

การวิเคราะห์ผลของการผันแปรอุณหภูมิ ต่อกำลังต้านทานการวิบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

Analysis of The Effect of Temperature Variation on Failure Resistance of Recycle Material Stabilized with Bitumen Emulsion

สิริกมล สายน้ำเย็น^{1,*} และ บุญชัย แสงเพชรงาม^{2,*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² ศูนย์เชี่ยวชาญด้านการบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* E-mail address: sirikamon.singto@gmail.com, boonchai.sa@chula.ac.th

บทคัดย่อ

วัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้านความเชื่อมแน่นด้วยบิทูเมนอิมัลชัน และ/หรือซีเมนต์ ภายใต้หน่วยแรงกระทำเท่ากันจะมีคุณสมบัติเชิงกลต้านกำลังต้านทานการวิบัติมากกว่าวัสดุไม่เชื่อมแน่นหลายเท่า ทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น ทั้งนี้บางการศึกษาไม่ได้คำนึงถึงการผันแปรอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดสอบ ซึ่งอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงพฤติกรรมเชิงกลต้านกำลังต้านทานการวิบัติ ที่มีความสำคัญร่วมกับปัจจัยอื่น ในการศึกษาต้านกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันแบบผสมเย็น จะใช้การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยไม่มีแรงดันล้อมรอบ อัตราส่วนของโครงสร้างชั้นผิวทางเดิมต่อโครงสร้างชั้นพื้นทางเดิม เป็นร้อยละ 25 ต่อ ร้อยละ 75 วัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 2% และ 3% โดยน้ำหนัก, ใช้/ไม่ใช้ ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม, ระดับอุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ผลของการศึกษาทำให้ทราบถึงความสอดคล้องของปัจจัยที่ได้กล่าวมา นั่นคือ ระดับอุณหภูมิ ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน และปริมาณซีเมนต์ ที่จะส่งผลถึงกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ

คำสำคัญ: บิทูเมนอิมัลชัน, วัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมน, การผันแปรอุณหภูมิ ต่อวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมน

Abstract

This study uses cold recycling method to improve material performance which would evidently improve adhesion, mechanical strength and resistance of failure. These give the stabilized material a longer life span. The Unconfined compressive strength testing is used to study the material behavior in terms of resistance of shear strength. Also, this study takes the thermal variation into consideration since we assume that this variable would play a significant role in the

resistance of shear strength. In this study, Unconfined compressive strength testing. The stabilized material is blended from reclaimed asphalt pavement 25 percent and reclaimed crush rock 75 percent and mixed with 2 - 3 percent bitumen emulsion and admixtures. Testing at 30 - 50 degree Celsius. The results show the compatibility of resistance of shear strength for bitumen stabilized material on each factor.

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

1. บทนำ

ประเภทของถนนในประเทศไทยนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ถนนลาดยางหรือแอสฟัลต์คอนกรีต (Flexible Pavement) และ ถนนคอนกรีต (Rigid Pavement) โดยสาเหตุที่ก่อให้เกิดถนนเกิดความเสียหายนั้นมีด้วยกันหลายสาเหตุ เช่น เนื่องจากปริมาณจราจรที่สะสม น้ำหนักบรรทุก ความล้า และด้านอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดปัญหาจากการเกิดรอยแตกและการเกิดร่องล้อได้ โดยปัญหาที่กล่าวมาจะต้องได้รับการซ่อมแซมให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม เพื่อที่ถนนหรือผิวทางนั้นๆ มีโครงสร้างที่มีคุณภาพและมีความแข็งแรงทนทาน

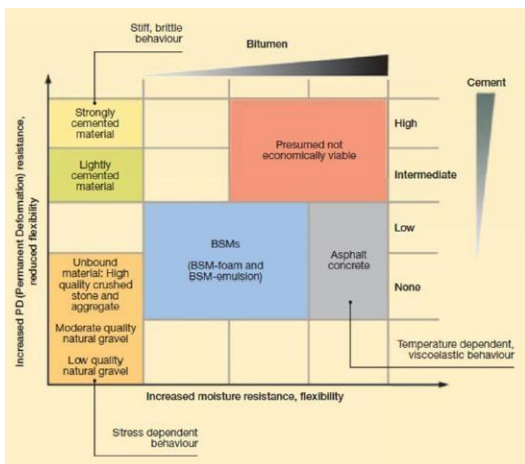
ในปัจจุบันนั้นได้มีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพให้สามารถใช้งานใหม่โดยแบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการร้อน (Hot recycling) และ กระบวนการเย็น (Cold Recycling) ซึ่งเทคนิคที่กรมทางหลวงนำมาใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีการนำวัสดุชั้นโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพโดยกระบวนการเย็นแบบในที่ (Cold In-Place Recycling) มาใช้ในการก่อสร้างบูรณะถนน โดยใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุผสมเพิ่ม และยังมีทางเลือกของสารผสมเพิ่มอีก 2 ชนิด คือ การใช้บิทูเมนอิมัลชัน และการใช้โพนบิทูเมน

สารปรับปรุงคุณภาพกลุ่มบิทูเมน (Bitumen Stabilizing Agent) มีทั้งที่เป็นบิทูเมนอิมัลชัน และโพนบิทูเมน บิทูเมนอิมัลชันเกิดจากการนำวัสดุบิทู

เมนไปแขวนลอยในน้ำ โดยใช้สาร Emulsifying agent ช่วยให้แขวนลอยได้ ซึ่งสาร Emulsifying agent นี้จะเป็นตัวกำหนดประจุของบิทูเมนอิมัลชัน โดยปกติแล้วบิทูเมนอิมัลชันจะมีอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการผลิตบิทูเมนอิมัลชันจึงต้องทำในจำนวนที่เหมาะสมกับการใช้งาน

เมื่อบิทูเมนอิมัลชันผสมกับหินแล้ว ประจุของบิทูเมนอิมัลชันจะถูกดึงดูดโดยประจุตรงข้ามที่อยู่บนผิวของวัสดุรวมรวมทำให้เกิดการยึดเกาะกัน ดังนั้นความชื้นในหินและชนิดของหินเป็นสิ่งสำคัญต่อการกระจายตัวของบิทูเมนจากน้ำในบิทูเมนอิมัลชันในขณะผสม สำหรับการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้บิทูเมนอิมัลชันจะกำหนดให้บิทูเมนอิมัลชันเป็นเหมือนสารหล่อลื่น (Lubricating agent) ดังนั้นการแตกตัวควรเกิดขึ้นหลังจากการบดอัดเรียบร้อยแล้ว

หนังสือคู่มือการปรับปรุงคุณภาพวัสดุด้วยวิธีผสมเย็น [1] ได้แสดงพฤติกรรมของวัสดุที่จะเกิดขึ้นจากการเลือกใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพชนิดต่างๆ ดังแสดงรูปที่ 1 ซึ่งในการปรับปรุงคุณภาพด้วยบิทูเมนอิมัลชันนั้น จะทำให้พฤติกรรมของวัสดุที่ปรับปรุงแล้วไม่ต่างจากวัสดุหินคลุก (Unbound granular material) แต่การปรับปรุงจะช่วยให้เป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) และลดผลกระทบที่จะเกิดจากความชื้น (Moisture sensitivity)



รูปที่ 1 แผนภูมิพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางจากการเลือกใช้วัสดุชนิดต่างๆ [1]

การศึกษาการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ ธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ์ [2] นำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ 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 และได้้นำก้อนตัวอย่างบดอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหาคุณสมบัติทั่วไป 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

ผลการทดสอบ พบว่า ยาง CSS-1 สามารถทำการผสมได้ง่ายกว่ายาง CMS-2 ค่าการต้านทานแรงอัดดีที่สุดของยาง 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

การศึกษาเชิงวัสดุกลศาสตร์ของวัสดุที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมน (Bitumen Stabilized Materials, BSM) นั้น Sufian และคณะ [3] ได้ศึกษาปัจจัยของระยะเวลาบ่ม ปริมาณความชื้น และสารผสมเพิ่ม ต่อวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ถูกปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันและโพนบิทูเมน โดยวัดจากค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ค่า Indirect Tensile Strength (ITS) และค่า Resilient Modulus (MR) โดยวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำมาใช้เป็นสารผสมระหว่างวัสดุผิวทางเดิม (Reclaim Asphalt Pavement, RAP) กับหินคลุก (Crush Rock, CR) มีอัตราส่วนคือ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100

ผลการศึกษาค่า UCS และ ITS พบว่าวัสดุรวมที่มีอัตราส่วน CR:RAP เป็น 0:100 ไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดภายใต้ปัจจัยระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และสำหรับปัจจัยด้านสารผสมเพิ่มเติมสารผสมเพิ่มปริมาณร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนักในวัสดุรวมที่มีอัตราส่วนดังที่กล่าวข้างต้น ค่า UCS และ ITS จึงผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนด ในขณะที่ปัจจัยปริมาณความชื้นส่งผลให้ค่า UCS และ ITS มีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่ง OMC (Optimum moisture content) ของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยโพนบิทูเมนเท่านั้น แต่วัสดุที่ปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันมีค่า UCS และ ITS สูงสุดไม่ตรงกับปริมาณความชื้น ตัวอย่าง ณ ตำแหน่ง OMC

ในส่วนของค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, MR) ส่วนผสมที่มีปริมาณ RAP 100 เปอร์เซ็นต์มีคุณสมบัติที่ต่ำที่สุดเช่นกันดังนั้นอัตราส่วน RAP จึงเป็นค่าที่ต้องตระหนักถึงในการออกแบบส่วนผสม

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของวัสดุ BSM ภายใต้การทดสอบกำลังอัดสามแกน (triaxial test) ของวรุช เลิศไพชญยนต์ [4] ได้กำหนดค่าแรงกระทำแนวราบ (confining pressure) 6 ระดับ คือ 0, 50, 100, 150, 200 และ 250 กิโลปาสกาล พบว่าหน่วยแรงกระทำในแนวดิ่ง (total vertical stress) ณ จุดที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีแรงกระทำแนวราบ 0, 50, 100 และ 150 มีขนาดใกล้เคียงกันทำให้มีแนวโน้มค่าของมุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle, ϕ) มีค่าใกล้เคียง 0 องศา

ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน (triaxial test) ของวรุช เลิศไพชญยนต์ [4] พบว่า ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน

3%, 2% และซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 1.367 และ 1.298 Mpa ตามลำดับ และจากการทดลองเก็บข้อมูลอุณหภูมิชั้นพื้นทาง ช่วงเดือน เมษายน-พฤษภาคม พ.ศ. 2555 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอยู่ที่ 51 องศาเซลเซียส ต่อมา ลาน เขตรัฐกิจ และ วราภรณ์ ดิยะพัฒน์ [5] ได้ทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยปิทูเมนอิมัลชัน 3% และ 2% โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยปิทูเมนอิมัลชัน มีค่าเท่ากับ 0.867, 0.788, 0.772 Mpa และ 1.903, 2.055, 1.306, 1.231, 1.588 Mpa ตามลำดับ

ในการศึกษาด้านอุณหภูมิต่อแอสฟัลต์คอนกรีต Alkaissi, Z. A. [6] 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

จากการทบทวนงานศึกษาที่ผ่านมาได้พบว่าทั้งอุณหภูมิ, ปริมาณปิทูเมนอิมัลชัน และปริมาณซีเมนต์ ล้วนเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยปิทูเมนอิมัลชัน (BSM) ทว่ายังไม่พบงานศึกษาที่พิจารณาปัจจัยดังกล่าวพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสอดคล้องของปัจจัย ทั้งสามด้านคือ ระดับอุณหภูมิ, ปริมาณปิทูเมนอิมัลชัน และปริมาณซีเมนต์ ที่จะส่งผลถึงกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยปิทูเมนอิมัลชัน (BSM)

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและการออกแบบส่วนผสมในงานวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้นำวัสดุตัวอย่างขนาดผลจากโครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 2262 ซึ่งวัสดุพื้นทางของโครงสร้างถนนเดิมเป็นหินบะซอลต์ และวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุเดียวกับวัสดุในงานวิจัยของวรุช เลิศไพชยนต์ [4] และไพศาล ปุ้ยไชยสอน [7] สำหรับส่วนผสมของวัสดุมวลรวมโครงสร้างทางเดิมในการศึกษามีอัตราส่วนของ RAP : RCR เป็น 25 : 75 มีค่า % CBR เฉลี่ยเท่ากับ 49% เมื่อใส่สารผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด หลังจากนั้นทำการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ผลของความหนาแน่นแห้งที่สูงที่สุดของตัวอย่างมีค่า 2.297 กรัมต่อมิลลิเมตรและมีระดับความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับ 7.5%

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของการปรับปรุงวัสดุโครงสร้างทางเดิม

ส่วนผสม	ปริมาณ
RAP	ร้อยละ 25
RCR	ร้อยละ 75
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ร้อยละ 0 และ 1 โดยน้ำหนักมวลรวม
ปิทูเมนอิมัลชัน	ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนักมวลรวม
ปริมาณความชื้น	ร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักมวลรวม

ตารางที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

ขนาดตะแกรง	ค่าเฉลี่ย ร้อยละผ่านตะแกรง (%Passing)
50 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)	100
25.0 มิลลิเมตร (1 นิ้ว)	100
19.0 มิลลิเมตร (¾ นิ้ว)	84.13
12.5 มิลลิเมตร (½ นิ้ว)	63.89
9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว)	53.19
4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)	35.81
2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10)	15.25
0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)	5.04
0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200)	1.96

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ชิ้นงานตัวอย่างวัสดุได้ถูกเตรียมตามวิธีของ William [8] โดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 200 มิลลิเมตร แล้วทำการผสมตัวอย่างตามส่วนผสมที่กล่าวมาข้างต้น หลังจากนั้นบดอัดด้วย Vibratory compactor ซึ่งมีน้ำหนักถ่วงขนาด 30 กิโลกรัม ในการบดอัดจะแบ่งการบดอัดออกเป็น 5 ชั้นโดยมีน้ำหนักและความสูงตัวอย่างในแต่ละชั้นเท่ากันเพื่อให้ได้ระดับการบดอัดอยู่ระหว่าง 96% ถึง 98% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด หลังจากนั้นทำการถอดแบบและทำการบ่มโดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างท่อใส่ถุงพลาสติกมัดปากถุงให้ปริมาตรภายในถุงประมาณ 3 เท่าของก้อนตัวอย่างแล้วนำไปใส่ในตู้บ่มอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยเปลี่ยนถุงพลาสติกที่ใช้ห่อทุก 24 ชั่วโมง

2.3 เครื่องมือและการเก็บข้อมูลในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Servopulser เป็นเครื่องมือสำหรับให้แรงกระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง, อุปกรณ์สำหรับวัดการยุบตัวของตัวอย่างคือ Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) 2 ตัวติดตั้งมุมกัน 180 องศาบริเวณแท่นของอุปกรณ์ทดสอบ และมีฮีตเตอร์ (Heater) ให้ความร้อนกับตัวอย่าง ในส่วนของการเก็บข้อมูลใช้เครื่อง Signal Data Acquisition เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ในการเก็บข้อมูลของแรงกระทำจากเครื่อง Servopulser, ค่าการยุบตัวจาก LVDT และค่าอุณหภูมิความร้อนจากฮีตเตอร์



รูปที่ 2 อุปกรณ์ทดสอบและเก็บข้อมูลสำหรับการทดสอบ

2.4 การออกแบบการทดลอง

ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชัน จะสิ้นสุดลงเมื่อค่าการยุบตัวในแนวตั้งของก้อนตัวอย่างเท่ากับ 5% ของความสูงตัวอย่าง หรือมีค่ายุบตัวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร สำหรับตัวแปรที่ศึกษาแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรต้น	ค่าการเปลี่ยนแปลง	ระดับการเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิ	30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส	3
บิโตนอิมัลชัน	2% และ 3%	2
ซีเมนต์	0% และ 1%	2

จากผลการทดสอบของ วรุศ เลิศไพชยนต์ [4] กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชัน 3%, 2% และซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.367 และ 1.298 Mpa ตามลำดับ, ลภน เชิดศิริภูมกร และ วรากร ดิยะพัฒน์พุดิ [5] ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชัน 3% และ 2% โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.867, 0.788, 0.772 Mpa และ 1.903, 2.055, 1.306, 1.231, 1.588 Mpa ตามลำดับ โดยจากผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชันทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสที่ได้กล่าวมา จะนำผลมารวมในการวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชันที่ระดับอุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส

สำหรับงานวิจัยนี้กรณีศึกษาที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชัน (BSM) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กรณีศึกษาวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชัน

ปริมาณบิโตนอิมัลชัน	ปริมาณซีเมนต์	ระดับอุณหภูมิ	จำนวนตัวอย่าง
3% โดยน้ำหนัก	1% โดยน้ำหนัก	40 องศาเซลเซียส	3
2% โดยน้ำหนัก	1% โดยน้ำหนัก	40 องศาเซลเซียส	3
3% โดยน้ำหนัก	-	40 องศาเซลเซียส	3
2% โดยน้ำหนัก	-	40 องศาเซลเซียส	3
3% โดยน้ำหนัก	1% โดยน้ำหนัก	50 องศาเซลเซียส	3
2% โดยน้ำหนัก	1% โดยน้ำหนัก	50 องศาเซลเซียส	3
3% โดยน้ำหนัก	-	50 องศาเซลเซียส	3
2% โดยน้ำหนัก	-	50 องศาเซลเซียส	3

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นถึงจำนวนตัวอย่างที่ต้องทดสอบ โดยมีจำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบ 1 ครั้งต้องใช้เวลาในการผลิตตัวอย่าง 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน และบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 2 วัน ซึ่งใช้เวลารวมในการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ 4 วัน โดยทางผู้วิจัยสังเกตเห็นว่าการใช้เวลาสูงมากสำหรับการเตรียมตัวอย่างและทดสอบ จึงได้ใช้การวิเคราะห์หากกรณีศึกษาด้วยวิธี Fractional factorial experimental design [9] และทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสถิติ SPSS ในฟังก์ชัน Orthogonal Design [10] โดยตัวแปรต้นที่ศึกษา ได้แก่ บิโตนอิมัลชัน 2 ระดับ ประกอบไปด้วย 2% และ 3% โดย

น้ำหนัก, ซีเมนต์ 2 ระดับ ประกอบไปด้วย ไมซีซีเมนต์ และ ซีซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนัก และ อุณหภูมิ 2 ระดับ ประกอบไปด้วย 40 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสถิติ SPSS Orthogonal Design [10] จะได้จำนวนกรณีศึกษาทั้งหมด 4 กรณีศึกษา ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์กรณีศึกษาวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชันด้วยโปรแกรม SPSS

ปริมาณบิโตนอิมัลชัน	ปริมาณซีเมนต์	ระดับอุณหภูมิ	จำนวนตัวอย่าง
3% โดยน้ำหนัก	1% โดยน้ำหนัก	40 องศาเซลเซียส	3
2% โดยน้ำหนัก	1% โดยน้ำหนัก	50 องศาเซลเซียส	3
3% โดยน้ำหนัก	-	50 องศาเซลเซียส	3
2% โดยน้ำหนัก	-	40 องศาเซลเซียส	3


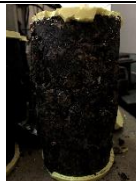
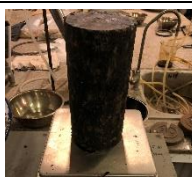

3. ผลการทดสอบ

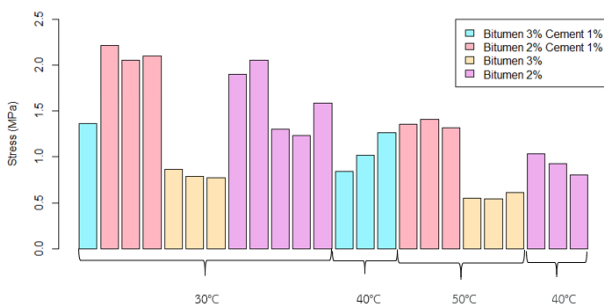
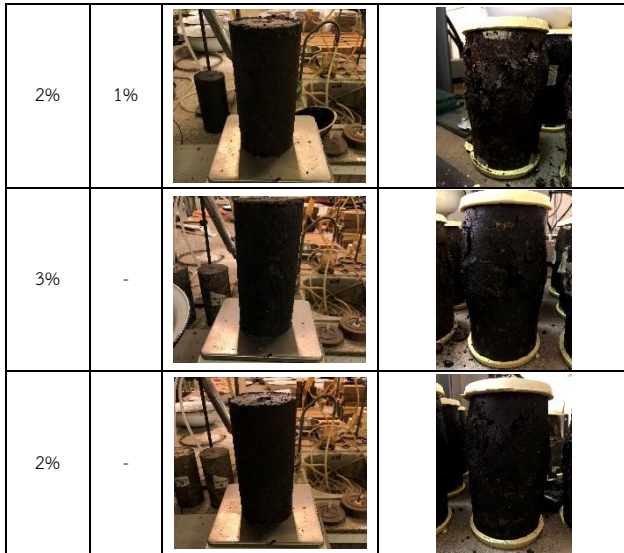
ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิโตนอิมัลชัน (BSM) ในหน่วยเมกะปาสคาล (MPa) แสดงดังตารางที่ 6-7 และรูปที่ 3 สำหรับตัวแปรที่มีระดับการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ บิโตนอิมัลชัน, ซีเมนต์ และอุณหภูมิ

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ BSM

บิโตน	ซีเมนต์	อุณหภูมิ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
3%	1%	30°C	1.367	-	-	-	-
2%	1%	30°C	2.214	2.053	2.101	-	-
3%	-	30°C	0.867	0.788	0.772	-	-
2%	-	30°C	1.903	2.055	1.306	1.231	1.588
3%	1%	40°C	0.844	1.017	1.261	-	-
2%	1%	50°C	1.359	1.407	1.318	-	-
3%	-	50°C	0.549	0.540	0.608	-	-
2%	-	40°C	1.036	0.927	0.805	-	-

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนบางตัวอย่างของวัสดุ BSM

บิโตน	ซีเมนต์	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
3%	1%	N/A	N/A
2%	1%		
3%	-	N/A	N/A
2%	-	N/A	N/A
3%	1%		

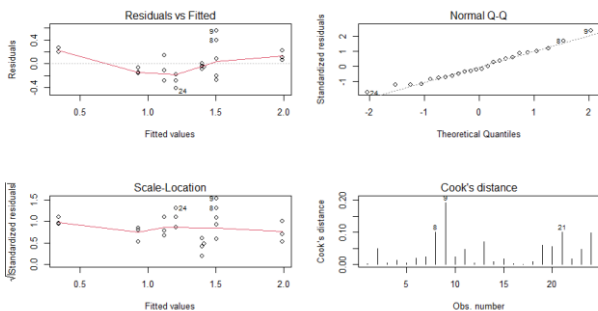


รูปที่ 3 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ BSM

3.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1.1 การวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ

จากผลทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน (BSM) ตารางที่ 6 ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) [12,13] จะต้องวิเคราะห์หาค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) [11,13] ของการทดสอบก่อน โดยการประมาณค่าทางสถิติที่อ่อนไหวต่อตัวอย่างที่ผิดปกติ ซึ่งทำให้ประมาณค่าสถิติผิดและมักทำให้ตัวแปรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติแสดงดังรูปที่ 4



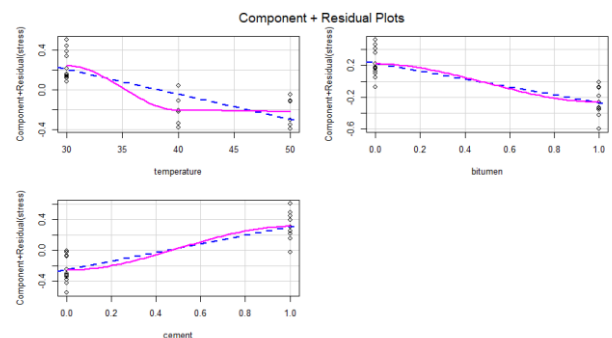
รูปที่ 4 ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case)

จากการวิเคราะห์ค่าที่ผิดปกติ (Outlier case) [11,13] ข้างต้นจะต้องถูกตัดออกในขั้นตอนทำสะอาดข้อมูลก่อนเข้าสู่ขั้นตอนวิเคราะห์ โดยค่าที่ผิดปกติ ได้แก่ ข้อมูลการทดสอบที่ 8 และ 9 นั่นคือ วัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 2% โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 จากนั้นเมื่อทำการตัดค่าที่ผิดปกติออกแล้ว จะสามารถวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) [12,13] ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ

Coefficients	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	2.107652	0.190591	11.058	1.86×10 ⁻⁹ ***
Temperature (X ₁)	-0.025194	0.004858	-5.186	6.22×10 ⁻⁵ ***
Bitumen (X ₂)	-0.489766	0.081378	-6.018	1.09×10 ⁻⁵ ***
Cement (X ₃)	0.564983	0.081378	6.943	1.73×10 ⁻⁶ ***
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'
Residual std. error	0.1882 on 18 degrees of freedom			
Multiple R ²	0.8706			
Adjusted R ²	0.8491			
F-statistic	40.39 on 3 and 18 DF			
p-value	3.358×10 ⁻⁸			

จากผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) [12,13] ของวัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน (BSM) ที่เกิดการวิบัติจากการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยไม่มีแรงดันล้อมรอบ (Unconfined compressive strength) ตารางที่ 8 ค่า p-value ของแต่ละตัวแปรมีค่าน้อยกว่า 0.001 ทำให้มีนัยสำคัญทางสถิติทั้งหมดที่ความเชื่อมั่น 99% ได้แก่ อุณหภูมิ บิตูเมนอิมัลชัน และซีเมนต์ ส่วนค่า p-value ของโมเดลมีค่าเท่ากับ 3.358×10⁻⁸ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 ดังนั้น โมเดลนี้จึงมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน สำหรับค่า Multiple R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 0.8706 ทำให้ภาวสารูปสนธิ (Goodness of fit) ไม่แนบสนิท ดังแสดงรูปที่ 5 ซึ่งระดับความ fit ของสมการกับข้อมูล (R²) แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชันได้ 87.06%



รูปที่ 5 ภาวสารูปสนธิ (Goodness of fit)

3.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 9 ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวน

X_i	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temperature	1	0.93863	0.93863	26.510	6.736×10 ⁻⁵ ***
Bitumen	1	1.64448	1.64448	46.445	2.219×10 ⁻⁶ ***
Cement	1	1.70664	1.70664	48.201	1.734×10 ⁻⁶ ***
Residuals	18	0.63733	0.03541		
Signif. codes	0	0.001 '***'	0.01 '**'	0.05 '*'	0.1 '.'

จากตารางที่ 9 จะสามารถหาค่าประมาณของ σ^2 เท่ากับ 0.03541 (ซึ่งมีค่าเท่ากับ MSE) โดยจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้น สามารถใช้ในการทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ หรือไม่ ดังนี้

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

สมมติฐานทางเลือก H_1 : มี β_i อย่างน้อย 1 ตัว ไม่เท่ากับ 0 โดยที่ $i = 1, 2, 3$

ค่าสถิติทดสอบตัวแปรอุณหภูมิ, บิทูเมนอิมัลชัน และซีเมนต์ มีค่า F เท่ากับ 26.510, 46.445, 48.201 และค่า p-value = 6.736×10⁻⁵, 2.219×10⁻⁶, 1.734×10⁻⁶ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.001$ ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานว่าง นั่นคือ มี β_i อย่างน้อย 1 ตัว ไม่เท่ากับ 0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ซึ่งสามารถพิจารณาถึงการประมาณค่าแบบช่วงของ $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ และ β_3 ได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 พิจารณาการประมาณค่าแบบช่วงของ $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ และ β_3

	β_i	Std. Error	Confidence Interval 99%	
Constant	2.107652	0.190591	1.55904611	2.65625827
X_1	-0.025194	0.004858	-0.03917847	-0.01120882
X_2	-0.489766	0.081378	-0.72400902	-0.25552323
X_3	0.564983	0.081378	0.33073992	0.79922571

ดังนั้น ช่วงความเชื่อมั่น 99% สำหรับ β_0 คือ (1.55904611, 2.65625827) β_1 คือ (-0.03917847, -0.01120882), β_2 คือ (-0.72400902, -0.25552323) และ β_3 คือ (0.33073992, 0.79922571)

โดยผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) [12,13] ตารางที่ 8 สามารถใช้ในการทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_1 = 0$ หรือไม่ ดังนี้

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

$$\text{สมมติฐานทางเลือก } H_1 : \beta_1 \neq 0$$

ค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ -5.186 และค่า p-value เท่ากับ 6.22×10⁻⁵ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.001$ ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 นั่นคือ $\beta_1 \neq 0$ สรุปได้ว่า อุณหภูมิ (X_1) มีความสัมพันธ์กับ กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Y) กล่าวคือ สามารถใช้ X_1 ในการพยากรณ์ Y ได้

ในทำนองเดียวกัน การทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_2 = 0$ หรือไม่ ทำได้ดังนี้

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

$$\text{สมมติฐานทางเลือก } H_1 : \beta_2 \neq 0$$

ค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ -6.018 และค่า p-value เท่ากับ 1.09×10⁻⁵ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.001$ ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 นั่นคือ $\beta_2 \neq 0$ สรุปได้ว่า บิทูเมนอิมัลชัน (X_2) มีความสัมพันธ์กับกำลังต้านทานแรงเฉือน

ของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Y) กล่าวคือ สามารถใช้ X_2 ในการพยากรณ์ Y ได้

และ การทดสอบสมมติฐานว่า $\beta_3 = 0$ หรือไม่ ทำได้ดังนี้

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

$$\text{สมมติฐานทางเลือก } H_1 : \beta_3 \neq 0$$

ค่าสถิติทดสอบ t เท่ากับ 6.943 และค่า p-value เท่ากับ 1.73×10⁻⁶ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.001$ ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 นั่นคือ $\beta_3 \neq 0$ สรุปได้ว่า ซีเมนต์ (X_3) มีความสัมพันธ์กับ กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (Y) กล่าวคือ สามารถใช้ X_3 ในการพยากรณ์ Y ได้

ดังนั้น จากตารางที่ 8 ข้อมูล p-value แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ, บิทูเมนอิมัลชัน และ ซีเมนต์ มีความสมเหตุสมผล เนื่องจาก p-value < 0.001 จึงเป็นเหตุผลทำให้สามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง นั่นคือ อุณหภูมิ, บิทูเมนอิมัลชัน และซีเมนต์ สามารถใช้พยากรณ์กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชันได้ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส และบิทูเมนอิมัลชันเพิ่มขึ้น 1% โดยน้ำหนักมวลรวม จะทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน ลดลง 0.025194 และ 0.489766 Mpa ตามลำดับ ส่วนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น 1% โดยน้ำหนัก จะทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน 0.564983 Mpa ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 โดยสามารถเขียนสมการพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (BSM) ได้ดังสมการที่ (1)

$$Y = 2.108 - (0.025X_1) - (0.490X_2) + (0.565X_3) \quad (1)$$

โดยที่ Y คือ ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ BSM

X_1 คือ ระดับอุณหภูมิ

X_2 คือ ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน

X_3 คือ ปริมาณซีเมนต์

หมายเหตุ ระดับอุณหภูมิ : 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

ปริมาณบิทูเมนอิมัลชัน : 0 คือ 2% และ 1 คือ 3% โดยน้ำหนัก

ปริมาณซีเมนต์ : 0 คือ ไม่ใช่ซีเมนต์ และ 1 คือ ใช้ซีเมนต์

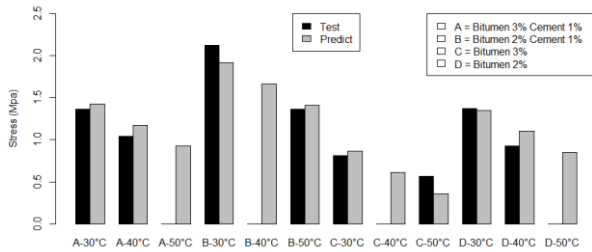
3.1.3 การพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน

จากสมการที่ (1) สามารถพยากรณ์ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน (BSM) ได้ดังตารางที่ 11 และรูปที่ 6

ตารางที่ 11 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ BSM ระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบกับการพยากรณ์ในหน่วยเมกะปาสคาล (Mpa)

บิทูเมน	ซีเมนต์	อุณหภูมิ	ทดสอบ	พยากรณ์	ระดับการบิด
3%	1%	30°C	1.367	1.427	96.40%
2%	1%	30°C	2.123	1.917	97.21%
3%	-	30°C	0.809	0.862	96.19%
2%	-	30°C	1.375	1.352	98.45%
3%	1%	40°C	1.041	1.175	97.93%
2%	1%	40°C	-	1.665	-

3%	-	40°C	-	0.610	-
2%	-	40°C	0.923	1.100	96.76%
3%	1%	50°C	-	0.923	-
2%	1%	50°C	1.361	1.413	96.70%
3%	-	50°C	0.566	0.358	96.13%
2%	-	50°C	-	0.848	-



รูปที่ 6 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ BSM ระหว่างค่าเฉลี่ยการทดสอบกับการพยากรณ์

3.1.4 การหาค่าส่วนเหลือ

ตารางที่ 12 ค่าส่วนเหลือกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ BSM

บิตูเมน	ซีเมนต์	อุณหภูมิ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
3%	1%	30°C	-0.060	-	-	-0.060
2%	1%	30°C	0.298	0.136	0.184	0.206
3%	-	30°C	0.005	-0.074	-0.090	-0.053
2%	-	30°C	-0.046	-0.121	0.236	0.023
3%	1%	40°C	-0.331	-0.158	0.086	-0.134
2%	1%	50°C	-0.054	-0.006	-0.095	-0.052
3%	-	50°C	0.190	0.181	0.250	0.208
2%	-	40°C	-0.063	-0.173	-0.294	-0.177

จากผลลัพธ์ข้างต้นอธิบายได้ดังนี้ ข้อมูลของค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชันร้อยละ 3 ซีเมนต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบครั้งที่ 1 เท่ากับ 1.367 และค่าพยากรณ์ของค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชันร้อยละ 3 ซีเมนต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.427 ดังนั้น ค่าส่วนเหลือของค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชันร้อยละ 3 ซีเมนต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เท่ากับ

$$e = 1.367 - 1.427 = -0.060$$

โดยที่ e คือ ค่าส่วนเหลือกำลังต้านทานแรงเฉือนวัสดุ BSM

3.1.5 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ตารางที่ 13 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

	ความเค้น	บิตูเมน	ซีเมนต์	อุณหภูมิ
ความเค้น	1.000	-0.615	0.606	-0.436

บิตูเมน	-0.615	1.000	-0.100	0.090
ซีเมนต์	0.606	-0.100	1.000	0.090
อุณหภูมิ	-0.436	0.090	0.090	1.000

จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ตารางที่ 13 แสดงให้เห็นว่า บิตูเมนอิมัลชัน และอุณหภูมิ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในเชิงลบกับกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน (BSM) ส่วนซีเมนต์ นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในเชิงบวกกับกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน (BSM) ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (1) ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ [12,13] ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

4. สรุปผลการทดสอบ

สำหรับผลของระดับอุณหภูมิ, ปริมาณบิตูเมนอิมัลชัน และปริมาณซีเมนต์ มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน (BSM) ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ BSM ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลง และปริมาณบิตูเมนอิมัลชันที่เพิ่มขึ้นจาก 2% เป็น 3% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงด้วยเช่นกัน ส่วนปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้น

ในทุกะดับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ส่วนผสมที่มีพฤติกรรมต้านทานแรงเฉือนได้ดีที่สุด คือ วัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 2% และซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนัก หากระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากระดับ 30 องศาเซลเซียส ไปที่ระดับ 40 องศาเซลเซียส จนถึงระดับ 50 องศาเซลเซียส พฤติกรรมต้านทานแรงเฉือนของวัสดุปรับปรุงด้วยบิตูเมนอิมัลชัน 2% และซีเมนต์ 1% โดยน้ำหนัก จะลดลง 1.151 เท่า และ 1.357 เท่า ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณาจารย์ที่ให้คำปรึกษาในการเขียนบทความนี้และบริษัทที่สนับสนุนวัสดุและแอสฟัลต์อิมัลชัน สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุคลากรและทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ทำงานวิจัยประสบความสำเร็จได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wirtgen. (2010). *Wirtgen Cold Recycling Technology (3rd ed.)*, pp.106.
- [2] ธัญรัตน์ ก่อตั้งสัมพันธ์. (2552). *การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น*. (ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [3] 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. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 70(4), pp.135-141.

- [4] วรุต เลิศไพบัฒยรัตน์. (2557). การปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง. (ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร
- [5] ลภน เชิดหิรัญกร และ วรากร ตียะพัฒนพุดิ. (2561). วัสดุผสมรวมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน. (ปริญญาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [6] 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), pp.1-4.
- [7] ไพศาล ปุ้ยไชยสอน. (2560). พฤติกรรมด้านสมรรถนะของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงด้วยบิทูเมนอิมัลชัน. (ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [8] William M. (2009). *Development of a simple triaxial test for characterising bitumen stabilised materials*. MScEng. Stellenbosch University, South Africa.
- [9] van Berkum, E. E. M., et al. (2005). Fractional factorial designs for two-step production processes. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 132(1-2), pp.53-62.
- [10] SPSS Inc. (2013). *IBM SPSS Conjoint 22*. Retrieved from http://www.sussex.ac.uk/its/pdfs/SPSS_Conjoint_22.pdf
- [11] ศิริินทร์ วารีเศวตสุวรรณ. (2545). การเปรียบเทียบวิธีการตรวจสอบค่าผิดปกติในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น. (ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [12] ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์ (2561). *การวิเคราะห์ทางเลือกแบบไม่ต่อเนื่องสำหรับวิศวกรรมขนส่ง*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] David Dalpiaz (2020). *Applied Statistics with R*. Retrieved from https://davidalpiazz.github.io/appliedstats/applied_statistics.pdf