คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน

Mechanical Properties of a Base Materials Improvements by Portland Cement Mixing with Asphalt Emulsion

จักรพงษ์ วงค์คำจันทร์[1], ณัฐวิทย์ เวียงยา[2], สกนธ์ พิทักษ์วินัย[3], ประจักษ์ ทูลกสิกร[4], พิทยุตม์ เจริญพันธุ์[5], นูรีฮัน ซา[6] และ กฤษดา เหมือนเนียม[7]

[1,2,3,4,5,6,7] สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา, กรมทางหลวงชนบท

**Corresponding author; E-mail address: nurihan.sa2809@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้ต้องการนำเสนอคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน ที่กรมทางหลวงชนบทได้ทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นพื้นทางเดิมของถนนสาย นม.3038 แยกทางหลวงหมายเลข 201 - บ้านดอนใหญ่ อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทางเดิม 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม 1 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ กลุ่ม 2 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มาแล้ว การทดลองปรับปรุงนี้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ที่ร้อยละ 4.75 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม ร่วมกับยางอิมัลชันในปริมาณร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength; UCS) มีค่าลดลงแปรผันกับปริมาณยางอิมัลชันที่เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength; ITS) และค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus; Mr) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางอิมัลชันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชันของกลุ่ม 1 มีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่ากลุ่ม 2

คำสำคัญ: กำลังอัดแกนเดียว, ความต้านทานแรงดึงทางอ้อม, ปูนซีเมนต์, โมดูลัสคืนตัว, ยางอิมัลชัน

Abstract

This paper presents the mechanical properties of a base materials, which improve by Portland cement mixing asphalt emulsion. The Department of Rural Roads had conducted the experiment to improve the base materials of road NM.3038 at the junction of road number 201 – Ban DonYai, Dan khun Thot District, Nakhon Ratchasima Province. The sample of base materials was divided into two groups. The first group of base materials was without cement improvement. For the second group, the base materials were modified with cement. The content of Portland cement was fixed at 4.75 % by weight of base materials and asphalt emulsion was varied at the rate of 0%, 1% and 2% by weight of base materials. The results revealed that the unconfined compressive strength (USC) of base material proportionally decreases with the amount of asphalt emulsion. However, the increases in asphalt emulsion content enhance the indirect tensile strength (ITS) and resilient modulus value (Mr). Therefore, it proved that the base materials improvement by Portland cement mixing asphalt emulsion in group 1 had better mechanical properties than group 2.

Keywords: Asphalt Emulsion, Indirect Tensile Strength, Portland Cement, Resilient Modulus, Unconfined Compressive Strength

1. คำนำ

ถนนเมื่อเปิดใช้งานจะถูกแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกของยวดยานพาหนะเมื่อผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดความเสียหายขึ้น อาจมาจากหลายสาเหตุ เช่น จากการรับปริมาณจราจรซ้ำๆ จนเกิดการล้ารับน้ำหนักบรรทุกเกินที่กฎหมายกำหนด หรือการเสียหายจากน้ำท่วมขังเสื่อมสภาพของวัสดุสร้างทาง โดยลักษณะความเสียหายของถนนที่มักพบบ่อย ได้แก่ ผิวทางแตกลายหนังจระเข้เกิดจากพื้นทางอ่อนตัวหรือเกิดจากความล้าของผิวทาง การทรุดตัวถาวรของโครงสร้างใต้ผิวทางจนเกิดเป็นร่องล้อตลอดตามความยาว เป็นต้น ซึ่งมีความจำเป็นต้องซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงใหม่ให้มีสภาพการใช้งานที่ดีอยู่เสมอ การแก้ปัญหาดังกล่าวจะทำการรื้อผิวทางเดิม ชั้นพื้นทางและแทนที่ด้วยวัสดุใหม่ที่ได้คุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานวัสดุสร้างทาง ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงถนนที่มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานนับวันยิ่งหายาก มีราคาแพง หากอยู่ห่างไกลจากพื้นที่ก่อสร้างจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงถนนในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) ร่วมกับส่วนผสมเพิ่มต่างๆ มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นพื้นทาง

เดิมด้วยปูนซีเมนต์ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการรับแรง อย่างไรก็ตามหากใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงเกินไป อาจส่งผลให้วัสดุชั้นพื้นทางเดิมแข็งเปราะได้ และส่งผลให้เกิดความเสียหายโดยเกิดรอยแตกร้าว

จากการศึกษาวรรณกรรมที่ผ่านมาการปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทางเดิมใช้วิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) พบว่าในต่างประเทศได้มีการนำวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยส่วนผสมเพิ่มต่างๆ เช่น ปูนซีเมนต์ ยางอิมัลชัน และน้ำมันเสีย เป็นต้น การใช้ยางอิมัลชันเป็นส่วนผสมเพิ่ม [1, 2] สามารถช่วยลดปัญหาการแตกร้าวจากการทรุดตัวของชั้นพื้นทาง และเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้ดี ได้แก่ กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (ITS) และโมดูลัสคืนตัว (Mr) เป็นต้น จากงานวิจัยที่ศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปใช้ปริมาณของยางอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของมวลรวม [3, 4]

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท เล็งเห็นถึงประโยชน์ของการใช้วัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชันกลับมาใช้เป็นวัสดุชั้นทางใหม่ เพื่อลดการใช้วัสดุใหม่ในการก่อสร้างและปรับปรุงคุณภาพพื้นทางให้ดีขึ้น จึงทำการศึกษาวิจัยและทดลองถึงคุณสมบัติเชิงกล รวมถึงความเหมาะสมของการใช้งาน โดยทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทางเดิมของถนนสาย นม.3038 แยกทางหลวงหมายเลข 201 - บ้านดอนใหญ่ อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 ยางอิมัลชัน (Asphalt Emulsion)

ใช้ยางอิมัลชันชนิด CSS-1 เป็นยางอิมัลชันประเภท Cationic Slow Setting โดยมีคุณลักษณะของยางอิมัลชัน แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งยางอิมัลชันทั่วไปใช้กันอย่างแพร่หลายในงานไพรม์โคท (Prime Coat) มีหน้าที่ช่วยป้องกันมิให้น้ำไหลซึมลงสู่ในชั้นพื้นทางและเพื่อให้ชั้นพื้นผิวทางยึดเกาะกับวัสดุชั้นพื้นทางได้ดี

2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน [5] มีลักษณะเป็นผงที่มีสีเทาอ่อน และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ปูนซีเมนต์ใช้กันมากในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานราก ถนนคอนกรีต มีหน้าที่เป็นตัวประสานและยึดเกาะระหว่างมวลรวมเข้าด้วยกันเมื่อแข็งตัวจะให้กำลังอัดกับคอนกรีต

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของยางอิมัลชัน [6]

ลำดับที่	คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ความหนืดเซย์โบลต์ฟูรอลที่ 25 องศาเซลเซียส	S	20-100
2	การแยกชั้นหลังจากเวลา 5 วัน ไม่เกิน	%	5.0
3	เสถียรภาพต่อการเก็บภายใน 24 ชั่วโมง ไม่เกิน	%	2.0
4	ปริมาณที่ค้างบนแร่ง 850 ไมโครเมตร (20 เมช) ไม่เกิน	%	0.10
5	ประจุของอนุภาคแอสฟัลต์	-	บวก
การกลั่นอิมัลชัน			
7	กากแอสฟัลต์ (Residual Asphalt) ไม่น้อยกว่า	%	65
กากที่เหลือจากการกลั่น			
8	เพนิเทรชันที่ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	0.1 mm.	40-90
9	การยืดดึงที่ 25 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อวินาที ไม่น้อยกว่า	cm.	40
10	การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน ไม่น้อยกว่า	%	97.5

2.2 แปลงทดลอง

สำหรับแปลงทดลองวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชันของถนนสาย นม.3038 แยกทางหลวงหมายเลข 201 - บ้านดอนใหญ่ อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา รวมเป็นระยะทาง 5.435 กิโลเมตร โดยมี 2 ช่องทางจราจร และมีค่าเฉลี่ยปริมาณจราจรรายวันประมาณ 1,641 คัน/วัน ซึ่งวัสดุชั้นพื้นทางเดิมแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม 1 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณด้วยปูนซีเมนต์ ส่วนกลุ่ม 2 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 2

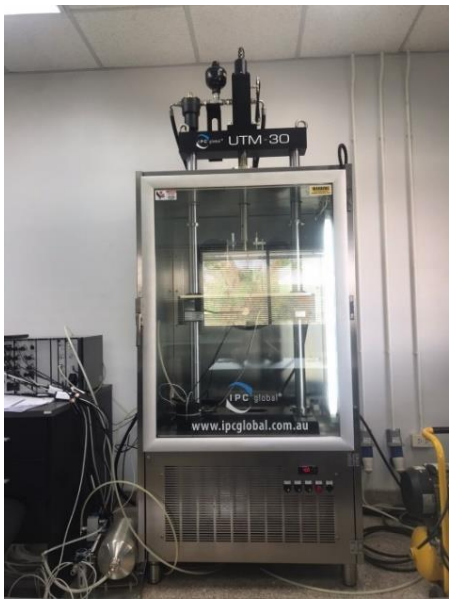
ตารางที่ 2 แปลงทดลองวัสดุชั้นพื้นทางเดิม

กลุ่ม	ปูนซีเมนต์ (%)	ยางอิมัลชัน (%)	ช่วง
1	4.75	0	กม. 6+500 ถึง กม. 6+900
		1	กม. 7+550 ถึง กม. 8+425
		2	กม. 8+425 ถึง กม. 9+250
2	4.75	0	กม. 0+000 ถึง กม. 1+050
		1	กม. 1+050 ถึง กม. 2+200
		2	กม. 2+200 ถึง กม. 3+335

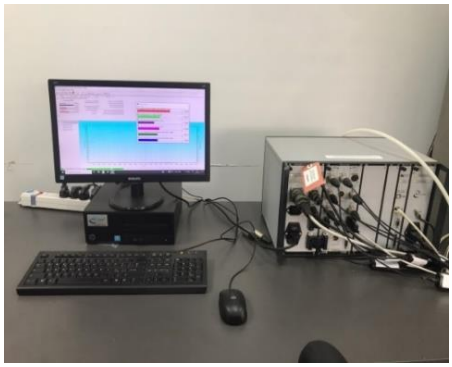
2.3 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างวัสดุชั้นพื้นทางเดิมสำหรับการทดสอบ UCS, ITS และ Mr โดยทำการเก็บตัวอย่างในสนามจำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 ช่วงความยาวของการขุดกัด ซึ่งตัวอย่าง UCS ทำการเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Modified Compaction (บดอัด 5 ชั้นๆ ละ 25 ครั้ง) [9] ตัวอย่าง ITS ทำการเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Marshall Compaction (บดอัด 2 ด้านๆ ละ 37 ครั้ง) [10] และตัวอย่าง Mr ทำการเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Modified Compaction (บดอัด 8 ชั้นๆ ละ 25 ครั้ง) [11] โดยตัวอย่าง ITS และ Mr ควบคุมพลังงานในการบดอัดเทียบเท่าตัวอย่าง UCS ด้วยวิธี Modified Compaction แสดงดังรูปที่ 1

น้ำหนักกดสูงสุด แสดงวิธีการทดสอบดังรูปที่ 5 แล้วทำการคำนวณค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมดังสมการที่ (1)

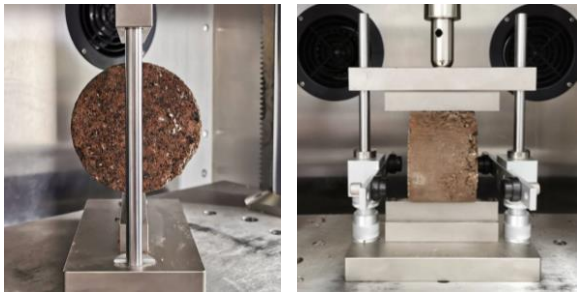


(ก) ตู้ควบคุมอุณหภูมิและโมลสำหรับการทดสอบ

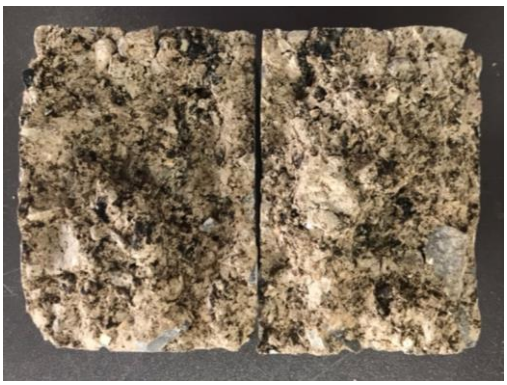


(ข) คอมพิวเตอร์และชุดควบคุม

รูปที่ 4 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



รูปที่ 5 การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม



รูปที่ 5(ต่อ) การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

$$ITS = \frac{2000P}{\pi DT} \quad (1)$$

เมื่อ ITS = ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม, กิโลปาสคาล (kPa)
P = ค่าน้ำหนักกดสูงสุด, นิวตัน (N)
D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่าง, มิลลิเมตร (mm)
T = ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง, มิลลิเมตร (mm)

2.2.3 โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

ทดสอบ Mr ตามมาตรฐาน [11] ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) แสดงดังรูปที่ 4 ใช้ก้อนตัวอย่างทรงกระบอก ขนาด 101.6 x 200.0 มิลลิเมตร ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับวิธีการทดสอบโมดูลัสคืนตัวมีการให้น้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที พัก 0.9 วินาที ในรูปแบบของ Haversine ตามเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งช่วงแรกเป็นการปรับสภาพของก้อนตัวอย่าง ด้วยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 1,000 ครั้ง จากนั้นทำการทดสอบจริงโดยแบ่งเป็น 15 ลำดับ แต่ละลำดับมีแรงดันด้านข้างและแรงกระทำซ้ำที่แตกต่างกัน ในแต่ละลำดับให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 100 ครั้ง โปรแกรมจะบันทึกผลการทดสอบ แสดงวิธีการทดสอบดังรูปที่ 6 แล้วทำการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวดังสมการที่ (2)



รูปที่ 6 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

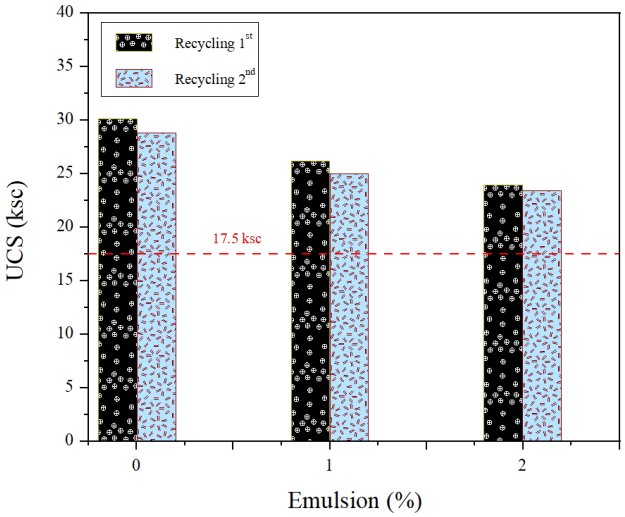
$$Mr = S_{cyclic} / \varepsilon_r \quad (2)$$

เมื่อ Mr = โมดูลัสคืนตัว, เมกะปาสคาล (MPa)
S_{cyclic} = Cyclic Stress (kPa)
ε_r = Recovery Strain

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุชั้นพื้นทางเดิม

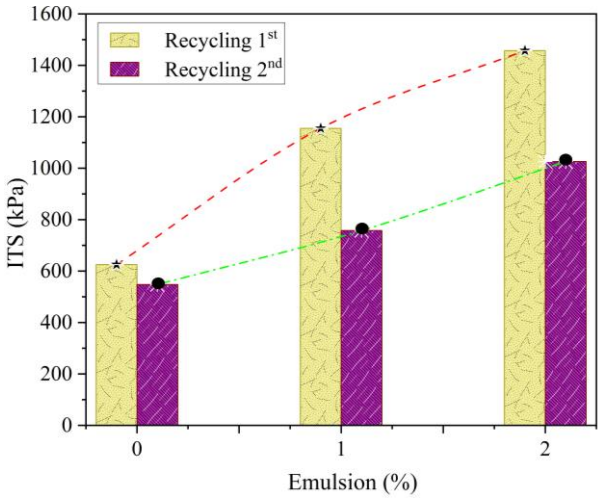
UCS ของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมทั้งสองกลุ่มปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน ทดสอบตามมาตรฐาน [7,8] UCS ต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ (UCS ที่ 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) จากรูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณร้อยละยางอิมัลชันของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน โดยใช้ปริมาณยางอิมัลชันร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม พบว่าผลการทดสอบทั้ง 2 กลุ่ม การผสมยางอิมัลชันไม่ได้ช่วยในการพัฒนา UCS สำหรับค่า UCS ของกลุ่ม 1 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ให้ค่า UCS ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ให้ค่า UCS เท่ากับ 30.2, 26.2 และ 24.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนกลุ่ม 2 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ให้ค่า UCS เท่ากับ 28.9, 25.1 และ 23.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า UCS ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยางอิมัลชันที่เพิ่มร้อยละ 0, 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณร้อยละยางอิมัลชัน

3.2 ความต้านแรงดึงทางอ้อมของวัสดุชั้นพื้นทางเดิม

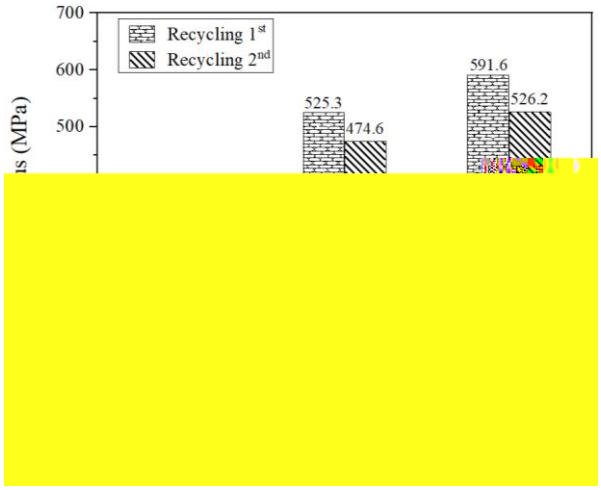
จากรูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงทางอ้อมกับปริมาณร้อยละยางอิมัลชัน ของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน โดยใช้ปริมาณยางอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของกลุ่ม 1 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 624.8, 1154.74 และ 1456.8 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่ากลุ่ม 2 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ มีค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อมเท่ากับ 547.4, 757.4 และ 1025.6 กิโลปาสคาล ตามลำดับ เห็นได้ว่าการใช้ยางอิมัลชันในส่วนผสมของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมส่งผลให้มีความสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงทางอ้อมได้ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกลุ่ม 1 เมื่อใช้ยางอิมัลชันร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม สูงถึงร้อยละ 85 และ 38 ตามลำดับ สำหรับกลุ่ม 2 เมื่อใช้ยางอิมัลชันร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม อัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ ร้อยละ 26 และ 35 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงทางอ้อมกับปริมาณร้อยละยางอิมัลชัน

3.3 โมดูลัสคืนตัวของวัสดุชั้นพื้นทางเดิม

จากรูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับปริมาณร้อยละยางอิมัลชัน ของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน โดยใช้ปริมาณยางอิมัลชันเท่ากับร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม พบว่าค่าโมดูลัสของกลุ่ม 1 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ มีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 267.2, 525.3 และ 591.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สำหรับกลุ่ม 2 เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ มีค่าโมดูลัสเท่ากับ 239.5, 474.6 และ 526.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเพิ่มค่าโมดูลัสคืนตัวของกลุ่ม 1 เมื่อใช้ยางอิมัลชันร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทางเดิม สูงถึงร้อยละ 97 และ 13 สำหรับกลุ่ม 2 เมื่อใช้ยางอิมัลชันร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุพื้นทาง อัตราการเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับร้อยละ 98 และ 11 ตามลำดับ เห็นได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสคืนตัวไปในทางเดียวกันกับอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านแรงดึงทางอ้อม



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวกับปริมาณร้อยละยางอิมัลชัน

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชันสามารถสรุปได้ดังนี้

1. UCS ของกลุ่ม 1 และ 2 มีค่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดที่ 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าลดลงแปรผันกับปริมาณยางอิมัลชันที่เพิ่มขึ้น

2. ITS และ Mr ของกลุ่ม 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ปริมาณยางอิมัลชันร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุชั้นพื้นทางเดิม

3. ITS และ Mr ที่ปริมาณยางอิมัลชันร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุชั้นพื้นทางเดิม กลุ่ม 2 ต่ำกว่ากลุ่ม 1 บ่งชี้ถึงคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลง

4. การปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชันร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุชั้นพื้นทางเดิม ทำให้ค่า ITS และ Mr เพิ่มสูงขึ้น บ่งชี้ถึงคุณสมบัติที่ดีขึ้น

5. ในการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของกลุ่ม 2 ให้มีคุณสมบัติเทียบเท่ากลุ่มที่ 1 การปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชันร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุชั้นพื้นทางเดิม สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้ บ่งชี้ถึงการฟื้นฟูวัสดุชั้นพื้นทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มาแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. การใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นพื้นทางเดิมได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Zhou, J., Zeng, M., Chen, Y. and Zhong, M. (2019). *Evaluation of Cement Stabilized Recycled Concrete Aggregate Treated with Waste Oil and Asphalt Emulsion*, Construction and Building Material, Vol. 199, pp. 143-153.

[2] Flores, G., Gallego, J., Miranda, L. and Marcobal, J.K. (2020). *Cold Asphalt Mix with Emulsion and 100% RAP: Compaction Energy and Influence of Emulsion and Cement Content*, Construction and Building Materials, Vol. 250, pp.1-10.

[3] Bessa, I.S., Almeida, L.R., Vasconcelo, K.L. and Bernucci, L.B. (2016). *Design of Cold Recycled Mixes with Asphalt Emulsion and Portland Cement, NRC Research Press*, Vol. 43, pp. 773-782.

[4] Patcharapan Nanthavisit, (2020). *Development of Cement-asphalt Emulsion Mixture for Thailand Road Rehabilitation*, Doctor of Engineering, Civil Engineering, Chiang Mai University, pp. 1-233.

[5] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก.15 (2547). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลด์ หน้า 1-12.

[6] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก.371 (2530). *แคตอินิกแอสฟัลต์อิมัลชัน*

[7] กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง ทล.105 (2015). *วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน (เทียบเท่า AASHTO T 208)*. กรมทางหลวง, หน้า 30-37.

[8] American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO T 208-15 (2019). *Standard Method of Test Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASSHTO Standard.

[9] กรมทางหลวง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง ทล.108 (2517). *วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (เทียบเท่า AASHTO T 180).* กรมทางหลวง, หน้า 60-69.

[10] American Society for Testing and Materials: ASTM D 6931 (2017). *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1-5.

[11] American Association of State Highway and Transportation Officials: ASSHTO T 307 (2007). *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. AASHTO Standard, pp. 1-42.