

การวิเคราะห์ผลของการผันแปรอุณหภูมิต่อพฤติกรรมด้านสมรรถนะของวัสดุโครงสร้างทางเดิม
ปรับปรุงด้วยปิพเมอนอิมัลชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Analysis of the Effects of Temperature Variation on Performance of Recycled
Material Stabilised with Bitumen Emulsion



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลของการผันแปรอุณหภูมิต่อพฤติกรรมด้าน สมรรถนะของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิโหมน อิมัลชัน
โดย	นายสิริกมล สายน้ำเย็น
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เถลิงพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปรนิก จิตต์อารีกุล)

สิริกมล สายน้ำเย็น : การวิเคราะห์ผลของการผันแปรอุณหภูมิต่อพฤติกรรมด้าน
สมรรถนะของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน. (Analysis of the
Effects of Temperature Variation on Performance of Recycled
Material Stabilised with Bitumen Emulsion) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.บุญชัย
แสงเพชรงาม

การนำวัสดุจากชั้นทางเดิมมาทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่แบบผสมเย็น มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างทางและการฟื้นฟูสมรรถภาพของชั้นพื้นทาง ซึ่งทฤษฎี Shakedown ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายถึงวัสดุและการตอบสนองของโครงสร้างทางต่อการทดสอบภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ โดยการทดสอบวัสดุภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ศึกษา โมดูลัสคืนตัว ความต้านทานการล้า และการยุบตัวถาวร การผันแปรของอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงพฤติกรรมของวัสดุ ที่มีความสำคัญร่วมกับปัจจัยด้านรูปแบบของแรงกระทำซ้ำ ผลของการศึกษาพบว่าเมื่อวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (bitumen stabilized material, BSM) มีการผันแปรอุณหภูมิที่สูงขึ้น ความต้านทานการเสียรูปและโมดูลัสคืนตัวของวัสดุจะมีค่าลดลง นอกจากนี้วัสดุ BSM ที่ใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มร่วม จะสามารถรับน้ำหนักของหน่วยแรงกระทำซ้ำและมีค่าโมดูลัสคืนตัวดีกว่าวัสดุ BSM ที่ไม่ใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มร่วม ทั้งนี้พฤติกรรมของวัสดุ BSM มีการตอบสนองเป็น plastic เมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำจนถึง 1 ล้านรอบการทดสอบ โดยมี permanent strain rate ลดลงอย่างรวดเร็วจนวัสดุมีพฤติกรรมเป็น purely elastic สามารถจัดอยู่ในช่วง Plastic Shakedown หากวัสดุมี permanent strain rate ลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไป แต่ permanent strain มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละรอบการทดสอบจนนำไปสู่การวิบัติในรอบการทดสอบที่ต่ำ พฤติกรรมของวัสดุสามารถจัดอยู่ในช่วง Incremental Collapse

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070337721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: bitumen emulsion, bitumen stabilized material, the thermal variation of bitumen stabilized material

Sirikamon Sainamyen : Analysis of the Effects of Temperature Variation on Performance of Recycled Material Stabilised with Bitumen Emulsion . Advisor: Assoc. Prof. Dr. BOONCHAI SANGPETNGAM

The cold recycling of pavement material is widely used in road construction and pavement rehabilitation. The shakedown concept was developed for describing the material and structural response to the repeated application of a cyclic load. This study also considers the thermal variation since we assume that this variable would play a significant role in deforming asphaltic concrete roads. A thermal variation would affect several material properties such as resilient modulus, fatigue, and permanent deformation. The results indicate that when bitumen stabilized material (BSM) takes a higher temperature variation, the deformation resistance is reduced, and the resilient modulus of BSM was also reduced. Besides, BSM with cement admixtures can carry the repeated load and resilient modulus better than BSM without cement admixtures. The behavior of BSM response is plastic subjected to repetitive load up to 1 million loading cycles, with a rapid decrease in the permanent strain rate; afterward, the response becomes purely elastic can be assigned as Plastic Shakedown. Furthermore, the permanent strain rate of BSM decreases gently; however, permanent strain increases progressively with each load cycle, which leads to failure after a relatively low number of loading cycles can be assigned as Incremental Collapse.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านให้ความเมตตา ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้กำลังใจพร้อมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ รวมถึงมีงานให้ทำสำหรับเพิ่มพูนประสบการณ์ด้านการทำงาน ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เณริมพงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ ดร.ปรนิก จิตต์อารีกุล สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาและให้คำแนะนำวิธีการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับอุปกรณ์ทดสอบ และสถานที่ ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ การสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต” บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ ครูปฏิบัติกรและเจ้าหน้าที่หน่วยทดสอบ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย แก้ไขปัญหา และดูแลในการทดสอบได้อย่างปลอดภัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประสานงานด้านเอกสารและให้คำแนะนำเป็นอย่างดีจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณเพื่อน พี่ น้อง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมขนส่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ดูแล ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจเสมอ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้ามีความสำนึกในพระคุณของคณาจารย์ทุกท่าน และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ได้สนับสนุนเอาใจใส่ดูแล และให้ความอนุเคราะห์แก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สิริกมล สายน้ำเย็น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุทางและการนำกลับมาใช้ใหม่.....	4
2.2 วิธีการปรับปรุงคุณภาพ.....	6
2.2.1 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาใช้ใหม่โดยการชุตใสแล้วนำไปผสมในโรงงาน.....	6
2.2.2 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยการผสมแบบในที่.....	7
2.3 บิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Emulsion).....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านสมรรถนะของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน.....	10
2.5 การทดสอบสมรรถนะด้านทานแรงกระทำซ้ำ.....	16

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านผลของอุณหภูมิที่มีต่อวัสดุชั้นพื้นทาง.....	26
2.7 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, Mr)	31
2.8 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate).....	31
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 การกำหนดปัญหาและการวางแผนการออกแบบงานวิจัย.....	32
3.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม	34
3.2.1 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม.....	35
3.2.2 ความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม.....	37
3.3 การตั้งสมมติฐาน.....	38
3.3.1 สมมติฐาน.....	38
3.3.2 ตัวแปรต้น.....	38
3.3.3 ตัวแปรตาม.....	38
3.3.4 ตัวแปรควบคุม.....	38
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	39
3.4.1 การออกแบบการทดลองส่วนที่ 1	39
3.4.2 การออกแบบการทดลองส่วนที่ 2	40
3.5 การทดลอง.....	41
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง.....	42
3.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
3.6 การวิเคราะห์และการแปลผลข้อมูล.....	46
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	48
4.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ.....	48
4.1.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ.....	50
4.1.1.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ.....	50

4.1.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	52
4.1.1.3 การพิจารณาการประมาณค่าแบบช่วง.....	53
4.1.1.4 การพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM.....	55
4.1.1.5 การหาค่าส่วนเหลือ	56
4.1.2 อภิปรายผลการทดลองส่วนที่ 1	57
4.2 ผลการทดสอบการเสีรูปลถารภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ	58
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคั้นตัว.....	72
4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้านสมรรถนะของวัสดุ BSM	81
4.4.1 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์	81
4.4.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ.....	82
4.4.3 การพยากรณ์ขีดจำกัดในการรองรับปริมาณจรรยาจรของวัสดุ BSM	86
4.4.4 การพยากรณ์ค่าโมดูลัสการคั้นตัวของวัสดุ BSM	91
4.4.5 อภิปรายผลการทดลองส่วนที่ 2.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	97
5.1 สรุปผลการทดลอง	97
5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	98
5.3 ข้อเสนอแนะ	98
บรรณานุกรม.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	104

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มเพียงชนิดเดียว	13
ตารางที่ 2 ใช้ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม	14
ตารางที่ 3 Stress levels สำหรับการทดสอบ Multi-Stage Loading (high stress level)	22
ตารางที่ 4 Stress levels สำหรับการทดสอบ Multi-Stage Loading (low stress level)	22
ตารางที่ 5 Stress levels สำหรับการเลือกรูปถาวรตามลักษณะการใช้งานของแต่ละวัสดุ	24
ตารางที่ 6 การทดสอบแรงกระทำซ้ำ 6 ระดับของการทดสอบ Repeated Load Triaxial (RLT) .	25
ตารางที่ 7 ลำดับการทดสอบของแต่ละหน่วยแรงในการทดสอบการยุบตัวของถาวรแบบสามแกน	26
ตารางที่ 8 รูปแบบการทดสอบของแต่ละมาตรฐาน	26
ตารางที่ 9 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก่อนตัวอย่างในงานวิจัย	36
ตารางที่ 10 ปริมาณส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR ที่ใช้ในงานวิจัย	37
ตารางที่ 11 ตัวแปรที่ทำการศึกษา	39
ตารางที่ 12 กรณีศึกษาที่ต้องทดสอบในส่วนการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ	40
ตารางที่ 13 กรณีศึกษาที่ต้องทดสอบในส่วนการทดสอบความต้านทานการเลือรูปถาวรหรือความล้า	41
ตารางที่ 14 ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ในหน่วย Mpa	48
ตารางที่ 15 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ	51
ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน	52
ตารางที่ 17 การประมาณค่าแบบช่วงของ β_0 , β_1 , β_2 และ β_3	53
ตารางที่ 18 ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ระหว่างค่าเฉลี่ยผลการทดสอบกับการพยากรณ์	55
ตารางที่ 19 ค่าส่วนเหลือ (Residuals) ของค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM	56

ตารางที่ 20 จำนวนรอบที่ตัวอย่างสามารถรองรับได้จนวิบัติของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิพูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ใช้ปูนซีเมนต์ 1% ร่วมในสารผสมเพิ่ม โดยมีผันแปรระดับอุณหภูมิ	59
ตารางที่ 21 จำนวนรอบที่ตัวอย่างสามารถรองรับได้จนวิบัติของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิพูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% โดยมีผันแปรระดับอุณหภูมิ	60
ตารางที่ 22 ช่วงของการเสีรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิพูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ใช้ปูนซีเมนต์ 1% ร่วมในสารผสมเพิ่ม ตามทฤษฎี Shakedown.....	69
ตารางที่ 23 ช่วงของการเสีรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิพูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ตามทฤษฎี Shakedown	70
ตารางที่ 24 ขีดจำกัดของวัสดุ BSM ที่ทำให้อยู่ในสถานะสามารถคงรูปได้	71
ตารางที่ 25 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM 3% ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม	72
ตารางที่ 26 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM 2% ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม	73
ตารางที่ 27 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM 3%	74
ตารางที่ 28 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM 2%	75
ตารางที่ 29 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	82
ตารางที่ 30 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุการทดสอบการเสีรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ	84
ตารางที่ 31 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุค่าโมดูลัสคั้นตัว	86
ตารางที่ 32 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุขนาดหน่วยแรงกระทำที่วัสดุสามารถรองรับได้.....	87
ตารางที่ 33 ขีดจำกัดของวัสดุ BSM ที่ทำให้อยู่ในสถานะคงรูปได้ในที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C	89
ตารางที่ 34 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุสำหรับ Stress Ratio ของวัสดุ BSM.....	89
ตารางที่ 35 Stress Ratio ที่วัสดุ BSM สามารถรองรับปริมาณจราจรได้ 1,000,000 รอบ	91
ตารางที่ 36 ค่าโมดูลัสการคั้นตัวของวัสดุ BSM ที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C.....	92

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 เครื่องจักรผสมแบบเย็น.....	7
รูปที่ 2 เครื่องจักรที่ใช้และลำดับของเครื่องจักรในการผสมแบบเย็นในที่.....	8
รูปที่ 3 การทำงานของเครื่องจักร Recycler.....	8
รูปที่ 4 การผลิตบิทูเมนอิมัลชัน.....	9
รูปที่ 5 แผนภูมิพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางจากการเลือกใช้วัสดุชนิดต่างๆ.....	9
รูปที่ 6 พฤติกรรมการพัฒนากำลังของวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน.....	10
รูปที่ 7 พฤติกรรมการยุบตัวถาวรที่ระดับหน่วยแรงกระทำที่มีสถานะคงที่.....	16
รูปที่ 8 พฤติกรรมการยุบตัวถาวรที่ระดับหน่วยแรงกระทำที่มีสถานะไม่คงที่.....	16
รูปที่ 9 พฤติกรรมการยุบตัวของ Granular Material เมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำ.....	17
รูปที่ 10 ช่วงของพฤติกรรม Shakedown.....	19
รูปที่ 11 พฤติกรรมการเสียรูปถาวรแต่ละรูปแบบโดยมีความสัมพันธ์กับระดับหน่วยแรงกระทำที่ตัวอย่างได้รับ.....	20
รูปที่ 12 องค์ประกอบของอุปกรณ์ทดสอบแรงกระทำซ้ำสามแกน.....	23
รูปที่ 13 แรงกระทำที่ให้กับตัวอย่าง.....	23
รูปที่ 14 อุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาของทางหลวงหมายเลข 2262 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 2076.....	27
รูปที่ 15 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Load Repetitions กับ Temperature ที่ระดับ Stress เท่ากับ 400 kPa ของผิวทางที่ศึกษา.....	28
รูปที่ 16 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Load Repetitions กับ Temperature ที่ระดับ Stress เท่ากับ 500 kPa ของผิวทางที่ศึกษา.....	28
รูปที่ 17 ความลึกความเสียหายจากการเกิดร่องล้อ (Rut Depth).....	30
รูปที่ 18 จำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำ (Number of Repetitions).....	30
รูปที่ 19 ลักษณะภาพตัดขวางของทางหลวงหมายเลข 2262.....	35

รูปที่ 20	กราฟขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก่อนตัวอย่างในงานวิจัย	36
รูปที่ 21	ผลการวิเคราะห์จำนวนกรณีศึกษาด้วยโปรแกรม SPSS	40
รูปที่ 22	ขนาดคละมวลรวมระหว่าง RAP:RCR ในอัตราส่วน 25:75	43
รูปที่ 23	เครื่องบดอัดก้อนตัวอย่าง	44
รูปที่ 24	บ่มก้อนตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง	44
รูปที่ 25	บ่มก้อนตัวอย่างไว้ที่ตู้บ่มอุณหภูมิ 40°C	45
รูปที่ 26	อุปกรณ์ทดสอบและเก็บข้อมูลสำหรับการทดสอบ	46
รูปที่ 27	ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM	49
รูปที่ 28	การวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ของการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ	50
รูปที่ 29	การทดสอบภาวะสารูปสนิทธิ (Goodness of Fit Test)	52
รูปที่ 30	ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ระหว่างค่าเฉลี่ยผลการทดสอบกับการพยากรณ์ 56	
รูปที่ 31	กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	62
รูปที่ 32	กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	63
รูปที่ 33	กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	64
รูปที่ 34	กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	65
รูปที่ 35	ขีดจำกัดของวัสดุ BSM ที่ทำให้อยู่ในสถานะสามารถคงรูปได้	71
รูปที่ 36	ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	76
รูปที่ 37	ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	77
รูปที่ 38	ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	78

รูปที่ 39 ค่าโมดูลัสคืบตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิพูเมนอิมัลชัน 2% ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	79
รูปที่ 40 ค่าโมดูลัสคืบตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิพูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ใช้หรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม โดยมีการผันแปรอุณหภูมิ.....	81
รูปที่ 41 การวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ของการทดสอบการเสีรूपถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ	83
รูปที่ 42 การวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ค่าโมดูลัสคืบตัวของวัสดุ BSM	83
รูปที่ 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกระทำซ้ำแนวตั้งกับจำนวนรอบการทดสอบของวัสดุ BSM โดยมีการผันแปรอุณหภูมิ.....	85
รูปที่ 44 ค่าพยากรณ์ Stress Limit ของวัสดุ BSM ที่สามารถอยู่ในสถานะคงรูปได้ที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C ในหน่วย kPa	94
รูปที่ 45 ค่าพยากรณ์โมดูลัสการคืบตัวของวัสดุ BSM ที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C ในหน่วย Mpa	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเภทของถนนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ถนนลาดยางหรือแอสฟัลต์คอนกรีต (Flexible Pavement) และถนนคอนกรีต (Rigid Pavement) โดยสาเหตุที่ทำให้ถนนเกิดความเสียหายนั้นมีด้วยกันหลายสาเหตุ เช่น เนื่องจากปริมาณจราจรที่สะสม น้ำหนักบรรทุก ความล้า และด้านอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านการเกิดรอยแตกร้าวและการเกิดร่องล้อได้ โดยปัญหาที่กล่าวมาจะต้องได้รับการซ่อมแซมให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม เพื่อที่ถนนหรือผิวทางนั้นๆ มีโครงสร้างที่มีคุณภาพและมีความแข็งแรงทนทาน

อุณหภูมิของถนนนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการชำรุดของถนนลาดยางหรือแอสฟัลต์คอนกรีต (Flexible Pavement) โดยงานวิจัยนี้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) ซึ่งอุณหภูมิน่าจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านวิศวกรรม ได้แก่ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) และความต้านทานการเสีรูปถาวร (Permanent Deformation) หรือค่าความล้า (Fatigue)

ดังนั้นอุณหภูมิเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการออกแบบและประสิทธิภาพการทำงานถนนลาดยางหรือแอสฟัลต์คอนกรีต (Flexible Pavement) โดยความแปรผันของอุณหภูมิภายในโครงสร้างทางนั้นสามารถก่อให้เกิดการชำรุดของถนนได้ ซึ่งความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการกำหนดความต้องการด้านการออกแบบและการบำรุงรักษา โดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อนอย่างประเทศไทย

เพื่อที่จะพัฒนาให้การก่อสร้างถนนหรือผิวทางนั้นๆ มีโครงสร้างที่มีคุณภาพ มีความแข็งแรงทนทาน ดังนั้น คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการสร้างผิวทางถือว่ามีส่วนสำคัญสำหรับการออกแบบโครงสร้างทาง ซึ่งปัญหาที่กล่าวมาจะต้องได้รับการซ่อมแซมให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพให้สามารถใช้งานใหม่โดยแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการร้อน (Hot recycling) และ กระบวนการเย็น (Cold Recycling) ซึ่งกระบวนการที่กรมทางหลวงมีการนำมาใช้ คือ วิธีการนำวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยกระบวนการเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) มาใช้ในการก่อสร้างบูรณะถนนโดยนิยมใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุผสมเพิ่ม และยังมีทางเลือกของสารผสมเพิ่มอีก 2 ชนิด คือการใช้บิตูเมนอิมัลชันและการใช้โพลีบิตูเมน

วรุช เลิศไพฑูริย์ (2557) ทำการปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางได้ศึกษาการออกแบบส่วนผสมและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน โดยคุณสมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) Undrained cohesion, C_u และ ค่า Internal friction angle, ϕ_u และพฤติกรรมด้านสมรรถนะของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน และจากการทดลองเก็บข้อมูลอุณหภูมิชั้นพื้นทางช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม พ.ศ. 2555 ที่ผ่านมามีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอยู่ที่ 51 องศาเซลเซียส

ไพศาล บุษย์ไชยสอน (2560) ศึกษาถึงโมดูลัสการคืนตัว (M_r) และความต้านทานการเสีรูปลถาวร (Permanent Deformation) หรือความล้า (Fatigue) โดยการจำลองปริมาณการจราจรด้วยหน่วยแรงกระทำซ้ำ มีการเปลี่ยนระดับหน่วยแรง 3 ระดับคือ 550 kPa, 700 kPa และ 900 kPa ซึ่งยังไม่ได้มีการศึกษาถึงด้านที่มีปัจจัยเรื่องอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง นั่นคือหากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นค่าโมดูลัสการคืนตัว (M_r) และความต้านทานการเสีรูปลถาวร (Permanent Deformation) หรือความล้า จะมีผลเป็นอย่างไรต่อพฤติกรรมด้านสมรรถนะในการรองรับปริมาณจราจรของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

ธัญญารัตน์ เผือกหอม (2557) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติความล้าของ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) AC60/70 9.5 mm, 12.5 mm และ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 9.5 mm, 12.5 mm ผลการทดสอบคุณสมบัติความล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดต่างๆ พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการต้านทานความล้าหรือค่าความทนทานต่อ Load Repetitions ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำ ผิวทางจะสามารถต้านทานความล้าได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง

Alkaissi (2020) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความเสียหายจากการเกิดร่องล้อ (Rutting) ของถนนลาดยางโดยใช้โปรแกรม ABAQUS ver.6.12.1 finite element พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้การเกิดร่องล้อ (Rutting) ที่สูงขึ้น 2.29, 3.1 และ 4.3 เท่า สำหรับชั้นผิวทาง (Asphalt layer) ชั้นพื้นทาง (Base layer) และชั้นดินคั่นทางบดอัดแน่น (Subgrade layer) ตามลำดับ

จากปัจจัยด้านอุณหภูมิที่ได้กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิก่อให้เกิดความเสียหายต่อถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะทำการทดสอบความต้านทานการเสีรูปลถาวรจากการได้รับแรงกระทำซ้ำ โดยจะศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิที่มีต่อ

พฤติกรรมด้านสมรรถนะในการรองรับปริมาณจราจร ทั้งค่าโมดูลัสการคืนตัว (M_r) และความต้านทานการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) หรือความล้า (Fatigue)

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของปัจจัยด้านอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมด้านสมรรถนะในการรองรับปริมาณจราจรของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ด้วยการทดสอบความต้านทานการเสียรูปจากการได้รับแรงกระทำซ้ำ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ปัจจัยตัวแปรต้นของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงแล้วมีดังนี้

1. ปริมาณของบิทูเมนอิมัลชัน
2. การใช้หรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม
3. ระดับอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับตัวอย่าง

สำหรับตัวแปรตาม คือ ค่าคุณสมบัติด้านวิศวกรรมในแต่ละระดับของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus), ความต้านทานการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) หรือค่าความล้า (Fatigue) และระดับของหน่วยแรงกระทำซ้ำ (Stress level) ต่อประสิทธิภาพการต้านทานแรงกระทำซ้ำของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงค่าโมดูลัสคืนตัว และระดับความต้านทานแรงกระทำซ้ำของวัสดุพื้นทางที่ได้จากการปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมภายใต้อุณหภูมิระดับต่างๆ
2. เป็นข้อแนะนำในการนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติในภาคสนาม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุทางและการนำกลับมาใช้ใหม่

ต้องยอมรับว่าทรัพยากรธรรมชาติมีจำนวนจำกัด และการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้งานก็จะทำลายสิ่งแวดล้อม และเรานั้นได้นำวัสดุมาใช้ในงานทางเป็นวัสดุชั้นโครงสร้างชั้นทางทั้ง ดิน หิน กรวด ทราย ซึ่งถือได้ว่าถนนลาดยางเดิมมีวัสดุสร้างทางอยู่เป็นปริมาณมาก ถึงแม้จากการใช้งานมา ระยะหนึ่งก็ต้องมีการดูแลรักษาซ่อมบำรุง บำรุงปรับปรุง ก่อสร้างใหม่ เนื่องจากโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงลดลงแต่คุณสมบัติวัสดุชั้นทางมิใช่เสื่อมสภาพจนไม่สามารถใช้งานได้ ก็ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพกลับมาใช้งานใหม่ แต่ต้องพิจารณาในด้านวิชาการและข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางว่าควรใช้เป็นชั้นทางใดได้

ในการพัฒนาด้านเศรษฐกิจสังคมและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนแนว “3R” เป็นปรัชญาหนึ่งที่ใช้ในการพัฒนา คือ ลด (Reduce) นำมาใช้ใหม่ (Reuse) และการปรับปรุงเพื่อนำมาใช้ใหม่ (Recycling) ในงานก่อสร้างบำรุงปรับปรุงถนนลาดยางเดิม ได้นำแนวคิดปรัชญามาร่วมใช้กับองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมงานทางและวิศวกรรมสาขาอื่นๆ โดยมีการผลิตเครื่องจักรซึ่งมีหลายรูปแบบมาใช้งานปรับปรุงวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อนำมาใช้ใหม่

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่เป็นการนำวัสดุจากชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำไปใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) โดยให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ในการนี้อาจจะเพิ่มเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณ เช่น หิน ทราย Soil Aggregate ฯลฯ และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ (Stabilizing Agents) เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ และสารผสมเพิ่ม (Admixture) ทั้งนี้ในวิธีการนำวัสดุโครงสร้างถนนแอสฟัลต์ คอนกรีตเดิมมาปรับปรุงเพื่อทำเป็นวัสดุพื้นทางสามารถแบ่งเป็นแบบ (1) วิธีการผสมร้อน (Hot recycling) กับ (2) วิธีการผสมเย็น (Cold Recycling) ซึ่งวิธีการผสมแบบเย็นสามารถทำการผสมทั้งในรูปแบบของการผสมในที่ (In-Place) และการนำกลับมาผสมในโรงงาน (In-Plant) หรือทั้งในที่และที่โรงงานด้วย ขึ้นอยู่กับการกำหนดไว้ในรูปแบบ โดยจะต้องก่อสร้างให้ถูกต้องตามขั้นตอนและปิดทับผิวทางใหม่ การปรับปรุงชั้นทางอาจจะทำปรับปรุงเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น เป็นการนำเอาวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมที่ถูกขูดไสออก มาปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมสารปรับปรุงคุณภาพ แล้วนำกลับไปใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างทาง เนื่องจากงานผสมเย็นในที่เป็นกระบวนการที่ทำแล้วเสร็จในพื้นที่ที่สายทางจึงเป็นวิธีการที่รวดเร็วกว่า ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการขนส่ง อย่างไรก็ตามงานผสมเย็นภายในโรงงานเป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อมีจุดเสียหายได้ชั้นทางนั้น การแก้ไขจะต้องกระทำก่อน โดยการขุดรื้อชั้นทางด้านบนออกแล้วทำการซ่อมแซมจุดนั้น หากบางจุดไม่ได้รับการแก้ไข อาจจะทำให้ถนนใหม่เสียหายภายหลังจากการใช้งานได้ไม่นาน ส่วนสารปรับปรุงคุณภาพที่ได้รับความนิยมคือปูนซีเมนต์และบิทูเมน โดยบิทูเมนนั้นมีการใช้งานทั้งที่อยู่ในรูปของบิทูเมนอิมัลชันและโพลีบิทูเมน

การพิจารณานำวิธีการทำ Pavement Recycling มาใช้ในถนนลาดยางเดิม การพิจารณาก่อนว่าทำการบูรณะปรับปรุงหรือก่อสร้างใหม่ถนนลาดยางเดิมโดยวิธี Pavement Recycling สิ่งสำคัญที่ต้องถือปฏิบัติละเว้นไม่ได้ คือ การทำ Site Investigation ต้องทำการสำรวจประเมินถนนเดิมนั้นถึงสภาพความเสียหาย ความลึกของความเสียหายที่ต้องแก้ไขความหนาและชนิดวัสดุของแต่ละชั้นทาง รวมถึงประเมินความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางและปริมาณน้ำหนักรจราจรที่มาใช้บริการต่อไป เพื่อทำการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบและกำหนดรูปแบบการทำ Pavement Recycling ซึ่งอาจแบ่งกิจกรรมงานได้ 3 ลักษณะกิจกรรม ได้แก่

Resurface คือ ความเสียหายจะเกิดเฉพาะชั้นผิวทาง ความลึกของความเสียหายประมาณ 5-10 เซนติเมตร การทำ Recycling จะเรียกว่า Partial Depth Recycling วัสดุชั้นทางเดิมจะเป็นผิวทางลาดยางเดิมที่เรียกว่า RAP (Reclaim Asphalt Pavement) เมื่อปรับปรุงแล้วจะนำกลับมาใช้ชั้นผิวทางหรือชั้นรองผิวทางหรือชั้นพื้นทาง ขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ออกแบบความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับมาตรฐานการบริการจราจรของถนนนั้นๆ สำหรับทางด่วนหรือทางที่ต้องการใช้ความเร็วสูง วัสดุ RAP มักนำออกไป แล้วใช้วัสดุผสมใหม่มาในชั้นผิวทาง (Wearing Course) เพราะต้องการแรงต้านความฝืดของผิวทาง (Skid Resistance) สำหรับการปรับปรุง RAP นั้น จะปรับปรุงในที่หรือปรับปรุงที่โรงงานผสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการคุณภาพในระดับไหน ถ้าปรับปรุงที่โรงงานผสมได้ความสม่ำเสมอของคุณภาพก็จะดีกว่า เนื่องจากขั้นตอนการทำงานและการควบคุมงานได้แยกส่วนให้เห็นได้ชัดเจนกว่าการผสมในที่ ฉะนั้นหากใช้เป็นชั้นบนของโครงสร้างทางแล้วควรอย่างยิ่งใช้ปรับปรุงที่โรงงานผสมจะดีกว่า

Rehabilitation คือ ความเสียหายจะเกิดขึ้นทั้งชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง ความลึกของความเสียหายประมาณ 10-30 เซนติเมตร การทำ Recycling จะเรียกว่า Full Depth Recycling วัสดุชั้นทางเดิมจะมีทั้ง RAP (Reclaim Asphalt Pavement) และ RAM (Reclaim Aggregate Material) คือ ทั้งชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางตามลำดับ ส่วนใหญ่ Recycling แล้วจะใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่ สำหรับการพิจารณาว่าจะปรับปรุงในที่หรือปรับปรุงที่โรงงานให้พิจารณาถึงสภาพความลึกของความเสียหายและความสามารถการทำงานของเครื่องจักร และสิ่งแก้ไขจุดอ่อนที่มีมากน้อยเพียงใดที่เกิดได้ชั้นพื้นทางด้วย (ชั้นรองพื้นทาง) สำหรับเลือกใช้การปรับปรุงในที่อาจมีข้อพิจารณาเพิ่มเติมคือการขุดใส่ชั้นผิวทางบางส่วนออกก่อน เพื่อให้เครื่องจักรปรับปรุงชั้นพื้นทางได้เต็มที่มีความสามารถของเครื่องจักรได้ และสามารถปรับปรุงได้ตามความลึกของความเสียหาย สำหรับการทำให้ชั้นผิวทางใหม่ต้องพิจารณาว่าควรใช้ความหนาเท่าไรจึงเหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักรจราจร และอาจใช้วัสดุ RAP บางส่วนมาทำ Hot-Mix Recycling ก็ได้ขึ้นอยู่กับมาตรฐานชั้นทาง

Reconstruction คือ ความเสียหายเกิดขึ้นตลอดทั้งโครงสร้างชั้นทาง คือ ผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทาง ความลึกความเสียหายมากกว่า 30 เซนติเมตรจนถึง 60 เซนติเมตร (โดยประมาณ) การทำ Recycling จะเรียกว่า Deep Recycling ซึ่งจะต้องมีทั้งปรับปรุงในที่และปรับปรุงที่โรงงานผสม โดยวัสดุชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางต้องนำมาปรับปรุงที่โรงงานผสม ส่วนวัสดุชั้นรองพื้นทางปรับปรุงในที่ (เครื่องจักรที่ใช้ผู้ผลิตเรียกว่า Soil Stabilizer ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ถึงความลึก 30-40 เซนติเมตร แต่สำหรับใช้ในงานพื้นทางเครื่องจักรจะมีความประณีตในการทำงานกว่า แต่ความหนาที่ปรับปรุงจะน้อยกว่าได้ความหนาที่เหมาะสม 20 เซนติเมตร ซึ่งผู้ผลิตจะเรียกว่า Recycler) สำหรับการทำให้ชั้นผิวทางใหม่นั้น ก็พิจารณาเช่นเดียวกันกับข้อ 2 งาน Rehabilitation

2.2 วิธีการปรับปรุงคุณภาพ

2.2.1 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาใช้ใหม่โดยการขุดใส่แล้วนำไปผสมในโรงงาน

การปรับปรุงวัสดุโดยวิธีนี้จะต้องทำการขุดใส่วัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพในโรงงาน (In-Plant Recycling) เมื่อปรับปรุงคุณภาพแล้วเสร็จก็จะนำวัสดุที่ปรับปรุงแล้วนั้นไปปูลงบนสายทางตามจุดที่ต้องการ ในการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพในโรงงานนั้นเมื่อนำเปรียบเทียบกับกับการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิมแบบในที่แล้วมีข้อได้เปรียบที่สำคัญดังนี้

1. ควบคุมวัสดุที่นำมาปรับปรุงให้มีปริมาณมากน้อยตามความเหมาะสมได้อย่างแม่นยำ ซึ่งทำให้คุณสมบัติของวัสดุที่ปรับปรุงเรียบร้อยแล้วนั้นมีคุณภาพเท่ากันสม่ำเสมอ สามารถ

เลือกวัสดุได้ตรงตามความต้องการโดยนำไปบดย่อยและร่อนผ่านตะแกรง แล้วจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติก่อนนำไปปรับปรุงคุณภาพ

2. ควบคุมคุณภาพของการผสม เนื่องด้วยการปรับปรุงคุณภาพในโรงงานจะใช้เครื่องผสมทำให้สามารถปรับเปลี่ยนระยะเวลาการผสมและปริมาณวัสดุจนวัสดุและสารปรับปรุงคุณภาพผสมเข้ากันได้
3. สำหรับวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนสามารถเก็บวัสดุที่ทำการผสมแล้วไว้ได้และนำไปใช้ได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ ซึ่งทำให้ขั้นตอนการผสมไม่ขึ้นกับการนำไปใช้ปูบนสายทางนั้น อย่างไรก็ตามถ้าใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพ จะต้องระมัดระวังเรื่องระยะเวลาในการผสมด้วย



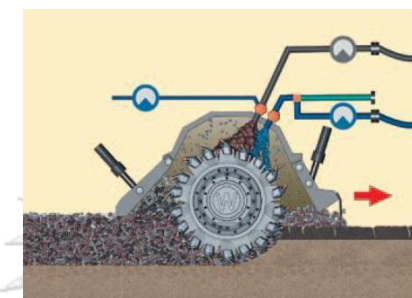
รูปที่ 1 เครื่องจักรผสมแบบเย็น

ที่มา : (Wirtgen, 2010)

2.2.2 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยการผสมแบบในที่

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่โดยการผสมแบบในที่ (In-Place Recycling) การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้งานใหม่รูปแบบนี้ ขั้นตอนการทำงานที่สำคัญทั้งหมดจะกระทำโดยเครื่องจักรหลักเพียงเครื่องเดียว ตั้งแต่ขุดใส่วัสดุผิวทางและวัสดุพื้นทางเดิม ฉีดสารผสมเพิ่ม ทำการผสมวัสดุและการปูวัสดุกลับ เรียกเครื่องจักรนี้ว่าเครื่องจักรสำหรับหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ มีทั้งแบบล้อติดตะขาบ (Track-mounted recycler) และล้อยาง (Tire-mounted recycler) ปกติแล้วการผสมแบบในที่จะไปกันเป็นขบวน โดยใช้เครื่องจักรสำหรับหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมเป็นตัวต้นหรือดึงรถบรรทุกทุกสารผสมเพิ่ม เพื่อเคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมๆ กัน ตามด้วยรถตกลินและอาจจะมีรถเกลี่ยดินทางานร่วมด้วย รถบรรทุกทุกสารผสมเพิ่มอาจมีจำนวน 1 คันหรือ 2 คันขึ้นกับจำนวนชนิดของสารผสมเพิ่มที่จะต้องใส่

ส่วนการทำงานของเครื่องจักรสำหรับหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycler) เริ่มต้นจากดรัมจะทำการดูดหรือวัสดุในชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง ผสมให้เข้ากันภายในห้องผสม (Mixing chamber) จากนั้นฉีดน้ำและสารปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งอาจเป็นบิทูเมนอิมัลชัน โฟมบิทูเมน หรือปูนซีเมนต์ที่อยู่ในรูปน้ำปูน (Slurry) หรือใช้ร่วมกันหลายชนิดก็ได้ ควบคุมปริมาณสารที่ฉีดเพิ่มด้วยระบบไมโครโปรเซสเซอร์โดยทำการฉีดผ่านหัวสเปรย์เพื่อการกระจายตัวของสารปรับปรุงคุณภาพที่ดีและควบคุมให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมกับการบดอัด



รูปที่ 2 เครื่องจักรที่ใช้และลำดับของเครื่องจักรในการผสมเย็นแบบในที่
ที่มา : (Wirtgen, 2010)



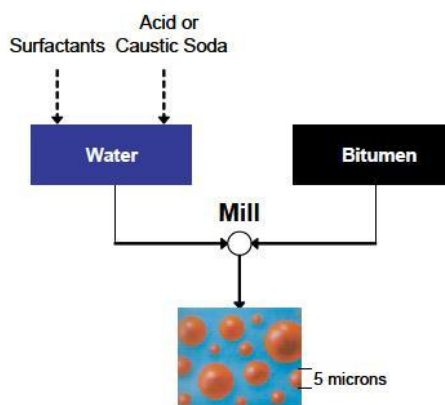
รูปที่ 3 การทำงานของเครื่องจักร Recycler
ที่มา : (Wirtgen, 2010)

2.3 บิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Emulsion)

สารปรับปรุงคุณภาพกลุ่มบิทูเมน (Bitumen Stabilizing Agent) มีทั้งที่เป็นบิทูเมนอิมัลชันและโฟมบิทูเมน บิทูเมนอิมัลชันเกิดจากการนำวัสดุบิทูเมนไปแขวนลอยในน้ำ โดยใช้สาร Emulsifying agent ช่วยให้แขวนลอยได้ ซึ่งสาร Emulsifying agent นี้จะเป็นตัวกำหนดประจุของบิทูเมนอิมัลชัน โดยปกติแล้วบิทูเมนอิมัลชันจะมีอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการผลิตบิทูเมนอิมัลชันจึงต้องทำในจำนวนที่เหมาะสมกับการใช้งาน

เมื่อบิทูเมนอิมัลชันผสมกับหินแล้ว ประจุของบิทูเมนอิมัลชันจะถูกดึงดูดโดยประจุตรงข้ามที่อยู่บนผิวของวัสดุรวมทำให้เกิดการยึดเกาะกัน ดังนั้นความชื้นในหินและชนิดของหินเป็นสิ่งสำคัญต่อการกระจายตัวของบิทูเมนจากน้ำในบิทูเมนอิมัลชันในขณะผสม สำหรับการปรับปรุงคุณภาพโดย

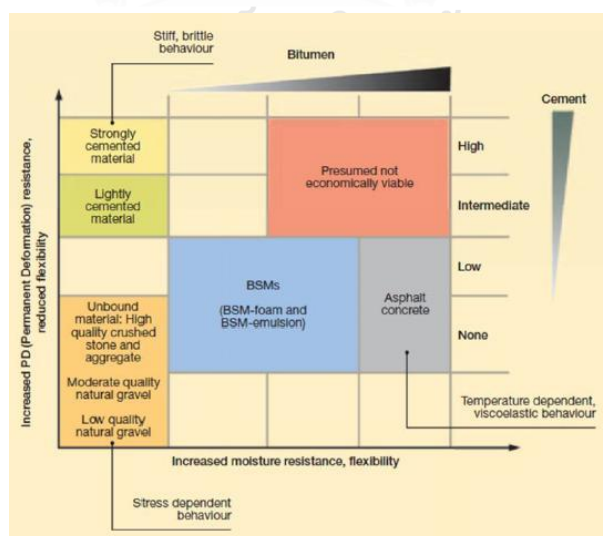
ใช้บิทุเมนอิมัลชันจะกำหนดให้บิทุเมนอิมัลชันเป็นเหมือนสารหล่อลื่น (Lubricating agent) ดังนั้นการแตกตัวควรเกิดขึ้นหลังจากการบดอัดเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4 การผลิตบิทุเมนอิมัลชัน

ที่มา : (Wirtgen, 2010)

จากหนังสือคู่มือ Wirtgen Cold Recycling Manual (Wirtgen GmbH, 2010) ได้แสดงพฤติกรรมของวัสดุที่จะเกิดขึ้นจากการเลือกใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งในการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทุเมนอิมัลชันนั้น จะทำให้พฤติกรรมของวัสดุที่ปรับปรุงแล้วไม่ต่างจากวัสดุหินคลุก (Unbound granular material) แต่การปรับปรุงจะช่วยเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) และลดผลกระทบที่จะเกิดจากความชื้น (Moisture sensitivity)

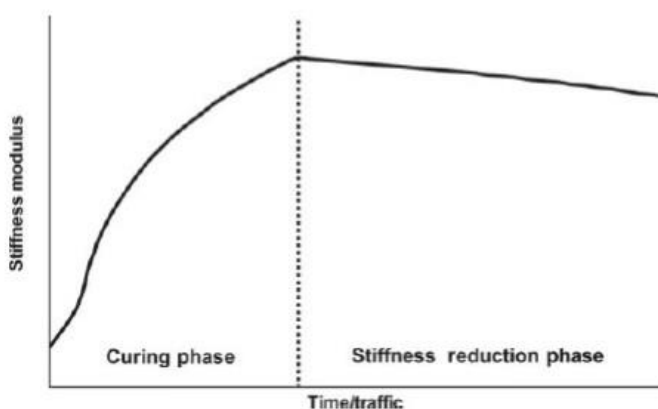


รูปที่ 5 แผนภูมิพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางจากการเลือกใช้วัสดุชนิดต่างๆ

ที่มา : (Wirtgen, 2010)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านสมรรถนะของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

K. J. Jenkins, Long, and Ebels (2007) ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการใช้งานในระยะยาวของโครงสร้างทาง พบว่าในช่วงเริ่มต้นของชั้นทางวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) ความแข็งแรงนั้นไม่ได้มีค่าลดลงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่ม Ebels (2008) ได้ให้ความเห็นว่าความล้าของวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาได้ผ่านไปนานแล้ว ส่วนการเสีรูรูปแบบถาวรจะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ จึงได้เสนอสมมติฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าความแข็งแรงในวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) มา 2 ขั้นตอนประกอบด้วยขั้นการบ่มตัว (Curing Phase) และขั้นการลดลงของความแข็งแรง (Stiffness Reduction Phase) ซึ่งในขั้นการบ่มตัว (Curing Phase) ในขั้นนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของวัสดุ โดยการลดลงของความชื้นและมีความแน่นขึ้นในชั้นของวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) ซึ่งในช่วงแรกจะมีอายุระหว่าง 6-18 เดือน และสำหรับขั้นการลดลงของความแข็งแรง (Stiffness Reduction Phase) จะเป็นช่วงที่ความแข็งแรงของวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) ลดลง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 พฤติกรรมการพัฒนากำลังของวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM)

ที่มา : Perez, Medina, and del Val (2013)

ฉัตรดี ก่อตั้งสัมพันธ (2552) ศึกษาการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ มีการปรับปรุงคุณภาพโดยการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2 และ CSS-1 ผสมกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) และผสมกับวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) โดยกำหนดสัดส่วนการผสมระหว่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) ต่อวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) เป็น 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:100 มีการบดอัดก้อนตัวอย่างด้วย Superpave Gyrotory Compactor (SGC) ให้มีค่าความหนาแน่นที่ 90, 95 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นสูงสุด และได้นำก้อนตัวอย่างบ่มอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปหาคุณสมบัติทั่วไป ได้แก่ ขนาดคละมวลรวม ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และคุณสมบัติเชิงวิศวกรรม ได้แก่ ค่า CBR ค่าความต้านทานรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส (Static Indirect Tensile Strength) ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แรงกระทำ 20%, 30% และ 40% ของค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมทั้งแช่น้ำและไม่แช่น้ำ

สรุปได้ว่ายาง CSS-1 สามารถทำการผสมได้ง่ายกว่ายาง CMS-2 ซึ่งค่าการต้านทานแรงอัดดีที่สุดของยาง CMS-2 และ CSS-1 อัตราส่วนผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) จะอยู่ที่ 50:50 และ 25:75 ตามลำดับ ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมดีที่สุดของยาง CMS-2 และ CSS-1 อัตราส่วนผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) อยู่ที่ 100:0 และ 75:25 ตามลำดับ โดยที่วัสดุที่ผสมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 สามารถรับกำลังได้ดีกว่าแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2

Sufian et al. (2014) ศึกษาถึงปัจจัยด้านระยะเวลาของปริมาณความชื้น สารผสมเพิ่ม ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันและโพลีบิทูเมน จากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ค่า Indirect Tensile Strength (ITS) และ ค่า Resilient Modulus (Mr) ซึ่งอัตราส่วนระหว่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม (Reclaim Asphalt Pavement, RAP) ผสมกับวัสดุชั้นหินคลุก (Crush Rock, CR) คือ 0:100, 25:75, 50:50 75:25, 100:0 ตามลำดับ โดยจะนำค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) มาเปรียบเทียบกับ โดยการนำวัสดุที่ปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันและโพลีบิทูเมนไปบ่ม และนำมาเปรียบเทียบกับ พบว่าเมื่อพิจารณาข้อกำหนดในงานก่อสร้าง สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดที่การบ่มที่ 7 วัน จะมีค่า 0.7MPa จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดและมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่ม สำหรับวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันส่วนผสมที่มีอัตราส่วนวัสดุทางเดิม (Reclaim Asphalt Pavement, RAP) 0, 25 และ

50% ผ่านข้อกำหนดภายใน 7 วัน ส่วนโพลีบิโทเมนทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดทั้งหมด ยกเว้นอัตราส่วนที่มีวัสดุทางเดิม (Reclaim Asphalt Pavement, RAP) 100% เท่านั้นที่ไม่ผ่าน

การพิจารณาปริมาณสารผสมเพิ่มโดยใช้ค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) มาเปรียบเทียบ ซึ่งจะใช้เกณฑ์เดียวกันกับผลของระยะเวลาในการบ่ม พบว่า วัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยบิโทเมนอิมัลชันอัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) 100% ต้องใช้สารผสมเพิ่ม 3% อัตราส่วนวัสดุผิวทางเดิม (RAP) 75% ต้องใช้วัสดุผสมเพิ่ม 1.5% และอัตราส่วนวัสดุผิวทางเดิม (RAP) 50% ต้องใช้วัสดุผสมเพิ่ม 1% ส่วนวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลีบิโทเมนทุกอัตราส่วนของวัสดุผิวทางเดิม (RAP) ผ่านเกณฑ์เมื่อใส่สารผสมเพิ่ม 1% ยกเว้นวัสดุที่มีอัตราส่วนผิวทางเดิม (RAP) 100% ต้องใส่สารผสมเพิ่ม 2% จึงจะผ่านเกณฑ์

การพิจารณาปริมาณความชื้นกับค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) พบว่า แต่สำหรับวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยบิโทเมนอิมัลชันจะมีค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ไม่ตรงกับจุด Optimum Moisture Content (OMC) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น +/- 30% ก็ไม่ส่งผลกับค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ดังนั้นการชี้วัดโดยใช้ Moisture Content จึงไม่เหมาะสม ส่วนวัสดุที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลีบิโทเมนจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ Optimum Moisture Content (OMC)

เมื่อนำค่า Indirect Tensile Strength (ITS) มาพิจารณากับเกณฑ์ข้อกำหนดของระยะเวลาในการบ่มต้องมีค่า 200 kPa โดยวัสดุปรับปรุงด้วยบิโทเมนอิมัลชันที่มีอัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) 100% ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ ส่วนวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิโทเมนมีเพียงอัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) 75% และ 100% ที่ผ่านเกณฑ์

การพิจารณาปริมาณความชื้นเมื่อนำค่า Indirect Tensile Strength (ITS) มาพิจารณา พบว่า วัสดุที่ปรับปรุงด้วยบิโทเมนอิมัลชันมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่า ค่า Indirect Tensile Strength (ITS) ที่ไม่ชัดเจน ส่วนวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิโทเมนอัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) 50% เท่านั้นที่มีค่า Indirect Tensile Strength (ITS) สูงที่สุดที่จุด Optimum Moisture Content (OMC)

สำหรับค่า Resilient Modulus เมื่อนำมาพิจารณากับระยะเวลาในการบ่ม พบว่า ทั้งวัสดุที่ปรับปรุงด้วยบิโทเมนอิมัลชันและโพลีบิโทเมนมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาแต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) จะทำให้ค่าลดลง ส่วนสารผสมเพิ่มต่อ Resilient Modulus เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่ม จะทำให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น และความชื้นต่อค่า Resilient Modulus สำหรับวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิโท

เมนอิมัลชันมีเพียงวัสดุที่มีอัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) 100% เท่านั้นที่มีค่า Resilient Modulus ไม่ผ่านค่าที่กำหนด 2000 MPa ที่ปริมาณความชื้นที่ศึกษา ส่วนวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพลีบิวเมนปริมาณความชื้นจะไม่ส่งผลต่อค่า Resilient Modulus ที่อัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) มีค่าสูง แต่เมื่ออัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) มีค่าต่ำ Resilient Modulus มีค่าสูงมากที่จุด Optimum Moisture Content (OMC) ดังนั้นอัตราส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) จึงเป็นค่าที่ต้องตระหนักถึงในการออกแบบส่วนผสม

ณัฐภรณ์ เจริญธรรม อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ และกณวีร์ กนิษฐพงษ์ (2555) ศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุชั้นโครงสร้างทางที่ได้รับการบูรณะด้วยวิธีการผสมเย็นแบบในที่โดยมีการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มแล้ว 1 ครั้ง และจะนำมาปรับปรุงคุณภาพอีกครั้งโดยใช้สารผสมเพิ่มได้แก่ปูนซีเมนต์, แอสฟัลต์อิมัลชัน, ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน และทำการออกแบบส่วนผสมใช้วัสดุชั้นผิวทางและวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการบูรณะแล้วด้วยอัตราส่วนชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทาง 25:75 และ 50:50 โดยน้ำหนัก มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1 ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มเพียงชนิดเดียว

ชนิดวัสดุพื้นทางเดิมก่อนการบูรณะ	อัตราส่วนผสมระหว่างชั้นผิวทางต่อชั้นพื้นทางโดยน้ำหนัก	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%

ที่มา : ณัฐภรณ์ เจริญธรรม อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ และกณวีร์ กนิษฐพงษ์ (2555)

ตารางที่ 2 ใช้ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม

ชนิดวัสดุชั้นพื้นทางเดิม ก่อนการบูรณะ	อัตราส่วนผสมระหว่าง ชั้นผิวทางต่อชั้นพื้น ทางโดยน้ำหนัก	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%

ที่มา : อนุรักษ์ เจริญธรรม อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ และกัณวีร์ กนิษฐพงศ์ (2555)

เมื่อผสมวัสดุชั้นผิวทางและวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการบูรณะแล้วตามอัตราส่วนพร้อมกับปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันตามปริมาณที่กำหนดในตาราง จากนั้นทิ้งไว้ให้แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัว ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการคลุกเคล้าเป็นระยะ แล้วจึงทำการบดอัดก้อนตัวอย่าง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปบ่ม โดยวางตัวอย่างบนตะแกรงเหล็กที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในตู้อบก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนทำการทดสอบ

ก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม ทำการบ่มอายุ 7 วัน โดยนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นวัสดุผสมจะมีค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) เพิ่มขึ้น

สำหรับก้อนตัวอย่างที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในตู้อบก้อนตัวอย่างเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ก่อนทดสอบจะนำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ทุกระดับปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันได้ค่าต่ำกว่า 10 ksc

ส่วนกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่ม พบว่าได้ค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) สูงกว่ากรณีใช้แอสฟัลต์อิมัลชันเพียงอย่างเดียว และพบว่าเมื่อปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันเพิ่มขึ้น ค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) มีแนวโน้มลดลง

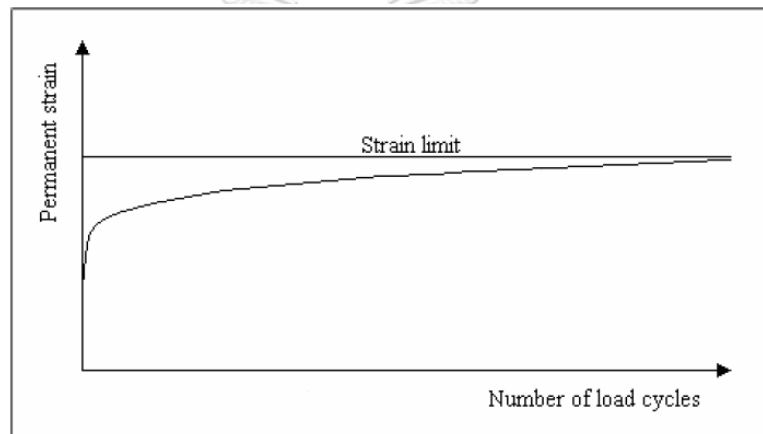
สรุปได้ว่าวัสดุพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มประมาณ 1-2% จากที่ทำการปรับปรุงคุณภาพครั้งแรก ส่วนกรณีที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันและกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมอิมัลชันเป็นสารผสมเพิ่มนั้น ไม่ได้ช่วยทำให้เพิ่มค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) ของวัสดุ

วรุช เลิศไพชญยนต์ (2557) สำหรับการทดลองชั้นที่ 1 ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิม ซึ่งมีการพิจารณาจากค่า Resilient Modulus มีปัจจัย คือ บิทูเมนอิมัลชันชนิด CSS-1 และ CSS-1h สารผสมเพิ่มเป็นปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 หรือฝุ่นหินปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของวัสดุรวมรวม สำหรับการบดอัดก่อนตัวอย่างจะบดอัดที่ 95 และ 100% Modified Compaction และอัตราส่วนผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) เป็น 50:50 และ 25:75% ซึ่งกำหนดระดับความชื้นเท่ากัน พบว่า วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่มีอัตราส่วนผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) เป็น 50:50% ให้ค่า Resilient Modulus ไม่แตกต่างกับวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่มีอัตราส่วนผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับวัสดุชั้นหินคลุกเดิม (RCR) ที่เป็น 25:75% สำหรับชนิดบิทูเมนอิมัลชัน CSS-1 และ CSS-1h ให้ค่า Resilient Modulus ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในส่วนของการใส่สารผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินนั้นจะให้ค่า Resilient Modulus ที่ต่ำกว่าการใส่ปูนซีเมนต์ และการบดอัดที่ 95% Modified Compaction ให้ค่า Resilient Modulus ไม่ต่างอย่างมีนัยสำคัญจากระดับการบดอัดที่ 100% Modified Compaction ที่ระดับความชื้น 95%

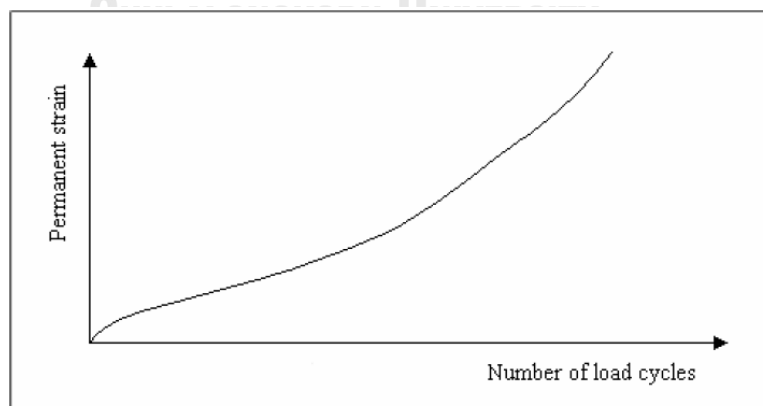
สำหรับการทดลองชั้นที่ 2 ศึกษาถึงปัจจัยด้านปริมาณบิทูเมนอิมัลชันและความชื้นหลังจากการบดตัวอย่างต่อวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำมาปรับปรุงใหม่โดยนำค่า Resilient Modulus และกำลังอัดแบบสามแกนมาพิจารณา สำหรับปริมาณบิทูเมนอิมัลชันที่ใช้อยู่ที่ 2 และ 3% ระดับความชื้นแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับความชื้นธรรมชาติ ระดับแห้ง และระดับแช่น้ำ พบว่า จากการวิเคราะห์ด้านปริมาณบิทูเมนอิมัลชันในระดับหน่วยแรง (loading stage) ที่ 2 จนถึงระดับหน่วยแรง (loading stage) ที่ 15 วัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนอิมัลชันปริมาณ 2% ให้ค่าต่ำกว่าปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน 3% แต่ในระดับหน่วยแรง (loading stage) ที่ 1 เท่านั้นที่ค่า Resilient Modulus ไม่แตกต่างกัน และสำหรับระดับความชื้นในสถานะแห้งจะให้ค่า Resilient Modulus แตกต่างกับระดับความชื้นในสถานะแช่น้ำในทุกๆระดับหน่วยแรง (loading stage)

2.5 การทดสอบสมรรถนะต้านทานแรงกระทำซ้ำ

Melan (1936) เป็นผู้นำเสนอทฤษฎี Shakedown มาอธิบายพฤติกรรมโครงสร้างเป็นคนแรก นับจากนั้นได้มีการนำทฤษฎีมาใช้อย่างกว้างขวางในการอธิบายพฤติกรรมของโครงถักและโครงข้อแข็ง (Truss and Frame Structural) ได้รับแรงกระทำซ้ำ จากนั้น R. W. J. T. r. r. Sharp (1985) ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนน ในระดับหน่วยแรงกระทำที่มีค่าน้อย การยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่สถานะสมดุลหลังจากได้รับการบดอัดในช่วงแรกของแรงกระทำ ดังรูปที่ 7 และสำหรับในระดับหน่วยแรงกระทำที่มีค่ามาก พฤติกรรมการเสียรูปถาวรจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดจนกระทั่งเกิดการพังของวัสดุ ค่าการยุบตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 8

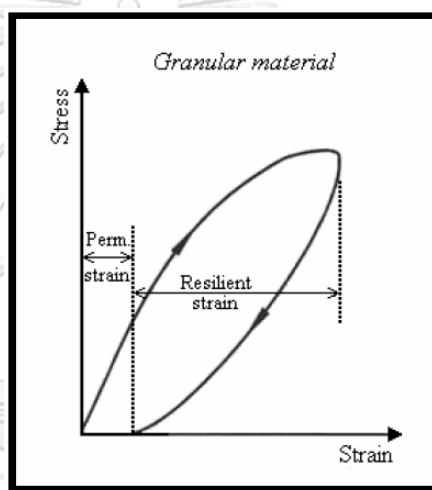


รูปที่ 7 พฤติกรรมการยุบตัวถาวรที่ระดับหน่วยแรงกระทำที่มีสถานะคงที่
ที่มา : Werkmeister (2003)



รูปที่ 8 พฤติกรรมการยุบตัวถาวรที่ระดับหน่วยแรงกระทำที่มีสถานะไม่คงที่
ที่มา : Werkmeister (2003)

Brecciaroli and Kolisoja (2006) โดยทั่วไปวัสดุโครงสร้างทางต้องรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำจากปริมาณการจราจรเป็นจำนวนมากตลอดช่วงอายุการใช้งาน ดังนั้น ผลลัพธ์ด้านการยุบตัวของวัสดุที่ได้รับหน่วยแรงกระทำซ้ำจะถูกกำหนดโดยผลของการยุบตัวที่คืนตัวได้ (Resilient Strain) และผลของการยุบตัวถาวร (Permanent Strain) ซึ่งผลของการยุบตัวที่คืนตัวได้ (Resilient Strain) มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุก ในขณะที่ผลของการยุบตัวถาวร (Permanent Strain) บวกถึงสมรรถนะในระยะยาวของวัสดุ จากคุณลักษณะการการยุบตัวของวัสดุทำให้ในแต่ละรอบของหน่วยแรงกระทำซ้ำวัสดุมีการยุบตัวถาวรสะสมเกิดขึ้นในทุกรอบของแต่ละหน่วยแรงกระทำซ้ำ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของวัสดุไม่เป็นแบบเชิงเส้น สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 พฤติกรรมการยุบตัวของ Granular Material เมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำซ้ำ
ที่มา : (Brecciaroli and Kolisoja (2006))

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียรูปถาวรของ Granular Material มีหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดของหน่วยแรงกระทำซ้ำ ลำดับของขนาดหน่วยแรงกระทำซ้ำที่ตัวอย่างได้รับในการทดสอบ จำนวนรอบหน่วยแรงกระทำซ้ำในการทดสอบ ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง และความหนาแน่นของตัวอย่าง ซึ่งผลของขนาดหน่วยแรงกระทำซ้ำจะแปรผันตรงกับการเสียรูปถาวรของวัสดุ กล่าวคือ เมื่อขนาดของหน่วยแรงกระทำซ้ำที่ตัวอย่างได้รับมีค่ามากขึ้นทำให้การยุบตัวถาวรสะสมของตัวอย่างมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

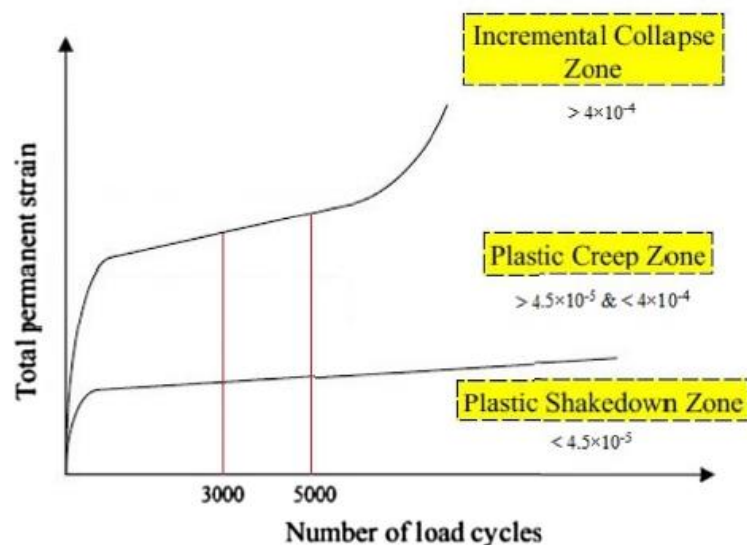
ในการพิจารณาอายุการใช้งานของวัสดุไม่เชื่อมแน่นจากพฤติกรรมการเสียรูปถาวร การทดสอบการยุบตัวถาวรของวัสดุไม่เชื่อมแน่นตามวิธีการทดสอบ EN (2004) ได้กำหนดจำนวนรอบ

การทดสอบที่ 80,000 รอบ แต่ในความเป็นจริงแล้วพฤติกรรมการเสีรูปถาวรของวัสดุมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในแต่ละรอบหน่วยแรงกระทำซ้ำทำให้การเสีรูปถาวรสะสมเป็นไปแบบค่อนข้างช้า ทำให้จำนวนรอบของหน่วยแรงกระทำซ้ำที่ 80,000 รอบอาจไม่เพียงพอในการพิจารณาอายุการใช้งานจากพฤติกรรมการเสีรูปถาวร ซึ่ง Morgan, 1966 ได้ทดสอบทรายสองชนิดด้วยวิธีให้หน่วยแรงกระทำซ้ำโดยให้จำนวนรอบหน่วยแรงกระทำซ้ำจำนวน 1×10^6 รอบ พบว่าเมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นค่าการยุบตัวถาวรยังคงเพิ่มขึ้น และหลังจากการทดสอบ 1×10^5 รอบหน่วยแรงกระทำซ้ำการเพิ่มขึ้นของอัตราการเสีรูปถาวรในแต่ละหน่วยรอบแรงกระทำซ้ำมีลักษณะเป็นเชิงเส้น เขาได้กล่าวถึงค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของการเสีรูปถาวรในแต่ละรอบหน่วยแรงกระทำมีค่าน้อยมากซึ่งอาจไม่ถูกนำมาพิจารณาสำหรับวัตถุประสงค์ในการปฏิบัติงานจริงได้

Ebels (2008) ได้ทำการทดสอบ Triaxial Dynamic Test เพื่อหาค่าความเครียดถาวรสะสมและจำนวนรอบของแรงกระทำมาออกแบบสมการเพื่อพยากรณ์หาค่าการเสีรูปแบบถาวร ซึ่งเมื่อนำสมการไปพยากรณ์หาผลของความเครียดถาวรสะสมของวัสดุที่มีสัดส่วนวัสดุผสมผิวทางเดิม (RAP) 25% พบว่า Tertiary Flow อยู่ระหว่างรอบของแรงกระทำที่ 100,000-1,000,000 รอบ

Barksdale (1972) จากการศึกษาเกี่ยวกับผลของความหนาแน่นต่อพฤติกรรมการเสีรูปถาวรของวัสดุไม่เชื่อมแน่นด้วยวิธีการทดสอบด้วยหน่วยแรงกระทำซ้ำและมีหน่วยแรงล้อมรอบคงที่ พบว่า ตัวอย่างที่มีระดับการบดอัด 100% ของระดับการบดอัดสูงสุด การเสีรูปถาวرن้อยกว่าตัวอย่างที่มีระดับการบดอัด 95% ของระดับการบดอัดสูงสุดในทุกวัสดุที่นำมาทดสอบ

Barksdale (1991) พฤติกรรมการเสีรูปถาวรของวัสดุไม่เชื่อมแน่นเกี่ยวข้องโดยตรงต่อลำดับของหน่วยแรงกระทำซ้ำที่วัสดุได้รับ เมื่อลำดับหน่วยแรงกระทำซ้ำที่ตัวอย่างได้รับในการทดสอบด้วยขนาดหน่วยแรงน้อยไปสู่ระดับหน่วยแรงที่มีขนาดมาก สามารถส่งผลกระทบของพฤติกรรมการเสีรูปถาวรของวัสดุได้ ในทางตรงกันข้ามเมื่อลำดับหน่วยแรงกระทำซ้ำที่ตัวอย่างได้รับเริ่มต้นมีขนาดสูงกว่าหน่วยแรงในลำดับถัดไปทำให้เกิดการยุบตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากลำดับของหน่วยแรงกระทำ สำหรับช่วงของพฤติกรรมเหล่านี้แสดงไว้ในรูปที่ 10 และสามารถอธิบายได้โดยใช้แนวคิดทฤษฎี Shakedown



รูปที่ 10 ช่วงของพฤติกรรม Shakedown

ที่มา : Saberian, Li, Nguyen, and Wang (2018)

Saberian et al. (2018) ได้ใช้ทฤษฎี Shakedown ของ Werkmeister (2004) ที่ได้กำหนดเกณฑ์ช่วงการเสียรูปของพฤติกรรม Shakedown ที่แสดงไว้ในรูปที่ 10 โดยช่วงของ Plastic Shakedown ค่ายุบตัวที่วัสดุไม่สามารถคืนตัวได้ (Permanent Strain) น้อยกว่า 4.5×10^{-5} ส่วนช่วงของ Plastic Creep ค่ายุบตัวที่วัสดุไม่สามารถคืนตัวได้ (Permanent Strain) มากกว่า 4.5×10^{-5} แต่ไม่เกิน 4×10^{-4} และช่วงของ Incremental Collapse ค่ายุบตัวที่วัสดุไม่สามารถคืนตัวได้ (Permanent Strain) เกินกว่า 4×10^{-4} ซึ่งสามารถหาค่าได้จากค่าการยุบตัวสะสมถาวรในรอบที่ 5,000 ลบด้วย รอบที่ 3,000

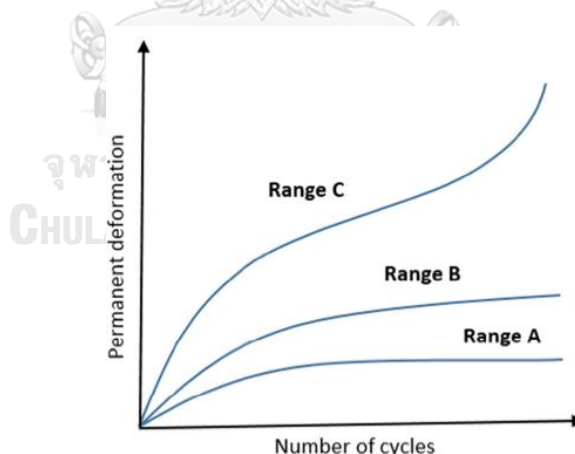
Maree (1982) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของหินคลุกภายใต้แรงกระทำซ้ำและแรงดันด้านข้างคงที่ โดยพิจารณาถึงระดับหน่วยแรงกระทำ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงกระทำที่ให้กับตัวอย่างต่อกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ ($\sigma_d / \sigma_{1,f}$) พบว่าที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำต่ำกว่า 0.58 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ พฤติกรรมตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะมีลักษณะเช่นเดียวกับสถานะสามารถคงรูปได้เรียกระดับหน่วยแรงกระทำนี้ว่า “Maximum safe repeated deviator stress

ไพศาล บุษยไชยสอน (2560) การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาปัจจัยด้านแรงดันล้อมรอบ (confining pressure) รูปแบบและความถี่หน่วยแรงกระทำในแนวตั้งแตกต่างกัน ที่มีต่อความต้านทานการเสียรูปจากการได้รับแรงกระทำซ้ำ พบว่า ผลของแรงดันล้อมรอบในการทดสอบตัวอย่าง

ด้วยหน่วยแรงกระทำซ้ำรูปแบบคลื่น sine ต่อเนื่องตามวิธีการทดสอบของ EN 13286-7:2004 (EN, 2004) ความถี่ 5 Hz ไม่ทำให้พฤติกรรมการเสียรูปถาวรของตัวอย่างแตกต่างจากการทดสอบที่ไม่มีแรงดันล้อมรอบอย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนของรูปแบบและความถี่ของหน่วยแรงกระทำ พบว่า หน่วยแรงกระทำซ้ำรูปแบบคลื่น haversine ตามวิธีการทดสอบของ NCHRP (AASHTO, 2007) ซึ่งมีช่วงให้แรงกระทำ 0.1 วินาทีและช่วงพักแรงกระทำ 0.9 วินาที ความถี่ 1 Hz มีพฤติกรรมการเสียรูปถาวรความสอดคล้องกับรูปแบบของหน่วยแรงกระทำซ้ำรูปแบบคลื่น sine ต่อเนื่องตามวิธีการทดสอบของ EN 13286-7:2004 (EN, 2004) ความถี่ 5 Hz ในขณะที่รูปแบบคลื่น sine ต่อเนื่องตามวิธีการทดสอบของ EN 13286-7:2004 (EN, 2004) ความถี่ 1 Hz มีพฤติกรรมการเสียรูปถาวรไม่สอดคล้องกับวิธีการทดสอบทั้ง 2 รูปแบบข้างต้นที่ดังกล่าว

สำหรับการทดลองส่วนที่ 2 ได้ทำการทดสอบก้อนตัวอย่างโดยกำหนดค่าความถี่ของหน่วยแรงกระทำและจะทำการเปลี่ยนระดับของหน่วยแรงกระทำเพื่อต้องการทราบถึงพฤติกรรมการเสียรูปถาวรตามทฤษฎี Shakedown ที่ Sharp (1985) ได้นำเสนอไว้ในการออกแบบทาง บนพื้นฐานของแนวคิดทฤษฎี Shakedown ในการศึกษาของ Werkmeister (2004) ได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบพฤติกรรมการเสียรูปถาวรของวัสดุ unbound granular ทั้ง 3 รูปแบบซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับของหน่วยแรงกระทำซ้ำ



รูปที่ 11 พฤติกรรมการเสียรูปถาวรแต่ละรูปแบบโดยมีความสัมพันธ์กับระดับหน่วยแรงกระทำที่ตัวอย่างได้รับ

ที่มา : (Alnedawi, Nepal, & Al-Ameri, 2019)

จากผลการทดลองการเสีรูปลถวหรือควมล้ำของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และ 3% โดยนำหนักของมวลรวม โดยการจำลองปริมาณการจรจรด้วยหน่วยแรงกระทำซ้ำ มีการเปลี่ยนระดับหน่วยแรง 3 ระดับคือ 550 kPa, 700 kPa และ 900 kPa พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 900 kPa วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และ 3% เกิดการวิบัติแต่เมื่อพิจารณาจากค่า minimum strain rate แล้ววัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% มีความสามารถต้านทานการเสีรูปลถวหรือควมล้ำได้ดีกว่าวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และปริมาณรอบของหน่วยแรงกระทำซ้ำที่วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% รองรับได้มีปริมาณมากกว่าวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และในระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 550 kPa และ 700 kPa ซึ่งวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และ 3% มีพฤติกรรมการเสีรูปลถวอยู่ในสถานะสามารถงรูปได้ (stable state) เมื่อค่าการยุบตัวถวระสมไม่เกิน 1% strain และค่า strain rate ต่ำกว่า 0.004 และ 0.4 ตามลำดับ

สำหรับโมดูลัสการคืบตัว (M_r) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกหลังจากนั้นมีค่าลดลงจนตัวอย่างเกิดการวิบัติทั้งวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และ 3% โดยวัสดุจะมีการเสีรูปลถวอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนของโมดูลัสการคืบตัว (M_r) ต่อโมดูลัสการคืบตัวสูงสุดของแต่ละตัวอย่างอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 สำหรับวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และร้อยละ 90 วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุงทางก่อนการวิบัติได้

Cyclic Load Triaxial Test

มาตรฐาน EN (2004) เป็นการทดสอบที่มีสองลักษณะคือ (1) Single Stress Loading จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปลถวของตัวอย่างภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำเพียงค่าเดียว และ (2) Multi-Stage Loading เป็นการศึกษาหาหน่วยแรงกระทำที่มากที่สุดที่ไม่ควรเกิน เพื่อต้องการหลีกเลี่ยงการเกิดการเสีรูปลถว

สำหรับ Single Stress Loading จะแบ่งการทดสอบเป็น 2 แบบ ได้แก่

1. Method A เป็นวิธีการทดสอบโดยให้แรงกระทำในแนวแกน (Axial Load) และความดันภายใน (Confining Pressure) จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ (Cycle) โดยจะให้แรงกระทำจำนวน 80,000 รอบหรือค่าการยุบตัวมากกว่า 2% หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดหาปริมาณน้ำ
2. Method B จะทำการทดสอบเหมือนกับ Method A แต่จะกำหนดความดันภายในให้มีค่าคงที่

สำหรับ Multi-Stage Loading จะทำการทดสอบโดยให้หน่วยแรงกระทำเป็นรอบตามตารางที่ 3 สำหรับวัสดุปูในชั้นพื้นทางที่อยู่ใต้ชั้นผิวทางที่บาง และให้หน่วยแรงกระทำตามตารางที่ 4 สำหรับวัสดุชั้นรองผิวทางหรือวัสดุใต้ชั้นผิวทางที่มีความหนา โดยจะให้แรงกระทำกับตัวอย่างเป็นจำนวน 10,000 รอบต่อ 1 เส้นของหน่วยแรงกระทำ โดยเริ่มต้นจาก sequence 1 และเมื่อทดสอบ sequence 1 เสร็จหรือค่าความเครียดถึง 0.5% ถึงจะทำการทดสอบ sequence ลำดับต่อไป แล้วจึงนำตัวอย่างมาหาปริมาณน้ำ

ตารางที่ 3 Stress levels สำหรับการทดสอบ Multi-Stage Loading (high stress level)

Sequence 1			Sequence 2			Sequence 3			Sequence 4			Sequence 5		
Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa	
constant	min	max	constant	min	max	constant	min	max	constant	min	max	constant	min	max
20	0	50	45	0	100	70	0	120	100	0	200	150	0	200
20	0	80	45	0	180	70	0	240	100	0	300	150	0	300
20	0	110	45	0	240	70	0	320	100	0	400	150	0	400
20	0	140	45	0	300	70	0	400	100	0	500	150	0	500
20	0	170	45	0	360	70	0	480	100	0	600	150	0	600
20	0	200	45	0	420	70	0	560						

ที่มา : EN (2004)

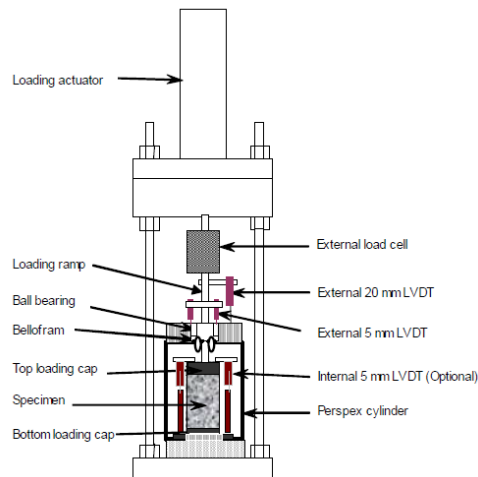
ตารางที่ 4 Stress levels สำหรับการทดสอบ Multi-Stage Loading (low stress level)

Sequence 1			Sequence 2			Sequence 3			Sequence 4			Sequence 5		
Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa		Confining stress, σ_3 kPa	Deviator stress, σ_d kPa	
constant	min	max	constant	min	max	constant	min	max	constant	min	max	constant	min	max
20	0	20	45	0	60	70		80	100	0	100	150	0	100
20	0	40	45	0	90	70	0	120	100	0	150	150	0	200
20	0	60	45	0	120	70	0	160	100	0	200	150	0	300
20	0	80	45	0	150	70	0	200	100	0	250	150	0	400
20	0	100	45	0	180	70	0	240	100	0	300	150	0	500
20	0	120	45	0	210	70	0	280	100	0	350	150	0	600

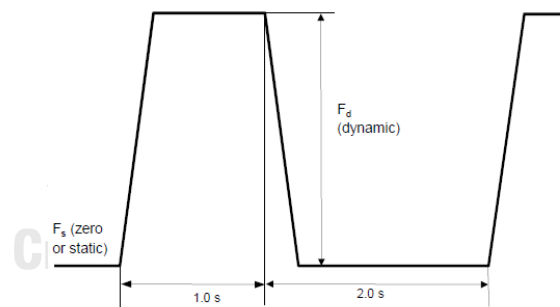
ที่มา : EN (2004)

มาตรฐาน Austroads AGPT/T053 Austroads Working Group (2007) ทำการทดสอบพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวรโดยกำหนดขนาดใหญ่สุดของอนุภาคไม่เกิน 19 มิลลิเมตร ใช้หน่วยแรงล้อมรอบมีค่าคงที่ ทดสอบภายใต้เงื่อนไขยอมให้มีการไหลออกของน้ำในตัวอย่าง ไม่มีการวัดความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Pore Pressure) และการเสียรูปแบบถาวรคำนวณหาจากความเครียดถาวรใน

แนวดิ่งที่หน่วยแรงกระทำซ้ำ 3 ระดับ ในแต่ละหน่วยแรงกระทำซ้ำในแนวดิ่งจะทำการทดสอบจำนวน 10,000 รอบ โดยองค์ประกอบของอุปกรณ์ทดสอบแรงกระทำซ้ำสามแกนจะแสดงในรูปที่ 12 และลักษณะของคลื่นแรงกระทำจะเป็นไปตามลักษณะ ดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 องค์ประกอบของอุปกรณ์ทดสอบแรงกระทำซ้ำสามแกน
ที่มา : Austroads Working Group (2007)



รูปที่ 13 แรงกระทำที่ให้กับตัวอย่าง

ที่มา : Austroads Working Group (2007)

การเลือกขนาดของหน่วยแรงกระทำซ้ำ 3 ระดับจะมีหน่วยแรงล้อมรอบคงที่สำหรับการทดสอบหาการเสียรูปถาวรแสดงได้ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 Stress levels สำหรับการเสียรูปถาวรตามลักษณะการใช้งานของแต่ละวัสดุ

Permanent Deformation Stress Levels						
Stress Stage Number	Base		Upper Subbase		Lower Subbase	
	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)
1	50	350	50	250	50	150
2	50	450	50	350	50	250
3	50	550	50	450	50	350

ที่มา : Austroads Working Group (2007)

โดยจะเลือกตามลักษณะการใช้งานของวัสดุที่นำมาทดสอบแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. Base materials (ระดับใต้ชั้นผิวทางตั้งแต่ 0 ถึง 150 มิลลิเมตร)
2. Upper subbase material (ระดับใต้ชั้นผิวทางตั้งแต่ 150 ถึง 250 มิลลิเมตร)
3. Lower subbase material (ระดับใต้ชั้นผิวทางมากกว่า 250 มิลลิเมตร)

มาตรฐานการทดสอบของ NZTA T15 (2014) การทดสอบหาการเสียรูปถาวรของวัสดุที่ไม่เชื่อมประสาน จะทำการทดสอบด้วย Repeated Load Triaxial (RLT) โดยจะเตรียมตัวอย่างที่มีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร และมีการทดสอบ 2 แบบคือ (1) Drain Test และ (2) Undrian Test โดยสำหรับการเตรียมตัวอย่างการทดสอบแบบ Undrian Test จะต้องนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับวัสดุที่ไม่เชื่อมประสานและ 24 ชั่วโมงสำหรับวัสดุที่ได้รับการปรับปรุง ใน การทดสอบจะให้หน่วยแรงกระทำซ้ำ 6 ระดับขึ้นโดยมีแรงดันภายในคงที่ดังตาราง 6 รูปแบบของ แรงกระทำเป็นแบบ Continuous Haversine ความถี่ 4 รอบต่อวินาที และในแต่ละระดับหน่วยแรงจะทำการทดสอบจำนวน 50,000 รอบ

ตารางที่ 6 การทดสอบแรงกระทำซ้ำ 6 ระดับของการทดสอบ Repeated Load Triaxial (RLT)

RLT Testing Stress Stage	A	B	C	D	E	F
Deviator Stress - q_{max} (kPa) (Cyclic Vertical Stress)	90.0	100.0	180.0	330.0	420.0	550.0
Mean Stress - p_{max} (kPa)	150.0	75.0	150.0	250.0	250.0	233.3
Cell Pressure, σ_{3max} (kPa)	120.0	41.7	90.0	140.0	110.0	50.0
Major Principal Vertical Stress, σ_{1max} (kPa)	210.0	141.7	270.0	470.0	530.0	600.0
Cyclic Vertical Loading Speed	Haversine at 4Hz					
Number of Loads (M)	50,000 for each test stage					
RLT Test Apparatus (Vertical Loading Pulse)	To suit available RLT pneumatic or hydraulic equipment and control software in New Zealand Haversine pulse at 4 times a second (4Hz) using pneumatic or hydraulic equipment*					
Triaxial Cell and Instrumentation	External load cell and 2 external displacement transducers mounted between loading caps to measure whole-sample strain Use air, water or silicon in the cell to apply confining pressure					
Drainage Condition	Drained condition (no pore pressure measurement), leave valves open during testing					
Record and Report Data Electronically in Microsoft Excel (see Table 3 for definitions)	Items to record and/or calculate are those listed in Table 3 which include: permanent strain, elastic/resilient strain, resilient modulus, specimen height, cell pressure, maximum and minimum cyclic vertical/deviatoric stress at the following load intervals for each RLT testing stage: 1-50; 91-100; 191-200; 391-400; 991-1000; 2491-2500; 4991-5000; 7491-7500; 9991-10000; 12491-12500; 14991-15000; 17491-17500; 19991-20000; 22491-22500; 24991-25000; 27491-27500; 29991-30000; 32491-32500; 34991-35000; 37491-37500; 39991-40000; 42491-42500; 44991-45000; 47491-47500; 49991-50000					

ที่มา : NZTA T15 (2014)

K. Jenkins and Ebels (2007) ทำการทดสอบค่าการยุบตัวถาวรจะเตรียมตัวอย่างที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบโดยให้หน่วยแรงกระทำรูปแบบ Noncontinuous Haversine โดยจะมีช่วงให้แรงกระทำ 0.1 วินาที ช่วงพักแรงกระทำ 0.9 วินาที ความถี่ของแรงกระทำอยู่ที่ 1 Hz จะทดสอบในแต่ละระดับของแรงกระทำเป็นจำนวน 1,000,000 รอบหรือค่าการยุบตัวถาวรถึง 4% โดยมีลำดับการทดสอบของแต่ละหน่วยแรงตามตารางที่ 7 ซึ่งจากวิธีการทดสอบหาค่าการเสียรูปถาวรตามมาตรฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะสามารถสรุปรูปแบบการทดสอบของแต่ละมาตรฐานได้ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ลำดับการทดสอบของแต่ละหน่วยแรงในการทดสอบการยุบตัวของตัวถาวรแบบสามแกน

Loading sequence	Confining pressure [kPa]	Total deviator stress
1	100	$0.65 \times \sigma_{d,f(100)}$
2	100	$0.5 \times \sigma_{d,f(100)}$
3	100	$0.35 \times \sigma_{d,f(100)}$
4	50	$0.65 \times \sigma_{d,f(100)}$
5	50	$0.5 \times \sigma_{d,f(100)}$
6	50	$0.35 \times \sigma_{d,f(100)}$

ที่มา : K. Jenkins and Ebels (2007)

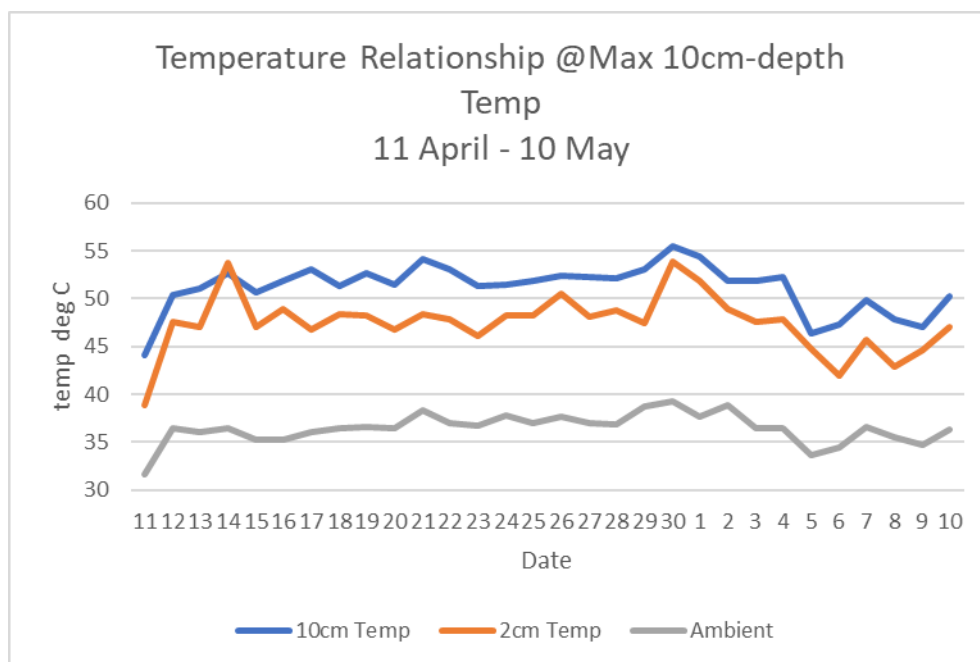
ตารางที่ 8 รูปแบบการทดสอบของแต่ละมาตรฐาน

Standard	EN				AS	NZ	South Africa, NCHRP
	Single Stage loading		Multiple-stage loading				
	Method A	Method B	Method A	Method B			
Condition vertical stress	Cyclic	Cyclic	Cyclic	Cyclic	Cyclic	Cyclic	Cyclic
Condition confining pressure	Cyclic	constant	Cyclic	constant	constant	constant	constant
Number of cycles (per stress path)	80,000	80,000	10,000	10,000	10,000	50,000	1,000,000
Wave shape loading	Haversine				Rectangular	Haversine	Haversine
Loading speed (Hz)	0.2-10				0.3	4	1
specimen (cylindrical)	5 times the maximum particle size (dia.) twice the diameter (height)				100 mm (dia.) 200 mm (height)	150 mm (dia.) 300 mm (height)	150 mm (dia.) 300 mm (height)

ที่มา : K. Jenkins and Ebels (2007)

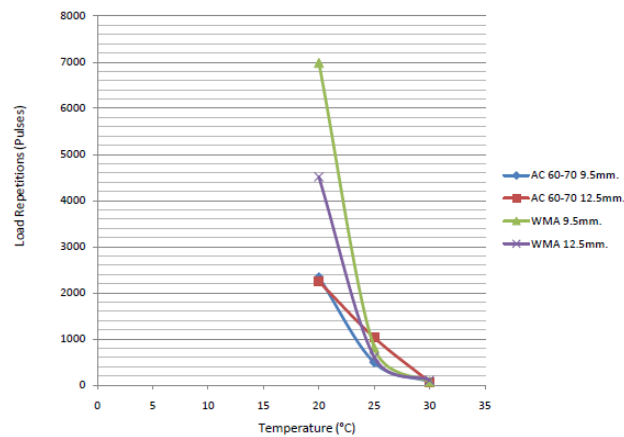
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านผลของอุณหภูมิที่มีต่อวัสดุชั้นพื้นทาง

วรุต เลิศไพฑูรย์ (2557) ได้เก็บข้อมูลอุณหภูมิในช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม พ.ศ. 2555 ซึ่งผู้วิจัยจะนำมาใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ โดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ คือ 51.17 องศาเซลเซียส แสดงตามรูปที่ 14



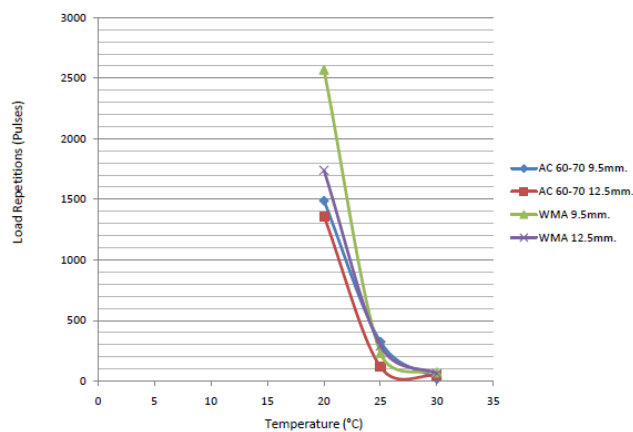
รูปที่ 14 อุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาของทางหลวงหมายเลข 2262 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 2076 (ม่วงหมาก) บรรจบกับทางหลวงหมายเลข 226 อ.สำโรงทาบ จ.สุรินทร์
ที่มา : วรุฒ เลิศไพชญยนต์ (2557)

ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติความล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดต่างๆ ได้แก่ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) AC60/70 9.5 mm, 12.5 mm และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 9.5 mm, 12.5 mm โดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Test) พบว่า ที่ระดับ Stress เท่ากับ 400 kPa ของผิวทางที่ศึกษา ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 9.5 mm สามารถต้านทานความล้าได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) AC60/70 9.5 mm และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 12.5 mm สามารถต้านทานความล้าได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) 12.5 mm ดังแสดงรูปที่ 15



รูปที่ 15 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Load Repetitions กับ Temperature ที่ระดับ Stress เท่ากับ 400 kPa ของผิวทางที่ศึกษา
ที่มา : ธีฎญารัตน์ เผือกหอม (2557)

และที่ระดับ Stress เท่ากับ 500 kPa ของผิวทางที่ศึกษา พบว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 9.5 mm สามารถต้านทานความล้าได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) AC60/70 9.5 mm และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 12.5 mm สามารถต้านทานความล้าได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) 12.5 mm ดังแสดงรูปที่ 16



รูปที่ 16 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Load Repetitions กับ Temperature ที่ระดับ Stress เท่ากับ 500 kPa ของผิวทางที่ศึกษา
ที่มา : ธีฎญารัตน์ เผือกหอม (2557)

ผลการทดสอบคุณสมบัติความล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดต่างๆ พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการต้านทานความล้าหรือค่าความทนทานต่อ Load Repetitions ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำผิวทางจะสามารถต้านทานความล้าได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง

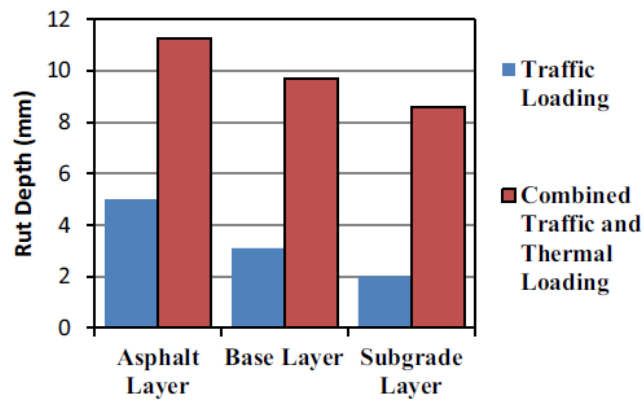
ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าความต้านทานหรือทนทานต่อค่า Load Repetitions เรียงลำดับจากน้อยที่สุดไปมากที่สุด คือ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) AC60/70 12.5 mm แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) 9.5 mm แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 12.5 mm และผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) WMA 9.5 mm

ดังนั้น จะเห็นได้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) สามารถต้านทานความล้าได้ดีกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete: HMA) ซึ่งหากเลือกใช้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt Concrete: WMA) มาทำถนนนอกจากจะสามารถต้านทานความล้าเนื่องจากแรงกระทำของน้ำหนักรถทุกที่กระทำซ้ำในสายทางได้ดีแล้วยังสามารถทำให้ประหยัดพลังงาน ลดควันและคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการผลิตอีกด้วย

Alkaissi (2020) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความเสียหายจากการเกิดร่องล้อ (Rutting) ของถนนลาดยาง (Flexible pavement) ซึ่งใช้โปรแกรม ABAQUS ver.6.12.1 finite element และมีการกำหนด 2 Models โดยที่ Model แรกนั้นจะให้เงื่อนไขจากโหลดการจราจร (Traffic loading) เพียงอย่างเดียวและ Model ที่ 2 จะให้เงื่อนไขจากโหลดการจราจรและด้านอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญของทั้งความร้อนและสภาพการจราจรต่อความเสียหายจากการเกิดร่องล้อของถนนลาดยาง และอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้การเกิดร่องล้อที่สูงขึ้น 2.29, 3.1 และ 4.3 เท่า สำหรับชั้นผิวทาง (Asphalt layer) ชั้นพื้นทาง (Base layer) และชั้นดินคันทางบดอัดแน่น (Subgrade layer) ตามลำดับ

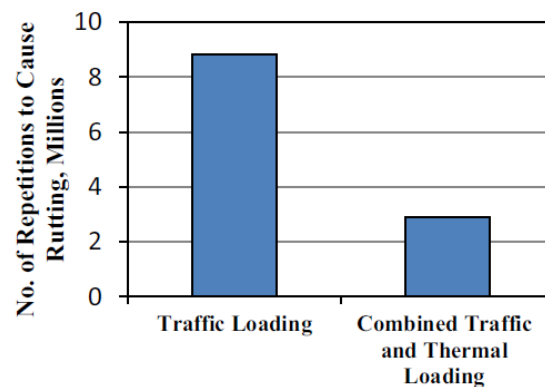
โดยสำหรับ Model แรกนั้นที่ให้โหลดการจราจรเพียงอย่างเดียว ซึ่งความเครียด (Strain) ในแนวตั้งที่สูงที่สุดจะรวมอยู่ที่ด้านบนของ Subgrade layer แต่สำหรับ Model ที่ 2 ค่าวิกฤติสูงสุดเหล่านี้จะขยายไปถึง Base layer ภายใต้เงื่อนไขจากโหลดการจราจรและความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่ก่อให้เกิด Strain ที่สูงขึ้นด้วย โดยอุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 45-55 องศาเซลเซียส ผลที่เกิดขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าใน Model ที่มีเงื่อนไขทั้งโหลดการจราจรและความร้อนมาเกี่ยวข้องนั้น จำนวนครั้งสูงสุดของแรงกระทำซ้ำ (Repetition) ต่อความเสียหายจากการเกิดร่องล้อจะมีค่าน้อยกว่า 3 เท่า ถ้าเทียบกับ Model ที่ใช้เงื่อนไขโหลดการจราจรเพียงอย่างเดียว

สำหรับความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อของถนนลาดยาง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่สูงขึ้นรวมทั้งการประยุกต์ใช้โหลดจากการจราจร นอกจากนี้ยังได้รับความเสียหายสูงขึ้นภายใต้เงื่อนไขความร้อนและจากโหลดการจราจรเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่มีโหลดการจราจรเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 17 ความลึกความเสียหายจากการเกิดร่องล้อ (Rut Depth)

ที่มา : Alkaissi (2020)



รูปที่ 18 จำนวนรอบของแรงกระทำซ้ำ (Number of Repetitions)

ที่มา : Alkaissi (2020)

2.7 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, Mr)

สามารถวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, Mr) จากอัตราส่วนของหน่วยแรงกระทำซ้ำ (Deviator stress, σ_d) กับการยุบตัวที่วัสดุสามารถคืนตัวได้ (Resilient strain, ϵ_r) ดังสมการที่ 3-1

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2-1)$$

โดยที่ M_r = ค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus)
 σ_d = อัตราส่วนของหน่วยแรงกระทำซ้ำ (Deviator stress)
 ϵ_r = การยุบตัวที่วัสดุสามารถคืนตัวได้ (Resilient strain)

2.8 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate)

สามารถวิเคราะห์หาค่า Strain rate ได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดการยุบตัวถาวร (Permanent strain) ในแต่ละรอบหน่วยแรงกระทำซ้ำ โดยผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) มีการเปลี่ยนแปลงค่า Strain rate ในลักษณะที่ลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไปจนถึงจุด minimum strain rate จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนวัสดุเกิดความเสียหายจนไม่สามารถคงรูปได้ ดังสมการที่ 3-2

$$\text{Strain rate}_i = \frac{(\epsilon_{p,i}) - (\epsilon_{p,i-1})}{N_{\text{cycle}}} \quad (2-2)$$

โดยที่ $\epsilon_{p,i}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดการยุบตัวถาวร (Permanent strain) รอบแรงกระทำที่ i

$\epsilon_{p,i-1}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดการยุบตัวถาวร (Permanent strain) รอบแรงกระทำที่ i-1

N_{cycle} = จำนวนรอบแรงกระทำซ้ำตั้งแต่รอบที่ i ถึง i-1

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) ใช้และไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงคุณภาพร่วมประกอบไปด้วยวัสดุโครงสร้างชั้นผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) และวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR) โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงขีดจำกัด (Stress Limit) ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแบบผสมเย็น เพื่อที่จะสามารถรองรับปริมาณการจราจร เมื่อวัสดุชั้นผิวทางได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นจนสามารถส่งความร้อนถึงชั้นพื้นทาง ซึ่งปัจจัยด้านปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน, ปริมาณปูนซีเมนต์, ระดับอุณหภูมิ และขนาดของแรงกระทำซ้ำ จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของวัสดุ อันได้แก่ กำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด (Unconfined Compressive Strength, UCS), การเสียรูปถาวรหรือความล้า (Permanent deformation or Fatigue) และโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, M_r) เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยและพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุ BSM จะต้องมี การเตรียมอุปกรณ์ เครื่องทดสอบ เครื่องบันทึกผล รวมถึงวัสดุมวลรวม แล้วจึงมาศึกษาตัวแปรต่างๆ ในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการกำหนดปัญหา และการวางแผนการออกแบบงานวิจัย, การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ และทำการทดสอบ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของวัสดุ BSM รวมถึงการติดตั้งและตั้งค่าอุปกรณ์การทดสอบ โดยมีการทดสอบหลักอยู่ 2 การทดสอบ ประกอบไปด้วย การทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด (Unconfined Compressive Strength Test) และ การทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ (Cyclic Load Test) หลังจากทำการทดสอบเสร็จจึงได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การกำหนดปัญหาและการวางแผนการออกแบบงานวิจัย

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า มีการศึกษาถึงคุณสมบัติของโครงสร้างทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยสารปรับปรุงคุณภาพหลายชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์, โฟมบิทูเมน และบิทูเมนอิมัลชัน โดยได้มีการหาปริมาณที่ดีที่สุดของสารปรับปรุงคุณภาพ จนสามารถทำให้วัสดุมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น อีกทั้งยังมีการศึกษาสัดส่วนระหว่าง RAP กับ RCR ในหลายสัดส่วนอีกเช่นกัน ทั้งนี้ ยังไม่ค่อยมีผลการศึกษาถึงระดับอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยสารปรับปรุง

คุณภาพต่างๆ เนื่องจากอุณหภูมินั้นน่าจะส่งผลต่อคุณสมบัติด้านวิศวกรรมที่สำคัญไม่น้อยกว่าปัจจัยที่ได้กล่าวมา จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

การวางแผนและออกแบบงานวิจัยครั้งนี้ได้จำลองสภาพชั้นพื้นทางของโครงสร้างทางที่ได้รับ การปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ใช้น้ำและไม้น้ำปูนซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงคุณภาพร่วม รวมถึง การจำลองสภาวะการวิ่งผ่านของน้ำหนักรถบรรทุก โดยอาศัยแรงกระทำจากเครื่องทดสอบกระทำซ้ำๆ ต่อชั้นพื้นทาง ซึ่งเป็นการตั้งค่าอุปกรณ์การทดสอบจากภายในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการบันทึกข้อมูล จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผ่านการเก็บข้อมูลจากเครื่องบันทึกแรงกระทำจากเครื่องทดสอบ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรของวัสดุ BSM เมื่อชั้นพื้นทางได้รับความร้อนจากชั้นผิวทาง จนทำให้คุณสมบัติของวัสดุ BSM เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการทดสอบนั้นจะประกอบไปด้วยวัสดุ BSM ผสมด้วยสารปรับปรุงคุณภาพบิทูเมนอิมัลชันและ ปูนซีเมนต์ และวัสดุ BSM ผสมด้วยสารปรับปรุงคุณภาพบิทูเมนอิมัลชันเพียงอย่างเดียว ในระดับ อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการอ้างอิงและในเชิงการเปรียบเทียบ

ในการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM (Unconfined Compressive Strength Test) ทำให้ทราบถึงค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ อันเป็น ประโยชน์ต่อการนำผลที่ได้ไปใช้ต่อในส่วนของการทดสอบการเสีรูปลถารภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ (Cyclic Load Test) ในการพิจารณาหาระดับของหน่วยแรงกระทำซ้ำ (Stress Level) ที่วัสดุ BSM สามารถอยู่ในสถานะคงที่ได้ อีกทั้งทำให้ทราบถึงแนวโน้มของอิทธิพลจากปัจจัยที่ศึกษาว่าวัสดุ BSM จะมีทิศทางต่อปัจจัยต่างๆ อย่างไร

การทดสอบการเสีรูปลถารภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ ทำการเลือกรูปแบบของหน่วยแรง กระทำตามวิธีทดสอบ Continuous Haversine ความถี่ 5 Hz เนื่องจากผลการทดสอบที่ตัวอย่าง สามารถรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ใกล้เคียงกับวิธีการทดสอบ Noncontinuous Haversine ความถี่ 1 Hz จึงสามารถประหยัดเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น 6-12 ชั่วโมงต่อการทดสอบ 1 ตัวอย่าง (ไพศาล บัญไชยสอน, 2560)

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยในการพิจารณาหน่วยแรงดันล้อมรอบขณะที่ทำการ ทดสอบการเสีรูปลถารภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ จะต้องมียุอุปกรณ์ในการทดสอบเพิ่มเติม ได้แก่ เครื่องกำเนิดหน่วยแรงล้อมรอบ (Cell Pressure) และมาตรวัดแรงดัน (Pressure Gauge) ผล การศึกษา พบว่า รูปแบบหน่วยแรงกระทำซ้ำตามวิธี Continuous Haversine ความถี่ 5 Hz และมี

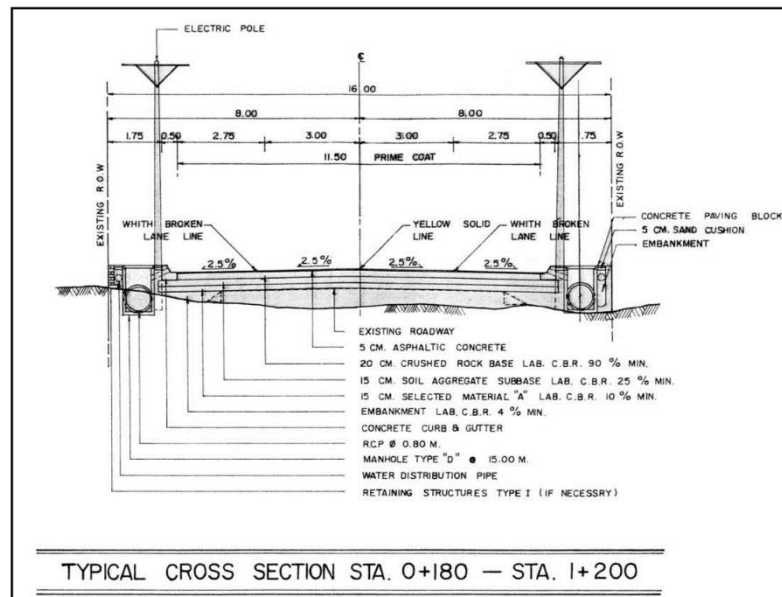
หน่วยแรงดันล้อมรอบขนาด 75 kPa ให้ผลของจำนวนรอบแรงกระทำซ้ำที่ตัวอย่างสามารถรับได้ไม่แตกต่างกับการไม่มีหน่วยแรงดันล้อมรอบ (ไพศาล ปุ้ยไชยสอน, 2560) ดังนั้น ได้เลือกทำการทดสอบรูปแบบหน่วยแรงกระทำซ้ำตามวิธี Continuous Haversine ความถี่ 5 Hz โดยไม่มีหน่วยแรงดันล้อมรอบ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดต้นทุนด้านอุปกรณ์การทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้น

การทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการยุบตัวของวัสดุ BSM ประกอบไปด้วยการยุบตัวที่วัสดุสามารถคืนตัวได้ (Resilient Strain) และการยุบตัวที่วัสดุไม่สามารถคืนตัวได้ (Permanent Strain) อีกทั้งทำให้ทราบถึงค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุ BSM ซึ่งค่าโมดูลัสการคืนตัวแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ โดย (ไพศาล ปุ้ยไชยสอน, 2560) ได้จำลองน้ำหนักบรรทุกทุกเพลามาตรฐาน 18,000 ปอนด์ ทำให้เกิดหน่วยแรงแนวตั้งสูงสุดที่ผิวด้านบนของชั้นพื้นทางของวัสดุ BSM เท่ากับ 550 kPa ที่อุณหภูมิผิวทาง 37.5 องศาเซลเซียส และจะเพิ่มเป็น 700 kPa ที่อุณหภูมิผิวทาง 50 องศาเซลเซียส ดังนั้น จากการทดสอบยังทำให้ทราบถึงขีดจำกัด (Stress Limit) ที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้เมื่อได้รับอิทธิพลความร้อนจากชั้นผิวทางที่ส่งผลมายังชั้นพื้นทาง โดยจะทำการทดสอบอยู่ที่ 1,000,000 รอบ หรือค่ายุบแนวตั้งของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 5% ของความสูงตัวอย่างจึงหยุดการทดสอบ

ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของผลกระทบจากปัจจัย ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน, ปริมาณปูนซีเมนต์, ระดับอุณหภูมิ และขนาดของหน่วยแรงกระทำซ้ำ ที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

3.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

วัสดุโครงสร้างทางเดิมถูกขุดไถจากทางหลวงหมายเลข 2262 ตอนแยกทางหลวงหมายเลข 2076 (ม่วงหมาก) บรรจบกับทางหลวงหมายเลข 226 อ.สำโรงทาบ จ.สุรินทร์ (เริ่มต้นก่อสร้างครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2539) โดยตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างอยู่ช่วงกม. 1 โดยประมาณ มีลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 19 โดย (วรุช เลิศไพชยนต์, 2557) ได้นำกลับมาห้องปฏิบัติการภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร เพื่อดำเนินการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน โดยจะทำการทดสอบหาขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ขนาดคละที่ได้จะถูกนำมาอ้างอิงในการผสมวัสดุผิวทางเดิมกับวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม เพื่อใช้ในการผลิตก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด



รูปที่ 19 ลักษณะภาพตัดขวางของทางหลวงหมายเลข 2262

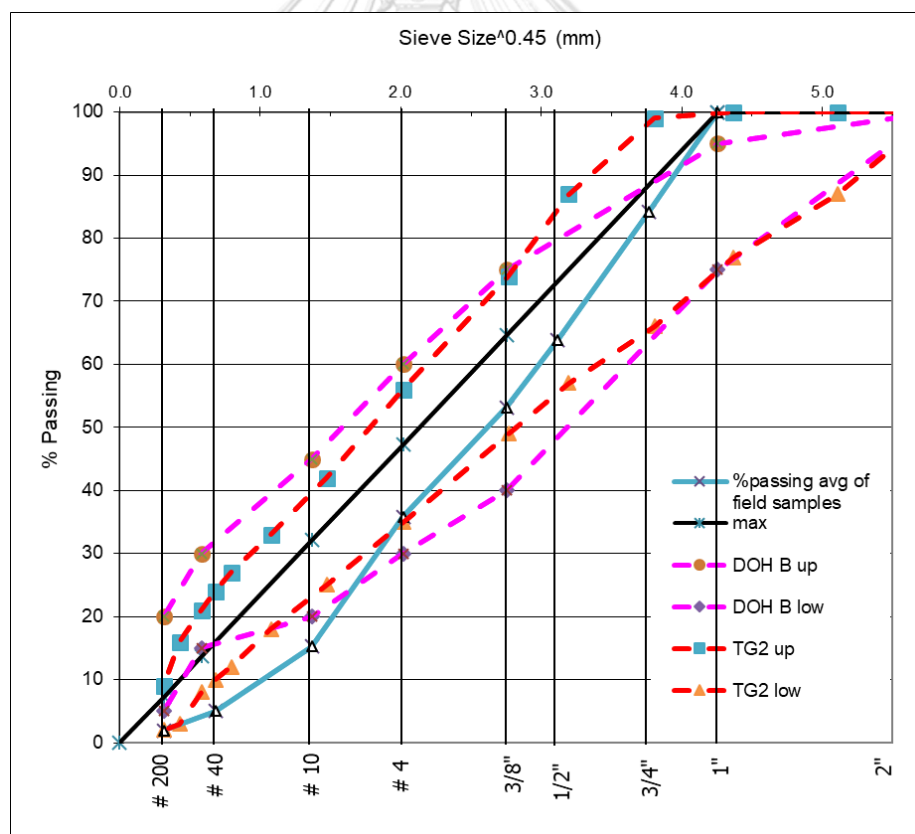
ที่มา : (กรมทางหลวง แขวงทางหลวงสุรินทร์ สำนักทางหลวงที่ 7 (อุบลราชธานี), 2539)

3.2.1 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นวัสดุโครงสร้างทางเดิมในชั้นผิวทาง (RAP) และวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (RCR) ในสัดส่วน 25:75 ซึ่งเป็นตัวแทนของการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยให้ชั้นผิวทางเดิมมีความหนา 5 เซนติเมตร จากความหนารวม 20 เซนติเมตร โดยขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมหนา 20 เซนติเมตร ที่เก็บตัวอย่างจากในสนามจำนวน 3 ตัวอย่างของ (วรุช เลิศไพชญยนต์, 2557) พบว่า วัสดุโครงสร้างทางเดิมมีขนาดเม็ดใหญ่ที่สุดถึง 50 มิลลิเมตร และมีขนาดคละที่ค่อนข้างหยาบ (Coarse Grade) โดยมีขนาดคละที่หยาบกว่าช่วงขนาดคละที่ระบุไว้ใน TG2 (Academy, 2009) ซึ่งในการเตรียมก่อนตัวอย่างสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีขนาดใหญ่มากที่สุดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) เพื่อสามารถใช้กับตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตรได้ โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากขนาดก่อนตัวอย่างเปรียบเทียบกับขนาดของเม็ดวัสดุ จึงได้คัดแยกเม็ดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 นิ้วออก กราฟขนาดคละ (เฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้ในงานวิจัยจึงมีลักษณะในรูปแบบของกราฟยกกำลัง 0.45 ดังแสดงในรูปที่ 20 และขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก่อนตัวอย่างในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก้อนตัวอย่างในงานวิจัย

ขนาดตะแกรง	ค่าเฉลี่ยผ่านตะแกรง (%)
50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)	100
25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว)	100
19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)	84.13
12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว)	63.89
9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว)	53.19
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	35.81
2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10)	15.25
0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)	5.04
0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200)	1.96



รูปที่ 20 กราฟขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก้อนตัวอย่างในงานวิจัย

จากตารางที่ 9 ทำให้ทราบถึงขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ใช้เตรียมก้อนตัวอย่างในงานวิจัย โดยในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยวัสดุโครงสร้างทางเดิมในชั้นผิวทาง (RAP) และวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (RCR) ในสัดส่วน 25:75 ดังนั้น สามารถแบ่งสัดส่วนขนาดคละระหว่าง RAP:RCR โดยกำหนดน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ต้องใช้สำหรับแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและความสูง 200 มิลลิเมตรไว้ที่ 3580 กรัม โดยปริมาณส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR ในแต่ละเบอร์สามารถแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR ที่ใช้ในงานวิจัย

ขนาดตะแกรง	25% RAP (กรัม)	75% RCR (กรัม)
50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)	0.0	0.0
25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว)	0.0	0.0
19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)	142.0	426.1
12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว)	181.2	543.6
9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว)	95.8	287.3
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	155.5	466.6
2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10)	184.0	551.9
0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)	91.4	274.3
0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200)	27.5	82.6
ถาดรอง	17.5	52.6
รวม	3580 กรัม	

3.2.2 ความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

การทดสอบบดอัดวัสดุแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) (วรุช เลิศไพรัชยนต์, 2557) ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล ท. 108/2517 กรมทางหลวง (สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง, 2517) ใช้วิธี ข. โดยดำเนินการทดสอบกับวัสดุดังนี้

1. วัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก ไม่ผสมปูนซีเมนต์
2. วัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก และผสมปูนซีเมนต์ 1% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

ผลการทดสอบของวัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์ จะได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่ 6.4% และได้ค่า

γ_{dry} สูงสุดเท่ากับ 2.338 กรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนผลการทดสอบของวัสดุโครงสร้างทางเดิม RAP25%:RCR75% โดยน้ำหนัก แบบผสมปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม จะได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ที่ 7.5% และได้ค่า γ_{dry} สูงสุดเท่ากับ 2.297 กรัมต่อมิลลิลิตร

3.3 การตั้งสมมติฐาน

3.3.1 สมมติฐาน

1. การใช้บิทูเมนอิมัลชันสามารถเพิ่มโมดูลัสการคืนตัวและเพิ่มความยืดหยุ่นของวัสดุ BSM
2. การใช้ปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มโมดูลัสการคืนตัวและความทนทานของวัสดุ BSM
3. การผันแปรอุณหภูมิทำให้คุณสมบัติของวัสดุ BSM เปลี่ยนแปลงไป

3.3.2 ตัวแปรต้น

1. การใช้ปริมาณบิทูเมนอิมัลชันเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีการศึกษา
2. การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีการศึกษา
3. ระดับอุณหภูมิที่วัสดุ BSM ได้รับเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีการศึกษา

3.3.3 ตัวแปรตาม

1. กำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM
2. ความต้านทานการเสีรูปลถารหรือความล้าของวัสดุ BSM
3. โมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM
4. ระดับของหน่วยแรงกระทำซ้ำ (Stress level) ต่อประสิทธิภาพการต้านทานแรงกระทำซ้ำของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

3.3.4 ตัวแปรควบคุม

1. สัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75
2. น้ำและส่วนเหลวของบิทูเมนอิมัลชัน มีค่าเท่ากับ OMC+1%
3. ความหนาแน่นของตัวอย่าง 97-99% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด
4. ระดับความชื้นหลังการบ่มเป็นระดับความชื้นธรรมชาติ
5. รูปแบบและความถี่หน่วยแรงกระทำเป็นรูปแบบ Continuous Haversine และความถี่ 5 รอบ/วินาที

3.4 การออกแบบการทดลอง

3.4.1 การออกแบบการทดลองส่วนที่ 1

การทดลองในส่วนที่ 1 คือ การทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM ซึ่งจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยของ (ไพศาล ปุ้ยไชยสอน, 2560) และ (लग्न चेदिहिरुणुकर & वरारकुर दियेपुठनपुठि, 2561) มีปัจจัยด้านตัวแปรให้พิจารณาสำหรับหาจำนวนกรณีศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาณบิพูเมนอิมัลชัน, ปริมาณปูนซีเมนต์ และระดับอุณหภูมิ ที่จะส่งผลต่อกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด โดยจำนวนกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรต้น	ค่าการเปลี่ยนแปลง	ระดับการเปลี่ยนแปลง
ปริมาณบิพูเมนอิมัลชัน	2% และ 3%	2
ปริมาณซีเมนต์	0% และ 1%	2
อุณหภูมิที่ให้กับตัวอย่าง	30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส	3
จำนวนกรณีศึกษา	$2 \times 2 \times 3 = 12$	

จากตารางที่ 11 แสดงถึงจำนวนกรณีศึกษาที่ต้องทำการทดสอบทั้งหมด 12 กรณีศึกษา โดยแต่ละกรณีศึกษาจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงต้องทำการเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับในการทดสอบทั้งหมด 36 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM โดยทางผู้วิจัยเล็งเห็นว่าระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่างพร้อมทำการทดสอบอาจใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนาน เนื่องจากการทดสอบแบบ Full factorial ทั้งในการทดสอบส่วนที่ 1 และการทดสอบส่วนที่ 2 ที่ได้กล่าวต่อไป ทางผู้วิจัยจึงได้ใช้โปรแกรม SPSS ในการช่วยวิเคราะห์หาจำนวนกรณีศึกษาใหม่ด้วยวิธี Fractional factorial experimental design หรือในโปรแกรม SPSS จะเป็นวิธีการที่เรียกว่า Orthogonal design ดังนั้น ตัวแปรต้นที่จะศึกษาประกอบด้วยปัจจัยบิพูเมน 2 ระดับ (2% และ 3%), ปูนซีเมนต์ 2 ระดับ (0% และ 1%) และ อุณหภูมิ 3 ระดับ (30°C, 40°C และ 50°C) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS จะได้จำนวนกรณีศึกษาทั้งหมด 8 กรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 21 โดยจะนำผลการศึกษาที่ระดับอุณหภูมิ 30°C ของ (ไพศาล ปุ้ยไชยสอน, 2560) และ (लग्न चेदिहिरुणुकर & वरारकुर दियेपुठनपुठि, 2561) มาร่วมในการวิเคราะห์ผลในขั้นถัดไป ดังนั้น ทำให้สามารถสรุปกรณีศึกษาขั้นต้นที่ต้องทำการทดสอบดังแสดงตารางที่ 12

```
*Generate Orthogonal Design.
ORTHOPLAN
/FACTORS=Bitumen 'bitumen' (2 '2%' 3 '3%') Cement 'cement' (0 '0%' 1 '1%') Temp 'temp' (30 '30°C' 40 '40°C' 50 '50°C')
/REPLACE.
```

Orthogonal Plan

[DataSet0]

Warnings

A plan is successfully generated with 8 cards.

```
.
PLANCARDS
/FACTORS=Bitumen Cement Temp
/FORMAT BOTH.
```

Plancards

[test]

Card List

	Card ID	bitumen	cement	temp
1	1	3%	1%	30°C
2	2	3%	0%	50°C
3	3	2%	1%	50°C
4	4	2%	0%	30°C
5	5	2%	0%	40°C
6	6	3%	1%	40°C
7	7	2%	1%	30°C
8	8	3%	0%	30°C

รูปที่ 21 ผลการวิเคราะห์จำนวนกรณีศึกษาด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางที่ 12 กรณีศึกษาที่ต้องทดสอบในส่วนการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ

บิตูเมนอิมัลชัน	ปูนซีเมนต์	อุณหภูมิ	จำนวนตัวอย่าง
3%	1%	40°C	3
2%	1%	50°C	3
3%	-	50°C	3
2%	-	40°C	3
รวมการทดสอบ			12

3.4.2 การออกแบบการทดลองส่วนที่ 2

จากการหากรณีศึกษาด้วยวิธี Fractional factorial experimental design ที่ได้กล่าวไปในการทดสอบส่วนที่ 1 โดยจะนำกรณีศึกษาจากตารางที่ 11 มาอ้างอิงกรณีศึกษาในการทดสอบส่วนที่ 2 คือ การทดสอบความต้านทานการเสียรูปถาวรหรือความล้าของวัสดุ BSM โดยจะเพิ่มระดับหน่วย

แรงกระทำซ้ำ 3 ระดับของค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM ในการทดสอบส่วนที่ 1 เข้าไป ทำให้ต้องเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบทั้งหมด 36 ตัวอย่าง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 กรณีศึกษาที่ต้องทดสอบในส่วนการทดสอบความต้านทานการเสีรูปถาวรหรือความล้า

บิทูเมนอิมัลชัน	ปูนซีเมนต์	อุณหภูมิ	ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ	จำนวนตัวอย่าง
3%	1%	40°C	ระดับที่ 1	3
3%	1%	40°C	ระดับที่ 2	3
3%	1%	40°C	ระดับที่ 3	3
2%	1%	50°C	ระดับที่ 1	3
2%	1%	50°C	ระดับที่ 2	3
2%	1%	50°C	ระดับที่ 3	3
3%	-	50°C	ระดับที่ 1	3
3%	-	50°C	ระดับที่ 2	3
3%	-	50°C	ระดับที่ 3	3
2%	-	40°C	ระดับที่ 1	3
2%	-	40°C	ระดับที่ 2	3
2%	-	40°C	ระดับที่ 3	3
รวมการทดสอบ				36

3.5 การทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ BSM จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM ซึ่งจะอาศัยแรงกระทำจากเครื่องทดสอบโดยการให้แรงกับก้อนตัวอย่าง จนทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยมีค่ายุบตัวในแนวตั้งของก้อนตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 5% ของความสูงก้อนตัวอย่าง จากผลการทดสอบจะทำให้ทราบถึงค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้หาระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ (Stress Level) ที่วัสดุ BSM มีพฤติกรรมอยู่ในสถานะคงรูปได้สำหรับการทดสอบในส่วนที่ 2 ต่อไป

สำหรับการทดสอบส่วนที่ 2 คือ การทดสอบความต้านทานการเสีรูปถาวรหรือความล้าของวัสดุ BSM ซึ่งจะอาศัยแรงกระทำจากเครื่องทดสอบกระทำซ้ำๆ ต่อก้อนตัวอย่าง โดยให้แรงกระทำจนครบ 1,000,000 รอบ หรือก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยมีค่ายุบตัวในแนวตั้งของก้อนตัวอย่างมีค่า

เท่ากับ 5% ของความสูงก้อนตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับว่าค่าใดถึงก่อน โดยจากการทดสอบจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการเสีรฐรูปถวรของวัสดุ BSM ตามทฤษฎี Shakedown ที่ (R. W. Sharp, 1985) ได้มีการนำเสนอไว้ในกรออกแบบทาง และทำให้ทราบถึงช่วงการเสีรฐรูปถวรตามข้อกำหนดที่ (Alnedawi et al., 2019) ได้ให้ไว้ ว่าจะจัดช่วงการเสีรฐรูปถวรของวัสดุ BSM อยู่ในช่วงใด อีกทั้งยังทำให้ทราบถึงความต้านทานการเสีรฐรูปถวร และโมดูลัสการคั้นตัวของวัสดุ BSM

โดยจากการออกแบบการทดลองในส่วนที่ 1 และ 2 จะต้องทำการเตรียมก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบทั้งหมด 48 ตัวอย่าง ประกอบไปด้วย 12 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด และอีก 36 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานการเสีรฐรูปถวรหรือความล้า โดยก้อนตัวอย่างที่ถูกเตรียมขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและสูง 200 มิลลิเมตร ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

สำหรับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะทำตามข้อแนะนำที่ระบุไว้ใน TG2 Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials (Academy, 2009) โดยใช้ผลการศึกษานาตคละมวบรวมของ วรฐ เลิศไพชัยยนต์ (2557) และใช้ส่วนผสมวัสดุ BSM เช่นเดียวกับ ไพศาล บุษยไชยสอน (2560) และ ลภน เชตหิรฐญกร & วรกรกร ตียะพัฒน์พุตติ. (2561) ในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ชั่งขนาดคละมวบรวมระหว่าง RAP:RCR ในอัตราส่วน 25:75 ตามตารางที่ 10 ดังแสดงในรูปที่ 22
2. ชั่งปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักมวบรวม แล้วนำไปในขนาดคละมวบรวมที่ได้ชั่งไว้
3. หรือในกรณีที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ ให้ทำการชั่งหินฝุ่นแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักมวบรวม แล้วนำไปในขนาดคละมวบรวมที่ได้ชั่งไว้
4. ทำการผสมหรือคลุกเคล้าให้ขนาดคละมวบรวมและปูนซีเมนต์หรือหินฝุ่นเข้ากัน
5. เทน้ำเปล่าตามข้อกำหนด 3.2.2 ลงไปในขนาดคละมวบรวม แล้วทำการผสมหรือคลุกเคล้าให้เข้ากัน
6. เทบิทูเมนอิมัลชัน 2% หรือ 3% แล้วทำการผสมหรือคลุกเคล้าให้เข้ากัน
7. เลือกใช้แบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและสูง 200 มิลลิเมตร

8. ทำการบดอัดด้วย Vibratory compactor โดยมีน้ำหนักถ่วงเครื่องบดอัดข้างละ 15 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 23 โดยทำการแบ่งการบดอัดออกเป็น 5 ชั้น ชั้นละเท่าๆ กัน เพื่อให้ได้ระดับการบดอัดอยู่ระหว่าง 97-99% ของความหนาแน่นสูงสุด
9. นำก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วทำการบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่มีอากาศถ่ายเท สะดวกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 24
10. นำก้อนตัวอย่างห่อใส่ถุงพลาสติกที่มีปริมาตรประมาณ 2 เท่าของปริมาตรก้อนตัวอย่างและทำการมัดปากถุงให้แน่น จากนั้นนำไปใส่ในตู้อบอุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และทำการเปลี่ยนถุงทุกๆ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 25
11. เมื่อทำการบ่มเสร็จให้นำตัวอย่างออกมาวางไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงเปลี่ยนใส่ถุงใหม่และมัดปากถุงให้แน่นเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นระหว่างรอการทดสอบ
12. ก่อนจะทำการทดสอบ 1 วัน ให้นำก้อนตัวอย่างใส่ในตู้อบอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ในขั้นของการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ก้อนตัวอย่างมีอุณหภูมิอยู่ในระดับที่พร้อมทำการทดสอบ



รูปที่ 22 ขนาดคละมวลรวมระหว่าง RAP:RCR ในอัตราส่วน 25:75



รูปที่ 23 เครื่องบดอัดก้อนตัวอย่าง



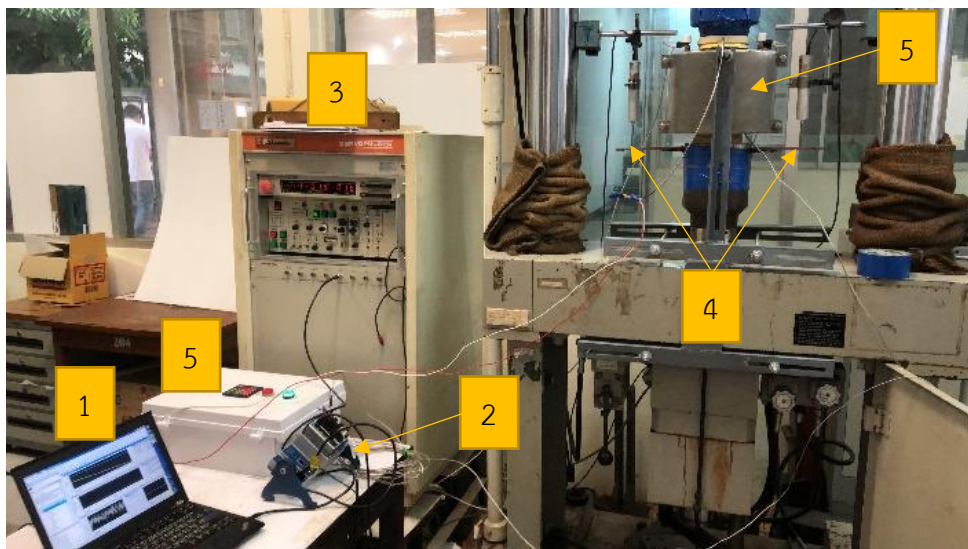
รูปที่ 24 บ่มก้อนตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 25 บ่มก้อนตัวอย่างไว้ที่ตู้บ่มอุณหภูมิ 40°C

3.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. Computer เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูล
2. Signal Data Acquisition เป็นอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลโดยจะเชื่อมต่อกับ Computer ในการเก็บข้อมูลของแรงกระทำจากเครื่อง Servopulser และค่าการยุบตัวของ LVDT
3. Servopulser เป็นเครื่องมือที่ให้แรงกระทำกับตัวอย่าง
4. Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) 2 ตัว เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการยุบตัวของตัวอย่าง ซึ่งทำมุม 180 องศาที่บริเวณแทนของอุปกรณ์ทดสอบ
5. Heater (พร้อมชุด Controller สำหรับควบคุมอุณหภูมิ) เป็นอุปกรณ์ในการให้อุณหภูมิตัวอย่าง



รูปที่ 26 อุปกรณ์ทดสอบและเก็บข้อมูลสำหรับการทดสอบ

3.6 การวิเคราะห์และการแปลผลข้อมูล

จากผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM จะทำให้ทราบถึงค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน, ปริมาณปูนซีเมนต์ และระดับอุณหภูมิ ซึ่งจะนำผลการทดสอบในแต่ละกรณีการศึกษามาวิเคราะห์ในเชิงสถิติด้วยโปรแกรมสถิติ R ในการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression) โดยการแปลผลจากโมเดลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะทำให้ทราบแนวโน้มของอิทธิพลจากปัจจัยที่ได้กล่าวมาว่ามีผลต่อค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM อย่างไร อีกทั้งยังทำให้สามารถพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM ในกรณีศึกษาที่ไม่ได้ทำการทดสอบด้วยสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปวิเคราะห์หาระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ (Stress Level) ที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ในแต่ละกรณีศึกษา สำหรับการทดสอบความต้านทานการเสีรูปถาวรหรือความล้าของวัสดุ BSM ในส่วนถัดไป

สำหรับการทดสอบความต้านทานการเสีรูปถาวรหรือความล้าภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำของวัสดุ BSM จะทำให้ทราบถึงความต้านทานการเสีรูปถาวรของวัสดุ BSM โดยจะนำผลการทดสอบในส่วนจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ มาวิเคราะห์ในเชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression) โดยการแปลผลจากโมเดลที่ได้จากการวิเคราะห์ จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีการศึกษามีความสามารถในการต้านทาน

เสียรูปถาวรอย่างไร และยังสามารถจัดช่วงของการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ตามทฤษฎี Shakedown รวมถึงทราบขีดจำกัด (Stress Limit) ที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ในแต่ละกรณีศึกษา

จากการทดสอบความต้านทานการเสียรูปถาวรหรือความล้าภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ ยังทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการยุบตัวของวัสดุ BSM ประกอบไปด้วย การยุบตัวที่วัสดุสามารถคืนตัวได้ (Resilient Strain) และการยุบตัวที่วัสดุไม่สามารถคืนตัวได้ (Permanent Strain) ดังนั้น จะทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM ได้จากสมการ 2-1 ซึ่งจากการวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสการคืนตัวของแต่ละกรณีศึกษาของวัสดุ BSM จะนำมาวิเคราะห์ในเชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ และจะทำให้ทราบถึงแนวโน้มของค่าโมดูลัสการคืนตัวที่ได้รับอิทธิพลจาก ปริมาณบิพูเมนอิมัลชัน, ปริมาณซีเมนต์, ระดับอุณหภูมิ และระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำอย่างไร อีกทั้งสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ จะทำให้สามารถพยากรณ์ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM สำหรับในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดสอบอีกเช่นกัน

ทั้งนี้จากการทราบน้ำหนักบรรทุกทุกเพลามาตรฐาน 18,000 ปอนด์ ทำให้เกิดหน่วยแรงแนวตั้งสูงสุดที่ผิวด้านบนของชั้นพื้นทางของวัสดุ BSM ซึ่งมีค่าเท่ากับ 550 kPa ที่อุณหภูมิผิวทาง 37.5°C และจะเพิ่มเป็น 700 kPa ที่อุณหภูมิผิวทาง 50°C สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาหรือเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้านขีดจำกัด (Stress Limit) ที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ กล่าวคือ จะทำให้วัสดุ BSM มีสถานะคงรูปได้ (Stable State) เมื่อได้รับอิทธิพลความร้อนจากชั้นผิวทางที่ส่งผลมายังชั้นพื้นในแต่ละกรณีศึกษา ทำให้สามารถเป็นข้อแนะนำในการก่อสร้างหรือบำรุงชั้นพื้นทางต่อไป

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

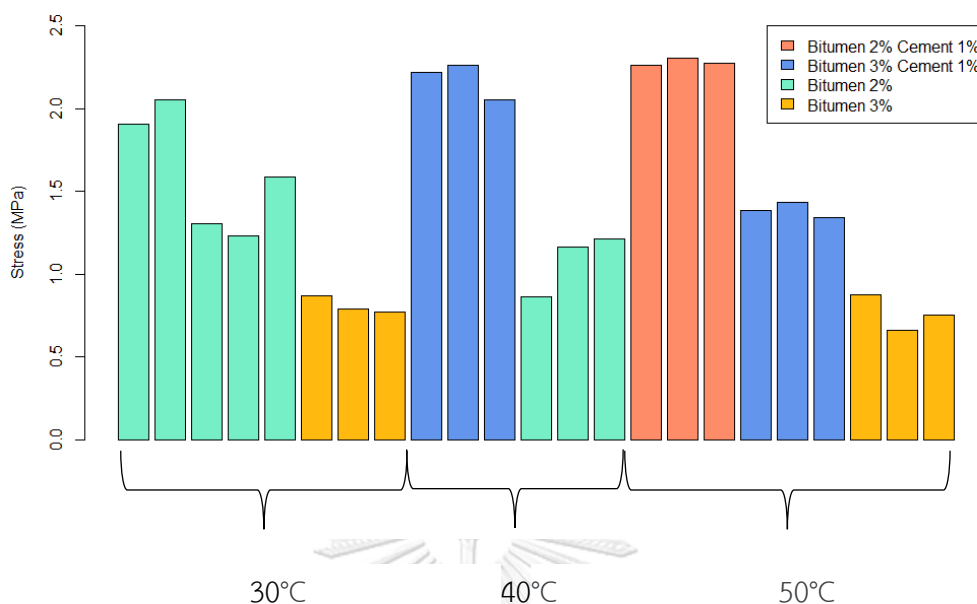
4.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ

การทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดของวัสดุ BSM ทำการทดสอบโดยอาศัยแรงกระทำจากเครื่องทดสอบ Servopulser ด้วยการให้แรงกระทำต่อก้อนตัวอย่างจนเกิดการวิบัติ ทำการทดสอบทั้งหมด 4 กรณีศึกษา แต่ละกรณีศึกษาจะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ประกอบไปด้วยวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1% ที่ระดับอุณหภูมิ 40°C (B3C1-40°C), วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และปูนซีเมนต์ 1% ที่ระดับอุณหภูมิ 50°C (B2C1-50°C), วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% ระดับอุณหภูมิ 50°C (B3-50°C) และวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% ระดับอุณหภูมิ 40°C (B2-40°C) โดยการทดสอบสิ้นสุดลงเมื่อค่าการยุบตัวในแนวดิ่งของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 5% ของความสูงตัวอย่าง

จากการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ (Unconfined compressive strength, UCS) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (bitumen stabilized material, BSM) ร้อยละ 3 และร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ใช้หรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม ทดสอบที่อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส ผลจากการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 14 และรูปที่ 27

ตารางที่ 14 ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ในหน่วย Mpa

BSM	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.4	Rep.5	SD	Avg.
B3-30°C	0.867	0.788	0.772	-	-	0.051	0.809
B2-30°C	1.903	2.055	1.306	1.231	1.588	0.361	1.616
B3C1-40°C	2.218	2.259	2.051	-	-	0.110	2.176
B2-40°C	0.862	1.161	1.212	-	-	0.189	1.078
B2C1-50°C	2.261	2.303	2.273	-	-	0.022	2.279
B3C1-50°C	1.386	1.434	1.344	-	-	0.045	1.388
B3-50°C	0.872	0.660	0.751	-	-	0.107	0.761



รูปที่ 27 ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM

จากตารางที่ 14 และรูปที่ 27 การทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C วัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 2% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงกว่า วัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% และเมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิไปที่ 40°C จะทำให้วัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 2% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติลดลงจาก 1.616 เป็น 1.078 Mpa ส่วนวัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% เมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิไปที่ 50°C จะทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติลดลงด้วยเช่นกันจาก 0.809 เป็น 0.761 Mpa

ส่วนที่ระดับอุณหภูมิ 40°C พบว่า วัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงกว่าวัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 2% เมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิไปที่ 50°C วัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติลดลงจาก 2.176 เป็น 1.388 Mpa

สำหรับที่ระดับอุณหภูมิ 50°C พบว่า วัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 2% และปูนซีเมนต์ 1% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ส่วนวัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1% และ วัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติรองลงมาตามลำดับ

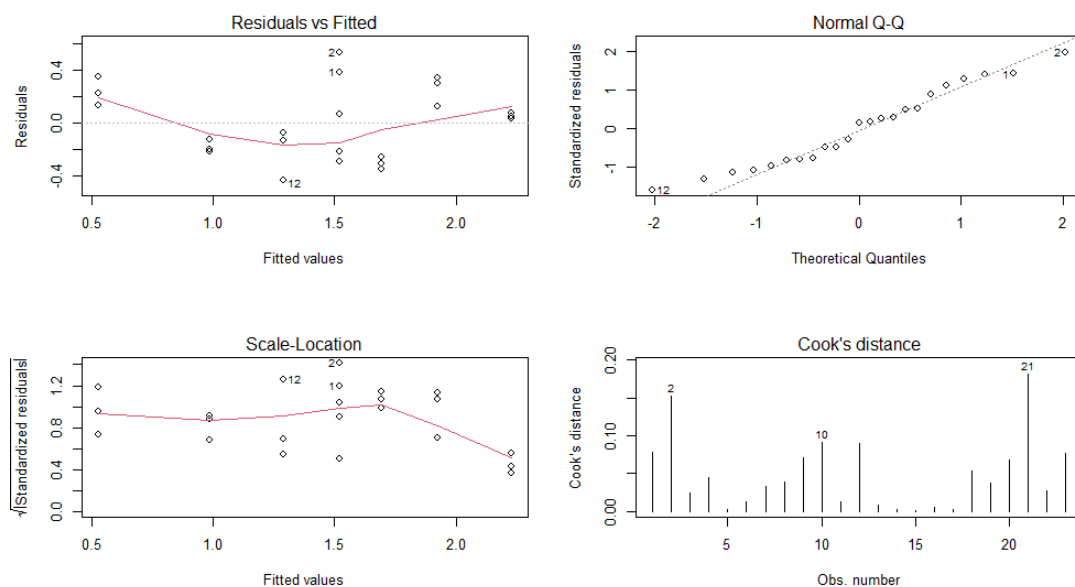
ทั้งนี้จากผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา ทำให้ทราบถึงแนวโน้มขั้นต้นของอิทธิพลจากปัจจัยด้าน ปริมาณบิตูเมนอิมัลชัน ปริมาณซีเมนต์ และระดับ

อุณหภูมิ กล่าวคือ วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงกว่าวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% และเมื่อมีการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงคุณภาพพร้อมด้วยแล้ว จะทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงขึ้น ส่วนการผันแปรอุณหภูมิไปที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM มีค่าลดลง ดังนั้น จากผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติจะสามารถนำผลการทดสอบข้างต้นไปวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อให้ทราบอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ ได้อย่างแน่ชัด และจะสามารถพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษาที่ไม่ได้ทำการทดสอบในขั้นถัดไป

4.1.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ

4.1.1.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ

จากผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติโดยไม่มีแรงดันล้อมรอบ (Unconfined compressive strength) ที่แสดงดังตารางที่ 14 ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ จะต้องวิเคราะห์หาค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ของการทดสอบก่อน โดยการประมาณค่าทางสถิตินั้นจะอ่อนไหวต่อตัวอย่างที่ผิดปกติ ซึ่งทำให้ค่าประมาณค่าสถิติผิดและมักทำให้ตัวแปรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการวิเคราะห์ Outlier case แสดงได้ดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 การวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ของการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติ

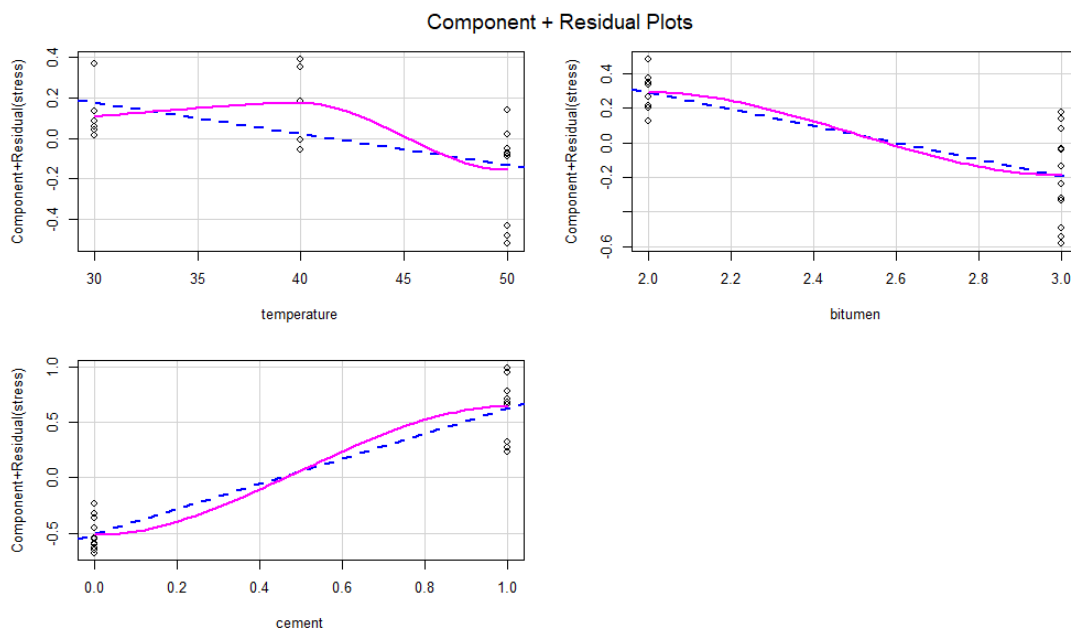
จาก Outliner case ที่แสดงดังรูปที่ 28 จะต้องถูกตัดออกในขั้นตอนทำสะอาดข้อมูลก่อนเข้าสู่ขั้นตอนวิเคราะห์ โดย Outliner case ข้างต้นมีค่าที่ผิดปกติ ได้แก่ ข้อมูลการทดสอบที่ 1, 2 และ 12 นั่นคือ วัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% โดยน้ำหนัก ทดสอบที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 และวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 1 จากนั้นเมื่อทำการตัด Outlier case แล้ว จะสามารถวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) ได้ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ

ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients)	ค่าประมาณการ (Estimate)	ค่าผิดพลาด (Std. Error)	t value	Pr(> t)
จุดตัดแกน Y	2.837691	0.373893	7.590	1.09×10^{-6} ***
อุณหภูมิ (X_1)	-0.015595	0.007303	-2.135	0.048528 *
บิทูเมนอิมัลชัน (X_2)	-0.486160	0.107179	-4.536	0.000337 ***
ซีเมนต์ (X_3)	1.134189	0.124859	9.084	1.03×10^{-7} ***
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'
Multiple R-squared	0.8693			
Adjusted R-squared	0.8448			
p-value	2.669×10^{-7}			

จากผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression) สำหรับขึ้นตัวอย่างวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ที่เกิดการวิบัติจากการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติโดยไม่มีแรงดันล้อมรอบ (Unconfined compressive strength) ที่แสดงดังตารางที่ 14 จากค่า p-value ของแต่ละตัวแปรมีค่าน้อยกว่า 0.001 ทำให้มีนัยสำคัญทางสถิติทั้งหมดที่ความเชื่อมั่น 99% ได้แก่ บิทูเมนอิมัลชัน และซีเมนต์ ส่วนค่า p-value ของตัวแปรอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 0.05 ทำให้มีนัยสำคัญทางสถิติทั้งหมดที่ความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่า p-value ของโมเดลมีค่า เท่ากับ 2.669×10^{-7} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 ดังนั้น โมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน สำหรับค่า Multiple R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.8693 ทำให้ Goodness of Fit ไม่แนบสนิท ดังแสดงรูปที่ 29 ซึ่งระดับความ fit ของสมการกับ

ข้อมูล (R^2) แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันได้ 86.93%



รูปที่ 29 การทดสอบภาวะสารูปสนิทธิ (Goodness of Fit Test)

4.1.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
temperature	1	0.4030	0.4030	7.4839	0.0146591*
bitumen	1	0.8852	0.8852	16.4388	0.0009204***
cement	1	4.4431	4.4431	82.5142	1.02810 ⁻⁷ ***
Residuals	16	0.8615	0.0538		
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'	0.1 '.'

จากตารางที่ 16 การวิเคราะห์ความแปรปรวน จะสามารถหาค่าประมาณของ σ^2 เท่ากับ 0.0538 (ซึ่งมีค่าเท่ากับ MSE) โดยจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้น สามารถใช้ในการทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ หรือไม่ ดังนี้

$$\text{สมมติฐานว่าง } H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$\text{สมมติฐานทางเลือก } H_1: \text{มี } \beta_i \text{ อย่างน้อย 1 ตัว ไม่เท่ากับ 0 โดยที่ } i = 1, 2, 3$$

ค่าสถิติทดสอบตัวแปรอนุหภูมิ, บิทูเมนอิมัลชัน และซีเมนต์ มีค่า F เท่ากับ 7.4839,

16.4388, 82.5142 และค่า p-value = 0.0146591, 0.0009204, 1.028×10^{-7} ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ สำหรับตัวแปรอุณหภูมิ ส่วนตัวแปรบิทูเมนอิมัลชัน และซีเมนต์ มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.001$ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง นั่นคือ มี β_i อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับ 0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ 0.001 ตามลำดับ ซึ่งสามารถพิจารณาถึงการประมาณค่าแบบช่วงของ $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ และ β_3 ได้ดังตารางที่ 17

4.1.1.3 การพิจารณาการประมาณค่าแบบช่วง

ตารางที่ 17 การประมาณค่าแบบช่วงของ $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ และ β_3

	β_i	Std. Error	Confidence Interval 95%	
Cont.	2.837691	0.373893	2.04507398	3.6303088729
X_1	-0.015595	0.007303	-0.03107708	-0.0001137741
X_2	-0.486160	0.107179	-0.71336857	-0.2589514293
X_3	1.134189	0.124859	0.86949860	1.3988785461

ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ β_0 คือ (2.04507398, 3.6303088729) β_1 คือ (-0.03107708, -0.0001137741), β_2 คือ (-0.71336857, -0.2589514293) และ β_3 คือ (0.86949860, 1.3988785461)

โดยผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) ข้างต้น ดังตารางที่ 15 สามารถใช้ในการทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_1 = 0$ หรือไม่ ดังนี้

สมมติฐานว่าง $H_0 : \beta_1 = 0$

สมมติฐานทางเลือก $H_1 : \beta_1 \neq 0$

ค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ -2.135 และค่า p-value เท่ากับ 0.048528 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 นั่นคือ $\beta_1 \neq 0$ สรุปได้ว่า อุณหภูมิ (X_1) มีความสัมพันธ์กับกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Y) กล่าวคือ สามารถใช้ X_1 ในการพยากรณ์ Y ได้

ในทำนองเดียวกัน การทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_2 = 0$ หรือไม่ ทำได้ดังนี้

สมมติฐานว่าง $H_0 : \beta_2 = 0$

สมมติฐานทางเลือก $H_1 : \beta_2 \neq 0$

ค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ -4.536 และค่า p-value เท่ากับ 0.000337 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.001$ ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 นั่นคือ $\beta_2 \neq 0$ สรุปได้ว่า บิทูเมนอิมัลชัน (X_2) มี

ความสัมพันธ์กับกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทุเมนอิมัลชัน (Y) กล่าวคือ สามารถใช้ X_2 ในการพยากรณ์ Y ได้

สำหรับการทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_3 = 0$ หรือไม่ ทำได้ดังนี้

สมมติฐานว่าง $H_0 : \beta_3 = 0$

สมมติฐานทางเลือก $H_1 : \beta_3 \neq 0$

ค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ 9.084 และค่า p-value เท่ากับ 1.03×10^{-7} ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.001$ ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 นั่นคือ $\beta_3 \neq 0$ สรุปได้ว่า ซีเมนต์ (X_3) มีความสัมพันธ์กับกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทุเมนอิมัลชัน (Y) กล่าวคือ สามารถใช้ X_3 ในการพยากรณ์ Y ได้

ดังนั้น จากตารางที่ 15 ข้อมูล p-value แสดงให้เห็นว่า บิทุเมนอิมัลชัน และ ซีเมนต์ มีความสมเหตุสมผล เนื่องจาก p-value < 0.001 ส่วนอุณหภูมิ p-value < 0.05 มีความสมเหตุสมผลด้วยเช่นเดียวกัน จึงเป็นเหตุผลทำให้สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง นั่นคือ อุณหภูมิ, บิทุเมนอิมัลชัน และ ซีเมนต์ สามารถใช้พยากรณ์กำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทุเมนอิมัลชันได้ ดังนั้น จากตารางที่ 15 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส และบิทุเมนอิมัลชันเพิ่มขึ้น 1% โดยน้ำหนักมวลรวม จะทำให้กำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทุเมนอิมัลชันลดลง 0.015595 และ 0.486160 Mpa ตามลำดับ ส่วนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น 1% โดยน้ำหนัก จะทำให้กำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทุเมนอิมัลชันเพิ่มขึ้น 1.134189 Mpa ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, 0.001 และ 0.001 ตามลำดับ โดยสามารถเขียนสมการพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทุเมนอิมัลชัน ได้ดังสมการที่ 4-1

$$\hat{Y} = 2.837691 - [0.015595 \times (X_1)] - [0.486160 \times (X_2)] + [1.134189 \times (X_3)] \quad (4-1)$$

โดยที่ \hat{Y} คือ ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM

X_1 คือ ระดับอุณหภูมิ

X_2 คือ ปริมาณบิทุเมนอิมัลชัน

X_3 คือ ปริมาณซีเมนต์

หมายเหตุ ระดับอุณหภูมิ : 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

ปริมาณบิทุเมนอิมัลชัน : 2 คือ 2% และ 3 คือ 3% โดยน้ำหนัก

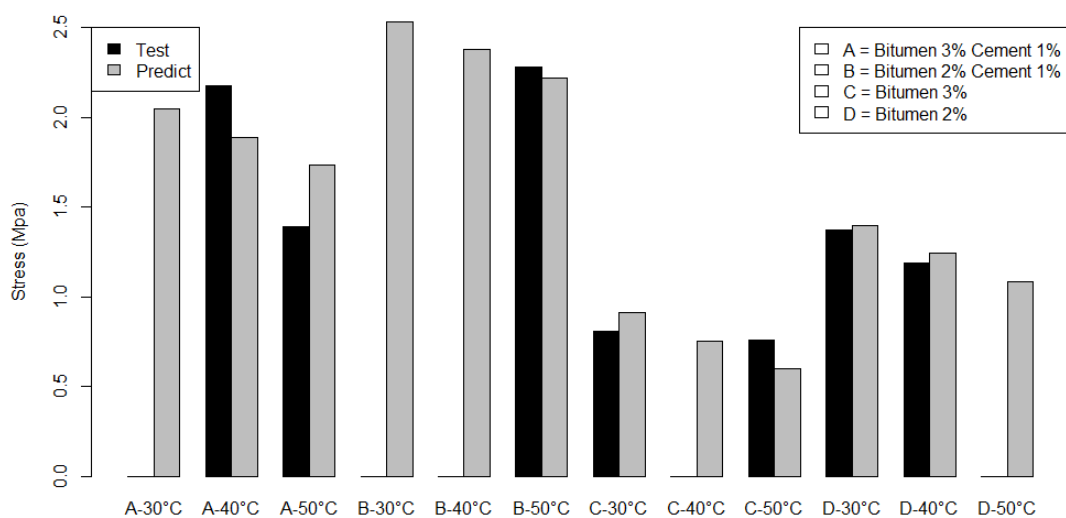
ปริมาณซีเมนต์ : 0 คือ ไม่ใช้ซีเมนต์ และ 1 คือ ใช้ซีเมนต์

4.1.1.4 การพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM

จากสมการที่ 4-1 ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุที่ได้กล่าวมานั้น จะสามารถพยากรณ์ (Predictor) ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ได้ดังตารางที่ 18 และสามารถเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานการวิบัติได้ดังรูปที่ 30

ตารางที่ 18 ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ระหว่างค่าเฉลี่ยผลการทดสอบกับการพยากรณ์

Bitumen (B)	Cement (C)	Temp.	Test (Mpa)	Predict (Mpa)
3%	1%	30°C	-	2.046
2%	1%	30°C	-	2.532
3%	-	30°C	0.809	0.911
2%	-	30°C	1.375	1.398
3%	1%	40°C	2.176	1.890
2%	1%	40°C	-	2.376
3%	-	40°C	-	0.755
2%	-	40°C	1.187	1.242
3%	1%	50°C	1.388	1.734
2%	1%	50°C	2.279	2.220
3%	-	50°C	0.761	0.599
2%	-	50°C	-	1.086



รูปที่ 30 ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM ระหว่างค่าเฉลี่ยผลการทดสอบกับการพยากรณ์

4.1.1.5 การหาค่าส่วนเหลือ

ตารางที่ 19 ค่าส่วนเหลือ (Residuals) ของค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM

Bitumen (B)	Cement (C)	Temp.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3%	1%	30°C	-	-	-	-
2%	1%	30°C	-	-	-	-
3%	-	30°C	-0.044	-0.123	-0.139	-0.102
2%	-	30°C	-0.092	-0.167	0.190	-0.023
3%	1%	40°C	0.328	0.369	0.161	0.286
3%	1%	50°C	-0.348	-0.300	-0.390	-0.346
2%	1%	50°C	0.041	0.083	0.053	0.059
3%	-	50°C	0.273	0.061	0.152	0.162
2%	-	40°C	-	-0.080	-0.030	-0.055

จากผลลัพธ์ข้างต้นอธิบายได้ดังนี้ ข้อมูลของค่ากำลังต้านทานการวิบัติวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชันร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.867 และค่าพยากรณ์ของค่ากำลังต้านทานการวิบัติวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชันร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.911 ดังนั้น ค่าส่วน

เหลือของค่ากำลังต้านทานการวิบัติวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทุเมนอิมัลชันร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ

$$\hat{e} = 0.867 - 0.911 = -0.044$$

4.1.2 อภิปรายผลการทดลองส่วนที่ 1

จากผลการวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานการวิบัติที่ได้พยากรณ์ไว้สำหรับวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% และปูนซีเมนต์ 1% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติเท่ากับ 2.532 Mpa ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ส่วนวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1%, วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% และ วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติเท่ากับ 2.046, 1.398 และ 0.911 Mpa ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานการวิบัติรองลงมาตามลำดับ

สำหรับที่ระดับอุณหภูมิ 40°C วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% และปูนซีเมนต์ 1% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติเท่ากับ 2.376 Mpa ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ส่วนวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1%, วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% และ วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติเท่ากับ 1.890, 1.242 และ 0.755 Mpa ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานการวิบัติรองลงมาตามลำดับ

และที่ระดับอุณหภูมิ 50°C วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% และปูนซีเมนต์ 1% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติเท่ากับ 2.220 Mpa ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ส่วนวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1%, วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% และ วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% มีค่ากำลังต้านทานการวิบัติเท่ากับ 1.734, 1.086 และ 0.599 Mpa ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานการวิบัติรองลงมาตามลำดับ

ทั้งนี้อิทธิพลจากปัจจัยด้านปริมาณบิทุเมนอิมัลชัน เมื่อวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน จาก 2% เป็น 3% จะทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติลดลง 0.486 Mpa ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 และอิทธิพลจากปัจจัยด้านระดับอุณหภูมิ เมื่อวัสดุ BSM ทุกกรณีศึกษา มีการผันแปรอุณหภูมิสูงขึ้น 1°C จะทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติมีค่าลดลง 0.015 Mpa ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนอิทธิพลจากปัจจัยด้านปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อวัสดุ BSM ทั้งผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 2% และ 3% เมื่อมีการใช้ปูนซีเมนต์จากการไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงคุณภาพร่วม จะทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติมีค่าเพิ่มขึ้น 1.134 Mpa ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001

4.2 ผลการทดสอบการเสีรรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ

การทดสอบการเสีรรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำตามวิธีการทดสอบของ EN 13286-7:2004 ด้วยความถี่ 5Hz ทำการทดสอบโดยอาศัยแรงกระทำจากเครื่องทดสอบ Servopulser ด้วยการใช้หน่วยแรงกระทำซ้ำ 3 ระดับของค่า UCS ของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษาที่ได้จากผลการทดสอบในส่วนที่ 1 โดยจะให้แรงกระทำซ้ำๆ ต่อก้อนตัวอย่าง ทำการทดสอบทั้งหมด 4 กรณีศึกษา แต่ละกรณีศึกษาจะทำการทดสอบ 3 ครั้ง ประกอบไปด้วยวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และปูนซีเมนต์ 1% ที่ระดับอุณหภูมิ 40°C (B3C1-40°C), วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และปูนซีเมนต์ 1% ที่ระดับอุณหภูมิ 50°C (B2C1-50°C), วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% ระดับอุณหภูมิ 50°C (B3-50°C) และวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% ระดับอุณหภูมิ 40°C (B2-40°C) โดยการทดสอบในแต่ละระดับหน่วยแรงสิ้นสุดลงเมื่อจำนวนรอบของหน่วยแรงกระทำซ้ำมีค่า 1,000,000 รอบ หรือค่าการยุบตัวในแนวตั้งของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 5% ของความสูงตัวอย่าง ขึ้นกับค่าใดถึงก่อน

โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะประกอบไปด้วย ขนาดหน่วยแรงกระทำซ้ำ, จำนวนรอบของการทดสอบ, และค่าการยุบตัว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลและนำไปสู่การอภิปรายและสรุปผลการทดลองในขั้นถัดไป

ผลการทดสอบการเสีรรูปถาวรของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน โดยมีการผันแปรอุณหภูมิภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำในระดับแรงต่างๆ จำนวนรอบที่ตัวอย่างสามารถรองรับได้จนวิบัติแสดงในตารางที่ 20-21 และรูปที่ 31-34

ตารางที่ 20 จำนวนรอบที่ตัวอย่างสามารถรองรับได้จนวิบัติของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ใช้ปูนซีเมนต์ 1% ร่วมในสารผสมเพิ่ม โดยมีแผนแปรระดับอุณหภูมิ

No.	Compaction	Temp.	Stress level	Stress (kPa)	Number of cycles
B3C1-1	97.40%	40°C	20%	436	1,000,000
B3C1-2	97.00%	40°C	20%	436	1,000,000
B3C1-3	99.05%	40°C	20%	436	1,000,000
B3C1-1	98.40%	40°C	25%	545	812,835
B3C1-2	99.13%	40°C	25%	545	91,512
B3C1-3	98.92%	40°C	25%	545	97,315
B3C1-1	98.93%	40°C	30%	655	3,860
B3C1-2	98.19%	40°C	30%	655	7,233
B3C1-3	98.63%	40°C	30%	655	7,265
B2C1-1	100%	50°C	30%	685	5,689
B2C1-2	100%	50°C	30%	685	1,000,000
B2C1-3	100%	50°C	30%	685	1,000,000
B2C1-1	99.30%	50°C	35%	800	3,211
B2C1-2	98.73%	50°C	35%	800	1,916
B2C1-3	100%	50°C	35%	800	9,368
B2C1-1	99.70%	50°C	40%	915	1,430
B2C1-2	99.40%	50°C	40%	915	3,979
B2C1-3	99.64%	50°C	40%	915	548

จากตารางที่ 20 แสดงให้เห็นความสามารถในการต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM B3C1-40°C และ B2C1-50°C สำหรับกรณีศึกษา B3C1-40°C ผลการทดสอบ พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 436 kPa วัสดุสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ 1,000,000 รอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 545 และ 655 kPa วัสดุเกิดการวิบัติก่อน 1,000,000 รอบทั้งหมด และในกรณีศึกษา B2C1-50°C ผลการทดสอบ พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 685 kPa วัสดุสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ 1,000,000 รอบ เป็นจำนวน 2 ตัวอย่าง ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 800 และ 915 kPa วัสดุเกิดการวิบัติก่อน 1,000,000 รอบทั้งหมด

ตารางที่ 21 จำนวนรอบที่ตัวอย่างสามารถรองรับได้จนวิบัติของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทุเมนอิมัลชัน 3% และ 2% โดยมีแผนแปรระดับอุณหภูมิ

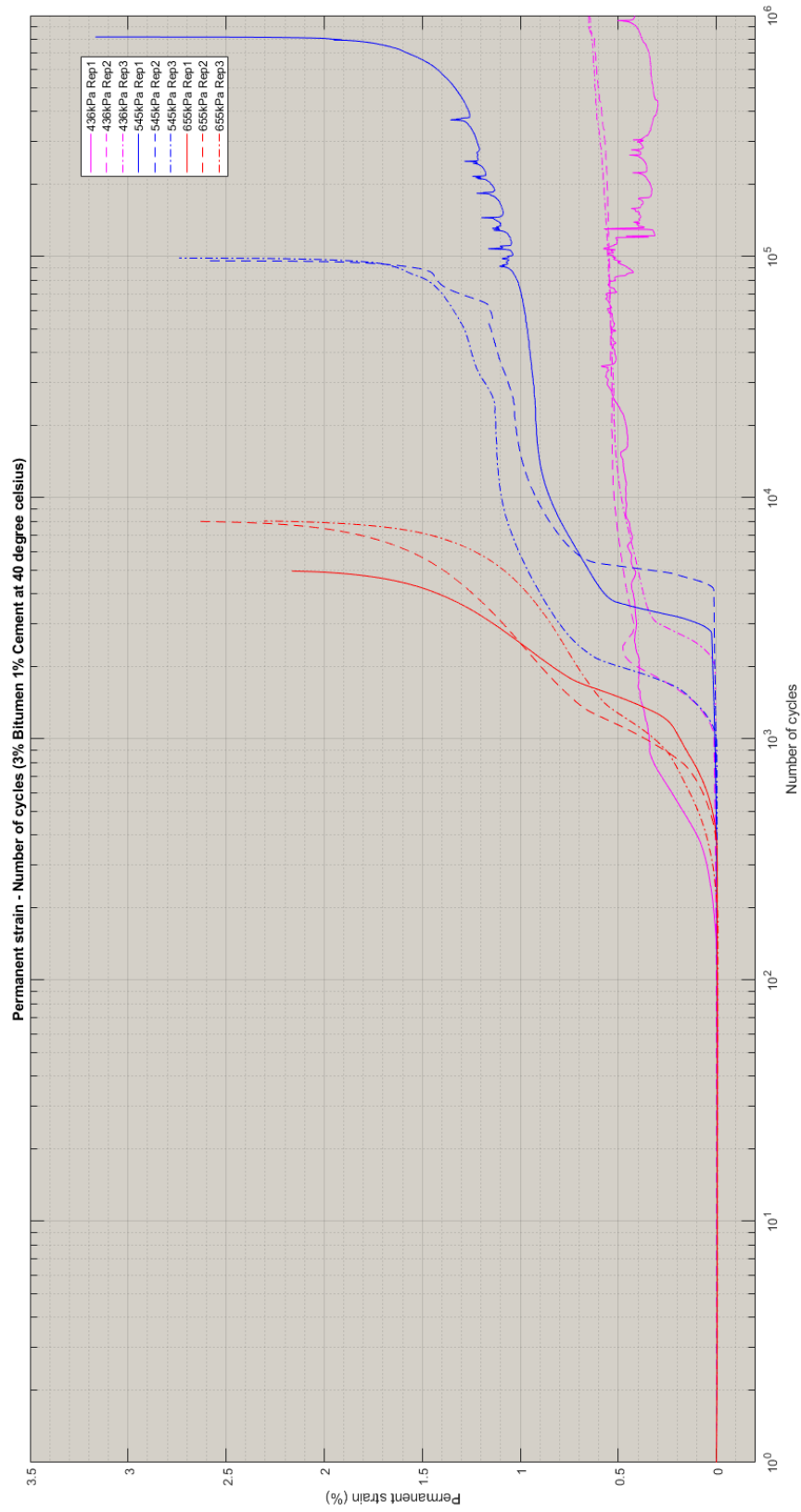
No.	Compaction	Temp.	Stress level	Stress (kPa)	Number of cycles
B3-1	99.26%	50°C	30%	230	1,000,000
B3-2	98.84%	50°C	30%	230	1,000,000
B3-3	97.83%	50°C	30%	230	65,406
B3-1	98.95%	50°C	40%	305	39,686
B3-2	99.34%	50°C	40%	305	494,817
B3-3	99.77%	50°C	40%	305	24,947
B3-1	98.77%	50°C	50%	380	4,199
B3-2	98.33%	50°C	50%	380	5,138
B3-3	98.06%	50°C	50%	380	2,097
B2-1	98.60%	40°C	30%	325	1,000,000
B2-2	99.19%	40°C	30%	325	1,000,000
B2-3	99.10%	40°C	30%	325	1,000,000
B2-1	100%	40°C	35%	380	85,855
B2-2	99.67%	40°C	35%	380	2,901
B2-3	99.85%	40°C	35%	380	1,000,000
B2-1	99.18%	40°C	40%	435	4,767
B2-2	100%	40°C	40%	435	101,189
B2-3	100%	40°C	40%	435	2,376

จากตารางที่ 21 แสดงให้เห็นความสามารถในการต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM B3-50°C และ B2-40°C สำหรับกรณีศึกษา B3-50°C ผลการทดสอบ พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 230 kPa วัสดุสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ 1,000,000 รอบ เป็นจำนวน 2 ตัวอย่าง ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 305 และ 380 kPa วัสดุเกิดการวิบัติก่อน 1,000,000 รอบทั้งหมด และในกรณีศึกษา B2-40°C ผลการทดสอบ พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 325 kPa วัสดุสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ 1,000,000 รอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 380

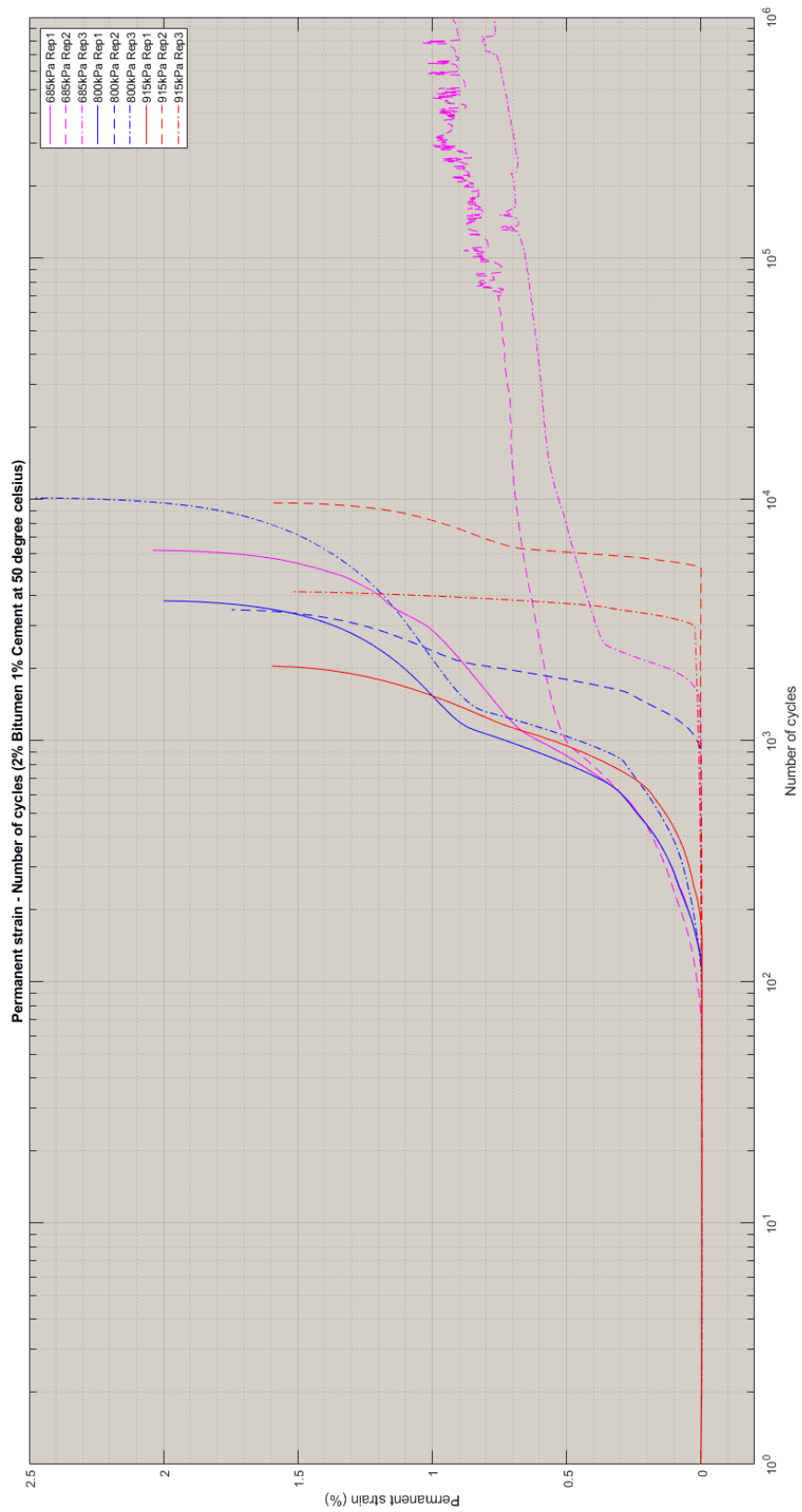
วัสดุสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ 1,000,000 รอบ 1 ตัวอย่าง ส่วนอีก 2 ตัวอย่างวัสดุเกิดการวิบัติก่อน 1,000,000 รอบ และ 915 kPa วัสดุเกิดการวิบัติก่อน 1,000,000 รอบทั้งหมด

จากผลการทดสอบการเสีรูปถาวรของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา ผลการทดสอบในด้านจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรองรับได้ โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบทำให้ทราบถึงความสามารถในการต้านทานการวิบัติเริ่มต้น ซึ่งวัสดุ B2C1-50°C มีความต้านทานการเสีรูปถาวรสูงกว่าวัสดุ BSM ในกรณีศึกษาอื่น เนื่องจากที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 685 kPa วัสดุสามารถรองรับได้ถึง 1,000,000 รอบ ส่วนวัสดุ B3C1-40°C ความสามารถในการรับหน่วยแรงกระทำซ้ำที่วัสดุสามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบ ซึ่งระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำที่รับได้มีค่าต่ำกว่าวัสดุ B2C1-50°C กล่าวคือ สามารถรับระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ที่ 436 kPa สำหรับวัสดุ B2-40°C มีความสามารถต้านทานการเสีรูปถาวรรองลงมา โดยที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 325 kPa วัสดุสามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบ และวัสดุ B3-50°C มีความสามารถต้านทานการเสีรูปถาวรต่ำที่สุด เนื่องจากสามารถรับระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ต่ำกว่าวัสดุ BSM ในกรณีศึกษาที่ได้กล่าวมา โดยที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 230 kPa วัสดุสามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบ

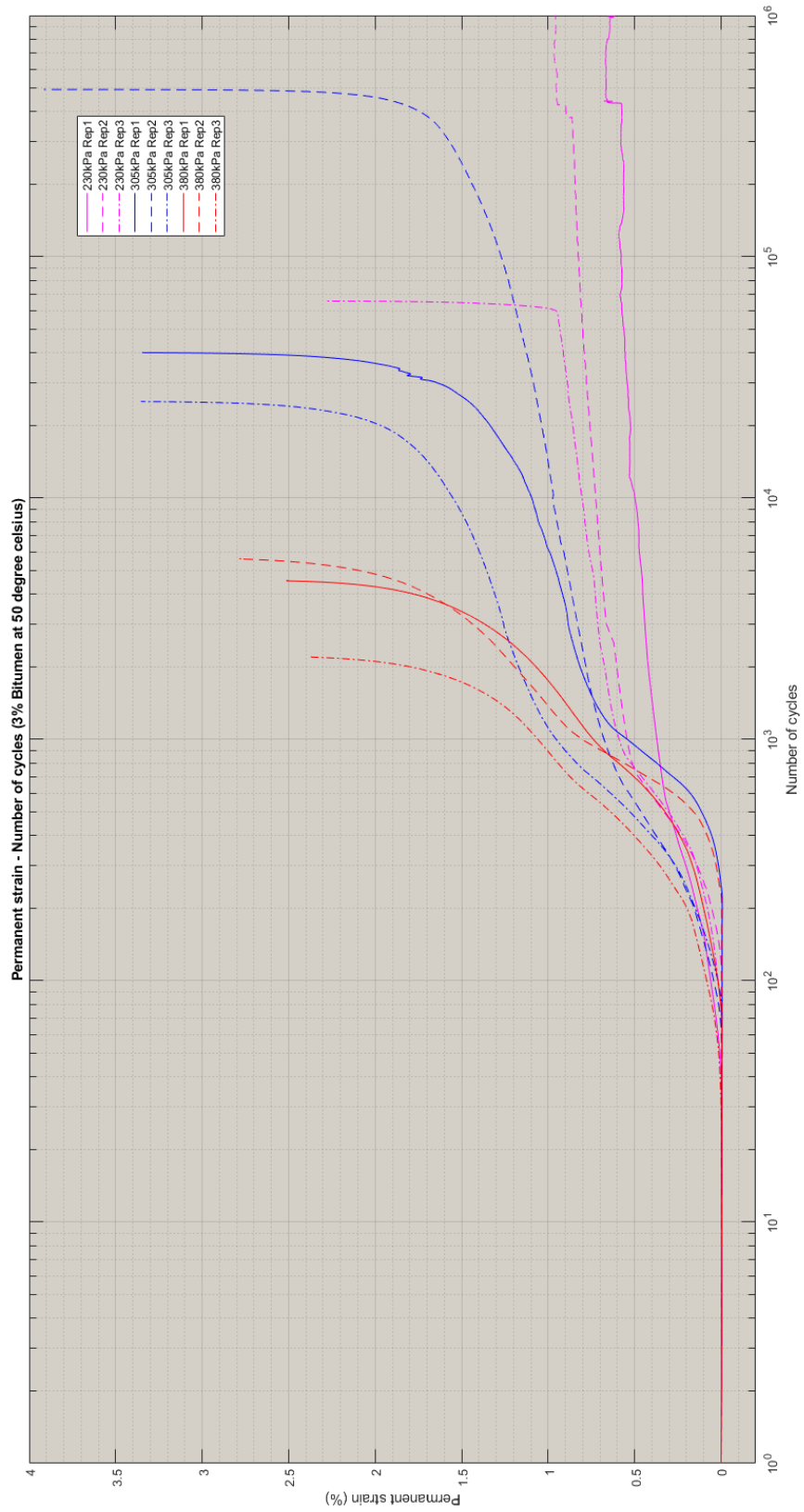
ทั้งนี้จากการทดสอบการเสีรูปถาวรของวัสดุ BSM ทำให้ทราบค่าการยุบตัวจากการเก็บข้อมูลของ LVDT ในหน่วยมิลลิเมตร ซึ่งจะสามารถนำไปหาค่าการยุบที่วัสดุไม่สามารถคืนตัวได้ (Permanent Strain) ของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา โดยสามารถนำมาสร้างกราฟระหว่างค่าการยุบที่วัสดุไม่สามารถคืนตัวได้กับจำนวนรอบที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 31-34



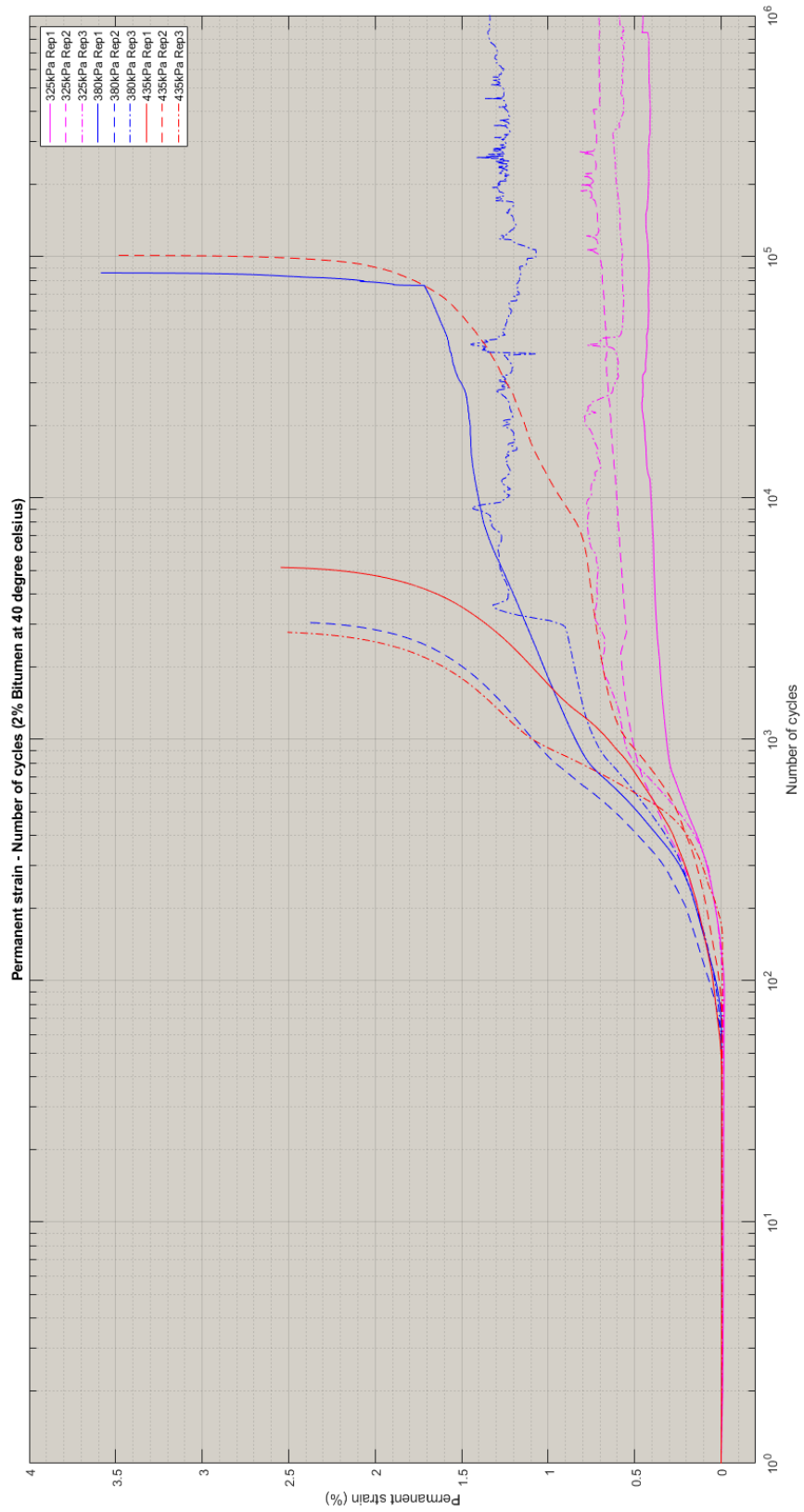
รูปที่ 31 กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% และซีเมนต์ 1% ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 32 กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และซีเมนต์ 1% ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 33 กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 34 กราฟการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 31 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุ B3C1-40°C พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำ 436 kPa พฤติกรรมของวัสดุมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% จนครบ 1,000,000 รอบ แสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ทั้ง 3 ตัวอย่าง ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำ 545 kPa ตัวอย่างเกิดการวิบัติทั้งหมด โดยพฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% และอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ แต่เมื่อรอบการทดสอบผ่านไปสักระยะเวลาหนึ่ง permanent strain จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำ จนทำให้เข้าใกล้ 1% strain หลังจากนั้น พฤติกรรมของวัสดุจะอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ จนทำให้วัสดุเกิดการวิบัติเมื่อ permanent strain เกินกว่า 1% และที่ระดับหน่วยแรงกระทำ 655 kPa ตัวอย่างเกิดการวิบัติทั้งหมด โดยพฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำ ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ตั้งแต่เริ่มการทดสอบ ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็วในรอบการทดสอบที่ต่ำ

จากรูปที่ 32 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุ B2C1-50°C พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำ 685 kPa พฤติกรรมของวัสดุมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% จนครบ 1,000,000 รอบ แสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้จำนวน 2 ตัวอย่าง ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำ 800 และ 915 kPa ตัวอย่างเกิดการวิบัติทั้งหมด โดยพฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำ ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ตั้งแต่เริ่มการทดสอบ ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็วในรอบการทดสอบที่ต่ำ

จากรูปที่ 33 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุ B3-50°C พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำ 230 kPa พฤติกรรมของวัสดุมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% จนครบ 1,000,000 รอบ แสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้จำนวน 2 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบครั้งที่ 3 ในช่วงแรกของการทดสอบพฤติกรรมของวัสดุมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% และอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ แต่เมื่อรอบการทดสอบผ่านไปสักระยะเวลาหนึ่ง permanent strain จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำ จนทำให้เข้าใกล้ 1% strain หลังจากนั้น พฤติกรรมของวัสดุจะอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ จนทำให้วัสดุเกิดการวิบัติเมื่อ permanent strain เกินกว่า 1% ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำ 305 kPa ตัวอย่างเกิดการวิบัติทั้งหมด โดยพฤติกรรมของวัสดุ

ในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% และอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ แต่เมื่อรอบการทดสอบผ่านไปสักระยะเวลาหนึ่ง permanent strain จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำซ้ำ จนทำให้เข้าใกล้ 1% strain หลังจากนั้นพฤติกรรมของวัสดุจะอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ จนทำให้วัสดุเกิดการวิบัติเมื่อ permanent strain เกินกว่า 1% และที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 380 kPa ตัวอย่างเกิดการวิบัติทั้งหมด โดยพฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำซ้ำ ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ตั้งแต่เริ่มการทดสอบ ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็วในรอบการทดสอบที่ต่ำ

จากรูปที่ 34 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุ B2-50°C พบว่า ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 325 kPa พฤติกรรมของวัสดุมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% จนครบ 1,000,000 รอบ แสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ทั้ง 3 ตัวอย่าง ส่วนที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 380 kPa มี 1 ตัวอย่าง นั่นคือ การทดสอบครั้งที่ 3 ที่มีพฤติกรรมเหมือนกับที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 325 kPa แต่อยู่ในระดับที่เกินกว่า 1% แต่ไม่เกิน 3% และอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้จนครบ 1,000,000 รอบ ส่วนการทดสอบครั้งที่ 1 พฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนอยู่ในระดับเกินกว่า 1% แต่ไม่เกิน 3% และอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ แต่เมื่อรอบการทดสอบผ่านไปสักระยะเวลาหนึ่ง permanent strain จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำซ้ำ จนเข้าใกล้ 1.5% strain หลังจากนั้นพฤติกรรมของวัสดุจะอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้จนทำให้วัสดุเกิดการวิบัติ ส่วนในการทดสอบครั้งที่ 2 พฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำซ้ำ ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ตั้งแต่เริ่มการทดสอบ ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็วในรอบการทดสอบที่ต่ำ และที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 435 kPa ตัวอย่างเกิดการวิบัติทั้งหมด โดยพฤติกรรมของวัสดุในการทดสอบครั้งที่ 2 พฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% และอยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ แต่เมื่อรอบการทดสอบผ่านไปสักระยะเวลาหนึ่ง permanent strain จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรงกระทำซ้ำ จนทำให้เข้าใกล้ 1% strain หลังจากนั้นพฤติกรรมของวัสดุจะอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ จนทำให้วัสดุเกิดการวิบัติเมื่อ permanent strain เกินกว่า 1% ส่วนการทดสอบครั้งที่ 1 และ 3 พฤติกรรมของวัสดุในช่วงต้นมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละรอบของการรับแรง

กระทำซ้ำ ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในสถานะไม่คงที่หรือไม่สามารถคงรูปได้ตั้งแต่เริ่มการทดสอบ ทำให้วัสดุเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็วในรอบการทดสอบที่ต่ำ

โดยที่กล่าวมาข้างต้นพฤติกรรมของวัสดุ BSM ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำต่ำสุดจะมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1% ทำให้วัสดุ BSM อยู่ในสถานะคงที่หรือคงรูปได้ โดยรูปแบบการเสียรูปถาวรไปเป็นไปตามทฤษฎี shakedown ตามข้อกำหนดใหม่ที่ Alnedawi (2019) ได้กล่าวไว้ นั่นคือ เมื่อ permanent deformation ไม่เกิน 1% strain จะจัดอยู่ในช่วงของ Plastic Shakedown ส่วนแรงกระทำซ้ำที่เกินกว่าแรงกระทำซ้ำต่ำที่สุด วัสดุ BSM จะมี permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละรอบของการทดสอบ จนทำให้วัสดุเกิดการวิบัติในรอบการทดสอบที่ต่ำกว่า 1 ล้านรอบ โดยมี permanent strain เกินกว่า 1% แต่ไม่เกิน 3% ทำให้สามารถจัดอยู่ในช่วงของ Plastic Creep หากวัสดุมี permanent deformation เกินกว่า 3% strain จะสามารถจัดอยู่ในช่วง Incremental Collapse

จากผลการทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำโดยมีการผันแปรอุณหภูมิไปที่ 40 และ 50 องศาเซลเซียส พฤติกรรมของวัสดุ B3C1-40°C, B2C1-50°C, B3-50°C และ B2-40°C ที่มีความสามารถอยู่ในสถานะคงที่ได้หรือจัดอยู่ในช่วง Plastic Shakedown คือที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 436, 685, 230 และ 325 kPa หากใช้ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำเกินกว่าที่ได้กล่าวมา วัสดุ จะไม่สามารถอยู่ในสถานะคงที่ได้หรือจัดอยู่ในช่วงของ Incremental Collapse และจะเกิดการวิบัติก่อนการทดสอบครบ 1,000,000 รอบ โดยจะสามารถสรุปช่วงของการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษาตามทฤษฎี Shakedown ได้ดังตารางที่ 22 และตารางที่ 23

ตารางที่ 22 ช่วงของการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ใช้ปูนซีเมนต์ 1% ร่วมในสารผสมเพิ่ม ตามทฤษฎี Shakedown

No.	Temperature (°C)	Deviator stress (kPa)	Ranges of Shakedown
B3C1-1	40	436	Plastic Shakedown
B3C1-2	40	436	Plastic Shakedown
B3C1-3	40	436	Plastic Shakedown
B3C1-1	40	545	Incremental Collapse
B3C1-2	40	545	Incremental Collapse
B3C1-3	40	545	Incremental Collapse
B3C1-1	40	655	Incremental Collapse
B3C1-2	40	655	Incremental Collapse
B3C1-3	40	655	Incremental Collapse
B2C1-1	50	685	Incremental Collapse
B2C1-2	50	685	Plastic Shakedown
B2C1-3	50	685	Plastic Shakedown
B2C1-1	50	800	Incremental Collapse
B2C1-2	50	800	Incremental Collapse
B2C1-3	50	800	Incremental Collapse
B2C1-1	50	915	Incremental Collapse
B2C1-2	50	915	Incremental Collapse
B2C1-3	50	915	Incremental Collapse

ตารางที่ 23 ช่วงของการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ตาม
ทฤษฎี Shakedown

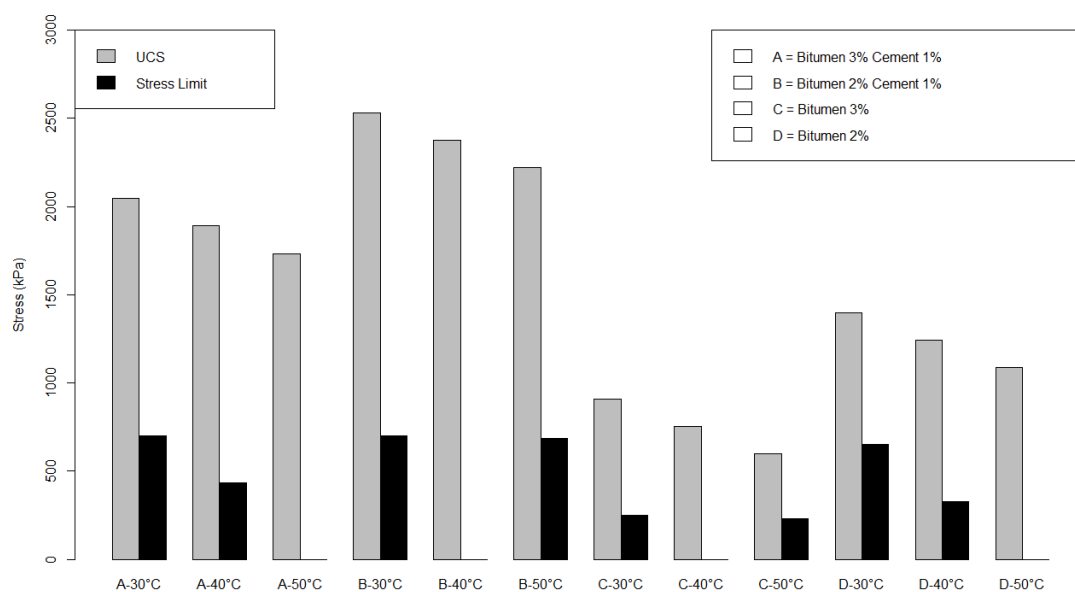
No.	Temperature (°C)	Deviator stress (kPa)	Ranges of Shakedown
B3-1	50	230	Plastic Shakedown
B3-2	50	230	Plastic Shakedown
B3-3	50	230	Incremental Collapse
B3-1	50	305	Incremental Collapse
B3-2	50	305	Incremental Collapse
B3-3	50	305	Incremental Collapse
B3-1	50	380	Incremental Collapse
B3-2	50	380	Incremental Collapse
B3-3	50	380	Incremental Collapse
B2-1	40	325	Plastic Shakedown
B2-2	40	325	Plastic Shakedown
B2-3	40	325	Plastic Shakedown
B2-1	40	380	Incremental Collapse
B2-2	40	380	Incremental Collapse
B2-3	40	380	Plastic Creep
B2-1	40	435	Incremental Collapse
B2-2	40	435	Incremental Collapse
B2-3	40	435	Incremental Collapse

ดังนั้น จากผลการทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำของวัสดุ BSM โดยมีการผันแปรอุณหภูมิ ทำให้ทราบถึงขีดจำกัด (stress limit) ที่ทำให้วัสดุอยู่ในช่วงของ Plastic Shakedown หรืออยู่ในสถานะที่สามารถคงรูปได้ (stable state) โดยต้องไม่เกิน 0.23, 0.31, 0.38 และ 0.26 เท่าของค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด สำหรับ B3C1-40°C, B2C1-50°C, B3-50°C และ B2-40°C ตามลำดับ ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Maree (1982) ที่ได้กล่าวไว้ว่า วัสดุหินคลุก (Unbound Granular Material, UGM) ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำที่ต่ำกว่า 0.58 เท่าของกำลังต้านทานการวิบัติการเสียรูปจะมีสถานะคงที่ ซึ่งทางผู้วิจัยได้นำผลการศึกษาของ ไพศาล ปู่ไชยสอน

(2560) และ ลภน เชิดหิรัญกร & วรากร ตียะพัฒนพุดิ. (2561) ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C มาร่วมในการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 24 และรูปที่ 35

ตารางที่ 24 ขีดจำกัดของวัสดุ BSM ที่ทำให้อยู่ในสถานะสามารถคงรูปได้

BSM	Temperature (°C)	UCS (kPa)	Stress Limit (kPa)	Stress Limit/UCS
B3C1	30	2,046	700	0.34
B3C1	40	1,890	436	0.23
B2C1	30	2,532	700	0.28
B2C1	50	2,220	685	0.31
B3	30	911	250	0.27
B3	50	599	230	0.38
B2	30	1,398	650	0.46
B2	40	1,242	325	0.26



รูปที่ 35 ขีดจำกัดของวัสดุ BSM ที่ทำให้อยู่ในสถานะสามารถคงรูปได้

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคืนตัว

การวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_r) หาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงกระทำซ้ำ (deviator stress, σ_d) กับการยุบตัวที่สามารถคืนตัวได้ (resilient strain) ดังแสดงในสมการที่ 2-1 ซึ่งค่าโมดูลัสคืนตัวแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ โดยผลการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุรวมรวมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ร้อยละ 3 และ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ใช้หรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม แสดงดังตารางที่ 25-28

ตารางที่ 25 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM 3% ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม

No.	Temperature	Stress level	Deviator stress (kPa)	M_r (Mpa)
B3C1-1	40°C	20%	436	880.57
B3C1-2	40°C	20%	436	859.31
B3C1-3	40°C	20%	436	843.47
Average				861.12
Standard deviation				18.62
Standard error				10.75
B3C1-1	40°C	25%	545	857.96
B3C1-2	40°C	25%	545	768.30
B3C1-3	40°C	25%	545	917.79
Average				848.02
Standard deviation				75.24
Standard error				43.44
B3C1-1	40°C	30%	655	799.38
B3C1-2	40°C	30%	655	778.00
B3C1-3	40°C	30%	655	820.06
Average				799.15
Standard deviation				21.03
Standard error				12.14

ตารางที่ 26 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM 2% ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม

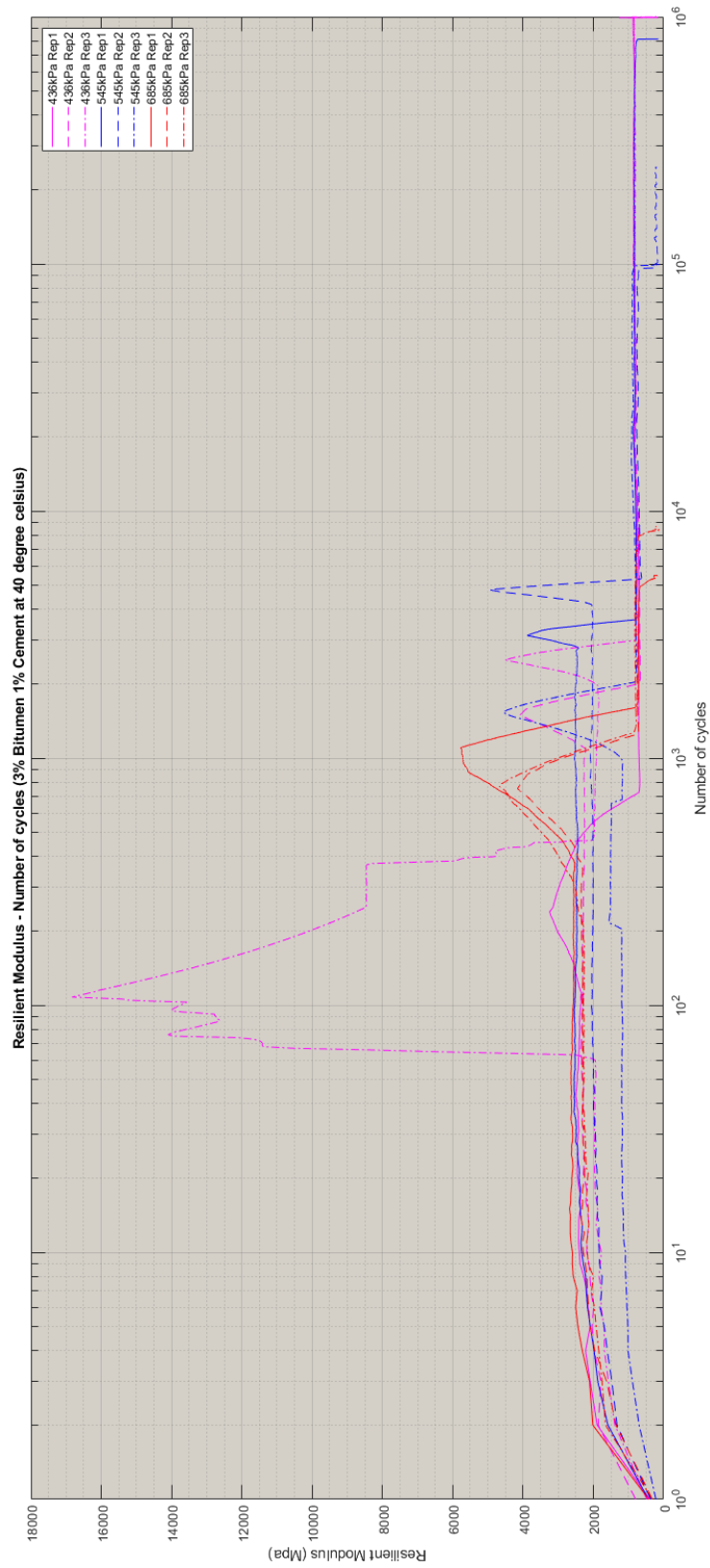
No.	Temperature	Stress level	Deviator stress (kPa)	M_r (Mpa)
B2C1-1	50°C	30%	685	861.58
B2C1-2	50°C	30%	685	1005.60
B2C1-3	50°C	30%	685	891.69
Average				919.62
Standard deviation				75.96
Standard error				43.86
B2C1-1	50°C	35%	800	803.19
B2C1-2	50°C	35%	800	778.02
B2C1-3	50°C	35%	800	821.60
Average				800.94
Standard deviation				21.88
Standard error				12.63
B2C1-1	50°C	40%	915	873.49
B2C1-2	50°C	40%	915	839.05
B2C1-3	50°C	40%	915	761.08
Average				824.54
Standard deviation				57.59
Standard error				33.25

ตารางที่ 27 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM 3%

No.	Temperature	Stress level	Deviator stress (kPa)	M_r (Mpa)
B3-1	50°C	30%	230	601.62
B3-2	50°C	30%	230	571.29
B3-3	50°C	30%	230	504.25
Average				559.05
Standard deviation				49.83
Standard error				28.77
B3-1	50°C	40%	305	607.66
B3-2	50°C	40%	305	548.63
B3-3	50°C	40%	305	521.33
Average				559.21
Standard deviation				44.13
Standard error				25.48
B3-1	50°C	50%	380	478.59
B3-2	50°C	50%	380	501.01
B3-3	50°C	50%	380	532.74
Average				504.11
Standard deviation				27.21
Standard error				15.71

ตารางที่ 28 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM 2%

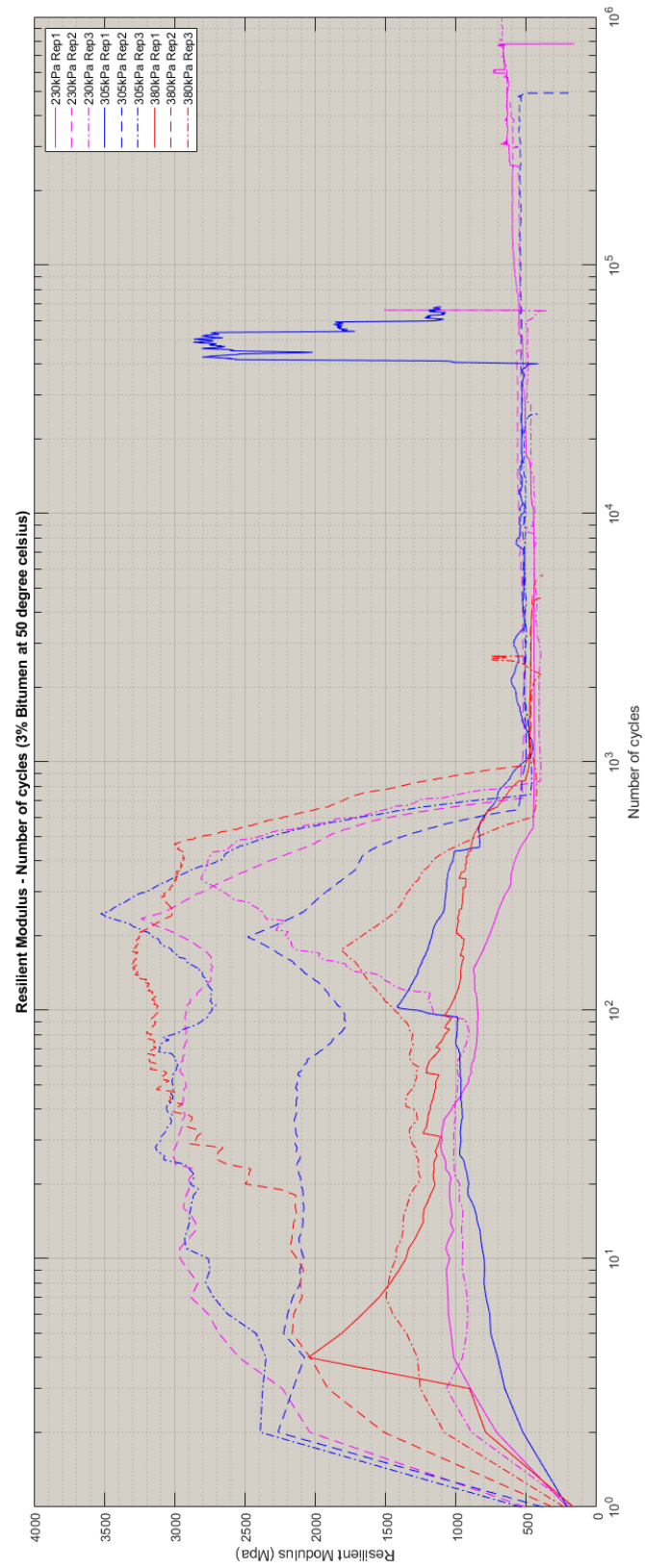
No.	Temperature	Stress level	Deviator stress (kPa)	M_r (Mpa)
B2-1	40°C	30%	325	615.94
B2-2	40°C	30%	325	726.04
B2-3	40°C	30%	325	536.23
Average				626.07
Standard deviation				95.31
Standard error				55.03
B2-1	40°C	35%	380	618.02
B2-2	40°C	35%	380	513.57
B2-3	40°C	35%	380	703.57
Average				611.72
Standard deviation				95.16
Standard error				54.94
B2-1	40°C	40%	435	730.21
B2-2	40°C	40%	435	612.90
B2-3	40°C	40%	435	542.40
Average				628.50
Standard deviation				94.87
Standard error				54.77



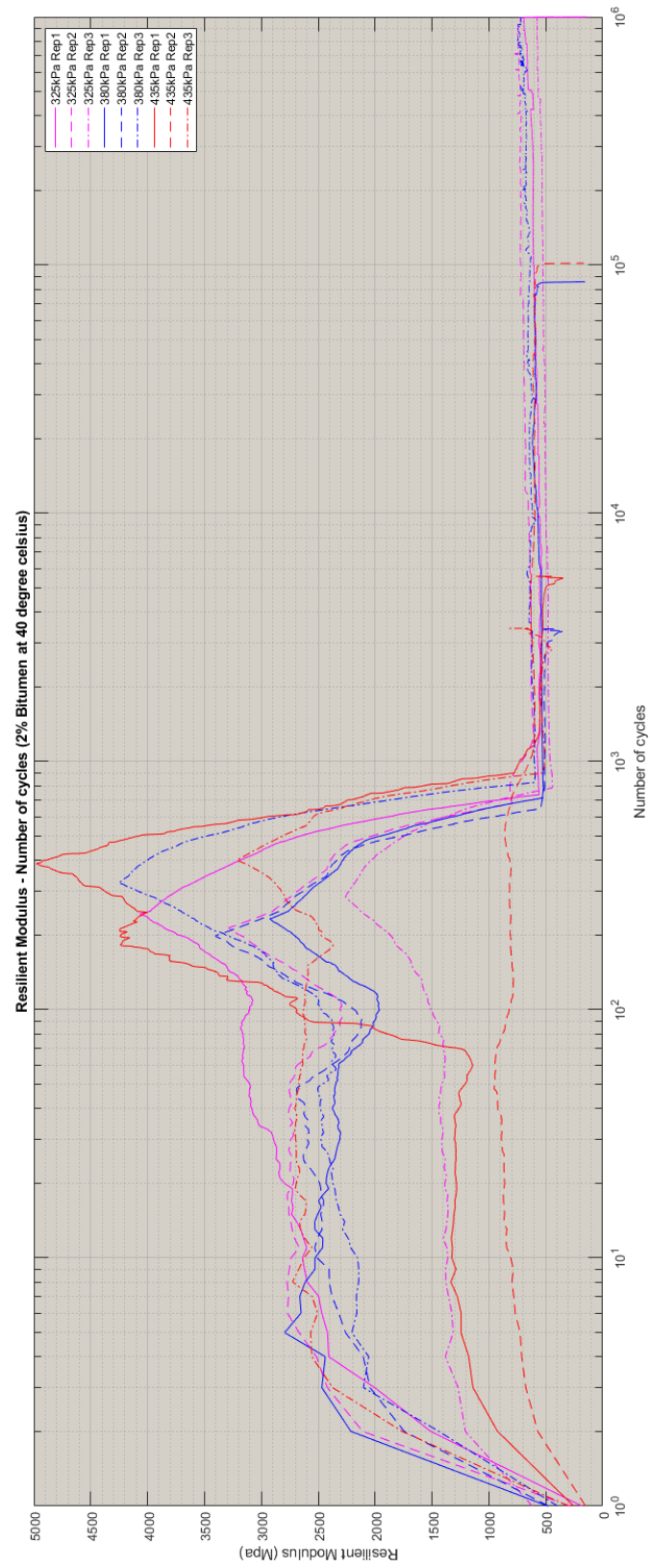
รูปที่ 36 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 37 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอีมีลชัน 2% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



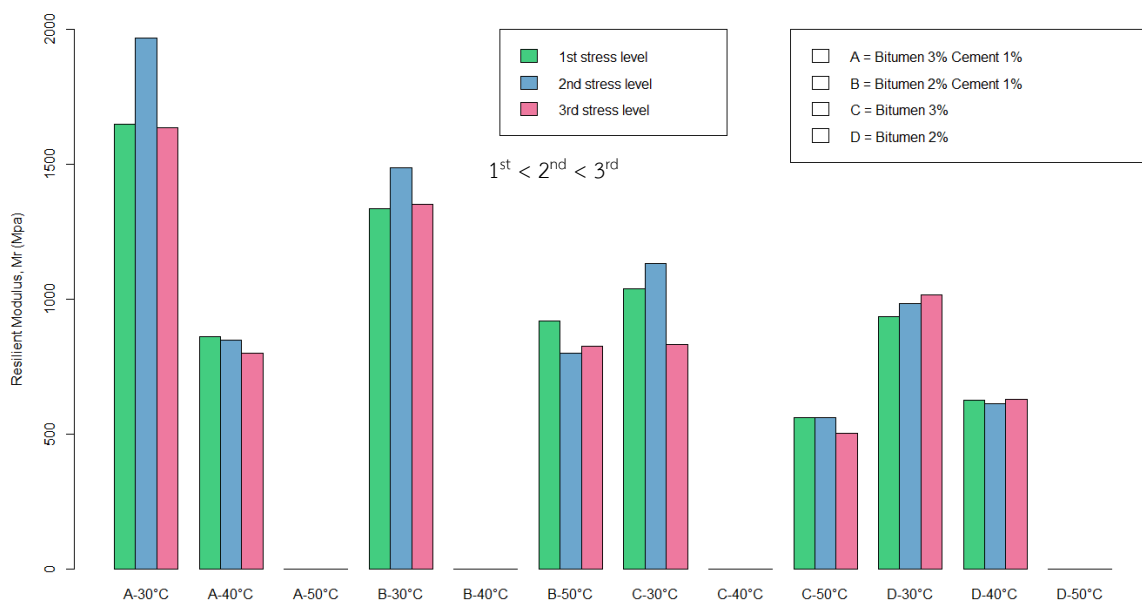
รูปที่ 38 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 39 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% ทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM จะเห็นได้ว่าในทุกกระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ วัสดุ BSM มีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการทดสอบ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง โดยพฤติกรรมของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษาโมดูลัสการคืนตัวต่อปริมาณจราจรที่วัสดุได้รับ พบว่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 1,000 แต่ไม่เกิน 10,000 รอบ หลังจากนั้นโมดูลัสการคืนตัวจะมีค่าลดลงมาอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างจะคงที่และจะค่อยๆ มีค่าลดลงจนวัสดุได้รับปริมาณจราจรถึง 1,000,000 รอบ หรือจนวัสดุเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 36-39 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ebels (2008) ที่ได้ระบุพฤติกรรมด้าน Stiffness Modulus ต่อ Time/traffic ว่าค่า Stiffness Modulus จะเพิ่มขึ้นในช่วง Curing phase และจะลดลงในช่วง Reduction phase โดยนักวิจัยทั่วไปได้กล่าวถึงช่วง Curing phase ซึ่ง Stiffness Modulus โดยปกติแล้วจะเพิ่มขึ้นในช่วง 6-18 เดือนหลังการก่อสร้างทางเสร็จ แต่ Ebels (2008) ได้ให้ข้อสรุปจากที่เขาทำการทดสอบและการสังเกตในระยะยาวของวัสดุ BSM ภายใต้การจำลองปริมาณจราจร (Heavy Vehicle Simulator) พบว่า Stiffness Modulus ที่เพิ่มขึ้นของวัสดุไม่ได้เป็นผลมาจากการบ่มหลังการก่อสร้างทางเสร็จ แต่เนื่องจากปริมาณจราจรที่ได้รับทำให้ Stiffness Modulus มีค่าเพิ่มขึ้นจนวัสดุเกิดการทรุดตัวเนื่องจากความล้าและทำให้ Stiffness Modulus ของวัสดุมีค่าลดลง

โดยผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้กล่าวมาดังตารางที่ 25-28 แสดงให้เห็นว่าวัสดุ BSM จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวมากหรือน้อย การเปลี่ยนแปลงระดับของหน่วยแรงกระทำที่ใช้ทำการทดสอบในขั้นต้นยังไม่สามารถบอกได้อย่างแน่ชัด ในขณะที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณบิพูเมนอิมัลชัน และปริมาณซีเมนต์ เป็นตัวกำหนดค่าโมดูลัสคืนตัวว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งการเพิ่มระดับอุณหภูมิจะทำให้ค่าโมดูลัสคืนตัวลดลง ส่วนการเพิ่มปริมาณบิพูเมนอิมัลชันและปริมาณซีเมนต์สามารถทำให้ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นได้ สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 40 โดยผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคืนตัวที่ระดับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะใช้ผลการศึกษาของ ไพศาล บุษย์ไชยสอน (2560) และ ลภาน เขิดศิริณกร & วรากร ดิยะพัฒน์พุดิ. (2561) มาร่วมในการวิเคราะห์



รูปที่ 40 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ผสมด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% ใช้หรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม โดยมีการผันแปรอุณหภูมิ

4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้านสมรรถนะของวัสดุ BSM

จากผลการทดสอบการเสีรุกรายภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ และผลการวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ BSM ร้อยละ 3 และร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ใช้หรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมในสารผสมเพิ่ม เมื่อได้รับการผันแปรอุณหภูมิที่สูงขึ้นร่วมกับปัจจัยด้านหน่วยแรงกระทำซ้ำที่หลากหลาย โดยจะนำผลการศึกษาของ ไพศาล ปู่ไชยสอน (2560) และ ลภน เชิดหิรัญกร & วรากร ตียะพัฒน์พุฒิ. (2561) มาร่วมในการวิเคราะห์ผลทางด้านสถิติ จะสามารถอธิบายได้ตามหลักสถิติ ดังนี้

4.4.1 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

ผลของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation analysis) จะถูกนำเสนอผ่านค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างสองตัวแปรที่มีค่าอยู่ระหว่าง $-1.00 \leq r \leq 1.00$ กล่าวคือ หากมีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีระดับความสัมพันธ์กันสูงมาก หากมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ (Perfect correlation) บางครั้งอาจเรียกได้ว่าเป็นตัวแปรตัวเดียวกัน แต่ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ามีระดับความสัมพันธ์กันต่ำมาก หากมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง แต่ตัวแปรทั้งสองอาจมีความสัมพันธ์ในลักษณะอื่นๆ ได้

สำหรับเครื่องหมายลบของหน้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะแสดงถึงทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร ถ้ามีค่าเป็นลบ ($r < 0$) หมายถึงตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงลบ กล่าวคือ หากค่าตัวแปรหนึ่งเพิ่มตัวแปรอีกตัวจะมีค่าลดลงหรือในทางกลับกัน แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นบวก ($r > 0$) หมายถึง ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงบวก กล่าวคือ เมื่อตัวแปรหนึ่งมีค่าสูงขึ้นอีกตัวแปรหนึ่งก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (De Vaus & de Vaus, 2013) โดยผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ด้านสมรรถนะของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน จะแสดงดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

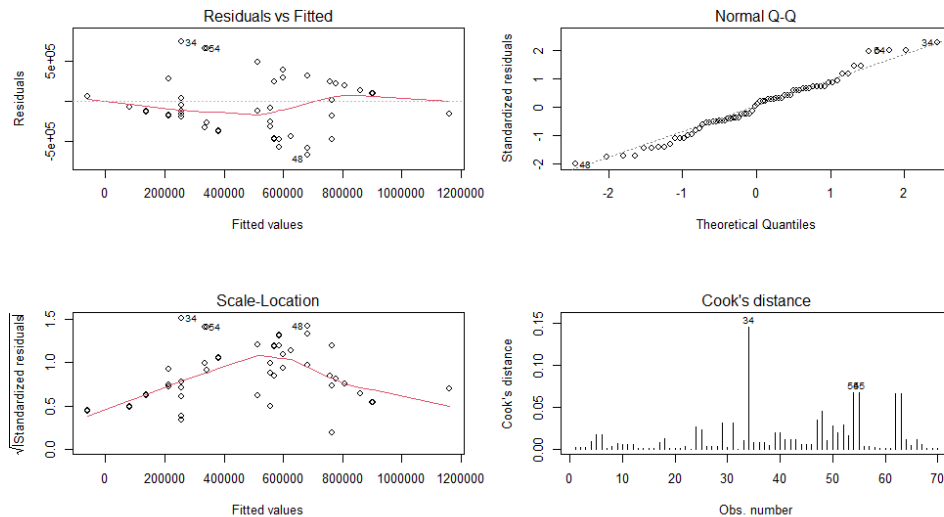
Variable	Bitumen	Cement	Temp.	Deviator stress	Cycles	M_r
Bitumen	1.00	0.00	0.07	-0.40	-0.06	0.02
Cement	0.00	1.00	-0.02	0.65	0.00	0.56
Temp.	0.07	-0.02	1.00	-0.17	-0.42	-0.69
Deviator stress	-0.40	0.65	-0.17	1.00	-0.24	0.53
Cycles	-0.06	0.00	-0.42	-0.24	1.00	0.32
M_r	0.02	0.56	-0.69	0.53	0.32	1.00

จากตารางที่ 29 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนรอบการทดสอบที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ โดยมีความสัมพันธ์ในช่วง 0.30-0.49 แสดงว่า อุณหภูมิกับจำนวนรอบการทดสอบที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้มีความสัมพันธ์อยู่ในระดับกลางถึงสูง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับจำนวนรอบการทดสอบ มีค่าเท่ากับ -0.42 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุ BSM หากมีการผันแปรอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้จำนวนรอบการทดสอบที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ลดลง ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM มีความสัมพันธ์ในช่วง 0.50-0.69 แสดงว่า อุณหภูมิกับโมดูลัสคั้นตัวมีความสัมพันธ์อยู่ในระดับที่สูงถึงสูงมาก โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับโมดูลัสคั้นตัว มีค่าเท่ากับ -0.69 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุ BSM เมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM ลดลงด้วยเช่นกัน

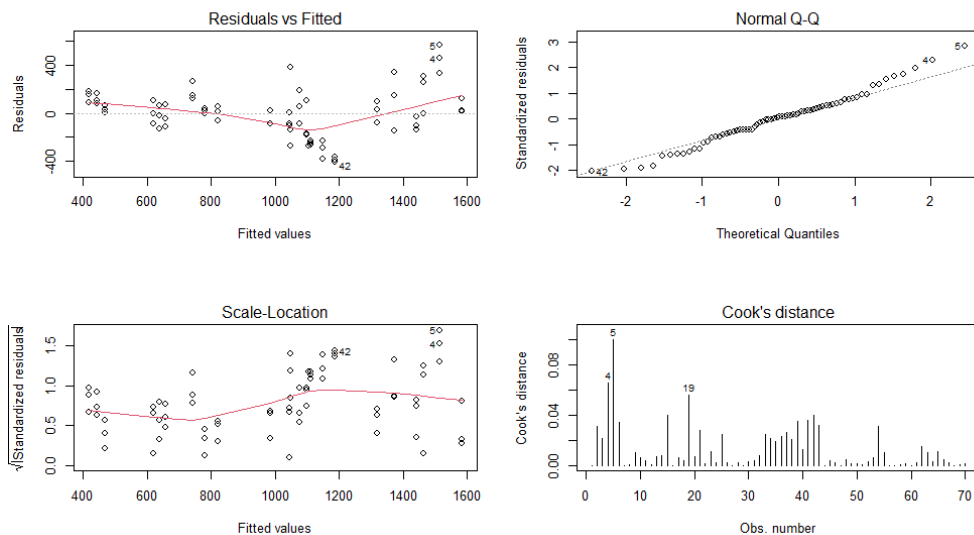
4.4.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ

จากผลการทดสอบการเสีรूपถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำและผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคั้นตัวที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ จะต้องวิเคราะห์หาค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ของการทดสอบก่อน โดยการประมาณค่าทางสถิตินั้นจะ

อ่อนไหวต่อตัวอย่างที่ผิดปกติ ซึ่งทำให้ค่าประมาณค่าสถิติผิดและมักทำให้ตัวแปรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการวิเคราะห์ Outlier case แสดงได้ดังรูปที่ 41 และ รูปที่ 42



รูปที่ 41 การวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ของการทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ



รูปที่ 42 การวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM

จาก Outlier case ที่แสดงดังรูปที่ 41 และ 42 จะต้องถูกตัดออกในขั้นตอนทำสะอาดข้อมูลก่อนเข้าสู่ขั้นตอนวิเคราะห์ โดย Outlier case ข้างต้นมีค่าที่ผิดปกติของการทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ ได้แก่ ข้อมูลการทดสอบที่ 34, 48, 54 และ 55 นั่นคือ วัสดุ BSM 2% ทดสอบที่ stress 800 kPa อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 3, วัสดุ BSM 2%

ทดสอบที่ stress 380 kPa อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 2 และ วัสดุ BSM 2% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่ stress 685 kPa อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 2 และ 3

ส่วนค่าที่ผิดปกติจากการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM ได้แก่ ข้อมูลการทดสอบที่ 4, 5, 19 และ 42 นั่นคือ ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM 3% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่ stress 700 kPa อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2, ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM 3% ทดสอบที่ stress 250 kPa อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุ BSM 3% และซีเมนต์ 1% ทดสอบที่ stress 655 kPa อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 2 จากนั้นเมื่อทำการตัด Outlier case แล้ว จะสามารถวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) ได้ดังตารางที่ 30 และ ตารางที่ 31

ตารางที่ 30 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุการทดสอบการเสีรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ

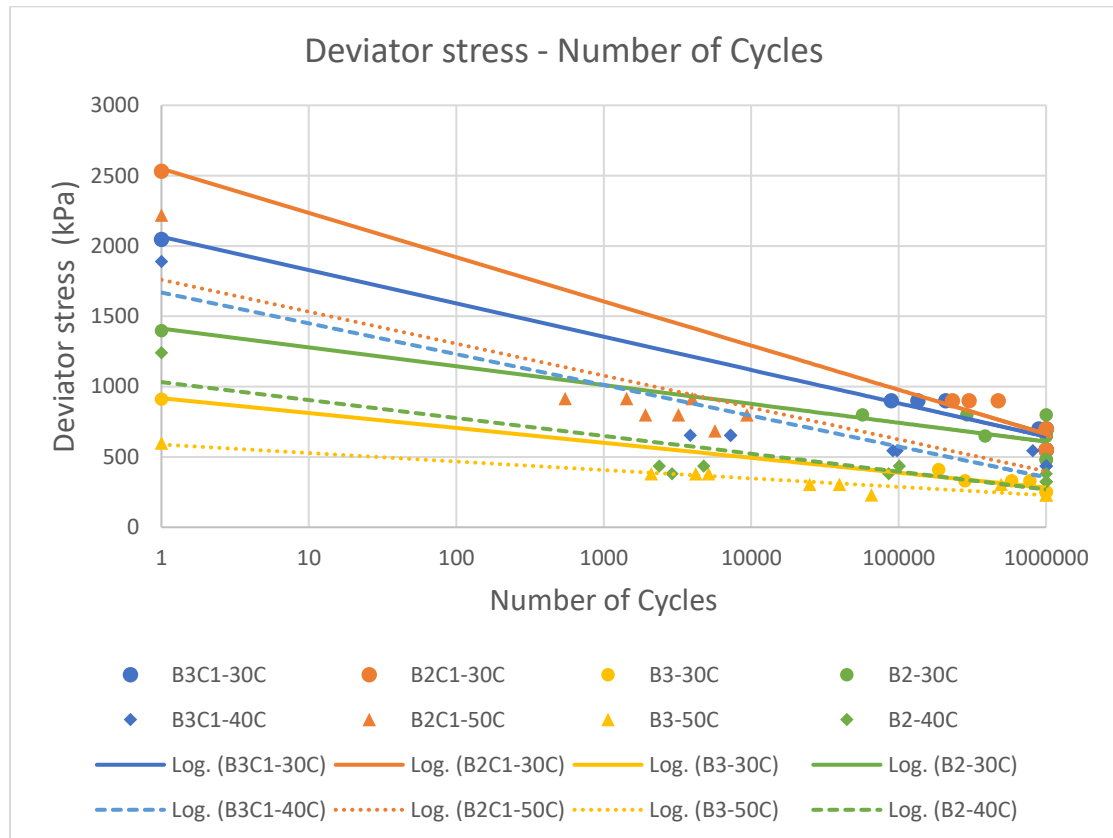
Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3274478.9	366328.2	8.939	1.09×10^{-12} ***
Temp.	-32698.6	4652.5	-7.028	2.07×10^{-9} ***
Bitumen	-285067.1	89045.8	-3.201	0.00217 **
Cement	488220.7	113904.8	4.286	6.57×10^{-5} ***
Deviator stress	-1910.6	291.4	-6.558	1.33×10^{-8} ***
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'
Multiple R-squared	0.568			
Adjusted R-squared	0.5397			
p-value	1.393×10^{-10}			

จากตารางที่ 30 ข้อมูล p-value แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ บิทูเมนอิมัลชัน ซีเมนต์ และแรงกระทำซ้ำแนวตั้ง มีความสมเหตุสมผล เนื่องจาก p-value < 0.01 สำหรับค่า p-value ของโมเดลมีค่าเท่ากับ 1.393×10^{-10} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 ดังนั้น โมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน ส่วนค่า Multiple R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.568 แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายการเสีรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำของวัสดุ BSM ได้ 56.80%

ดังนั้น พฤติกรรมของวัสดุ BSM เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ปริมาณบิทูเมนอิมัลชันเพิ่มขึ้น 1% โดยน้ำหนักมวลรวม และแรงกระทำซ้ำแนวตั้งเพิ่มขึ้น 1 kPa จะทำให้วัสดุ BSM

มีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปถาวรลดลง ส่วนการเพิ่มซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนัก จะทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปถาวรเพิ่มขึ้นได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ดังแสดงในรูปที่

43



รูปที่ 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกระทำซ้ำแวนดิงกับจำนวนรอบการทดสอบของวัสดุ

BSM โดยมีการผันแปรอุณหภูมิ

จากรูปที่ 43 แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C วัสดุ B2C1 มีความต้านทานการเสีรูปถาวรดีที่สุด สำหรับวัสดุ B3C1, B2 และ B3 มีความต้านทานการเสีรูปถาวรรองลงมา ตามลำดับ โดยเมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถต้านทานการเสีรูปถาวรของวัสดุ BSM ลดลง เนื่องจากสามารถรับน้ำหนักของหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ต่ำลงในการรองรับจนถึง 1,000,000 รอบ โดยที่ B2C1-50°C ยังมีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปถาวรที่ดีกว่าทุกกรณีศึกษา เหมือนเช่นที่ระดับอุณหภูมิ 30°C แต่จะสามารถรองรับขนาดหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ต่ำลง จากระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 700 kPa เป็น 685 kPa ส่วน B3C1-40°C, B2-40°C และ B3-50°C สามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ต่ำลงจากระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 700, 650 และ 250 kPa เป็น 436, 325 และ 230 kPa ตามลำดับ ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะมีการผันแปรอุณหภูมิสูงขึ้น แต่วัสดุ B2C1-50°C และ

B3C1-40°C ในการรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำจนครบ 1,000,000 รอบ ยังสามารถรองรับได้ดีกว่าวัสดุ B3-30°C

ตารางที่ 31 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุค่าโมดูลัสคืบตัวของวัสดุ

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1449.6110	205.8530	7.042	1.96×10^{-9} ***
Temp. (X ₁)	-28.5288	2.5744	-11.082	3.03×10^{-16} ***
Bitumen (X ₂)	105.4678	49.9232	2.113	0.0387 *
Cement (X ₃)	304.4641	60.5336	5.030	4.61×10^{-6} ***
Deviator stress (X ₄)	0.3418	0.1580	2.162	0.0345 *
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'
Multiple R-squared	0.795			
Adjusted R-squared	0.7816			
p-value	2.20×10^{-16}			

จากตารางที่ 31 ข้อมูล p-value แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ ซีเมนต์ บิทูเมนอิมัลชัน และแรงกระทำซ้ำแวนดิ่ง มีความสมเหตุสมผล เนื่องจาก p-value < 0.001 และ p-value < 0.05 ตามลำดับ ส่วนค่า p-value ของโมเดลมีค่า เท่ากับ 2.20×10^{-16} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 ดังนั้นโมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับค่า Multiple R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.795 แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายค่าโมดูลัสคืบตัวของวัสดุ BSM ได้ 79.50%

ดังนั้น พฤติกรรมของวัสดุ BSM เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าโมดูลัสคืบตัวของวัสดุ BSM มีค่าลดลง 28.53 Mpa ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน, ปริมาณซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม และแรงกระทำซ้ำแวนดิ่งเพิ่มขึ้น 1 kPa จะทำให้วัสดุมีค่าโมดูลัสคืบตัวที่เพิ่มขึ้น 105.47, 304.46 และ 0.34 Mpa ตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05, 0.001 และ 0.05 ตามลำดับ

4.4.3 การพยากรณ์ขีดจำกัดในการรองรับปริมาณจราจรของวัสดุ BSM

จากผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติทำให้ทราบถึงค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งก่อนตัวอย่างจะรับได้ โดยผู้วิจัยได้พยากรณ์ค่า UCS ของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษาในหัวข้อ 4.1.1.4 และจากการทดสอบการเสีรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำทำให้ทราบถึงขีดจำกัดของวัสดุ BSM ที่สามารถอยู่ในสถานะคงที่หรืออยู่ในช่วงของ Plastic Shakedown

ดังแสดงในตารางที่ 24 พบว่า B3C1-40°C, B2C1-50°C, B3-50°C และ B2-40°C สามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ไม่เกิน 0.23, 0.31, 0.38 และ 0.26 เท่าของกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุดตามลำดับจากการทราบแนวโน้มดังกล่าว เมื่อวัสดุได้รับการผันแปรอุณหภูมิความสามารถในการรับขนาดหน่วยแรงกระทำซ้ำในกรณีศึกษาที่ไม่ได้ทำการทดสอบ ประกอบไปด้วยวัสดุ B3C1-50°C, B2C1-40°C, B3-40°C และ B2-50°C ซึ่ง B2C1-40°C ยังสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 685 kPa ได้ และ B3-40°C ยังสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำขนาด 230 kPa ได้ ส่วนวัสดุ B3C1-50°C และ B2-50°C จะต้องพยากรณ์ขีดจำกัดในการรองรับปริมาณจราจรของวัสดุ BSM ที่สามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุขนาดหน่วยแรงกระทำที่วัสดุสามารถรองรับได้

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.220×10^3	1.041×10^2	11.725	2×10^{-16} ***
Temp. (X ₁)	-7.714	1.804	-4.276	6.36×10^{-5} ***
Bitumen (X ₂)	-1.675×10^2	2.689×10^1	-6.228	3.91×10^{-8} ***
Cement (X ₃)	2.808×10^2	2.688×10^1	10.447	1.52×10^{-15} ***
Cycles (X ₄)	-1.828×10^{-4}	3.341×10^{-5}	-5.473	7.62×10^{-7} ***
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'
Multiple R-squared	0.7353			
Adjusted R-squared	0.7191			
p-value	2.2×10^{-16}			

จากตารางที่ 32 ข้อมูล p-value แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ ซีเมนต์ บิทูเมนอิมัลชัน และจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรองรับได้ มีความสมเหตุสมผล เนื่องจาก p-value < 0.001 ส่วนค่า p-value ของโมเดลมีค่าเท่ากับ 2.2×10^{-16} ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 ดังนั้น โมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับค่า Multiple R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.7353 แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายขนาดหน่วยแรงกระทำที่วัสดุสามารถรองรับได้ 73.53%

ดังนั้น พฤติกรรมของวัสดุ BSM เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส, ปริมาณบิทูเมนที่เพิ่มขึ้นจาก 2% เป็น 3% และจำนวนรอบที่วัสดุสามารถรองรับได้ จะทำให้วัสดุสามารถรับหน่วยแรงกระทำซ้ำลดลง 7.714, 167.5 และ 1.828×10^{-4} kPa ตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ส่วนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 1% จากการไม่ใช้ปูนซีเมนต์ จะทำให้วัสดุสามารถรับหน่วยแรงกระทำ

ซ้ำเพิ่มขึ้น 280.8 kPa ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 โดยสามารถเขียนสมการพยากรณ์ขนาดหน่วยแรงกระทำที่วัสดุสามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบ ดังสมการที่ 4-2 และจะสามารถทราบขีดจำกัด (Stress Limit) ของวัสดุ BSM จากการพยากรณ์ ที่วัสดุสามารถอยู่ในสถานะคงรูปได้หรืออยู่ในช่วงของ Plastic Shakedown ดังตารางที่ 33

$$\hat{Y} = 1220 - [7.714 \times (X_1)] - [167.5 \times (X_2)] + [280.8 \times (X_3)] - [-1.828 \times 10^{-4} \times (X_4)] \quad (4-2)$$

โดยที่ \hat{Y} คือ ขนาดหน่วยแรงกระทำที่วัสดุสามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบ

X_1 คือ ระดับอุณหภูมิ

X_2 คือ ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน

X_3 คือ ปริมาณซีเมนต์

X_4 คือ จำนวนรอบที่วัสดุสามารถรองรับได้

หมายเหตุ ตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง ระดับอุณหภูมิ : 30, 40 และ 50°C

ตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน : 2 และ 3%

ตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง ปริมาณซีเมนต์ : 0 และ 1%

ตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง จำนวนรอบที่วัสดุรับได้ 1,000,000 รอบ

ตารางที่ 33 ขีดจำกัดของวัสดุ BSM ที่ทำให้อยู่ในสถานะคงรูปได้ในที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C

BSM	Temperature (°C)	UCS (kPa)	Stress Limit (kPa)
B3C1	30	2,046	603 (700)
B3C1	40	1,890	538 (436)
B3C1	50	1,734	473
B2C1	30	2,532	760 (700)
B2C1	40	2,376	696
B2C1	50	2,220	631 (685)
B3	30	911	286 (250)
B3	40	755	221
B3	50	599	157 (230)
B2	30	1,398	444 (650)
B2	40	1,242	379 (325)
B2	50	1,086	314
หมายเหตุ	ค่าในวงเล็บ คือ ผลการทดสอบจริงที่วัสดุสามารถรองรับได้ถึง 1×10^6 รอบ		

จากตารางที่ 33 ทำให้ทราบถึงขีดจำกัด (Stress Limit) ของวัสดุ BSM ในการรองรับปริมาณจราจร 1,000,000 รอบในแต่ละกรณีศึกษา โดยเมื่อวัสดุได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรองรับหน่วยแรงลดลง จากการทราบ Stress Limit ที่ได้กล่าวมาทำให้สามารถทำการพยากรณ์ Stress Ratio (Stress Limit/UCS) ของวัสดุ BSM โดยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุสำหรับ Stress Ratio ของวัสดุ BSM

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.325	2.382×10^{-2}	13.642	3.79×10^{-5} ***
UCS. (X_1)	-2.067×10^{-4}	2.599×10^{-5}	-7.953	0.000507 ***
Stress Limit (X_2)	6.532×10^{-4}	8.371×10^{-5}	7.803	0.000554 ***
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'
Multiple R-squared	0.9305			
Adjusted R-squared	0.9027			
p-value	0.001274			

จากตารางที่ 34 ข้อมูล p-value แสดงให้เห็นว่า ค่า UCS และ Stress Limit มีความสมเหตุสมผล เนื่องจาก p-value < 0.001 ส่วนค่า p-value ของโมเดลมีค่า เท่ากับ 0.001274 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.01 ดังนั้น โมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับค่า Multiple R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.9305 แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบาย Stress Ratio ที่วัสดุสามารถรองรับปริมาณจรรยาได้ 1,000,000 รอบได้ 93.05%

ดังนั้น พฤติกรรมของวัสดุ BSM เมื่อ ค่า UCS เพิ่มขึ้น 1 kPa จะทำให้ Stress Ratio ลดลง 2.067×10^{-4} ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ส่วน Stress Limit เพิ่มขึ้น 1 kPa จะทำให้ Stress Ratio เพิ่มขึ้น 6.532×10^{-4} ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 โดยสามารถเขียนสมการพยากรณ์ Stress Ratio ที่วัสดุสามารถรองรับปริมาณจรรยาได้ 1,000,000 รอบ ดังสมการที่ 4-3 และจะสามารถทราบ Stress Ratio ของวัสดุ BSM จากการพยากรณ์ที่วัสดุสามารถรองรับได้ ดังตารางที่ 35

$$\hat{Y} = 0.325 - [2.067 \times 10^{-4} \times (X_1)] + [6.532 \times 10^{-4} \times (X_2)] \quad (4-3)$$

โดยที่ \hat{Y} คือ Stress Ratio ที่วัสดุสามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบ

X_1 คือ ค่า UCS สูงสุดของวัสดุ BSM

X_2 คือ Stress Limit ที่วัสดุสามารถรองรับได้ 1,000,000 รอบ

หมายเหตุ ตัวแปรค่าต่อเนื่อง ค่า UCS ของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา

ตัวแปรค่าต่อเนื่อง ค่า Stress Limit ของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา

ตารางที่ 35 Stress Ratio ที่วัสดุ BSM สามารถรองรับปริมาณจรรยาได้ 1,000,000 รอบ

BSM	Stress Ratio
B3C1-30°C	0.296
B3C1-40°C	0.286
B3C1-50°C	0.276
B2C1-30°C	0.298
B2C1-40°C	0.289
B2C1-50°C	0.278
B3-30°C	0.324
B3-40°C	0.313
B3-50°C	0.304
B2-30°C	0.326
B2-40°C	0.316
B2-50°C	0.306

จากตารางที่ 35 ทำให้ทราบถึง Stress Ratio ของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา โดยวัสดุ B3C1 เมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิจากระดับ 30°C ไปที่ระดับ 40°C และ 50°C หน่วยแรงในชั้นพื้นทางได้รับจะต้องไม่เกิน 0.296, 0.286 และ 0.276 เท่าของกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ตามลำดับ สำหรับวัสดุ B2C1 เมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิจากระดับ 30°C ไปที่ระดับ 40°C และ 50°C หน่วยแรงในชั้นพื้นทางได้รับจะต้องไม่เกิน 0.298, 0.289 และ 0.278 เท่าของกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ตามลำดับ ส่วนวัสดุ B3 เมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิจากระดับ 30°C ไปที่ระดับ 40°C และ 50°C หน่วยแรงในชั้นพื้นทางได้รับจะต้องไม่เกิน 0.324, 0.313 และ 0.304 เท่าของกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ตามลำดับ และวัสดุ B2 เมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิจากระดับ 30°C ไปที่ระดับ 40°C และ 50°C หน่วยแรงในชั้นพื้นทางได้รับจะต้องไม่เกิน 0.326, 0.316 และ 0.306 เท่าของกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ตามลำดับ

4.4.4 การพยากรณ์ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM

จากการพยากรณ์ค่า UCS ในหัวข้อ 4.1.1.4 และค่า Stress Ratio ของวัสดุ BSM ที่ทำให้อยู่ในสถานะคงรูปได้ (Stable State) หรืออยู่ในช่วงของ Plastic Shakedown Limit ในตารางที่ 35 ซึ่งสามารถรับขนาดของหน่วยแรงกระทำซ้ำได้จนรอบ 1,000,000 รอบ โดยจากผลการวิเคราะห์ค่า

โมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM จากตารางที่ 31 ทำให้สามารถเขียนสมการพยากรณ์ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM ได้ดังสมการที่ 4-4 และจะสามารถพยากรณ์ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM ได้ดังตารางที่ 36

$$\hat{Y} = 1449.61 - [28.53 \times (X_1)] + [105.47 \times (X_2)] + [304.46 \times (X_3)] + [0.34 \times (X_4)] \quad (4-4)$$

โดยที่ \hat{Y} คือ ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM

X_1 คือ ระดับอุณหภูมิ

X_2 คือ ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน

X_3 คือ ปริมาณซีเมนต์

X_4 คือ ขนาดหน่วยแรงกระทำซ้ำที่วัสดุรองรับได้ 1,000,000 รอบ

หมายเหตุ ตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง ระดับอุณหภูมิ : 30, 40 และ 50°C

ตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน : 2 และ 3%

ตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง ปริมาณซีเมนต์ : 0 และ 1%

ตัวแปรค่าต่อเนื่อง ค่า Stress Limit ของวัสดุ BSM แต่ละกรณีศึกษา

ตารางที่ 36 ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM ที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C

BSM	UCS	Stress Ratio	Stress Limit (kPa)	M_r (Mpa)
B3C1-30°C	2,046	0.296	603	1,421
B3C1-40°C	1,890	0.286	538	1,113
B3C1-50°C	1,734	0.276	473	806
B2C1-30°C	2,532	0.298	760	1,369
B2C1-40°C	2,376	0.289	696	1,062
B2C1-50°C	2,220	0.278	631	754
B3-30°C	911	0.324	286	1,008
B3-40°C	755	0.313	221	700
B3-50°C	599	0.304	157	393
B2-30°C	1,398	0.326	444	956
B2-40°C	1,242	0.316	379	649
B2-50°C	1,086	0.306	314	341

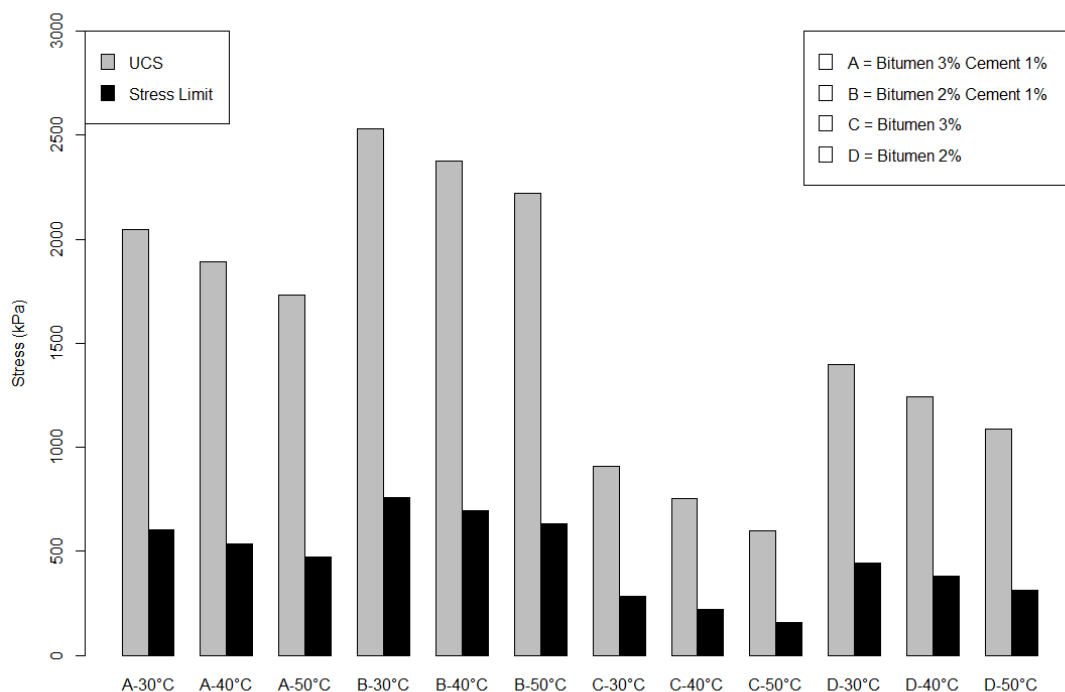
จากตารางที่ 36 แสดงให้เห็นถึงค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM ที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C พบว่า วัสดุ B3C1 มีค่าโมดูลัสการคืนตัวสูงสุดในทุกระดับการผันแปรอุณหภูมิ ส่วนวัสดุ B2C1, B3 และ B2 มีค่าโมดูลัสการคืนตัวรองลงมาตามลำดับ โดยเมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุลดลงในทุกกรณีศึกษา เนื่องจากวัสดุ BSM สามารถรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ต่ำลงจึงส่งผลทำให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุลดลงตามไปด้วย

4.4.5 อภิปรายผลการทดลองส่วนที่ 2

การทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุโครงสร้างชั้นทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) ในการรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำ พบว่า จากระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 3 ระดับ วัสดุ B3C1-40°C, B2C1-50°C, B3-50°C และ B2-40°C พฤติกรรมของวัสดุมีสถานะคงรูปได้ (stable state) ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 538, 631, 157 และ 379 kPa ตามลำดับ ในการทดสอบด้วยหน่วยแรงกระทำซ้ำเป็นจำนวน 1,000,000 รอบ เมื่อพิจารณาสัดส่วนของหน่วยแรงกระทำซ้ำต่อกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ($\sigma_d/\sigma_{1,f}$) มีค่าเท่ากับ 0.286, 0.278, 0.304 และ 0.316 ตามลำดับ

ทั้งนี้ในกรณีศึกษาที่ทางผู้วิจัยไม่ได้ทำการทดสอบแต่ได้ทำการพยากรณ์ค่าขีดจำกัด (Stress Limit) ที่วัสดุสามารถรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำเป็นจำนวน 1,000,000 รอบได้ ได้แก่ วัสดุ B3C1-50°C, B2C1-40°C, B3-40°C และ B2-50°C พบว่า พฤติกรรมของวัสดุมีสถานะคงรูปได้ (stable state) ที่ระดับหน่วยแรงกระทำซ้ำ 473, 696, 221 และ 314 kPa ตามลำดับ ในการทดสอบด้วยหน่วยแรงกระทำซ้ำเป็นจำนวน 1,000,000 รอบ เมื่อพิจารณาสัดส่วนของหน่วยแรงกระทำซ้ำต่อกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ($\sigma_d/\sigma_{1,f}$) มีค่าเท่ากับ 0.276, 0.289, 0.313 และ 0.306 ตามลำดับ

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางของวัสดุ BSM โดยหน่วยแรงในโครงสร้างชั้นพื้นทางของวัสดุ B3C1-40°C, B3C1-50°C, B2C1-40°C, B2C1-50°C, B3-40°C, B3-50°C, B2-40°C และ B2-50°C ต้องไม่เกิน 0.286, 0.276, 0.289, 0.278, 0.313, 0.304, 0.316 และ 0.306 เท่าของกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด ตามลำดับ ในการรองรับจำนวนน้ำหนักรบรรทุก 1 ล้านรอบในช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างทาง ดังรูปที่ 44

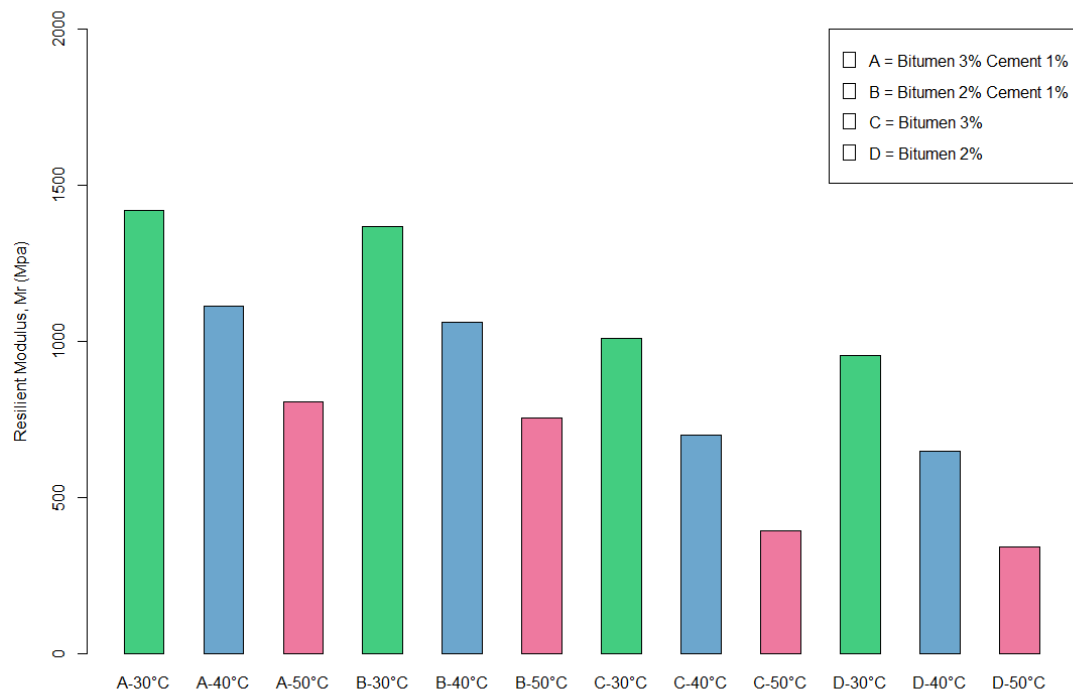


รูปที่ 44 ค่าพยากรณ์ Stress Limit ของวัสดุ BSM ที่สามารถอยู่ในสถานะคงรูปได้ที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C ในหน่วย kPa

เมื่อพิจารณาหน่วยแรงที่โครงสร้างชั้นพื้นทางได้รับจากการจำลองรถบรรทุกชนิดเพลลาเดี่ยว (Single Axle) มีน้ำหนักบรรทุกเพลลามาตรฐาน 18,000 ปอนด์ของ ไพศาล ปุ้ยไชยสอน (2560) พบว่า จะทำให้เกิดหน่วยแรงแนวตั้งสูงสุดที่ผิวด้านบนของชั้นพื้นทางของวัสดุ BSM เท่ากับ 550 kPa ที่อุณหภูมิชั้นผิวทาง 37.5°C และจะเพิ่มขึ้นเป็น 700 kPa ที่อุณหภูมิชั้นผิวทางสูงขึ้นไปถึง 50°C โดยชั้นผิวทางมีความหนา 5 เซนติเมตร ซึ่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาออกแบบชั้นพื้นทางได้ โดยจากผลการทดสอบในด้านขีดจำกัด (Stress Limit) ของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา พบว่า วัสดุ B2C1 สามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้หากระดับอุณหภูมิจากชั้นผิวทางส่งอิทธิพลมาถึงชั้นพื้นทางไม่เกิน 50°C ส่วนวัสดุ B3C1, B3 และ B2 เมื่อชั้นพื้นทางได้รับอุณหภูมิเกินกว่า 37.5°C หรือได้รับหน่วยแรงขนาด 550 kPa จะทำให้เกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วในการรองรับปริมาณจราจรที่ต่ำ ดังนั้น หากต้องการใช้วัสดุดังกล่าวจะต้องเพิ่มความหนาของชั้นผิวทางขึ้น เพื่อลดอิทธิพลจากการได้รับความร้อนและหน่วยแรงที่ส่งมายังชั้นพื้นทาง

นอกจากนี้ภายใต้การทดสอบหน่วยแรงกระทำซ้ำแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM และสามารถจัดช่วงการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM ได้ กล่าวคือ หากวัสดุมีค่า permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปและไม่เกิน 1% strain ทำให้วัสดุอยู่ในสถานะคงรูปได้จนครบการทดสอบที่ 1,000,000 รอบ สามารถจัดวัสดุ BSM อยู่ในช่วง Plastic Shakedown ทั้งนี้หากวัสดุมีค่า permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป จนมีค่า permanent strain อยู่ในช่วงเกินกว่า 1% strain แต่ไม่เกิน 3% strain และทำให้วัสดุอยู่ในสถานะคงรูปได้จนครบการทดสอบที่ 1,000,000 รอบ สามารถจัดวัสดุ BSM อยู่ในช่วง Plastic Creep และหากวัสดุมีค่า permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกรอบการทดสอบ จนทำให้วัสดุเกิดการวิบัติในรอบการทดสอบที่ต่ำกว่า 1,000,000 รอบ ซึ่งมีค่า permanent strain อยู่ในช่วงเกินกว่า 3% strain สามารถจัดวัสดุ BSM อยู่ในช่วง Incremental Collapse ดังนั้น จากการทราบแนวโน้มของค่า permanent strain ทำให้สามารถบ่งบอกถึงขีดความสามารถในการรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำ กล่าวคือ เมื่อค่า permanent strain เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละรอบการทดสอบ จนมีค่าเข้าใกล้ 1% strain จะทำให้วัสดุ BSM เกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถประเมินคุณสมบัติความต้านทานการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างชั้นพื้นทางในการซ่อมบำรุงก่อนเกิดความเสียหายได้

สำหรับค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมด้านความแข็งแรงของวัสดุ BSM ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าโมดูลัสคืนตัวมีค่าลดลง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ในขณะที่การเพิ่มปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน และปริมาณซีเมนต์สามารถทำให้ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุเพิ่มขึ้นได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ 0.001 ตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณบิทูเมนอิมัลชันนั้นสามารถเพิ่มค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุ BSM ได้จริง แต่ในทางกลับกันหากพิจารณาในด้านการรองรับน้ำหนักของหน่วยแรงกระทำซ้ำที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้นั้น วัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% จะสามารถรองรับหน่วยแรงกระทำซ้ำได้ดีกว่าวัสดุ BSM ผสมด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 3% และการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มร่วมสามารถช่วยเพิ่มทั้งน้ำหนักหน่วยแรงกระทำซ้ำที่วัสดุ BSM สามารถรองรับได้ และสามารถเพิ่มค่าโมดูลัสของวัสดุได้อีกเช่นกัน ดังรูปที่ 45



รูปที่ 45 ค่าพยากรณ์โมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM ที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C ในหน่วย Mpa



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อแนะนำ

การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) ใช้และไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงคุณภาพรวม ประกอบไปด้วย วัสดุโครงสร้างชั้นผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) และวัสดุหินคลุกชั้นพื้นทางเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR) ในสัดส่วน 25:75 โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงขีดจำกัด (Stress Limit) ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแบบผสมเย็น ในการรองรับปริมาณจราจรเมื่อวัสดุชั้นผิวทางได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นจนส่งอิทธิพลต่อชั้นพื้นทาง

การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ BSM มีการทดสอบ 2 ส่วน ประกอบไปด้วย การทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด และการทดสอบการเสียรูปถาวรภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำ ซึ่งปัจจัยด้านปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน, ปริมาณปูนซีเมนต์, ระดับอุณหภูมิ และขนาดของแรงกระทำซ้ำ จะส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุ อันได้แก่ กำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด (Unconfined Compressive Strength, UCS), การเสียรูปถาวรหรือความล้า (Permanent deformation or Fatigue) และโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, M_r) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ BSM จากการศึกษาี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุโครงสร้างชั้นทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Bitumen Stabilized Material, BSM) พบว่า หากมีผันแปรอุณหภูมิสูงขึ้นจากระดับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ไปที่ระดับอุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส และการใช้ปริมาณบิทูเมนอิมัลชันจาก 2% เพิ่มเป็น 3% โดยน้ำหนักมวลรวม ทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุ BSM มีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวม จากการที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มรวม จะทำให้ค่ากำลังต้านทานการวิบัติเพิ่มขึ้น

สำหรับผลการทดสอบการเสียรูปถาวรหรือความล้าภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำเมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานการเสียรูปถาวรของวัสดุ BSM จะต่ำลง โดยวัสดุ B3C1-30°C, B2C1-30°C, B3-30°C และ B2-30°C สามารถรองรับหน่วยแรงขนาด 603, 760, 286 และ 444 kPa ได้ตามลำดับ แต่หากมีการผันแปรอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สามารถรองรับหน่วยแรงได้ต่ำลง โดยจะ

สามารถรองรับหน่วยแรงได้ 473, 631, 157 และ 314 kPa ตามลำดับ วัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษาจึงจะสามารถอยู่ในสถานะสามารถคงรูปได้ (Stable State) หรือจัดอยู่ในช่วงของ Plastic Shakedown

สำหรับค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, M_r) ของวัสดุ BSM เมื่อได้รับอิทธิพลจากปัจจัยด้านอุณหภูมิที่มีการผันแปรสูงขึ้นจะทำให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวมีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน และปริมาณปูนซีเมนต์ จะทำให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวมีค่าสูงขึ้น

5.2 ข้อจำกัดของการวิจัย

สำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนกรณีศึกษาด้วยวิธี Fractional factorial experimental design ทางผู้วิจัยได้ทำการตัดจำนวนกรณีศึกษาที่ต้องทดสอบออก อันเนื่องมาจากด้านระยะเวลาในการทดสอบวัสดุภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำที่ใช้ระยะเวลาการทดสอบเป็นเวลานาน ทำให้ผลจากการตัดจำนวนกรณีศึกษามีความแม่นยำไม่เท่ากับการที่ต้องทดสอบจำนวนกรณีศึกษาทั้งหมด ส่งผลทำให้ผลของการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนได้

โดยจากผลการวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานการวิบัติสูงสุด, ผลการวิเคราะห์การเสีรูปถาวรหรือความล้า และผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุ BSM ในแต่ละกรณีศึกษา ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Multiple Linear Regression) โดยโมเดลสามารถใช้ได้กับที่ระดับอุณหภูมิ 30-50°C, ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน 2% และ 3% โดยน้ำหนักมวลรวม และปริมาณปูนซีเมนต์ คือ การใช้ปูนซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนักมวลรวมหรือไม่ใช้ปูนซีเมนต์ เท่านั้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

การนำวัสดุ BSM ไปใช้ในงานก่อสร้างทางควรพิจารณาการทดสอบ, การออกแบบส่วนผสม โดยพิจารณา Modulus และ Plastic Shakedown Limit ร่วมในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างทาง รวมถึงปัจจัยอื่นที่อาจจะส่งผลต่อ Repeated Load Resistance ประกอบไปด้วย ด้านสัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เช่น ปรับสัดส่วนระหว่าง RAP:RCR เป็น 0:100 น่าจะส่งผลทำให้คุณสมบัติของวัสดุดีขึ้น, ด้านปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน เช่น ปรับปริมาณบิทูเมนอิมัลชันเป็น 1% และด้านปริมาณปูนซีเมนต์ เช่น ปรับปริมาณปูนซีเมนต์เป็น 0.5% หรือ 1.5% ซึ่งในประเด็นดังกล่าวยังไม่ครอบคลุมในงานศึกษาครั้งนี้ต่อการนำไปใช้งานจริง โดยการศึกษาของงานวิจัยนี้มีการใช้ส่วนผสมเดียวกับไพศาล ปุ๋ยไชยสอน (2560) และ ลภาน เขิดหิรัญกร & วรากร ตริยะพัฒน์พุดิ. (2561) ซึ่งเมื่อวัสดุ BSM

ได้รับอิทธิพลด้านอุณหภูมิที่ส่งผลมายังชั้นพื้นทาง ทำให้วัสดุในส่วนผสมดังกล่าวมีพฤติกรรมต่อ Modulus, Plastic Shakedown Limit และ Repeated Load Resistance ในทิศทางที่ลดลง ดังนั้น จึงควรทดลองปรับตัวแปรดังกล่าวในการออกแบบส่วนผสมสำหรับการออกแบบโครงสร้างทาง

จากสมการที่ใช้ทำนายค่าขีดจำกัด (Stress Limit) และโมดูลัสการคืนตัว (M_r) ของวัสดุ BSM ที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Linear Regression) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ได้ระดับความเชื่อมั่นที่สูง น่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ในการอ้างอิงสำหรับงานก่อสร้างทาง หรืองานวิจัยวัสดุ BSM ต่อไป



บรรณานุกรม

- Academy, A. (2009). Technical guideline: Bitumen stabilised materials. In.
- Alkaissi, Z. A. (2020). Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(1), 1-4. doi:10.1016/j.jksues.2018.04.005
- Alnedawi, A., Nepal, K. P., & Al-Ameri, R. (2019). New shakedown criterion and permanent deformation properties of unbound granular materials. *Journal of Modern Transportation*, 27(2), 108-119. doi:10.1007/s40534-019-0185-2
- Austroroads Working Group. (2007). *Commentary to AGPT/T053 - Determination of Permanent Deformation and Resilient Modulus Characteristics of Unbound Granular Materials Under Drained Condition*. Australia.
- Barksdale, R. D. (1972). *Laboratory evaluation of rutting in base course materials*. Paper presented at the Presented at the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Grosvenor House, Park Lane, London, England, Sept. 11-15, 1972.
- Barksdale, R. D. (1991). *The aggregate handbook*.
- Brecciaroli, F., & Kolisoja, P. J. R. j. A. (2006). Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading: literature review.
- De Vaus, D., & de Vaus, D. (2013). *Surveys in social research*: Routledge.
- Ebels, L.-J. (2008). *Characterisation of material properties and behaviour of cold bituminous mixtures for road pavements*. Stellenbosch: Stellenbosch University, EN, B. J. B. S. I., UK. (2004). 13286-7 (2004) Unbound and Hydraulically Bound Mixtures– Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures.
- Jenkins, K., & Ebels, L. (2007). *Determination of Shear Parameters, Resilient Modulus and Permanent Deformation Behaviour of Unbound and Bound Granular Materials Using Tri-Axial Testing on 150mm Ø x 300mm High Specimens*. Retrieved from
- Jenkins, K. J., Long, F. M., & Ebels, L. J. (2007). Foamed bitumen mixes = shear performance? *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 85-98.

doi:10.1080/10298430601149718

- Maree, J. (1982). Aspects of the design and behaviour of road pavements with granular material base layers. In: PhD.
- Melan, E. (1936). *Theorie statisch unbestimmter Systeme aus ideal-plastischem Baustoff*: Hölder-Pichler-Tempsky in Komm.
- NZTA T15. (2014). *Specification for Repeated Load Triaxial (RLT) Testing for Pavement Materials*. Retrieved from.
- Perez, I., Medina, L., & del Val, M. Á. (2013). Mechanical properties and behaviour of in situ materials which are stabilised with bitumen emulsion. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 221-238.
- Saberian, M., Li, J., Nguyen, B., & Wang, G. (2018). Permanent deformation behaviour of pavement base and subbase containing recycle concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 178, 51-58.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.107
- Sharp, R. W. (1985). Pavement design based on shakedown analysis. *Transportation research record*, 1022(99), 107.
- Sharp, R. W. J. T. r. r. (1985). Pavement design based on shakedown analysis. 1022(99), 107.
- Sufian, Z., Aziz, N. A., Matori, M. Y., Hussain, M. Z., Hainin, M. R., & Oluwasola, E. A. J. J. T. (2014). Influence of active filler, curing time and moisture content on the strength properties of emulsion and foamed bitumen stabilized mix. 70(4).
- Werkmeister, S. (2003). Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions.
- Werkmeister, S. (2004). Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions.
- Wirtgen. (2010). *Wirtgen Cold Recycling Technology* (3 ed.).
- ไพศาล ปุ้ยไชยสอน. (2560). พฤติกรรมด้านสมรรถนะของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมน อิมัลชัน. (ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- ณัฐภรณ์ เจริญธรรม อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ และกัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์. (2555). การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุหมุนเวียนเพื่อนำกลับมาปรับปรุงใช้ใหม่. Paper presented at the Paper presented at the International Conference on Highway Engineering, โรงแรมเซ็นทา

ราแกรนด์ เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพมหานคร.

ธัญญารัตน์ เผือกหอม. (2557). การศึกษาคุณสมบัติความล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนและ

แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น. (ปริญญาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร,

ธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ์. (2552). การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสม

เย็น. (ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

ลภน เชิดหิรัญกร, & วรากร ตริยะพัฒน์. (2561). วัสดุมวลรวมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน. (ปริญญา

บัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

วรุช เลิศไพชญยนต์. (2557). การปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้น

ทาง. (ปริญญามหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, ก. (2517). ทล.-ท. 108/2517 วิธีการทดลอง *Compaction Test* แบบ

สูงกว่ามาตรฐาน.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสิริกมล สายน้ำเย็น
วัน เดือน ปี เกิด	25 พฤษภาคม 2537
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ที่อยู่ปัจจุบัน	ไอดีไอ สาทร ท่าพระ 221/1003 ถนนราชพฤกษ์ แขวงบुकคโโล เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY