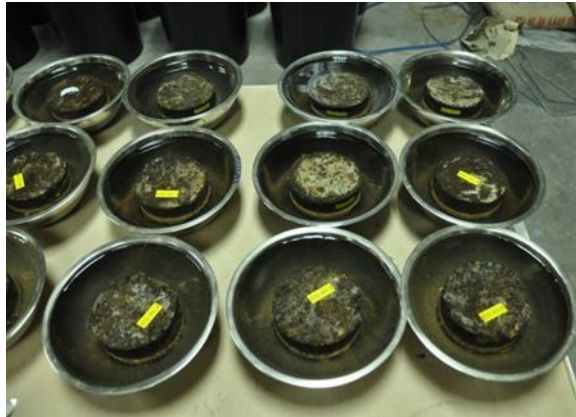
4.4 ผลการทดลองหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วน RAP25%:RCR75%

การทดลองหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม ได้ถูกระบุไว้ใน TG2 (Asphalt Academy, 2009b) ให้เป็นการทดสอบลำดับแรกสำหรับการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ในการทดลองนี้จะทดสอบกับวัสดุโครงสร้างทางเดิมในสัดส่วน RAP25%:RCR75% โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

- ชั่งวัสดุโครงสร้างทางเดิมในสัดส่วน RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก ให้แต่ละตัวอย่างมีน้ำหนักประมาณ 1,000 กรัม
- เติมหินฝุ่น 1% โดยน้ำหนักวัสดุแห้ง
- ผสมตัวอย่างโดยใช้ค่า Optimum moisture content เท่ากับ 7.5% (เท่ากับค่า Liquid content เท่ากับ 8.5%)
- ใช้บิทูเมนอิมัลชันเกรด CSS-1h และ CSS-1 อุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
- กำหนดปริมาณ %Bitumen residue เท่ากับ 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักวัสดุรวม
- ต้มตัวอย่างด้วยค้อนมาร์แชลล์ 75 ครั้ง หน้าเดียว
- หลังจากได้ก้อนตัวอย่างแล้ว บ่มตัวอย่างโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งก้อนตัวอย่างครึ่งหนึ่งไปทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะแห้ง (ITS_{dry})
- ก้อนตัวอย่างอีกครึ่งหนึ่ง นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะเปียก (ITS_{wet})
- เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะเปียก (ITS_{wet}) กับค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะแห้ง (ITS_{dry}) โดยรายงานเป็นค่า Tensile Strength Retained (TSR)



รูปที่ 4-28 ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS_{dry}



รูปที่ 4-29 ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ITS_{wet}

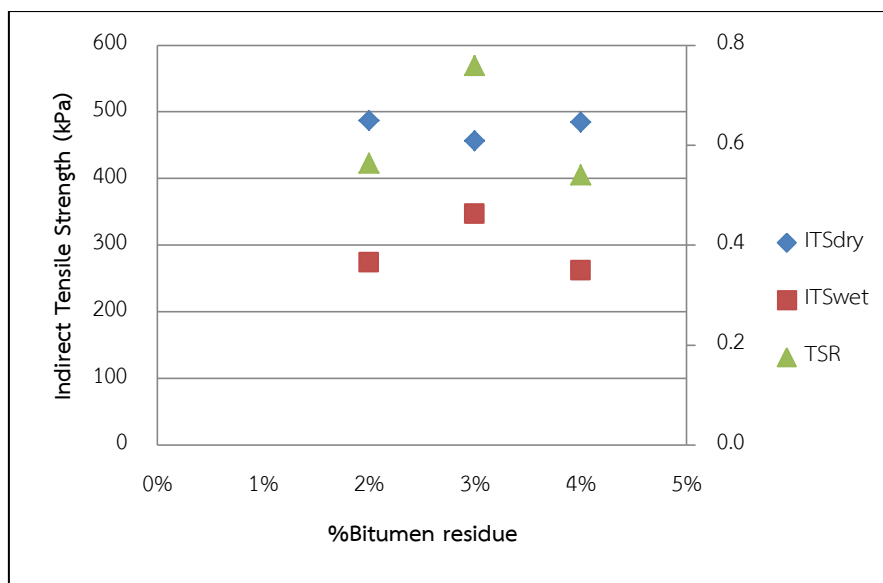


รูปที่ 4-30 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดิ่งทางอ้อม

ผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h เป็นดังตารางที่ 4-6 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-31 ส่วนผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 เป็นดังตารางที่ 4-7 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-32

ตารางที่ 4-6 ค่ากำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับ
หินฝุ่นและบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h

%Bitumen Residue (%)	ค่า ITS_{dry} (kPa)	ค่า ITS_{wet} (kPa)	ค่า TSR
2	486.7	274.2	0.56
3	456.7	346.5	0.76
4	484.5	261.9	0.54



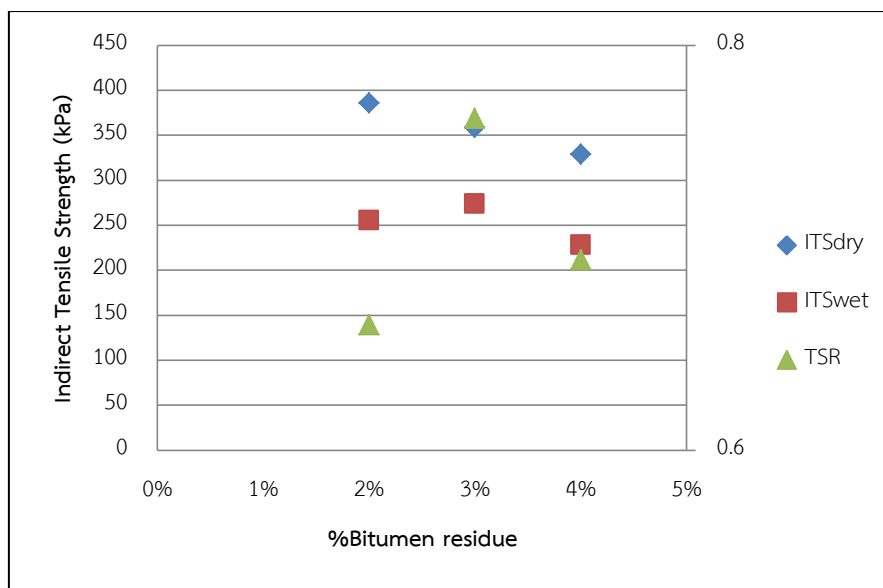
รูปที่ 4-31 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสถานะแห้ง (ITS_{dry}) จะพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ได้สูงกว่า 225 กิโลปาสคาล ที่เป็นข้อกำหนดของ TG2 (Asphalt Academy, 2009b) และเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่า TSR ซึ่งปริมาณบิทูเมนที่ 3% ให้ค่าสูงสุด จึงเลือกค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h เท่ากับ 3%

อย่างไรก็ดี ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสถานะแห้ง (ITS_{dry}) ที่ได้มีค่ามากกว่า 400 กิโลปาสคาลที่ทุกระดับปริมาณบิทูเมน ในขณะที่ค่า TSR มีค่าใกล้เคียง 0.5 ซึ่งใน TG2 ระบุไว้ว่าวัสดุนี้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสภาพก่อนหรืออาจต้องใช้สารผสมเพิ่ม (Active filler) (Asphalt Academy, 2009b) ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4-7 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

%Bitumen Residue (%)	ค่า ITS _{dry} (kPa)	ค่า ITS _{wet} (kPa)	ค่า TSR
2	385.7	255.3	0.66
3	358.5	273.8	0.76
4	328.9	228.2	0.69



รูปที่ 4-32 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสถานะแห้ง (ITS_{dry}) จะพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ได้สูงกว่า 225 กิโลปาสคาล ที่เป็นข้อกำหนดของ TG2 (Asphalt Academy, 2009b) และเมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสถานะเปียก (ITS_{wet}) จะพบค่าสูงสุดที่ปริมาณบิทูเมน 3% และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่า TSR พบว่าที่ปริมาณบิทูเมน 3% จะให้ค่า TSR สูงสุดด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงเลือกค่าปริมาณบิทูเมนที่ 3% เป็นค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับวัสดุโครงสร้างทางเดิมแบบสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมกับหินฝุ่นและบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

4.5 การทดลองหาความต้องการปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม (Active filler need)

วัสดุโครงสร้างทางเดิมบางชนิดต้องการการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้น ก่อนที่จะผสมกับบิทูเมนอิมัลชัน ทั้งนี้มีสาร 2 กลุ่มที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้น กลุ่มแรกคือกลุ่มที่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ (Active filler) เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (cement) ปูนขาว (hydrated lime) และเถ้าลอย (fly ash) อีกกลุ่มหนึ่งคือกลุ่มวัสดุธรรมชาติที่ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Natural filler) เช่น หินฝุ่น การใช้งานสารปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นนี้ขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น ต้องการให้บิทูเมนเกาะกับวัสดุรีไซเคิลได้ดีขึ้น ต้องการให้บิทูเมนกระจายตัวได้ดีขึ้น ปรับสภาพความชื้นในวัสดุ ต้องการเพิ่มความแข็งแรง หรือต้องการเร่งการบ่มตัว เป็นต้น

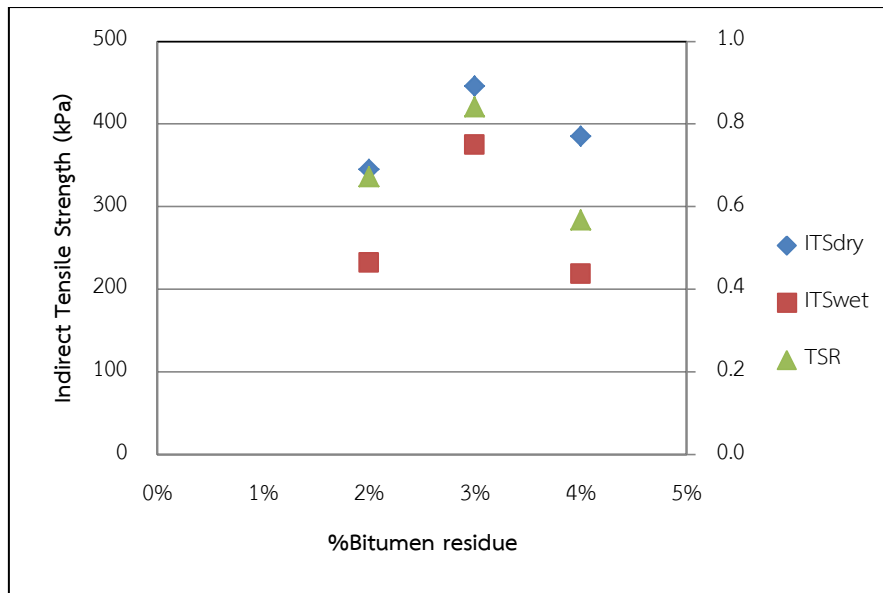
ในการศึกษานี้ได้เลือกปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นสารผสมเพิ่ม โดยกำหนดปริมาณการใช้ที่ร้อยละ 1 ของน้ำหนักวัสดุผสม ซึ่งเป็นขีดจำกัดสูงสุดที่ระบุไว้ใน TG2 (Asphalt Academy, 2009b) ทั้งนี้แนวทางในการพิจารณาเลือกใช้สารผสมเพิ่ม คือพิจารณาจากค่า ITS_{dry} ว่ามากกว่า 400 กิโลปาสกาลและค่า TSR น้อยกว่า 0.50 แล้ว วัสดุโครงสร้างทางเดิมนี้อาจได้รับการเติมสารปรับปรุงคุณภาพซึ่งจะต้องทำการทดลองเพื่อทดลองว่าสารใดเหมาะสมที่สุดกับวัสดุโครงสร้างทางเดิมนั้นๆ การทดลองในส่วนนี้จะมีรายละเอียดดังนี้

- ชั่งวัสดุโครงสร้างทางเดิมในสัดส่วน RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก ให้แต่ละตัวอย่างมีน้ำหนักประมาณ 1,000 กรัม
- เติมน้ำปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักวัสดุแห้ง
- ผสมตัวอย่างโดยใช้ค่า Optimum moisture content เท่ากับ 7.5% (เท่ากับค่า Liquid content เท่ากับ 8.5%)
- ใช้บิตูเมนอิมัลชันเกรด CSS-1h และ CSS-1 อุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
- กำหนดปริมาณ %Bitumen residue เท่ากับ 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักวัสดุรวม
- ต้มตัวอย่างด้วยค้อนมาร์แชลล์ 75 ครั้ง หน้าเดียว
- หลังจากได้ก้อนตัวอย่างแล้ว บ่มตัวอย่างโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งก้อนตัวอย่างครึ่งหนึ่งไปทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะแห้ง (ITS_{dry})
- ก้อนตัวอย่างอีกครึ่งหนึ่ง นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะเปียก (ITS_{wet})
- เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะเปียก (ITS_{wet}) กับค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะแห้ง (ITS_{dry}) โดยรายงานเป็นค่า Tensile Strength Retained (TSR)

ผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h เป็นดังตารางที่ 4-8 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-33 ส่วนผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิตูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 เป็นดังตารางที่ 4-9 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-34

ตารางที่ 4-8 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับ
ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h

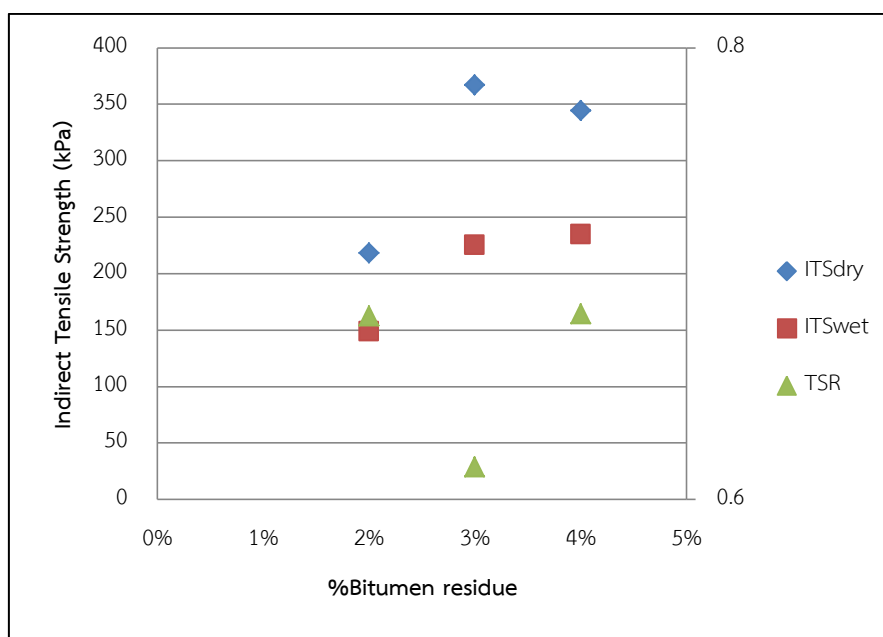
%Bitumen Residue (%)	ค่า ITS _{dry} (kPa)	ค่า ITS _{wet} (kPa)	ค่า TSR
2	345.0	231.8	0.67
3	445.7	374.4	0.84
4	385.1	218.3	0.57



รูปที่ 4-33 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75%
ผสมกับปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h

ตารางที่ 4-9 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP25%:RCR75% ผสมกับ
ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

%Bitumen Residue (%)	ค่า ITS _{dry} (kPa)	ค่า ITS _{wet} (kPa)	ค่า TSR
2	218.5	148.8	0.68
3	367.2	225.6	0.61
4	344.5	235.0	0.68



รูปที่ 4-34 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP25%:RCR75% ผสมกับปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

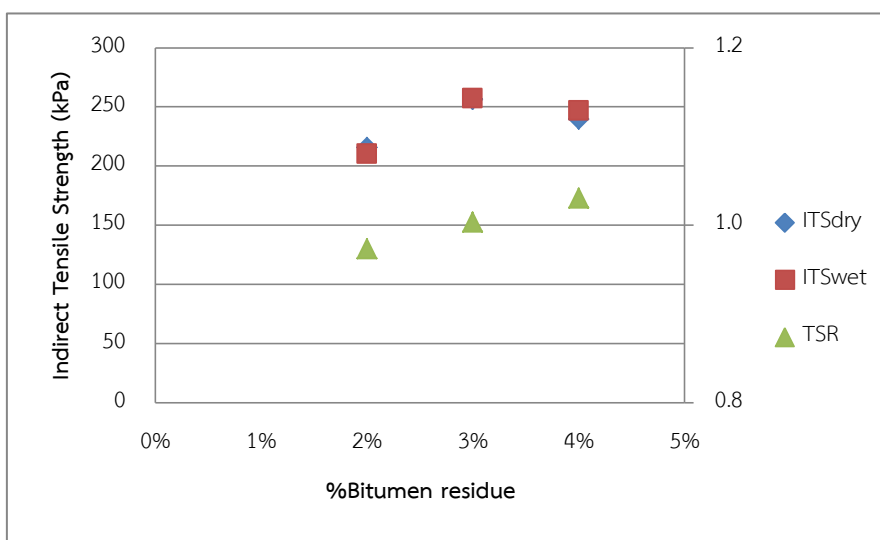
จากผลการทดสอบกับตัวอย่าง RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันทั้ง 2 ชนิด พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สภาวะแห้ง (ITS_{dry}) และค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สภาวะเปียก (ITS_{wet}) มีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับคำแนะนำที่ระบุไว้ใน TG2 (Asphalt Academy, 2009b) พบว่าค่า ITS_{wet} ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์มีค่ามากกว่า 400 กิโลปาสคาล และมีค่า TSR มากกว่า 0.50 ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสามารถกล่าวได้ว่า วัสดุโครงสร้างทางเดิมนี้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม (Active filler)

4.6 ผลการทดลองหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วน RAP50%:RCR50%

สำหรับการทดลองหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วนผสม RAP50%:RCR50% นี้ จะดำเนินการโดยวิธีเดียวกับการทดลองในสัดส่วนผสม RAP25%:RCR75% และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุแห้ง เป็นสารผสมเพิ่ม ผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h เป็นดังตารางที่ 4-10 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-35 ส่วนผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่เตรียมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 เป็นดังตารางที่ 4-11 และแสดงในรูปแบบกราฟดังรูปที่ 4-36

ตารางที่ 4-10 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP50%:RCR50% ผสมกับ
ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h

%Bitumen Residue (%)	ค่า ITS _{dry} (kPa)	ค่า ITS _{wet} (kPa)	ค่า TSR
2	215.7	209.8	0.97
3	256.0	256.8	1.00
4	239.5	246.7	1.03

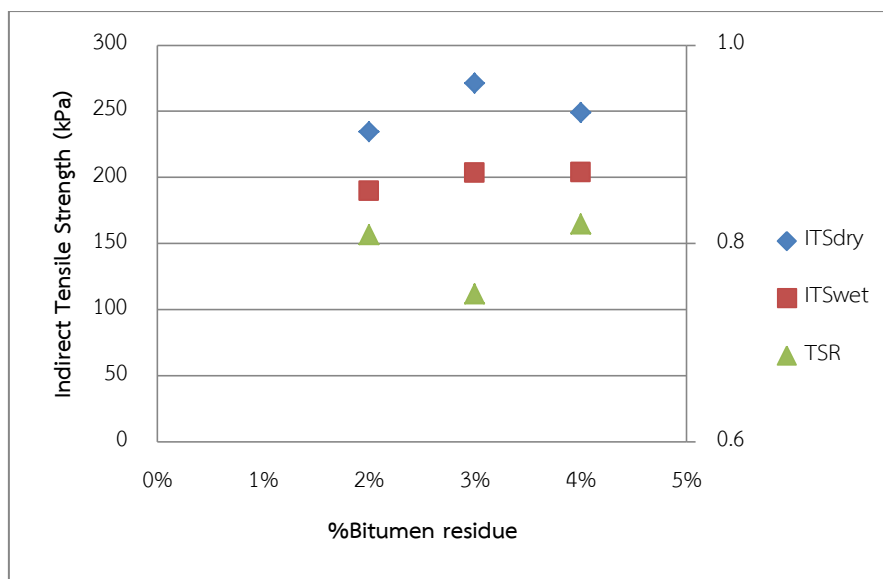


รูปที่ 4-35 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP50%:RCR50%
ผสมกับปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP50%:RCR50% ผสมกับ
ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h จะได้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสภาวะเปียก (ITS_{wet})
สูงสุดที่ปริมาณบิทูเมน 3% และเมื่อพิจารณาว่าค่า TSR ร่วมด้วยจะพบว่าที่ปริมาณบิทูเมน 3% จะให้
ค่า TSR เท่ากับ 1.00 เพราะฉะนั้นจึงเลือกค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ
RAP50%:RCR50% ผสมกับปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h เท่ากับ 3%

ตารางที่ 4-11 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ RAP50%:RCR50% ผสมกับ
ปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

%Bitumen Residue (%)	ค่า ITS _{dry} (kPa)	ค่า ITS _{wet} (kPa)	ค่า TSR
2	234.6	189.8	0.81
3	271.3	203.3	0.75
4	248.8	204.0	0.82



รูปที่ 4-36 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP50%:RCR50% ผสมกับปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1

จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุ RAP50%:RCR50% ผสมกับปูนซีเมนต์และบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 จะได้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสถานะเปียก (ITS_{wet}) ที่ปริมาณบิทูเมน 3% และ 4% มีค่าสูงใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาค่า TSR ร่วมด้วยจะพบว่าค่า TSR ที่ทุกปริมาณบิทูเมนสูงกว่า 0.75 ทั้งหมด และเมื่อนำค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมในสถานะแห้ง (ITS_{dry}) มาร่วมพิจารณา จะพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณบิทูเมน 3% และเพื่อให้สามารถนำผลการทดสอบในขั้นต่อไปมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างจากวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ได้ จึงเลือกค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมเท่ากับ 3%

4.7 ผลการทดลองขั้นที่ 1

การทดลองขั้นที่ 1 นี้จะเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต้นที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน โดยตัวแปรต้นที่จะศึกษาคือ ชนิดของบิทูเมนอิมัลชัน สัดส่วนของวัสดุโครงสร้างทางเดิม การเติมสารผสมเพิ่ม และระดับความแน่นของการบดอัด นำมาทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ตามมาตรฐาน AASHTO T-307 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007) ทั้งนี้ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับเพื่อกำหนดตัวแปรต้นสำหรับการทดลองในขั้นที่ 2 ต่อไป

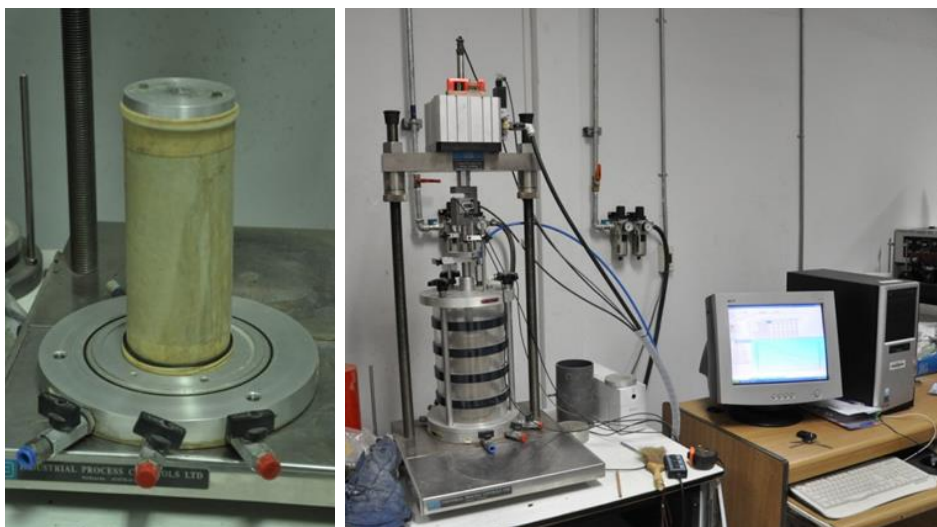
ในการทดลองขั้นนี้ ก้อนตัวอย่างจะถูกเตรียมขึ้นให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 200 มิลลิเมตร บ่มตัวอย่างให้มีระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ จากนั้นจึงนำไปทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว ผลการทดสอบก้อนตัวอย่างสำหรับวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h หรือ CSS-1 และเติมหินฝุ่นหรือปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction แสดงไว้ในตารางที่ 4-13 ถึง 4-16 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4-12



รูปที่ 4-37 (ซ้าย) แบบหล่อและการบดอัดเตรียมก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร (ขวา) ตัวอย่างที่บดอัดเรียบร้อยแล้ว กำลังถูกแกะออกจากแบบหล่อ



รูปที่ 4-38 การบ่มก้อนตัวอย่างเพื่อให้มีระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ



รูปที่ 4-39 (ซ้าย) ก้อนตัวอย่างที่บรรจุในเซลล์ ก่อนเริ่มทดสอบ
(ขวา) การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว ตามมาตรฐาน AASHTO T307

ตารางที่ 4-12 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างควบคุมวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน
RAP25%:RCR75% ผสมโดยไม่เติมบิทูเมนอิมัลชันและปูนซีเมนต์
บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	25/75-OMC-1 (MPa)	25/75-OMC-2 (MPa)	25/75-OMC-5 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	96	156	121	124
2	123	159	139	140
3	151	185	167	168
4	112	152	143	136
5	164	194	188	182
6	200	225	219	215
7	195	193	195	194
8	252	261	257	257
9	290	336	291	306
10	246	206	185	212
11	248	242	217	236
12	312	346	298	319
13	289	241	215	248
14	305	283	250	279
15	380	386	330	365

ตารางที่ 4-13 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	1h-D-1 (MPa)	1h-D-2 (MPa)	1h-D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	204	242	272	239
2	206	247	297	250
3	216	271	343	277
4	203	250	279	244
5	224	282	351	286
6	256	304	418	326
7	236	328	320	295
8	301	315	417	344
9	354	369	447	390
10	343	329	320	331
11	321	312	341	325
12	386	381	434	400
13		326	362	344
14		342	366	354
15		428	447	437

ตารางที่ 4-14 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

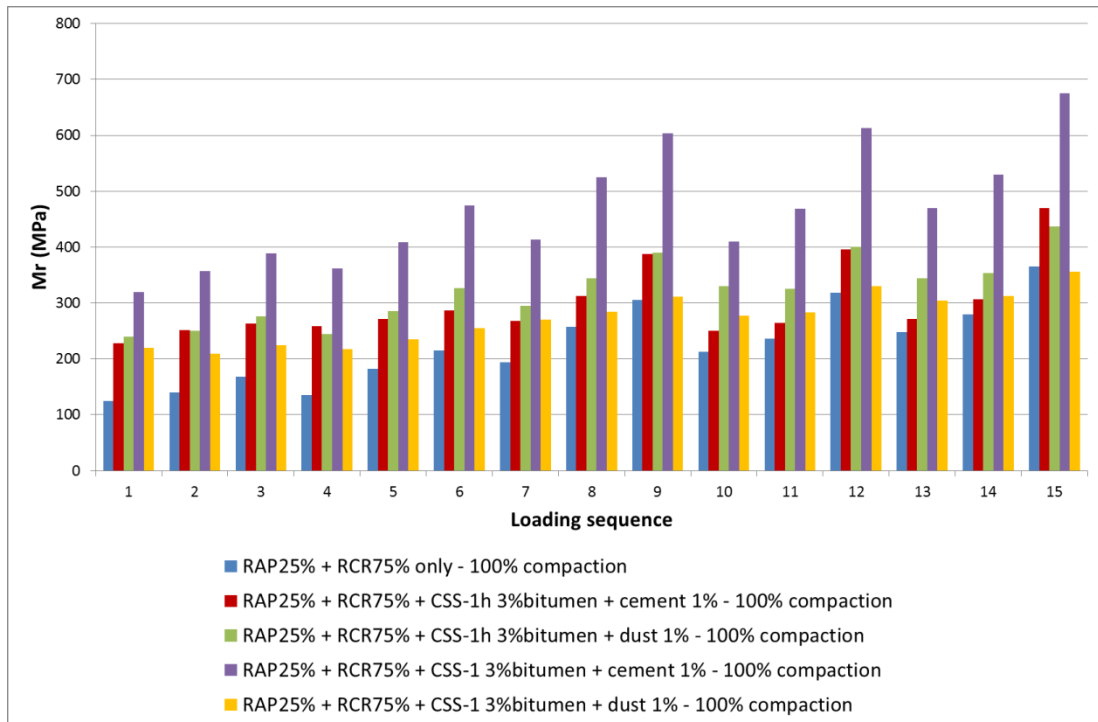
Sequence	1h-C-1 (MPa)	1h-C-2 (MPa)	1h-C-3 (MPa)	1h-C-1 R1 (MPa)	1h-C-2 R1 (MPa)	1h-C-3 R1 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	205	240	275	218	233	200	228
2	247	251	290	223	257	240	251
3	289	255	305	231	256	245	264
4	245	251	297	226	255	275	258
5	300	264	312	235	256	261	271
6	330	272	308	271	263	273	286
7	298	270	322	224	234	260	268
8	348	297	333	301	299	299	313
9	449	357	422	374	386	341	388
10	312	267	331	260	142	185	250
11	316	274	333	256	196	209	264
12	442	375	452	371	374	358	395
13	315	282	351	243	177	258	271
14	344	316	379	279	229	289	306
15	540	450	556	417	434	419	469

ตารางที่ 4-15 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมหินเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	S1-D-1 (MPa)	S1-D-2 (MPa)	S1-D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	Reject	273	168	220
2		236	183	210
3		247	201	224
4		247	189	218
5		260	209	234
6		280	229	255
7		278	263	270
8		306	263	284
9		334	290	312
10		315	240	277
11		321	245	283
12		347	312	330
13		346	264	305
14		349	277	313
15		374	336	355

ตารางที่ 4-16 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมหินเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	S1-C-1 (MPa)	S1-C-2 (MPa)	S1-C-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	267	288	403	319
2	329	344	398	357
3	380	383	405	389
4	339	341	404	361
5	412	403	412	409
6	519	457	445	474
7	416	424	402	414
8	584	521	471	525
9	670	598	542	603
10	421	436	373	410
11	497	494	415	468
12	669	625	546	613
13	484	513	412	470
14	566	561	464	530
15	709	706	612	676



รูปที่ 4-40 กราฟค่าโมดูลัสคั้นตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP25%:RCR75% ในแต่ละส่วนผสม (100% ของ modified compaction)

จากกราฟในรูปที่ 4-40 จะพบว่า ค่าโมดูลัสคั้นตัวในแต่ละสถานะของหน่วยแรงของก้อนตัวอย่างสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ 1% บดอัดที่ 100% ของ modified compaction จะให้ค่าสูงที่สุด และค่าโมดูลัสคั้นตัวของก้อนตัวอย่างในส่วนผสมอื่น จะมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบก้อนตัวอย่างสำหรับวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h หรือ CSS-1 และเติมหินฝุ่นหรือปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction แสดงไว้ในตารางที่ 4-17 ถึง 4-20

ตารางที่ 4-17 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

Sequence	1h-095D-1 (MPa)	1h-095D-2 (MPa)	1h-095D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	327	174	Reject	250
2	331	198		264
3	348	237		292
4	341	223		282
5	365	278		322
6	393	326		359
7		398		398
8		455		455
9		482		482
10		501		501
11		509		509
12		544		544
13		540		540
14		562		562
15		598		598

ตารางที่ 4-18 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

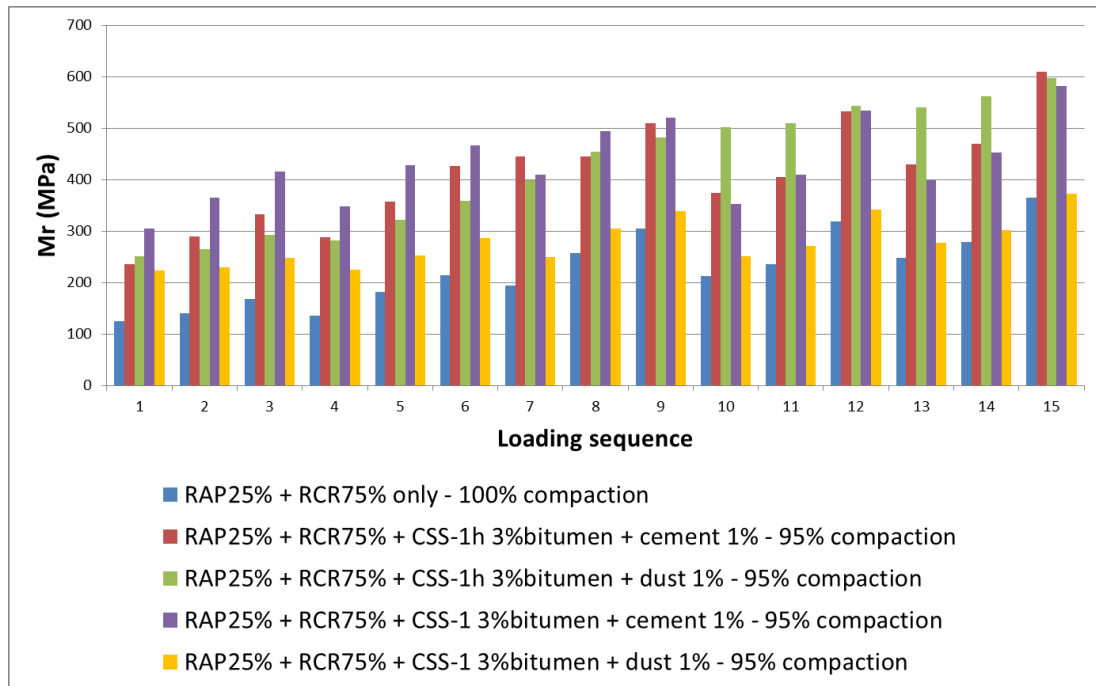
Sequence	1h-095C-1 (MPa)	1h-095C-2 (MPa)	1h-095C-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	214	237	254	235
2	295	251	320	289
3	361	271	364	332
4	313	206	344	288
5	427	261	383	357
6	528	328	422	426
7	609	331	396	445
8		436	455	445
9		511	509	510
10		363	385	374
11		412	398	405
12		533	532	533
13		438	422	430
14		476	464	470
15		608	610	609

ตารางที่ 4-19 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

Sequence	S1-095D-1 (MPa)	S1-095D-2 (MPa)	S1-095D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	183	224	263	223
2	210	225	255	230
3	240	237	265	247
4	200	217	259	225
5	246	239	274	253
6	287	270	302	287
7	233	234	281	250
8	302	286	327	305
9	342	315	357	338
10	230	235	290	252
11	256	249	306	270
12	342	312	373	342
13	256	248	328	277
14	284	269	351	302
15	361	346	411	373

ตารางที่ 4-20 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75%
ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

Sequence	S1-095C-1 (MPa)	S1-095C-2 (MPa)	S1-095C-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	217	391	308	305
2	263	488	343	365
3	316	556	374	416
4	258	441	344	347
5	322	571	390	428
6	364	611	424	466
7	310	504	416	410
8	386	625	469	493
9	395	671	495	520
10	252	411	396	353
11	297	499	432	409
12	406	671	528	535
13	318	433	444	398
14	353	523	481	452
15	454	727	563	581



รูปที่ 4-41 กราฟค่าโมดูลัสคั้นตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP25%:RCR75% ในแต่ละส่วนผสม (95% ของmodified compaction)

จากกราฟในรูปที่ 4-41 จะพบว่า ที่แต่ละสถานะหน่วยแรง ค่าโมดูลัสคั้นตัวของก้อนตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction จะมีค่าโมดูลัสคั้นตัวต่ำกว่าก้อนตัวอย่างอื่นๆ ที่ทุกสถานะหน่วยแรง เมื่อพิจารณาก้อนตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ของบิทูเมนอิมัลชันทั้ง 2 ชนิดจะพบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวจะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันในทุกสถานะหน่วยแรง

ผลการทดสอบก้อนตัวอย่างสำหรับวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h หรือ CSS-1 และเติมหินฝุ่นหรือปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction แสดงไว้ในตารางที่ 4-22 ถึง 4-25 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-21 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างควบคุมวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมโดยไม่เติมบิทูเมนอิมัลชันและปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	50/50-OMC-1 (MPa)	50/50-OMC-2 (MPa)	50/50-OMC-4 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	109	78	104	97
2	141	112	116	123
3	172	142	144	153
4	131	106	110	116
5	187	158	158	168
6	222	189	197	203
7	184	171	160	172
8	255	222	234	237
9	290	245	281	272
10	161	157	157	158
11	205	197	199	200
12	295	260	293	283
13	197	199	196	197
14	244	238	240	241
15	317	286	327	310

ตารางที่ 4-22 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	1h-5/5-D-1 (MPa)	1h-5/5-D-2 (MPa)	1h-5/5-D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	223	311	307	280
2	239	332	319	297
3	267	358	333	319
4	248	330	318	299
5	292	374	339	335
6	339	410	371	373
7	323	403	338	354
8	385	440	401	409
9	460	467	431	453
10	350	423	358	377
11	388	438	363	397
12	480	496	438	471
13	415	455	395	421
14	451	478	402	444
15	515	520	477	504

ตารางที่ 4-23 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทุเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

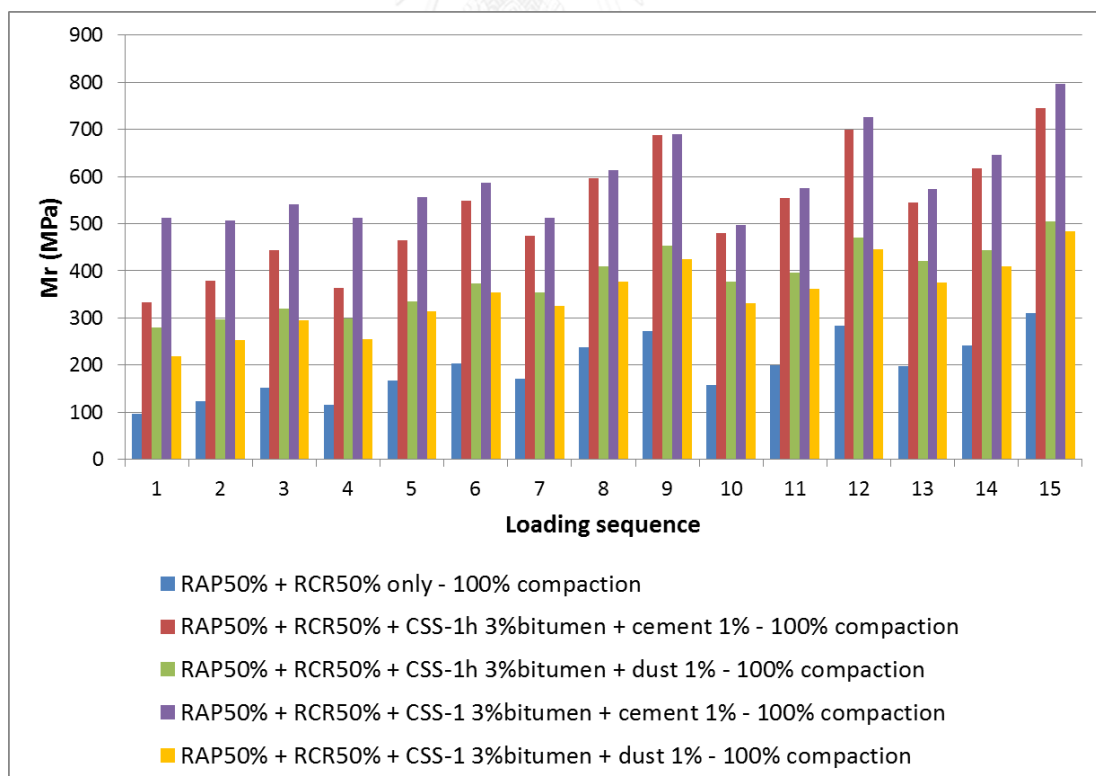
Sequence	1h-5/5-C-1 (MPa)	1h-5/5-C-2 (MPa)	1h-5/5-C-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	319	371	310	333
2	367	422	349	379
3	425	481	425	444
4	387	375	330	364
5	456	490	449	465
6	526	587	535	549
7	499	469	456	475
8	588	617	585	596
9	673	717	675	688
10	565	470	402	479
11	620	544	500	555
12	701	723	673	699
13	626	547	459	544
14	670	622	560	617
15	717	766	751	745

ตารางที่ 4-24 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทุเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	S1-5/5-D-1 (MPa)	S1-5/5-D-2 (MPa)	S1-5/5-D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	323	169	162	218
2	315	228	219	254
3	328	302	256	295
4	326	227	214	256
5	343	329	271	314
6	367	397	297	354
7	355	336	284	325
8	387	431	310	376
9	411	501	361	424
10	369	333	292	331
11	375	391	317	361
12	432	528	375	445
13	400	406	318	375
14	419	461	349	410
15	469	578	407	484

ตารางที่ 4-25 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทุเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 100% ของ modified compaction

Sequence	S1-5/5-C-1 (MPa)	S1-5/5-C-2 (MPa)	S1-5/5-C-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	575	403	560	513
2	531	434	556	507
3	567	473	581	540
4	549	419	571	513
5	580	494	595	556
6	616	528	616	586
7	536	490		513
8	638	555	649	614
9	732	628	710	690
10	520	473		496
11	610	541		575
12	788	664		726
13	617	529		573
14	699	595		647
15	852	742		797



รูปที่ 4-42 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP50%:RCR50% ในแต่ละส่วนผสม (100% ของ modified compaction)

จากกราฟในรูปที่ 4-42 จะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว มีค่าสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ และเมื่อพิจารณาก้อนตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ของบิทูเมนอิมัลชันทั้ง 2 ชนิดจะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวจะเกาะกลุ่มไปในทางเดียวกันในทุกสถานะหน่วยแรง และเป็นกลุ่มที่แยกออกจากก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยหินฝุ่นอย่างชัดเจน อีกทั้ง ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่ใช้บิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 ผสมกับหินฝุ่นจะให้ค่าต่ำสุดในทุกสถานะหน่วยแรง

ผลการทดสอบก้อนตัวอย่างสำหรับวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h หรือ CSS-1 และเติมหินฝุ่นหรือปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction แสดงไว้ในตารางที่ 4-26 ถึง 4-29

ตารางที่ 4-26 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

Sequence	1h-5/5-095D-1 (MPa)	1h-5/5-095D-2 (MPa)	1h-5/5-095D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	232	260	377	290
2	259	287	376	307
3	301	317	393	337
4	263	283	388	311
5	323	330	413	355
6	378	376	436	397
7	353	336	430	373
8	442	405	468	438
9	506	436	502	481
10	411	335	399	382
11	438	368	430	412
12	536	457	509	501
13	481	395	463	446
14	503	427	491	474
15	580	498	552	543

ตารางที่ 4-27 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

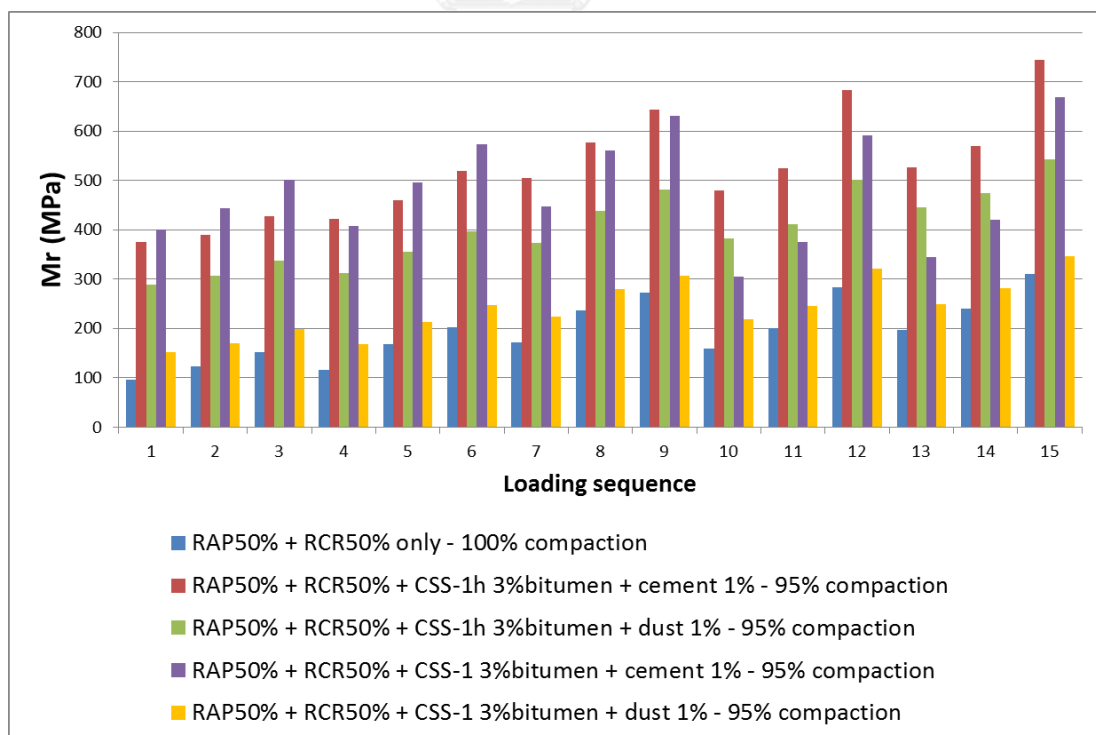
Sequence	1h-5/5-095C-1 (MPa)	1h-5/5-095C-2 (MPa)	1h-5/5-095C-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	366	373	386	375
2	378	391	402	390
3	379	457	448	428
4	423	423	422	422
5	408	504	469	460
6	437	608	512	519
7	435	619	460	505
8	533	654	546	578
9	618	686	626	643
10	584	500	354	479
11	597	548	428	524
12	682	709	657	683
13	686	500	396	527
14	712	544	452	569
15	803	716	713	744

ตารางที่ 4-28 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

Sequence	S1-5/5-095D-1 (MPa)	S1-5/5-095D-2 (MPa)	S1-5/5-095D-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	142	164	150	152
2	163	178	169	170
3	191	205	199	198
4	163	175	168	169
5	206	221	215	214
6	243	248	249	247
7	217	221	232	223
8	277	278	286	280
9	310	300	311	307
10	208	221	225	218
11	241	244	252	246
12	321	319	325	321
13	240	253	255	250
14	276	283	287	282
15	349	346	345	347

ตารางที่ 4-29 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ผสมบิพูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ บดอัดที่ 95% ของ modified compaction

Sequence	S1-5/5-095C-1 (MPa)	S1-5/5-095C-2 (MPa)	S1-5/5-095C-3 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	391	503	307	400
2	453	516	361	443
3	503	587	416	502
4	324	544	352	407
5	419	605	461	495
6	522	661	539	574
7	324	530	490	448
8	439	639	605	561
9	513	702	679	632
10	184		427	306
11	248		503	376
12	466		715	591
13	215		475	345
14	285		557	421
15	533		803	668



รูปที่ 4-43 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วน RAP50%:RCR50% ในแต่ละส่วนผสม (95% ของ modified compaction)

จากกราฟรูปที่ 4-43 จะพบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่าง RAP50%:RCR50% ที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว บดอัดที่ 95% ของ modified compaction จะมีค่าสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ เช่นเดียวกับก้อนตัวอย่างของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่มีสัดส่วน RAP50%:RCR50% บดอัดที่ 100% ของ modified compaction และเมื่อพิจารณาก้อนตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ของบิทูเมนอิมัลชันทั้ง 2 ชนิดจะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวจะเกาะกลุ่มไปในทางเดียวกันในทุกสถานะหน่วยแรง และเป็นกลุ่มที่แยกออกจากก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยหินฝุ่นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่ใช้บิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 ผสมกับหินฝุ่นจะให้ค่าต่ำสุดในทุกสถานะหน่วยแรงเหมือนกันกับการทดลองก่อนหน้านี้

4.8 การวิเคราะห์ทางสถิติของผลการทดลองขั้นที่ 1

จากการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัยที่ต้องการศึกษาทั้งสิ้น 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลง 2 รูปแบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- สัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยพิจารณาที่ความหนาของชั้นวัสดุผิวทางเดิมที่มีความแตกต่างกัน 2 ระดับ คือเป็นสัดส่วนผสม RAP25%:RCR75% และ RAP50%:RCR50%
- ชนิดของบิทูเมนอิมัลชัน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ CSS-1h และ CSS-1
- ประเภทของสารผสมเพิ่ม แบ่งเป็น 2 ประเภท คือปูนซีเมนต์และหินฝุ่น
- ระดับการบดอัด แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ 100% และ 95% ของผลทดสอบ modified compaction

รูปแบบที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปัจจัย ย่อมส่งผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพให้มีค่าแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการวิเคราะห์ผลเพื่อแสดงให้เห็นสำหรับในแต่ละปัจจัย ว่ารูปแบบของปัจจัยรูปแบบใดจะส่งผลดีต่อการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ หรือเป็นรูปแบบที่ให้ค่าโมดูลัสคืนตัวที่สูงกว่านั่นเอง การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะดำเนินการทดสอบความแตกต่างทางสถิติโดยจัดกลุ่มตามรูปแบบของแต่ละปัจจัย ซึ่งมีปัจจัยละ 2 รูปแบบ จากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างของผลการทดสอบด้วยวิธี Paired-Samples t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การทดสอบสมมติฐาน โดยให้สมมติฐานหลัก (H_0) สำหรับการทดสอบ Paired-Samples t-test สำหรับงานศึกษาในส่วนนี้ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างของรูปแบบกลุ่มหนึ่งมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างของรูปแบบอีกกลุ่มหนึ่งหรือไม่ ระหว่าง 2 รูปแบบเพื่อพิจารณาบนปัจจัยเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ คือ

สมมติฐานหลัก $H_0 : \mu_d \geq 0$

สมมติฐานทางเลือก $H_1 : \mu_d < 0$

โดย μ_d คือ ความแตกต่างของค่าโมดูลัสคืนตัวที่สถานะหน่วยแรง (Sequence) ใดๆ ซึ่งเกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างทดสอบ ที่อยู่ภายใต้ปัจจัยรูปแบบเดียวกัน

สำหรับการทดสอบสมมติฐาน จะแยกวิเคราะห์รายสถานะหน่วยแรง (Sequence) เพื่อพิจารณาว่า มีความแตกต่างระหว่าง 2 รูปแบบในปัจจัยเดียวกันหรือไม่ โดยสนใจเป็นพิเศษ ที่สถานะหน่วยแรง 10-12 ซึ่งมีขนาดของ σ_1 ใกล้เคียงกับถนนของประเทศไทย (ความหนาชั้นผิวทางประมาณ 5 เซนติเมตร)

ในการทดสอบสมมติฐาน จำนวนตัวอย่างที่ใช้มีจำนวนทั้งสิ้น 41 ตัวอย่าง โดยมีรูปแบบการผสมตัวอย่างที่แตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-30

ตารางที่ 4-30 รูปแบบการผสมและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ

ชนิดของบิตูเมน		ปริมาณบิตูเมน	RAP : RCR		สารผสมเพิ่ม		ระดับความชื้น	% modified compaction	จำนวนตัวอย่าง
CSS-1h	CSS-1		25 : 75	50 : 50	ปูนซีเมนต์	หินฝุ่น			
/		3%	/		/		ธรรมชาติ	100%	3
/		3%	/			/	ธรรมชาติ	100%	2
	/	3%	/		/		ธรรมชาติ	100%	3
	/	3%	/			/	ธรรมชาติ	100%	2
/		3%	/		/		ธรรมชาติ	95%	2
/		3%	/			/	ธรรมชาติ	95%	1
	/	3%	/		/		ธรรมชาติ	95%	3
	/	3%	/			/	ธรรมชาติ	95%	3
/		3%		/	/		ธรรมชาติ	100%	3
/		3%		/		/	ธรรมชาติ	100%	3
	/	3%		/	/		ธรรมชาติ	100%	2
	/	3%		/		/	ธรรมชาติ	100%	3
/		3%		/	/		ธรรมชาติ	95%	3
/		3%		/		/	ธรรมชาติ	95%	3
	/	3%		/	/		ธรรมชาติ	95%	2
	/	3%		/		/	ธรรมชาติ	95%	3
รวม									41

- ปัจจัยสัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยด้านสัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ระหว่าง สัดส่วน RAP25%:RCR75% กับสัดส่วน RAP50%:RCR50% โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ -1.746 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 9 11 – 12 และ 13 – 14 มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุ โครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% จะให้โมดูลัสคั้นตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วย วัสดุ โครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 10 และ 13 ค่าทดสอบสถิติมีค่าน้อยกว่า 2.120 ซึ่งเป็นค่าวิกฤติที่ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวคือจากข้อมูลตัวอย่างที่มี ไม่ เพียงพอที่จะปฏิเสธได้ว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวของตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% จะให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวไม่มากกว่าหรือเท่ากับ ตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุโครงสร้าง ทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4-31 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ของปัจจัยสัดส่วนผสม

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	16	-59.4	108.4	26.3	-2.260	-1.746	0.019	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	16	-65.6	84.5	20.5	-3.202	-1.746	0.003	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	16	-81.1	87.2	21.1	-3.833	-1.746	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	16	-57.1	84.0	20.4	-2.799	-1.746	0.006	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	16	-83.6	85.9	20.8	-4.011	-1.746	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	16	-101.4	109.8	26.6	-3.807	-1.746	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	16	-70.1	94.3	22.9	-3.066	-1.746	0.004	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	16	-91.5	112.1	27.2	-3.365	-1.746	0.002	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	16	-100.2	116.8	28.3	-3.540	-1.746	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	16	14.9	92.1	22.3	0.669	-1.746	0.257	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	16	-68.5	113.1	27.4	-2.495	-1.746	0.012	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	16	-102.8	116.9	28.3	-3.628	-1.746	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	16	-49.6	117.7	28.5	-1.739	-1.746	0.051	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	16	-71.0	122.8	29.8	-2.385	-1.746	0.015	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	16	-95.1	110.1	26.7	-3.560	-1.746	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง

- ปัจจัยชนิดของบิฑูเมนอิมัลชัน

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยด้านชนิดของบิฑูเมนอิมัลชัน ระหว่างบิฑูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และ CSS-1 โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ -1.740 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่ทุกสถานะหน่วยแรงมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวคือจากข้อมูลตัวอย่างที่มี ไม่เพียงพอที่จะปฏิเสธได้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมด้วยบิฑูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h มีค่าไม่มากกว่าหรือเท่ากับของตัวอย่างที่ผสมด้วยบิฑูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4-32 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test จากปัจจัยชนิดของบิฑูเมนอิมัลชัน

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	17	-3.2	122.9	29.0	-0.109	-1.740	0.457	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	17	-6.4	114.2	26.9	-0.237	-1.740	0.408	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	17	-10.3	120.4	28.4	-0.364	-1.740	0.360	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	17	5.2	116.8	27.5	0.188	-1.740	0.427	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	17	-5.6	120.6	28.4	-0.197	-1.740	0.423	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	17	-8.9	133.4	31.4	-0.285	-1.740	0.390	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	17	15.9	107.6	25.4	0.629	-1.740	0.269	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	17	8.3	136.2	32.1	0.260	-1.740	0.399	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	17	17.8	137.7	32.5	0.550	-1.740	0.295	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	17	75.4	122.8	28.9	2.607	-1.740	0.009	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	17	35.3	147.3	34.7	1.016	-1.740	0.162	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	17	23.8	147.3	34.7	0.686	-1.740	0.251	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	17	57.9	168.0	39.6	1.464	-1.740	0.081	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	17	42.0	170.5	40.2	1.045	-1.740	0.155	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	17	32.3	154.0	36.3	0.889	-1.740	0.193	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง

- ปัจจัยประเภทของสารผสมเพิ่ม

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยด้านประเภทของสารผสมเพิ่ม ระหว่างหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ -1.740 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่ทุกสถานะหน่วยแรง มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือการใช้หินฝุ่นผสมตัวอย่างจะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตัวอย่าง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4-33 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test จากปัจจัยประเภทของสารผสมเพิ่ม

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	17	-103.7	92.5	21.8	-4.758	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	17	-121.0	90.1	21.2	-5.697	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	17	-133.8	99.4	23.4	-5.711	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	17	-109.3	82.4	19.4	-5.628	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	17	-131.2	98.7	23.3	-5.640	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	17	-126.4	123.9	29.2	-4.330	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	17	-84.8	97.1	22.9	-3.708	-1.740	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	17	-150.3	114.3	26.9	-5.579	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	17	-181.5	119.8	28.2	-6.427	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	17	-79.8	101.9	24.0	-3.323	-1.740	0.002	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	17	106.7	106.7	25.2	-4.577	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	17	147.9	147.9	34.9	-3.208	-1.740	0.003	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	17	104.4	104.4	24.6	-3.760	-1.740	0.001	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	17	117.5	117.5	27.7	-4.104	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	17	121.9	121.9	28.7	-7.516	-1.740	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง

- ปัจจัยระดับการบดอัด

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยด้านระดับการบดอัด ระหว่างระดับการบดอัดที่ 95% และ 100% ของ Modified compaction โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ -1.734 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่ทุกสถานะหน่วยแรงมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวคือจากข้อมูลตัวอย่างที่มีไม่เพียงพอที่จะปฏิเสธได้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่บดอัดที่ระดับการบดอัด 95% ของ Modified compaction มีค่าไม่มากกว่าหรือเท่ากับตัวอย่างที่บดอัดที่ระดับการบดอัด 100% ของ Modified compaction ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4-34 ผลทดสอบ t-test จากปัจจัยระดับการบดอัด

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	18	-22.9	81.9	18.8	-1.221	-1.734	0.119	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	18	-14.4	67.4	15.5	-0.929	-1.734	0.183	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	18	-7.8	69.8	16.0	-0.490	-1.734	0.315	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	18	-19.2	84.9	19.5	-0.986	-1.734	0.169	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	18	-15.4	79.9	18.3	-0.842	-1.734	0.206	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	18	-10.1	85.9	19.7	-0.513	-1.734	0.307	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	18	-10.8	92.0	21.1	-0.511	-1.734	0.308	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	18	-2.9	105.7	24.3	-0.119	-1.734	0.453	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	18	-21.9	115.7	26.6	-0.825	-1.734	0.210	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	18	-30.8	114.7	26.3	-1.172	-1.734	0.128	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	18	-30.5	126.4	29.0	-1.051	-1.734	0.154	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	18	-21.6	129.3	29.7	-0.727	-1.734	0.238	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	18	-32.4	138.2	31.7	-1.021	-1.734	0.160	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	18	-34.9	145.0	33.3	-1.050	-1.734	0.154	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	18	-21.6	133.6	30.7	-0.704	-1.734	0.245	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง

4.9 สรุปการดำเนินงานการทดลองขั้นนำร่องและการทดลองขั้นที่ 1

จากผลการทดสอบในการทดลองขั้นนำร่อง สามารถสรุปรายละเอียดเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาในการทดลองขั้นที่ 1 ได้ดังนี้

- จากการเก็บข้อมูลขนาดคลื่นในสนามจากเครื่องจักรรีไซเคิล จะได้ขนาดคลื่นเป็นดังรูปที่ 4-20 และเมื่อนำวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 นิ้วออก จะได้ขนาดคลื่นเป็นดังรูปที่ 4-21 ซึ่งจะใช้เป็นขนาดคลื่นอ้างอิงในการเตรียมตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมต่อไป

- จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบพลังงานการบดอัด จะได้ว่าการตำตัวอย่างด้วยค้อนแบบมาร์แชลล์เพื่อเตรียมก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 60 มิลลิเมตร ควรใช้จำนวนครั้งในการตำเป็น 75 ครั้ง ตำหน้าเดียว เพื่อให้ได้ความแน่นใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบ modified compaction
- จากผลการทดลองหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมสำหรับบิทูเมนอิมัลชันทั้ง 2 ชนิด ทั้งสัดส่วนวัสดุโครงสร้างทางเดิมทั้ง 2 รูปแบบ และทั้งการเติมหรือไม่เติมสารผสมเพิ่ม สามารถกล่าวได้ว่าสำหรับทุกรูปแบบการผสม ปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมอยู่ที่ 3% ของน้ำหนักวัสดุแห้งทั้งหมด
- จากการทดลองหาความต้องการปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม (Active filler need) โดยการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม พบว่า วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้ในการศึกษานี้ ไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุก่อนที่จะได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

จากผลการทดลองหาปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสมที่ได้กล่าวมาทั้งหมด จะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการผสมก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวกับก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ซึ่งได้ระบุรายละเอียดตัวแปรในการทดสอบไว้ใน การทดลองชั้นที่ 1 ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองชั้นที่ 1 สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

- ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากตัวอย่างที่มีรูปแบบการผสมต่างๆ จะมีค่าสูงกว่าประมาณ 2 ถึง 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากตัวอย่างวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ
- สำหรับการทดลองหาค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างสัดส่วน RAP25%:RCR75% บดอัดที่ 100% ของ modified compaction ก้อนตัวอย่างที่ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ 1% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวในแต่ละสถานะของหน่วยแรงสูงสุด และค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างในส่วนผสมอื่น จะมีค่าใกล้เคียงกัน
- สำหรับการทดลองหาค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างสัดส่วน RAP25%:RCR75% บดอัดที่ 95% ของ modified compaction ก้อนตัวอย่างที่ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ 1% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวสูงสุดที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 6 และ 8 – 9 ส่วนค่าโมดูลัสคืนตัวที่สถานะหน่วยแรงที่ 10 – 14 ก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น 1% จะให้ค่าสูงสุด ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 7 และ 15 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ 1% จะมีค่าสูงสุด

- สำหรับการทดลองหาค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างสัดส่วน RAP50%:RCR50% บดอัดที่ 100% ของ modified compaction ก้อนตัวอย่างที่ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ 1% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุดในแต่ละสถานะของหน่วยแรง รองลงมาคือก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และปูนซีเมนต์ 1% รองลงมาคือก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h และหินฝุ่น 1% ส่วนก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น 1% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำที่สุด
- สำหรับการทดลองหาค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างสัดส่วน RAP50%:RCR50% บดอัดที่ 95% ของ modified compaction ก้อนตัวอย่างที่ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ 1% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุดที่สถานะหน่วยแรง 1 – 3 และ 5 – 6 ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 4 และ 7 – 15 ก้อนตัวอย่างที่ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และปูนซีเมนต์ 1% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุด
- จากทุกรูปแบบการผสมและการบดอัด ก้อนตัวอย่างที่ผสมกับบิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และหินฝุ่น 1% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำที่สุดที่ทุกสถานะหน่วยแรง
- เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อพิจารณารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยอันได้แก่ ปัจจัยด้านสัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ชนิดของบิทูเมนอิมัลชัน ประเภทของสารผสมเพิ่ม และระดับการบดอัด โดยการวิเคราะห์ความแตกต่างของผลการทดสอบด้วยวิธี Paired-Sample t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สามารถสรุปได้ว่า
 - สำหรับปัจจัยสัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 9 11 – 12 และ 13 – 14 พบว่าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กล่าวโดยสรุปคือตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ให้ค่าโมดูลัสคืนตัวที่สูงกว่าสัดส่วน RAP25%:RCR75% ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 10 และ 13 ค่าสถิติทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากข้อมูลที่มี ไม่เพียงพอที่จะสรุปว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP25%:RCR75% จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวมากกว่าหรือเท่ากับ ตัวอย่างที่ผสมด้วยวัสดุโครงสร้างทางเดิมสัดส่วน RAP50%:RCR50% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 - สำหรับปัจจัยชนิดของบิทูเมนอิมัลชัน ค่าสถิติทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติที่ทุกสถานะหน่วยแรง จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวคือจากข้อมูล

ตัวอย่างที่มี ไม่เพียงพอที่จะสรุปได้ว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมด้วย บิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับของตัวอย่างที่ผสมด้วย บิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

- สำหรับปัจจัยประเภทของสารผสมเพิ่ม พบว่าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กล่าวคือการเลือกใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม จะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าการใช้หินฝุ่นเป็นสารผสมเพิ่ม
- สำหรับปัจจัยระดับการบดอัด ค่าสถิติทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติที่ทุกสถานะ หน่วยแรง จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวคือจากข้อมูลตัวอย่างที่มี ไม่เพียงพอที่จะสรุปได้ว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่บดอัดที่ระดับ 95% ของ modified compaction มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่บดอัดที่ระดับ 100% ของ modified compaction ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในบทนี้ ทำให้สามารถกำหนดปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษาขั้นที่ 2 ได้ดังต่อไปนี้

- สัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของ ค่าโมดูลัสคืนตัวที่สถานะหน่วยแรงลำดับที่ 10 ซึ่งเป็นระดับหน่วยแรงที่ใกล้เคียงกับถนนของประเทศไทย ที่มีความหนาชั้นผิวทางประมาณ 5 เซนติเมตร จะพบว่าไม่มีความแตกต่างกันของสัดส่วนผสม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมในประเทศไทยนิยมเลือกใช้สัดส่วน RAP25%:RCR75% นี้อยู่แล้ว ดังนั้น ในการทดลองขั้นที่ 2 จะเลือกศึกษาสัดส่วน RAP25%:RCR75%
- ชนิดของบิทูเมนอิมัลชันที่ให้ค่าโมดูลัสคืนตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงเลือกใช้บิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1h
- การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม จะทำให้ค่าโมดูลัสคืนตัวดีกว่าการใช้หินฝุ่นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการทดลองขั้นที่ 2 ก้อนตัวอย่างทุกก้อนจะเติมปูนซีเมนต์ 1% เป็นสารผสมเพิ่ม
- เนื่องด้วยระดับการบดอัดที่ 95% และ 100% ของ modified compaction ให้ค่าโมดูลัสคืนตัวไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในการทดลองขั้นที่ 2 จะใช้ระดับการบดอัดที่ 100% ของ modified compaction เพราะทำให้สามารถรักษารูปร่างของก้อนตัวอย่าง ในขณะที่ถอดแบบได้ง่ายกว่าระดับการบดอัดที่ 95% ของ modified compaction

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลในการทดลองขั้นที่ 2

5.1 รายละเอียดการทดลอง

หลังจากที่ได้ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรต้นในการทดลองขั้นที่ 1 ที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันแล้ว ในการทดลองขั้นที่ 2 จะเป็นการศึกษาตัวแปรที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าได้ในระหว่างการก่อสร้าง โดยตัวแปรต้นจากการทดลองในขั้นที่ 1 จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ เพื่อให้เป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองขั้นที่ 2 โดยมีรายละเอียดของตัวแปรควบคุมดังนี้

- สัดส่วนของวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยกำหนดให้เป็นสัดส่วน RAP25%:RCR75%
- ชนิดของบิทูเมนอิมัลชัน โดยเลือกใช้ชนิด CSS-1h
- ใช้ปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักวัสดุ เป็นสารผสมเพิ่ม
- ระดับความแน่นของการบดอัด โดยกำหนดไว้ที่ 100% ของ modified compaction

ตัวแปรต้นที่ศึกษาในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ ได้แก่

- ปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม ซึ่งจะกำหนดค่าไว้ 2 ระดับ คือ 2% และ 3% โดยน้ำหนักของส่วนผสม
- ระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างหลังจากที่ผ่านการบ่มตัวอย่างในเตาอบแล้ว โดยควบคุมให้มี 3 ระดับ คือ ความชื้นที่สถานะแห้ง ความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และความชื้นที่สถานะแช่น้ำ

การควบคุมระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างเพื่อให้มีความชื้นที่สถานะแห้ง จะกระทำโดยนำตัวอย่างที่บดอัดเรียบร้อยและถอดออกจากแบบหล่อแล้ว นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากเตาอบปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้อง แล้วใส่ถุงพลาสติกหุ้มกันความชื้นสูญหาย ส่วนการควบคุมระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำ จะกระทำเหมือนกับที่สถานะแห้ง แต่ก่อนการทดสอบจะนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ส่วนการควบคุมระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ จะกระทำโดยนำตัวอย่างที่บดอัดเรียบร้อยและถอดออกจากแบบหล่อแล้ว วางตัวอย่างอยู่ในห้องที่อากาศถ่ายเทสะดวกเป็นเวลา 26 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนใส่ในถุงพลาสติกมัดปากถุงโดยให้มีปริมาตรช่องว่างในถุงประมาณ 2 เท่าของปริมาตรก้อนตัวอย่าง แล้วนำก้อน

ตัวอย่างใส่เตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเปลี่ยนถุงที่เป็ยกด้วยถุงใหม่ ทุก 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้ว นำก้อนตัวอย่างออกจากเตาหีบก้อนตัวอย่างออกจากถุงและปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงใส่ถุงพลาสติกใบใหม่และมัดถุงให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้สูญเสียความชื้นระหว่างการรอทดสอบ

สำหรับการทดลองในขั้นที่ 2 นี้ จะประกอบไปด้วย 2 การทดสอบ คือการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T-307 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007) และการทดสอบกำลังอัดสามแกน (Triaxial Test) ดำเนินการทดสอบตามวิธีการ Laboratory test method 7 (Asphalt Academy, 2009a)

5.2 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

สำหรับการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ จะเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงประมาณ 200 มิลลิเมตร โดยมีรูปแบบการผสม การบดอัด และระดับความชื้นหลังการบ่ม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 รูปแบบการผสมและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองขั้นที่ 2

RAP:RCR	ชนิดอิมัลชัน	ปริมาณบิทูเมน	ปูนซีเมนต์	ระดับการบดอัด	ระดับความชื้น	จำนวนตัวอย่าง
25:75	CSS-1h	2%	1%	100%	แห้ง	5
25:75	CSS-1h	2%	1%	100%	ธรรมชาติ	4
25:75	CSS-1h	2%	1%	100%	แช่น้ำ	5
25:75	CSS-1h	3%	1%	100%	แห้ง	5
25:75	CSS-1h	3%	1%	100%	ธรรมชาติ	5
25:75	CSS-1h	3%	1%	100%	แช่น้ำ	7

5.2.1 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ของก้อนตัวอย่างในแต่ละรูปแบบการผสม แสดงไว้ในตารางที่ 5-2 ถึง 5-7 และแสดงกราฟค่าเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง ดังรูปที่ 5-1 สำหรับก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% และรูปที่ 5-2 สำหรับก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3%

ตารางที่ 5-2 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 2% ที่สถานะแข็ง

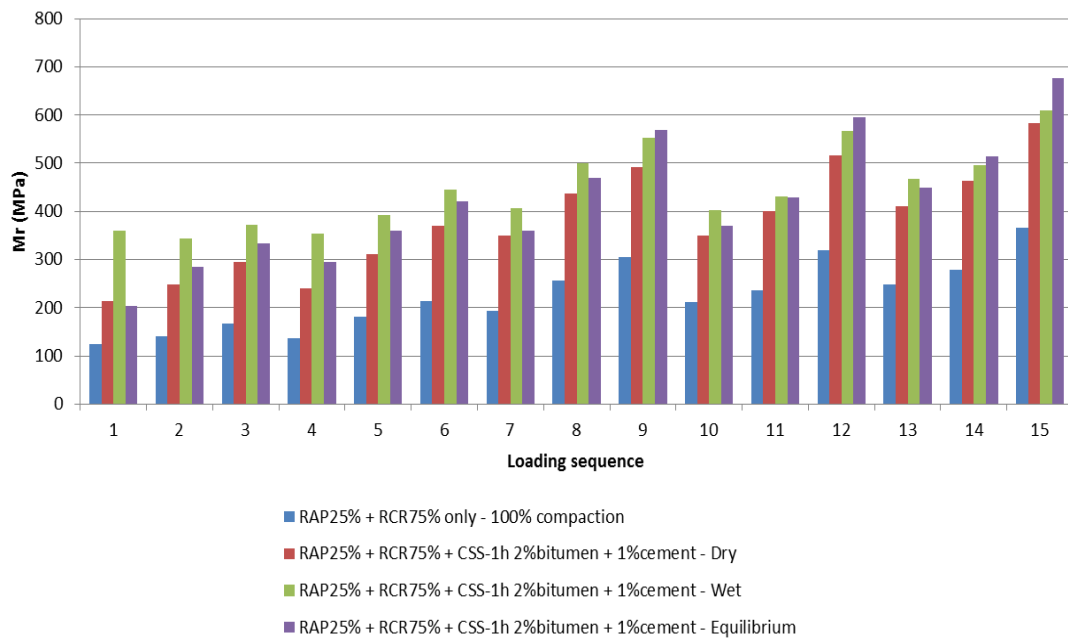
Sequence	1hC-2AD-1 (MPa)	1hC-2AD-2 (MPa)	1hC-2AD-3 (MPa)	1hC-2AD-12 (MPa)	1hC-2AD-22 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	367	240	222	161	77	214
2	371	267	274	193	134	248
3	410	308	338	233	182	294
4	368	256	258	187	135	241
5	421	321	359	254	201	311
6	472	380	433	318	247	370
7	418	314	370	266	378	349
8	497	415	490	372	415	438
9	543	462	558	447	443	491
10	371	289	344	265	481	350
11	431	354	421	316	478	400
12	558	485	560	469	511	516
13	430	362	417	323	526	411
14	490	423	478	377	548	463
15	611	545	625	536	596	583

ตารางที่ 5-3 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 2% ที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติ

Sequence	1hC-2AE-1 (MPa)	1hC-2AE-2 (MPa)	1hC-2AE-13 (MPa)	1hC-2AE-14 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	269	-	186	157	204
2	299	334	317	191	285
3	337	387	372	237	333
4	287	332	373	184	294
5	352	410	412	263	359
6	393	476	468	343	420
7	331	409	424	279	361
8	405	525	533	413	469
9	503	628	625	517	568
10	305	461	439	277	371
11	374	503	489	353	430
12	521	661	654	541	594
13	380	536	511	369	449
14	448	583	582	442	514
15	569	741	756	636	676

ตารางที่ 5-4 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 2% ที่สถานะแช่เย็น

Sequence	1hC-2AW-1 (MPa)	1hC-2AW-10 (MPa)	1hC-2AW-11 (MPa)	1hC-2AW-24 (MPa)	1hC-2AW-25 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	279	339	348	561	271	360
2	297	315	316	478	316	344
3	337	336	334	478	374	372
4	308	330	306	503	321	354
5	356	357	351	492	403	392
6	413	418	402	525	471	446
7	365	378	378	486	426	406
8	452	486	476	563	526	501
9	483	539	555	607	577	552
10	340	377	469	441	387	403
11	380	425	447	469	438	432
12	489	567	579	602	593	566
13	385	445	612	461	437	468
14	429	493	561	505	495	497
15	531	617	631	628	640	609



รูปที่ 5-1 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างผสมบิทูเมน 2%

ตารางที่ 5-5 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 3% ที่สถานะแห้ง

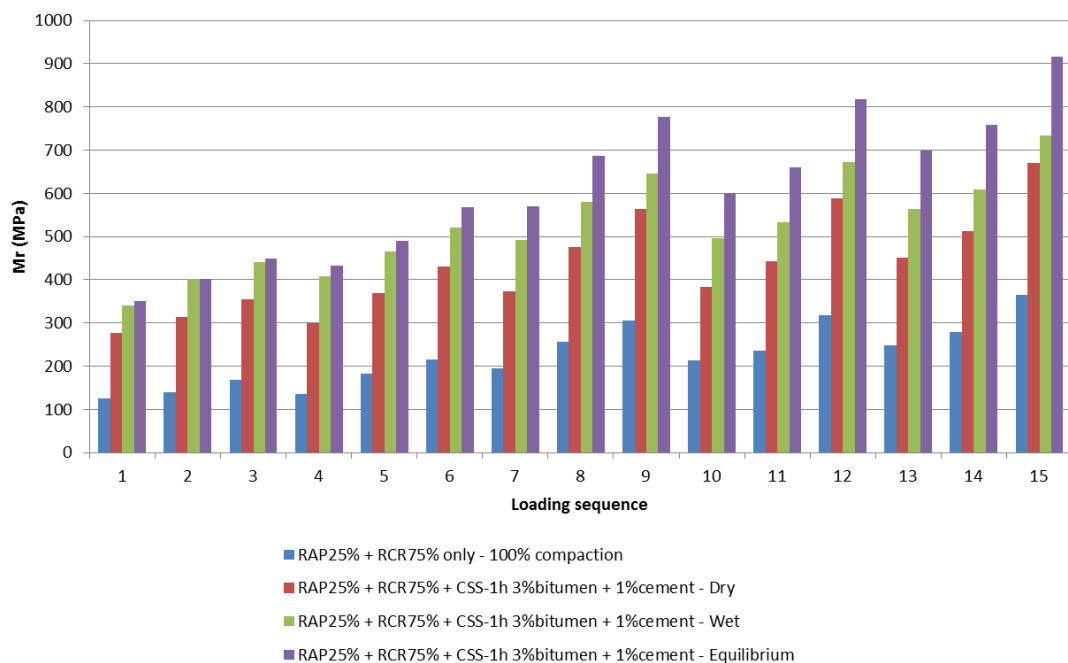
Sequence	1hC-3AD-1 (MPa)	1hC-3AD-2 (MPa)	1hC-3AD-3 (MPa)	1hC-3AD-4 (MPa)	1hC-3AD-15 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	325	331	327	194	208	277
2	376	350	331	281	230	314
3	419	386	356	347	265	355
4	356	337	323	262	219	299
5	437	397	366	368	282	370
6	509	440	403	445	354	430
7	441	388	358	379	296	372
8	549	482	436	491	421	476
9	625	573	539	576	508	564
10	420	414	340	438	303	383
11	493	470	404	493	358	443
12	644	602	573	608	515	589
13	497	486	416	511	342	450
14	564	538	493	558	406	512
15	726	690	644	669	620	670

ตารางที่ 5-6 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 3% ที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติ

Sequence	1hC-3AE-12 (MPa)	1hC-3AE-13 (MPa)	1hC-3AE-14 (MPa)	1hC-3AE-19 (MPa)	1hC-3AE-20 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	282	335	480	408	246	350
2	317	422	493	468	311	402
3	370	467	498	525	380	448
4	307	467	549	561	279	433
5	387	518	503	637	405	490
6	470	616	470	686	499	568
7	412	645	583	801	405	569
8	559	788	622	884	583	687
9	692	879	693	910	705	776
10	442	722	537	892	415	602
11	532	751	558	948	512	660
12	744	921	691	996	734	817
13	566	794	593	1016	528	699
14	651	830	655	1042	616	759
15	846	998	813	1080	845	917

ตารางที่ 5-7 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างผสมบิทูเมน 3% ที่สถานะแช่เย็น

Sequence	1hC-3AW-1 (MPa)	1hC-3AW-2 (MPa)	1hC-3AW-4 (MPa)	1hC-3AW-16 (MPa)	1hC-3AW-23 (MPa)	1hC-3AW-24 (MPa)	1hC-3AW-25 (MPa)	Average Mr (MPa)
1	511	374	218	245	359	291	390	341
2	614	457	327	278	371	328	434	401
3	625	489	382	328	406	369	481	440
4	620	460	313	302	392	305	466	408
5	639	507	404	366	435	381	525	465
6	668	551	466	433	480	458	583	520
7	642	505	401	485	441	373	601	493
8	698	588	517	532	540	529	659	580
9	736	642	580	609	610	631	712	646
10	617	541	421	502	448	363	582	496
11	639	569	469	514	494	446	597	533
12	757	662	609	641	633	670	732	672
13	640	586	488	578	506	497	646	563
14	693	623	538	592	558	587	665	608
15	809	707	669	706	618	773	791	734



รูปที่ 5-2 กราฟค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยของตัวอย่างผสมบิทูเมน 3%

จากกราฟรูปที่ 5-1 ก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 8 10 – 11 และ 13 ค่าโมดูลัสคืนตัวของสถานะแช่เย็นจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้ง ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 9 12 และ 14 – 15 ค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือที่ระดับความชื้นที่สถานะแช่เย็น และต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุง ที่ทุกสถานะหน่วยแรงและทุกระดับความชื้น จะได้ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันสูงกว่าวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

และจากกราฟรูปที่ 5-2 ค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่มีความชื้นระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติจะมีค่าสูงที่สุดในทุกสถานะหน่วยแรง รองลงมาเป็นก้อนตัวอย่างที่มีระดับความชื้นสถานะแช่เย็นและสถานะแห้งตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของก้อนตัวอย่างที่มีความชื้นระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ จะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุสูงกว่าวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ

และเมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% กับ 3% จะพบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของกลุ่มก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% จะมีค่าสูงกว่า โดยก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% และมีความชื้นระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุด

5.2.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของผลการทดลองขั้นที่ 2

จากการออกแบบการทดลองในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ เพื่อศึกษาระดับการเปลี่ยนแปลงปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม และระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างหลังผ่านการบ่มตัวอย่างในเตาอบ โดยแต่ละรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงไปย่อมจะส่งผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ให้มีค่าแตกต่างกันออกไป ในขั้นตอนนี้จะนำผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยจะจัดกลุ่มตามรูปแบบของแต่ละปัจจัย ซึ่งมีปัจจัยละ 2 รูปแบบ จากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างของผลการทดสอบด้วยวิธี Paired-Samples t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ในการทดสอบสมมติฐาน จำนวนตัวอย่างที่ใช้มีจำนวนทั้งสิ้น 31 ตัวอย่าง โดยมีรูปแบบการผสมตัวอย่างที่แตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5-1 ที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้

- ปัจจัยระดับการเปลี่ยนแปลงปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม

การทดสอบทางสถิติในการพิจารณาปัจจัยระดับการเปลี่ยนแปลงปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม การทดสอบสมมติฐาน กำหนดให้สมมติฐานหลัก (H_0) สำหรับการทดสอบ Paired-Samples t-test สำหรับงานศึกษาในส่วนนี้ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างของรูปแบบกลุ่มหนึ่งมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างของรูปแบบอีกกลุ่มหนึ่งหรือไม่ ระหว่าง 2 รูปแบบที่พิจารณานับปัจจัยเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ คือ

สมมติฐานหลัก $H_0 : \mu_d \geq 0$

สมมติฐานทางเลือก $H_1 : \mu_d < 0$

โดย μ_d คือ ความแตกต่างของค่าโมดูลัสคืนตัวของสถานะหน่วยแรง (Sequence) ใดๆ ซึ่งเกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างทดสอบ ที่อยู่ภายใต้ปัจจัยรูปแบบเดียวกัน

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยระดับปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม ระหว่างปริมาณบิทูเมน 2% และ 3% โดยน้ำหนักของส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5-8 โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ -1.782 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่สถานะหน่วยแรงที่ 2 – 15 มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% จะให้โมดูลัสคืนตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 ค่าทดสอบสถิติมีค่าน้อยกว่า -1.782 ซึ่งเป็นค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวคือจากข้อมูลตัวอย่างที่มี ไม่เพียงพอที่จะปฏิเสธได้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% จะให้ค่าไม่มากกว่าหรือเท่ากับตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5-8 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test จากปัจจัยปริมาณปัญหาในสวนผสม

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	12	-54.8	159.8	44.3	-1.235	-1.782	0.120	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	12	-83.0	130.4	36.2	-2.296	-1.782	0.020	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	12	-81.7	111.8	31.0	-2.634	-1.782	0.011	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	12	-83.9	139.7	38.8	-2.166	-1.782	0.026	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	12	-82.1	104.3	28.9	-2.839	-1.782	0.007	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	12	-86.3	96.3	26.7	-3.231	-1.782	0.004	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	12	-89.5	116.6	32.3	-2.767	-1.782	0.009	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	12	-90.8	101.4	28.1	-3.228	-1.782	0.004	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	12	-107.9	89.6	24.9	-4.341	-1.782	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	12	-104.6	134.5	37.3	-2.804	-1.782	0.008	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	12	-105.3	111.1	30.8	-3.416	-1.782	0.003	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	12	-113.2	92.4	25.6	-4.414	-1.782	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	12	-103.5	139.5	38.7	-2.674	-1.782	0.010	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	12	-109.8	116.1	32.2	-3.411	-1.782	0.003	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	12	-127.5	92.6	25.7	-4.963	-1.782	0.000	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง

- ปัจจัยระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างหลังผ่านการบ่มตัวอย่าง

การทดสอบทางสถิติในการพิจารณาปัจจัยระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างหลังผ่านการบ่มตัวอย่างในเตาอบ การทดสอบสมมติฐาน กำหนดให้สมมติฐานหลัก (H_0) สำหรับการทดสอบ Paired-Samples t-test สำหรับงานศึกษาในส่วนนี้ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ระหว่าง 2 รูปแบบที่พิจารณานับปัจจัยเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ คือ

สมมติฐานหลัก $H_0 : \mu_d = 0$

สมมติฐานทางเลือก $H_1 : \mu_d \neq 0$

โดย μ_d คือ ความแตกต่างของค่าโมดูลัสคืนตัวที่สถานะหน่วยแรง (Sequence) ใดๆ ซึ่งเกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างทดสอบ ที่อยู่ภายใต้ปัจจัยรูปแบบเดียวกัน

สำหรับการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างหลังจากที่ผ่านการบ่มตัวอย่างในเตาอบ ซึ่งระดับการเปลี่ยนแปลงมี 3 ระดับ คือ ความชื้นที่สถานะแห้ง ความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และความชื้นที่สถานะแช่น้ำ ดังนั้นในการทดสอบสมมติฐาน จะทดสอบทีละคู่ระดับปัจจัย โดยผลการทดสอบสมมติฐานแสดงไว้ในตารางที่ 5-9 ถึง 5-11

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งกับที่สถานะแช่น้ำ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5-9 โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ 2.262 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่ทุกสถานะหน่วยแรง มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือค่าโมดูลัสคืบตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งและค่าโมดูลัสคืบตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะแช่น้ำ มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5-9 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ระหว่างสถานะแห้งกับสถานะแช่น้ำ

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	9	-105.3	146.8	46.4	-2.269	2.262	0.049	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	9	-96.2	115.2	36.4	-2.642	2.262	0.027	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	9	-84.5	108.3	34.3	-2.467	2.262	0.036	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	9	-115.4	119.8	37.9	-3.047	2.262	0.014	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	9	-90.4	104.9	33.2	-2.725	2.262	0.023	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	9	-82.6	99.0	31.3	-2.637	2.262	0.027	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	9	-89.9	85.0	26.9	-3.344	2.262	0.009	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	9	-81.0	71.7	22.7	-3.571	2.262	0.006	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	9	-66.4	66.0	20.9	-3.179	2.262	0.011	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	9	-87.8	90.5	28.6	-3.069	2.262	0.013	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	9	-62.6	73.3	23.2	-2.699	2.262	0.024	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	9	-60.7	59.7	18.9	-3.214	2.262	0.011	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	9	-82.8	89.7	28.4	-2.920	2.262	0.017	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	9	-61.2	72.6	22.9	-2.667	2.262	0.026	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	9	-35.7	49.6	15.7	-2.275	2.262	0.049	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งกับที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5-10 โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ 2.262 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 8 และ 10 มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือจากข้อมูลตัวอย่างที่มี ไม่เพียงพอที่จะปฏิเสธได้ว่า ค่าโมดูลัสคืบตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งและค่าโมดูลัสคืบตัวของ

ตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 8 และ 10 ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 9 และ 11 – 15 ค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งและค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติที่สถานะหน่วยแรงที่ 9 และ 11 – 15 มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5-10 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ระหว่างสถานะแห้ง กับสถานะความชื้นตามธรรมชาติ

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	7	-28.5	104.8	37.1	-0.769	2.365	0.467	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	7	-51.5	94.3	33.3	-1.545	2.365	0.166	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	7	-54.0	90.4	32.0	-1.690	2.365	0.135	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	7	-87.1	132.3	46.8	-1.863	2.365	0.105	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	7	-74.1	111.5	39.4	-1.880	2.365	0.102	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	7	-83.9	114.2	40.4	-2.077	2.365	0.076	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	7	-120.5	169.9	60.1	-2.006	2.365	0.085	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	7	-131.1	161.9	57.2	-2.291	2.365	0.056	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	7	-144.4	129.0	45.6	-3.166	2.365	0.016	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	7	-141.8	171.4	60.6	-2.339	2.365	0.052	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	7	-141.4	162.3	57.4	-2.464	2.365	0.043	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	7	-159.1	139.9	49.5	-3.217	2.365	0.015	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	7	-166.9	173.7	61.4	-2.717	2.365	0.030	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	7	-170.3	161.4	57.1	-2.983	2.365	0.020	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	7	-177.8	138.1	48.8	-3.640	2.365	0.008	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง

จากการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งน้ำกับที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5-11 โดยที่ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะเท่ากับ 2.365 พบว่าค่าสถิติทดสอบที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 14 มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือจากข้อมูลตัวอย่างที่มี ไม่เพียงพอที่จะปฏิเสธได้ว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งน้ำและค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 14 ไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 15 ค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างได้ กล่าวโดยสรุปคือค่าโมดูลัสคืบตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะแช่เย็นและค่าโมดูลัสคืบตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ที่สถานะหน่วยแรงที่ 15 มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5-11 ผลการทดสอบ Paired-Samples t-test ระหว่างสถานะแช่เย็น
กับสถานะความชื้นตามธรรมชาติ

Sequence	Df	Mean Difference	Std. Deviation	s.e.	t*	t _{critical}	p-value	ผลทดสอบสมมติฐาน
1	7	66.5	212.5	75.1	0.885	2.365	0.405	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
2	7	40.0	179.8	63.6	0.629	2.365	0.549	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
3	7	24.1	157.4	55.6	0.434	2.365	0.678	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
4	7	24.6	218.9	77.4	0.318	2.365	0.760	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
5	7	9.1	170.4	60.2	0.151	2.365	0.884	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
6	7	-13.4	148.8	52.6	-0.254	2.365	0.807	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
7	7	-22.1	188.6	66.7	-0.332	2.365	0.750	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
8	7	-52.6	169.8	60.0	-0.876	2.365	0.410	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
9	7	-87.8	132.2	46.7	-1.878	2.365	0.103	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
10	7	-31.3	189.5	67.0	-0.467	2.365	0.655	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
11	7	-67.0	177.5	62.8	-1.068	2.365	0.321	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
12	7	-103.8	138.6	49.0	-2.117	2.365	0.072	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
13	7	-62.6	184.9	65.4	-0.958	2.365	0.370	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
14	7	-95.9	167.1	59.1	-1.623	2.365	0.149	ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง
15	7	-147.6	128.9	45.6	-3.239	2.365	0.014	ปฏิเสธสมมติฐานว่าง

5.2.3 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ k

ในการออกแบบโครงสร้างทางตามวิธีของ MEPDG (National Cooperative Highway Research Program, 2004) ค่าโมดูลัสคืบตัวจะเป็นค่าตั้งต้นที่นำไปใช้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามการจะทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืบตัวที่ระดับหน่วยแรงที่ต้องการมีความซับซ้อน ดังนั้นในการออกแบบจึงใช้สมการประมาณกำลัง (generalized constitutive model) ดังสมการที่ 3-1 ที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 3 คือ

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (\text{สมการที่ 3-1})$$

โดยที่	M_r	=	Resilient Modulus
	P_a	=	ความดันบรรยากาศ
	θ	=	Bulk Stress = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$
	σ_1	=	หน่วยแรงแกนหลัก (major principal stress)
	σ_2	=	หน่วยแรงแกนรอง (intermediate principal stress) ซึ่งจะเท่ากับ σ_3 สำหรับตัวอย่างที่มีรูปทรงกระบอก
	σ_3	=	หน่วยแรงด้านข้าง (minor principal stress / confining pressure)
	τ_{oct}	=	หน่วยแรงเฉือน (octahedral shear stress)
	k_1, k_2, k_3	=	สัมประสิทธิ์จากการคำนวณโดยความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น (Linear regression)

ทั้งนี้ ค่าหน่วยแรงเฉือน (Octahedral shear stress, τ_{oct}) จะคำนวณได้จากสมการที่ 3-2

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (\text{สมการที่ 3-2})$$

ในการวิเคราะห์ในขั้นนี้ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 จากผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว ในหัวข้อ 5.2.1 โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละรูปแบบส่วนผสม ซึ่งสามารถพิจารณาค่า k_1 k_2 และ k_3 ดังแสดงในตารางที่ 5-12 และค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 ของวัสดุที่ไม่ได้รับการปรับปรุงใดๆ แสดงในตารางที่ 5-13

ตารางที่ 5-12 ผลการวิเคราะห์ค่า k_1 k_2 และ k_3 ของแต่ละรูปแบบส่วนผสม

ปริมาณบิทูเมน	ระดับความชื้น	k_1	Sig.	k_2	Sig.	k_3	Sig.	R^2 (adj)
2%	แห้ง	2010.552	0.000	0.243	0.003	0.803	0.002	0.597
2%	ธรรมชาติ	2260.209	0.000	0.157	0.023	1.025	0.000	0.708
2%	แช่น้ำ	3068.991	0.000	0.053	0.222	0.734	0.000	0.628
3%	แห้ง	2561.075	0.000	0.096	0.041	0.972	0.000	0.751
3%	ธรรมชาติ	3492.148	0.000	0.253	0.000	0.614	0.006	0.630
3%	แช่น้ำ	3410.699	0.000	0.143	0.002	0.631	0.000	0.599

ตารางที่ 5-13 ผลการวิเคราะห์ค่า k_1 k_2 และ k_3 ของวัสดุที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

RAP:RCR	ระดับความชื้น	k_1	Sig.	k_2	Sig.	k_3	Sig.	R^2 (adj)
25:75	ความชื้นที่เหมาะสม	1193.311	0.000	0.223	0.000	0.899	0.000	0.898

จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีนัยสำคัญ ยกเว้นค่า k_2 ในกรณีปริมาณบิทูเมน 2% โดยน้ำหนักส่วนผสม ที่ระดับความชื้นสถานะแช่เย็น ที่มีค่า นัยสำคัญมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ และจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 ที่วิเคราะห์ได้มีค่าสถิติ R-square มากกว่า 0.599 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ตีระดับหนึ่ง

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ k_1 ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุโดยตรง จะพบว่าค่า k_1 ของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงในทุกรูปแบบส่วนผสม จะมีค่ามากกว่าวัสดุที่ไม่ได้รับการ ปรับปรุงใดๆ อย่างชัดเจน โดยค่าสัมประสิทธิ์ k_1 ของกรณีปริมาณบิทูเมน 3% โดยน้ำหนักส่วนผสม ที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ จะมีค่าสูงที่สุด

จากผลการทดสอบทางสถิติในหัวข้อ 5.2.2 จะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณ ความชื้นที่สถานะแช่เย็นและที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ไม่มีความแตกต่างกัน ใน การนี้จึงนำเอาข้อมูลค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นที่สถานะแช่เย็นและที่สถานะ ความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 ร่วมกัน โดยพิจารณา แยกกรณีปริมาณบิทูเมน ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 5-14

ตารางที่ 5-14 ผลการวิเคราะห์ค่า k_1 k_2 และ k_3 พิจารณาสถานะแช่เย็นร่วมกับความชื้นธรรมชาติ

ปริมาณบิทูเมน	ระดับความชื้น	k_1	Sig.	k_2	Sig.	k_3	Sig.	R^2 (adj)
2%	ธรรมชาติ+แช่เย็น	2692.871	0.000	0.095	0.023	0.864	0.000	0.625
3%	ธรรมชาติ+แช่เย็น	3444.098	0.000	0.189	0.000	0.624	0.000	0.583

จากผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 โดยพิจารณารวมตัวอย่างที่สถานะแช่เย็น และที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ จะพบว่าค่า k_2 ที่ปริมาณบิทูเมน 2% โดยน้ำหนัก ส่วนผสมจะมีค่านัยสำคัญดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด สามารถสรุปเป็น สมการความสัมพันธ์ในการทำนายค่าโมดูลัสคืนตัวได้เป็น 4 สมการ ดังนี้

$$M_r = 3444.098 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{0.189} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{0.624} \quad (\text{สมการที่ 5-1})$$

สมการที่ 5-1 เป็นสมการเพื่อทำนายกำลังของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมน อิมัลชัน โดยมีปริมาณบิทูเมนที่ผสมในตัวอย่างในระดับปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม และมีปริมาณความชื้นของวัสดุอยู่ในสถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติหรือที่สถานะแช่น้ำ

$$M_r = 2561.075 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{0.096} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{0.972} \quad (\text{สมการที่ 5-2})$$

สมการที่ 5-2 เป็นสมการเพื่อทำนายกำลังของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมน อิมัลชัน โดยมีปริมาณบิทูเมนที่ผสมในตัวอย่างในระดับปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม และมีปริมาณความชื้นของวัสดุอยู่ในสถานะแห้ง

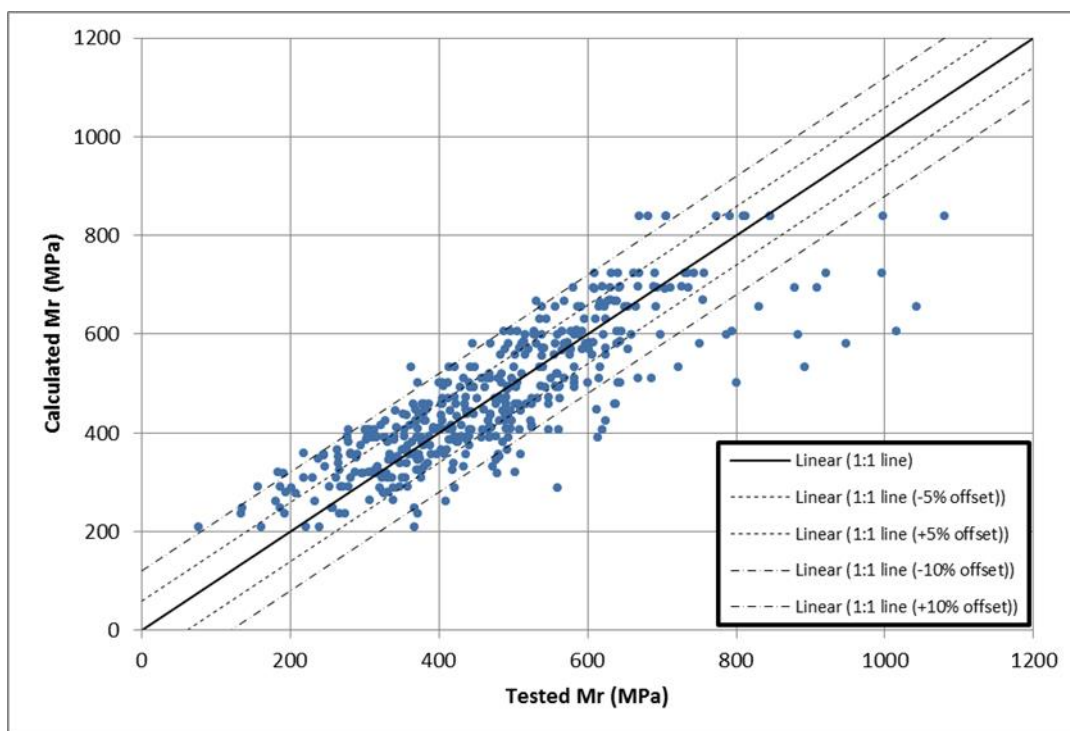
$$M_r = 2692.871 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{0.095} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{0.864} \quad (\text{สมการที่ 5-3})$$

สมการที่ 5-3 เป็นสมการเพื่อทำนายกำลังของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมน อิมัลชัน โดยมีปริมาณบิทูเมนที่ผสมในตัวอย่างในระดับต่ำกว่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม และมีปริมาณความชื้นของวัสดุอยู่ในสถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติหรือที่สถานะแช่น้ำ

$$M_r = 2010.552 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{1.275} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{2.232} \quad (\text{สมการที่ 5-4})$$

สมการที่ 5-4 เป็นสมการเพื่อทำนายกำลังของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมน อิมัลชัน โดยมีปริมาณบิทูเมนที่ผสมในตัวอย่างในระดับต่ำกว่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม และมีปริมาณความชื้นของวัสดุอยู่ในสถานะแห้ง

จากสมการทั้ง 4 สมการ นำมาคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวและนำมาเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากการทดลอง จะพบว่าค่าโมดูลัสที่คำนวณได้จะกระจายตัวอยู่ในช่วง +/- 10% ในช่วงที่ค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำกว่า 600 เมกะปาสคาล สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังกราฟรูปที่ 5-3



รูปที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากคำนวณและค่าที่ได้จากทดลอง

5.3 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน (Triaxial Test)

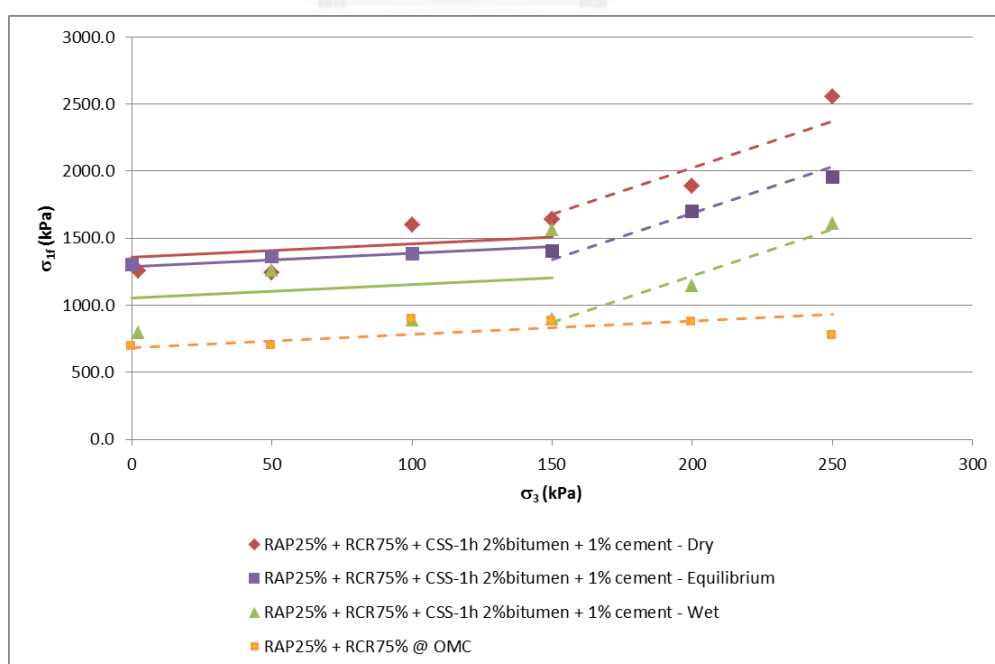
การทดสอบกำลังอัดสามแกนในการทดลองขั้นที่ 2 นี้ จะดำเนินการโดยใช้ก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวแล้ว มาทำการทดสอบกำลังอัดสามแกน โดยมีจำนวนก้อนตัวอย่างที่ได้ทดสอบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5-15

ตารางที่ 5-15 รูปแบบการผสมและจำนวนตัวอย่างที่ทดสอบกำลังอัดสามแกน

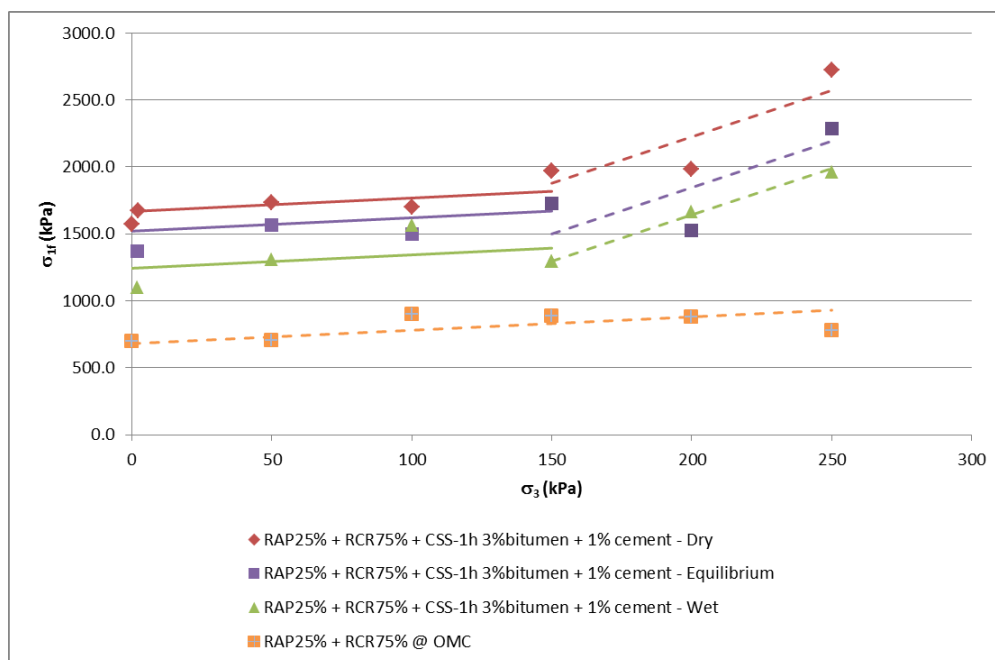
RAP:RCR	ชนิดอิ้มัลชัน	ปริมาณปิทูเมน	ปูนซีเมนต์	ระดับการบดอัด	ระดับความชื้น	จำนวนตัวอย่าง
25:75	CSS-1h	2%	1%	100%	แห้ง	6
25:75	CSS-1h	2%	1%	100%	ธรรมชาติ	6
25:75	CSS-1h	2%	1%	100%	แช่น้ำ	7
25:75	CSS-1h	3%	1%	100%	แห้ง	7
25:75	CSS-1h	3%	1%	100%	ธรรมชาติ	6
25:75	CSS-1h	3%	1%	100%	แช่น้ำ	6

ในการทดสอบกำลังอัดสามแกน จะกำหนดแรงกระทำด้านข้าง (Confining pressure) สำหรับแต่ละรูปแบบการผสมไว้ 6 ระดับ คือ 0 50 100 150 200 และ 250 กิโลปาสกาล ควบคุมการให้แรงกระทำจากการควบคุมระยะเคลื่อนตัวที่อัตรา 2 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบใน

ลักษณะ Unconsolidated Undrained ผลการทดสอบสามารถแสดงผลในรูปแบบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (Confining pressure) และกำลังรับแรงขณะวิบัติในแนวตั้ง (Total vertical stress) ได้ดังรูปที่ 5-4 และ 5-5 ซึ่งจากกราฟสามารถพิจารณาการอบการวิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb failure envelope) ได้ตั้งเส้นแนวโน้มที่แสดง ซึ่งในทางทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า ในขณะที่แรงเฉือนเกิดขึ้นกับดินที่มีปริมาตรหนึ่งสามารถเกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาคเม็ดดินได้ ซึ่งทำให้เส้นกรอบการวิบัติสามารถขยับขึ้นหรือลงได้ และอาจทำให้เส้นกรอบการวิบัติมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหรือเป็นส่วนหนึ่งของเส้นตรงมากกว่าหนึ่งเส้นต่อกัน ซึ่งแตกต่างไปจากกรอบการวิบัติพื้นฐานของดิน (Muni Budhu, 2007) ในกรณีผลการทดลองนี้สามารถพิจารณาแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มผลการทดสอบที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 0 – 150 กิโลปาสคาล และอีกกลุ่มที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 150 – 250 กิโลปาสคาล ซึ่งจากกรอบการวิบัติในช่วง 0 – 150 กิโลปาสคาล จะเห็นได้ว่าข้อมูลผลการทดสอบของตัวอย่างมีแนวโน้มที่อยู่ใกล้กับเส้นตรงที่คำนวณแปลงมาจากค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์องศา ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, C) และค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (angle of internal friction, ϕ) ตามสมการที่ 3-5 และ 3-6 สามารถแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มตัวอย่างที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 0 – 150 กิโลปาสคาล จะใช้สมมติฐานว่าในช่วง 0 – 150 กิโลปาสคาล พฤติกรรมของวัสดุมีค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์องศา แล้วทำการวิเคราะห์ในแต่ละกลุ่มตัวอย่างเพื่อหาค่าแรงยึดเหนี่ยว ได้ผลดังตารางที่ 5-16



รูปที่ 5-4 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกนของตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทุเมน 2% โดยน้ำหนัก

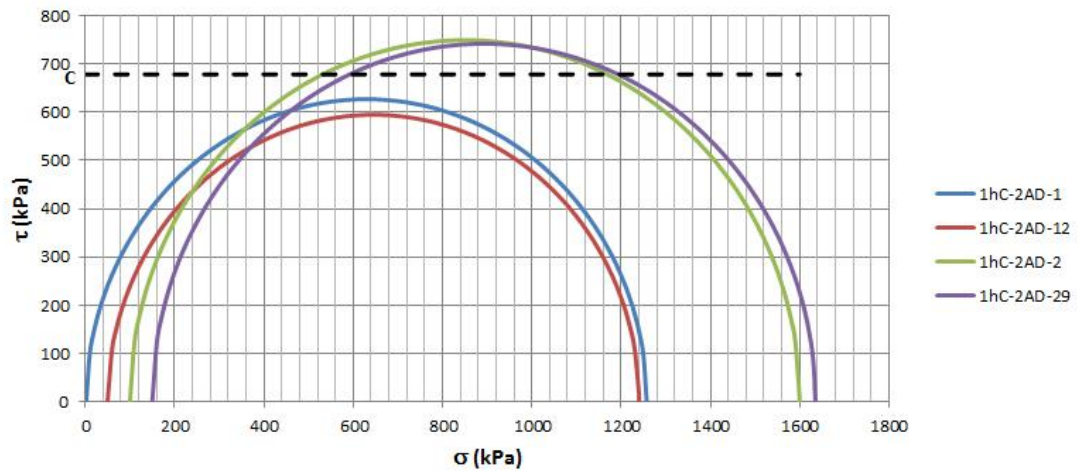


รูปที่ 5-5 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน ของตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% โดยน้ำหนัก

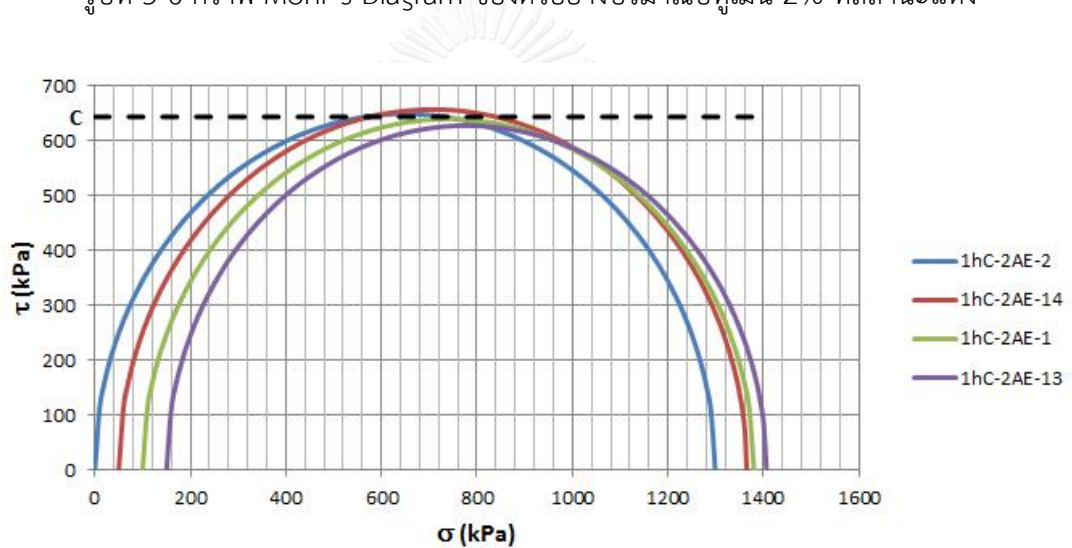
ตารางที่ 5-16 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงยึดเหนี่ยวในช่วง 0-150 กิโลปาสกาล เมื่อกำหนดให้ค่า $\phi = 0$

ปริมาณบิทูเมน	ระดับความชื้น	C (kPa)	R ²
2%	แห้ง	679	0.451
2%	ธรรมชาติ	644	0.694
2%	แฉะน้ำ	527	0.223
3%	แห้ง	833	0.575
3%	ธรรมชาติ	760	0.445
3%	แฉะน้ำ	621	0.268

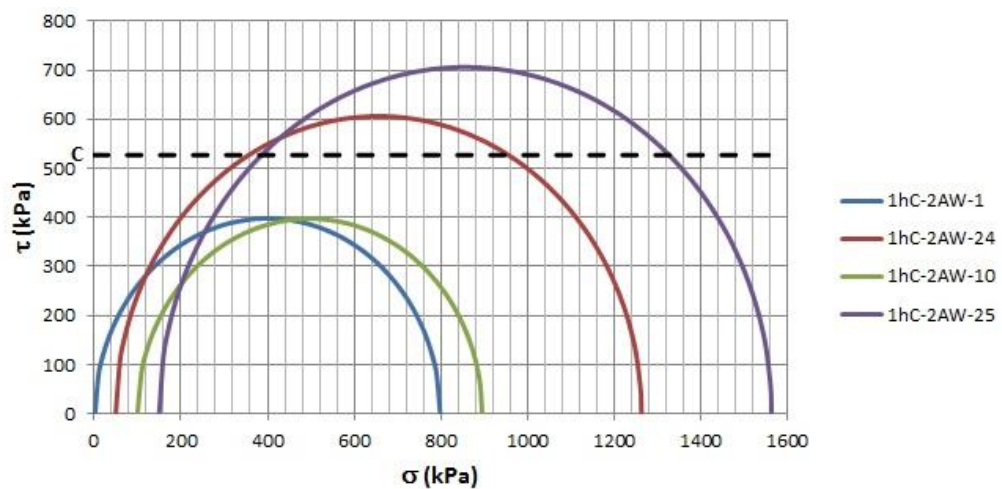
ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5-16 พบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวจะมีค่าสูงที่สุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้ง ตามด้วยค่าที่ระดับความชื้นในขั้นพื้นที่ตามธรรมชาติ และมีค่าต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแฉะน้ำ โดยกลุ่มตัวอย่างที่ผสมปริมาณบิทูเมน 3% จะมีค่าแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความชื้นเดียวกัน และจากผลการวิเคราะห์ทั้งหมด สามารถแสดง ค่าแรงยึดเหนี่ยวของแต่ละปัจจัยในรูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ Mohr's Diagram ดังรูปที่ 5-6 ถึง 5-11



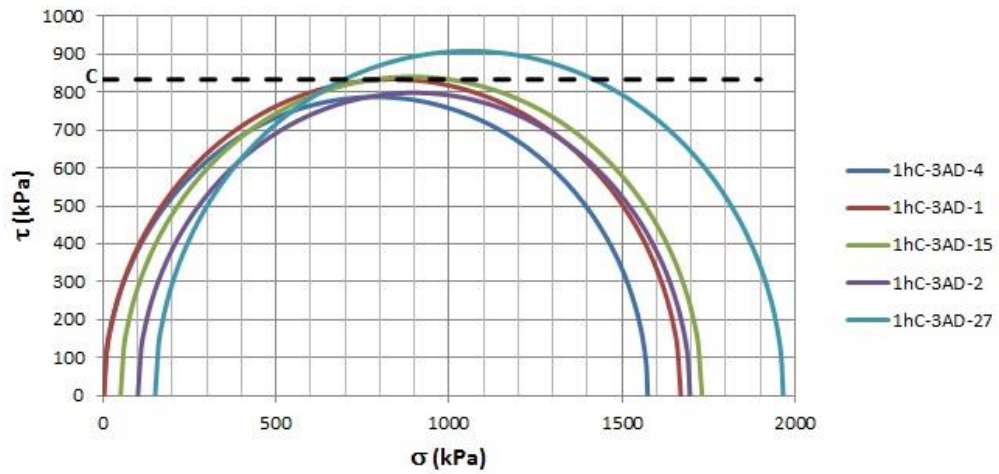
รูปที่ 5-6 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 2% ที่สถานะแห้ง



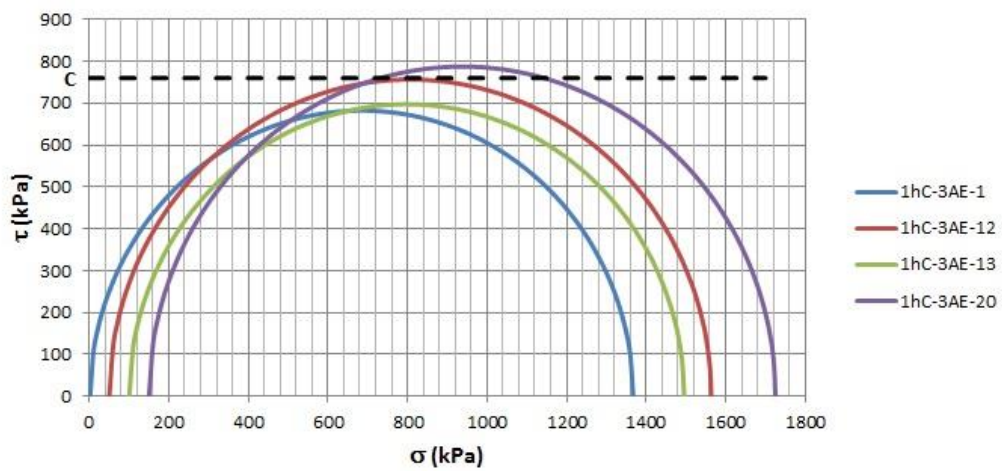
รูปที่ 5-7 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 2% ที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติ



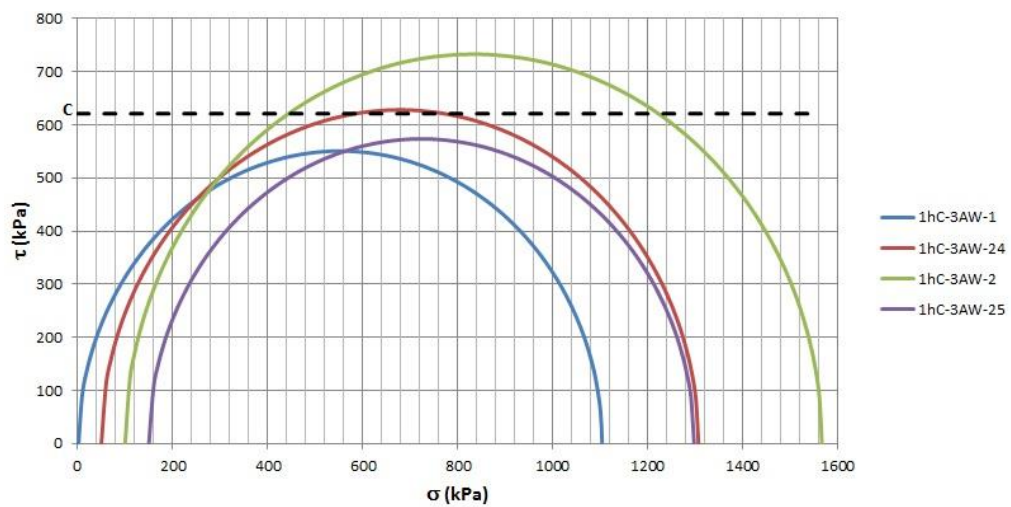
รูปที่ 5-8 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 2% ที่สถานะแช่น้ำ



รูปที่ 5-9 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 3% ที่สถานะแห้ง



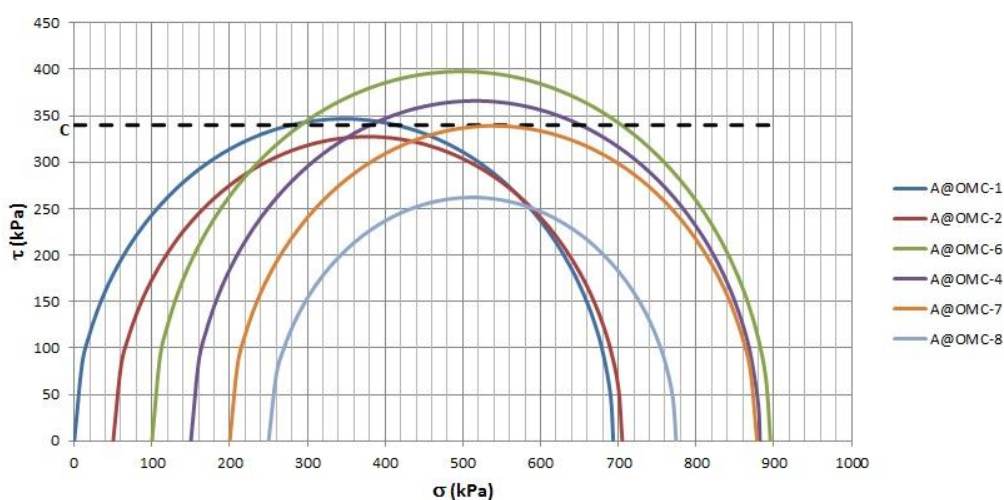
รูปที่ 5-10 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 3% ที่สถานะ
ความชื้นตามธรรมชาติ



รูปที่ 5-11 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างปริมาณบิทูเมน 3% ที่สถานะแช่ น้ำ

สำหรับข้อมูลการทดสอบกำลังอัดสามแกนของวัสดุที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 5-4 และ 5-5 ร่วมกับผลการทดสอบกำลังอัดสามแกนของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว โดยผลการทดสอบสามารถรวมเป็นกลุ่มเดียวกันที่แรงกระทำด้านข้างตลอดช่วง 0 – 250 กิโลปาสคาล จะเห็นได้ว่าข้อมูลการทดสอบตัวอย่างมีแนวโน้มที่อยู่ใกล้กับเส้นตรงที่คำนวณแปลงมาจากค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์องศา เช่นเดียวกับข้อมูลการทดสอบตัวอย่างที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 0 – 150 กิโลปาสคาล จึงทดลองใช้สมมติฐานว่าวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมีค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์องศา แล้วทำการวิเคราะห์ในแต่ละกลุ่มตัวอย่างเพื่อหาค่าแรงยึดเหนี่ยว ซึ่งจะได้ค่าแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพเท่ากับ 340 กิโลปาสคาล ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-16 และผลการวิเคราะห์ของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพสามารถแสดงในรูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ Mohr's Diagram ดังรูปที่ 5-12

สำหรับข้อมูลการทดสอบที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 150 – 250 กิโลปาสคาล เนื่องด้วยผลการทดสอบมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ประกอบกับจำนวนตัวอย่างในช่วงที่พิจารณามีจำนวนน้อยมาก จึงไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่า ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในมีค่าเท่ากับเท่าใด แต่จากแนวโน้มของข้อมูลพบว่าสามารถลากเส้นแนวโน้มได้หลายเส้น ยกตัวอย่างเส้นแนวโน้มที่น่าสนใจ คือเส้นแนวโน้มที่ค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเท่ากับ 34 42 45 และ 48 องศา โดยในกราฟรูปที่ 5-3 และ 5-4 แสดงเส้นแนวโน้มที่ 48 องศา อย่างไรก็ตาม จากเส้นแนวโน้มสามารถกล่าวได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้งจะสูงที่สุด ตามด้วยค่าที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และมีค่าต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแช่แข็ง



รูปที่ 5-12 กราฟ Mohr's Diagram ของตัวอย่างที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

5.4 สรุปการทดลองขั้นที่ 2

จากผลการศึกษาตัวแปรที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าได้ในระหว่างการก่อสร้าง นั้นคือปริมาณบิทูเมนในส่วนผสมและระดับความชื้นในวัสดุหลังผ่านการบ่มแล้ว สามารถสรุปได้ดังนี้

- ปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม
 - จากการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมนในส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัวอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน โดยมีปริมาณบิทูเมนในส่วนผสมที่ระดับปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม (optimum bitumen content) จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมนที่ต่ำกว่า ที่ทุกระดับความชื้นในก้อนตัวอย่าง
 - เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวระหว่างตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน กับวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงที่ผสมและบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content, OMC) จะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 2.5 เท่า ซึ่งแตกต่างกันไปตามปริมาณบิทูเมนที่ผสมและระดับความชื้นในก้อนตัวอย่าง
 - จากการทดสอบกำลังอัดสามแกนของก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมนในส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองและวิเคราะห์โดยใช้สมมติฐานว่า ที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 0 – 150 กิโลปาสคาล พฤติกรรมของวัสดุมีค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์องศา จะพบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวที่วิเคราะห์ได้ของก้อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน โดยมีปริมาณบิทูเมนในส่วนผสมที่ระดับปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม (optimum bitumen content) จะมีค่าสูงกว่าประมาณ 1.2 เท่าจากก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมนที่ต่ำกว่า ที่ทุกระดับความชื้นในก้อนตัวอย่าง
 - เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน กับวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงที่ผสมและบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content, OMC) พบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 2.5 เท่า ซึ่งแตกต่างกันไปตามปริมาณบิทูเมนที่ผสมและระดับความชื้นในก้อนตัวอย่าง

- ระดับความชื้นในก้อนตัวอย่าง
 - จากการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่าง ที่มีระดับความชื้นหลังผ่านการบ่มตัวอย่างในเตาอบที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือระดับความชื้นที่สถานะแห้ง ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำ จะพบว่าเมื่อผสมตัวอย่างโดยมีปริมาณบิพูเมนในส่วนผสมที่ระดับปริมาณบิพูเมนที่เหมาะสม ค่าโมดูลัสคืนตัวจะสูงที่สุดที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ รองลงมาคือที่ระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำ และต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้ง
 - และจากการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิพูเมน 2% โดยน้ำหนักผสม (ต่ำกว่าระดับปริมาณบิพูเมนที่เหมาะสม) จะพบว่า ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 8 10 – 11 และ 13 ค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำจะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้ง ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 9 12 และ 14 – 15 ค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติจะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่ระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำ และต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้ง
 - สำหรับการทดสอบกำลังอัดสามแกนของก้อนตัวอย่างที่มีระดับความชื้นหลังผ่านการบ่มตัวอย่างในเตาอบที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือระดับความชื้นที่สถานะแห้ง ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำ จากผลการทดลองและวิเคราะห์โดยใช้สมมติฐานว่า ที่แรงกระทำด้านข้างในช่วง 0 – 150 กิโลปาสคาล พฤติกรรมของวัสดุมีค่ามุมของแรงเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์องศา จะพบว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวที่วิเคราะห์ได้ของก้อนตัวอย่างที่ระดับความชื้นที่สถานะแห้งจะมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่ระดับความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ และต่ำสุดที่ระดับความชื้นที่สถานะแช่น้ำ แนวโน้มที่วิเคราะห์ได้นี้ มีลักษณะเดียวกันที่ทุกปริมาณบิพูเมน

จากผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ในการศึกษาตัวแปรปริมาณบิพูเมนในส่วนผสมและระดับความชื้นในวัสดุหลังผ่านการบ่มแล้ว เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ สามารถสรุปผลการทดลองในแต่ละตัวแปรได้ดังนี้

- ปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม

จากการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Samples t-test สามารถสรุปได้ว่า

- ที่สถานะหน่วยแรงที่ 2 – 15 ตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% จะให้โมดูลัสคืนตัวต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 ข้อมูลตัวอย่างที่มี ไม่เพียงพอที่จะปฏิเสธได้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 2% จะให้ค่าไม่มากกว่าหรือเท่ากับตัวอย่างที่ผสมด้วยปริมาณบิทูเมน 3% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

- ระดับความชื้นในก้อนตัวอย่าง

จากการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Samples t-test โดยทดสอบความแตกต่างที่ละคู่ระดับความชื้น สามารถสรุปได้ว่า

- การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งกับที่สถานะแช่น้ำ สามารถสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวมีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งกับที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ สามารถสรุปได้ว่า ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 8 และ 10 ค่าโมดูลัสคืนตัวไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 9 และ 11 – 15 ค่าโมดูลัสคืนตัวมีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยปริมาณความชื้นที่สถานะแช่น้ำกับที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ สามารถสรุปได้ว่า ที่สถานะหน่วยแรงที่ 1 – 14 ค่าโมดูลัสคืนตัวไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนที่สถานะหน่วยแรงที่ 15 ค่าโมดูลัสคืนตัวมีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Paired-Samples t-test พบว่าปัจจัยปริมาณความชื้นที่สถานะแช่น้ำกับที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ ไม่มีความแตกต่างกัน จึงนำข้อมูลค่าโมดูลัสคืนตัวมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ k ในสมการประมาณกำลัง (generalized constitutive model) ดังที่ได้กล่าวถึงในสมการที่ 3-1 โดยใช้การวิเคราะห์เชิงเส้น (Linear regression) พิจารณาจากระดับปริมาณบิทูเมนในส่วนผสมที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จำนวน 2 ระดับ คือที่ระดับปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม และที่ระดับต่ำกว่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม พิจารณาร่วมกับ

ระดับปริมาณความชื้นในตัวอย่างที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จำนวน 2 ระดับ คือที่ระดับปริมาณความชื้นที่สถานะแห้ง และที่ระดับปริมาณความชื้นที่สถานะแช่น้ำร่วมกับที่สถานะความชื้นในชั้นพื้นทางตามธรรมชาติ จะได้สมการทั้งหมด 4 สมการ แสดงไว้ในสมการที่ 5-1 ถึง 5-4 ดังรายละเอียดในตารางที่ 5-17

ตารางที่ 5-17 ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 และเงื่อนไข ของสมการประมาณกำลัง

ลำดับ	ปริมาณบิทูเมน	ระดับความชื้น	k_1	k_2	k_3
สมการที่ 5-1	ปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม	ธรรมชาติ / แช่น้ำ	3444.098	0.189	0.624
สมการที่ 5-2	ปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม	แห้ง	2561.075	0.096	0.972
สมการที่ 5-3	ต่ำกว่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม	ธรรมชาติ / แช่น้ำ	2692.871	0.095	0.864
สมการที่ 5-4	ต่ำกว่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม	แห้ง	2010.552	0.243	0.803

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ k พบว่าค่าระดับนัยสำคัญ (ค่า sig.) ของทุกค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 5-1 ถึง 5-4 มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า สมการประมาณกำลัง (generalized constitutive model) ดังที่ได้กล่าวถึงในสมการที่ 3-1 สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอีมีลชันได้

ค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ได้จากการประมาณด้วยสมการที่ 5-1 ถึง 5-4 ตามเงื่อนไขที่ระบุ จะพบว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ได้จะมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ในช่วงที่ค่าโมดูลัสคั้นตัวต่ำกว่า 600 กิโลปาสคาล

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือเพื่อศึกษาการออกแบบส่วนผสมโดยใช้บิทูเมนอิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการผสมเย็น และเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน จากการศึกษาวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยใช้บิทูเมนอิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม

- การออกแบบส่วนผสม เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิมโดยใช้บิทูเมนอิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม โดยวิธีการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) เพื่อวิเคราะห์หาค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม (Optimum Bitumen Content, OBC) พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_r) และค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, C) ที่ได้จากการทดสอบก่อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ผสมบิทูเมนอิมัลชันด้วยปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่ได้จากการทดสอบก่อนตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพใดๆ
- การศึกษาเพื่อหาความต้องการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มร่วมกับบิทูเมนอิมัลชัน พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สถานะแช่เย็นและค่า Tensile Strength Retained (TSR) ของตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักส่วนผสม มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยหินฝุ่น และเมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสคืนตัว จะพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุที่ผสมบิทูเมนอิมัลชันและปูนซีเมนต์ จะมีค่าสูงกว่าวัสดุที่ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชันและหินฝุ่น ที่ทุกสถานะหน่วยแรง

อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

- สำหรับปัจจัยปริมาณบิทูเมนในส่วนผสม เมื่อปริมาณบิทูเมนน้อยกว่าค่าปริมาณบิทูเมนที่เหมาะสม (Optimum Bitumen Content, OBC) พบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวและค่าแรงยึดเหนี่ยวจะมีค่าลดลง

- สำหรับปัจจัยปริมาณความชื้นในวัสดุ ที่มีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสคืนตัว กล่าวคือ ปริมาณความชื้นที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติจะให้ค่าโมดูลัสคืนตัวสูงที่สุด รองลงมาคือที่ปริมาณความชื้นที่สถานะแช่แข็ง และที่ปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำที่สุด
- สำหรับปัจจัยปริมาณความชื้นในวัสดุ ที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงยึดเหนี่ยว กล่าวคือ ปริมาณความชื้นที่สถานะแห้งจะมีค่าแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุด รองลงมาคือที่กล่าวคือ ปริมาณความชื้นที่สถานะความชื้นตามธรรมชาติ และปริมาณความชื้นที่สถานะแช่แข็งจะมีค่าแรงยึดเหนี่ยวต่ำที่สุด

6.2 ข้อเสนอแนะ

- ในโครงการบูรณะทางบางกรณี จะมีการผสมวัสดุหินใหม่ร่วมกับการใช้วัสดุโครงสร้างทางเดิม ทั้งนี้อาจเพื่อปรับระดับสายทาง หรือต้องการให้สายทางสามารถรองรับปริมาณการจราจรได้มากขึ้น หรืออาจต้องการปรับขนาดคละให้อยู่ในข้อกำหนดวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ โดยการเติมหินใหม่ในการออกแบบส่วนผสมจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ
- ประเด็นที่น่าสนใจศึกษาเพิ่มเติมอีกด้านหนึ่ง คือคุณสมบัติในการต้านทานร่องล้อและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุก เพื่อนำไปใช้ในงานบูรณะทางที่มีปริมาณจราจรทุกใช้งานจำนวนมาก
- ศึกษาและพัฒนาบิทูเมนอิมัลชันชนิดอื่นที่จะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและเหมาะสมกับสภาพวัสดุในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย และเพื่อให้วัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันจะมีค่ากำลังมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการลดราคาค่าก่อสร้างลง หรือทำให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรได้เพิ่มขึ้น
- การศึกษานี้เป็นการศึกษาและทดสอบกับวัสดุในระดับห้องปฏิบัติการ การศึกษาในลำดับถัดไปควรจะไปทดลองก่อสร้างแปลงทดสอบในถนนทางหลวง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนอิมัลชัน เทียบกับวัสดุพื้นทางตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติในการต้านทานร่องล้อทั้งในฤดูมรสุมและฤดูร้อนทั่วไป

รายการอ้างอิง

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). AASHTO T307 Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials, . USA.
- Asphalt Academy. (2009a). Laboratory test method 7, Determination of Triaxial Shear parameter using Simple Triaxial Test. Pretoria, South Africa.
- Asphalt Academy. (2009b). Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials, . Pretoria, South Africa.
- Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA). (2001). *Basic Asphalt Recycling Manual*. USA.
- European Standard. (2004). EN 13286-7 Unbound and Hydraulically Bound Mixtures - Test Methods - Part 7: Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures.
- Houston M., & Long F. (2004). *Correlations between different ITS and UCS test protocols for foamed bitumen treated materials*. Paper presented at the 8th Conference on Asphalt Pavement for Southern Africa (CAPSA'04), Sun City, South Africa.
- Muni Budhu. (2007). *Soil Mechanics and Foundations* (2nd ed.). USA: John Wiley & Sons Inc.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Part 2 Design Inputs, Chapter 2 Material Characterization. USA.
- Sufian Zulakmal, A.Aziz Nafisah, Matori Mohd Yazip, & Hussain Mat Zin. (2009). *Influence of active filler, curing time, and moisture content on the strength properties of emulsion and foamed bitumen stabilized mix*. Paper presented at the 7th, Advanced testing and characterization of bituminous materials (International symposium), Rhodes, Greece.
- Wirtgen GmbH. (2008). Cold Recycler 2200CR - Recycling and milling with a single machine. Windhagen, Germany.

- Wirtgen GmbH. (2010). *Wirtgen Cold Recycling Manual* (3rd ed.). Windhagen, Germany.
- กรมทางหลวง. (2544). ทล.-ม. 201/2544 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก.
- กรมทางหลวง แขวงทางหลวงสุรินทร์ สำนักทางหลวงที่ 7 (อุบลราชธานี). (2539). แบบก่อสร้าง ทางหลวงหมายเลข 2262.
- กรมทางหลวง กองวิเคราะห์และวิจัย. (2516). ทล.-ท.204/2516 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง (เทียบเท่า AASHTO T27-70).
- กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง. (2517a). ทล.-ท. 108/2517 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (เทียบเท่า AASHTO T180)
- กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง. (2517b). ทล.-ท. 109/2517 วิธีการทดลอง เพื่อหาค่า CBR (เทียบเท่า AASHTO T193).
- ณัฐภรณ์ เจริญธรรม, อัครพัฒน์ สว่างสุริย์, & กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์. (2555). การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุหินเวียนเพื่อนำกลับมาปรับปรุงใช้ใหม่. Paper presented at the International Conference on Highway Engineering, โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ เซ็นทรัลเวิลด์, กรุงเทพมหานคร.
- ธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ์. (2552). การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น. (ปริญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บัญชา เอกธรรมสุทธิ. (2519). การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ยางมะตอยน้ำชนิดพิเศษ. (ปริญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรภัทร เกตุญาติ. (2546). การประยุกต์เทคนิคโฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย. (ปริญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรุณ เตียวพานิช. (2519). คุณสมบัติการรับน้ำหนักของดินปนทรายเมื่อผสมด้วยยางมะตอยน้ำ และวัสดุผสมอื่นๆ. (ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรุฒ เลิศไพฑูริย์ เกิดเมื่อวันที่ 29 เมษายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2544

