การทำนายความแข็งแรงของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์

The Prediction of Cement-Polymer Stabilized Road Base Strength from the Free-free Resonance Testing Result

ณัฐนนท์ คุ้มครุฑ[1], กรกฎ นุสิทธิ์[2,*], สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว[3], พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม[4], ภูริชัย แก้วมา[1], พลปรีชา ชิดบุรี[2] และ ภัคพงศ์ หอมเนียม[2]

[1]

[2]

[4]

Corresponding author address: korakodn@nu.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์กำลังได้รับความนิยมสำหรับการศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของวัสดุงานทาง เนื่องจากเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายและสามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างผลจากการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์และประสิทธิภาพของวัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบวัสดุดังกล่าวในอนาคต ส่วนผสมที่ศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้ ประกอบด้วย หินคลุกผสมซีเมนต์ หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์สไตรีนอะคริลิค (SA) และ หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์สไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ปริมาณซีเมนต์และพอลิเมอร์ที่เหมาะสมจะได้รับการออกแบบตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง บ่มตัวอย่างในภาชนะปิดเป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน จากนั้นทำการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์ ก่อนที่จะนำไปทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพ ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม สุดท้ายนำผลการทดสอบทั้งหมดมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแบบด้วยคลื่นความถี่และประสิทธิภาพของวัสดุพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ พบว่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวตัวอย่าง (D/L) ส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR สามารถรับกำลังแรงดึงทางอ้อมได้ดีกว่าการปรับปรุงวัสดุด้วยซีเมนต์และซีเมนต์กับพอลิเมอร์ชนิด SA นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังถูกนำไปใช้สร้างสมการทำนายกำลังรับแรงจากความเร็วคลื่นเฉือน ซึ่งสามารถใช้เป็นการทำนายคุณภาพวัสดุที่ได้รับผสมด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์สำหรับงานโครงสร้างทางในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: การทดสอบแบบไม่ทำลาย; การทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแนนท์; การปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทาง; ดินซีเมนต์พอลิเมอร์; ชั้นพื้นทางหินคลุก

Abstract

This research investigates the relationship between the free-free frequency resonant test results and the performance of cement-polymer stabilized soil. Two types of polymers are used in this research, which are the Styrene Acrylic (SA) polymer and Styrene-Butadiene Rubber (SBR). The crushed rock material is employed as the parent material and represent conventional road base. The optimum amount of cement and polymer will be determined based on the Department of Highways standard by considering the liquid polymer as water. The prepared samples will be cured in the closed container, at room temperature, for 7, 14, 28 and 60 days. After that, the free-free frequency resonant test will be conducted prior to the strength tests. The strength tests conducted in this research include Unconfined Compressive Strength test (UCS) and the Indirect Tensile Strength Test (IDT). The test results indicate that sample to length ratio (D/L) affects the strength of cement-polymer stabilized soil. The additional of SBR improves the indirect tensile strength of cement-stabilized soil, while the additional of SA results in strength drop. At the final stage of this research, the strength prediction equation from the shear wave velocity was developed.

Keywords: Non-destructive Test; Free-Free Resonance Test; Stabilized pavement materials; Cement-polymer stabilized soil; Crushed rock base

1. คำนำ

ปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างชั้นทางได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมากโดยการนำสารผสมเพิ่มมาเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงของวัสดุงานทาง นอกจากการ

ผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัด ยังมีการนำพอลิเมอร์มาเป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึง โดยมีเป้าหมายที่จะให้พอลิเมอร์ (Polymers) เข้ามาช่วยในการพัฒนากำลังรับแรงและมีความทนทานต่อความชื้นมากขึ้น ประกอบไปด้วย Styrene Acrylic Emulsion (SA) , Styrene Butadiene Rubber (SBR) ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้จะมีคุณสมบัติในการเพิ่มกำลังรับแรงและเพิ่มอายุการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถเป็นวัสดุเชื่อมประสานในการปรับปรุงคุณภาพดิน เพราะซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการผสมดินโดยตรง แถมยังไวต่อความการเปลี่ยนแปลง จากความชื้นมีส่วนทำให้อายุการใช้งานของถนนนั้นลดลง[1,2,3]

โดยการทดสอบหาค่าการรับกำลังของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวิธีต่างๆ วิธีการที่ได้รับการนิยมในปัจจุบันมักจะประกอบด้วยการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม ซึ่งเป็นการทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง (Destructive) และใช้เวลาค่อนข้างมากและค่าใช้จ่ายสูง ผู้วิจัยจึงได้นำการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) มาใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของวัสดุงานทาง เนื่องจากเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายและสามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็ว

โดยที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยนำผลการศึกษาด้วยวิธีการทดสอบหาความเร็วคลื่นเฉือนและการทดสอบด้วยคลื่นความถี่เรโซแน้นท์มาวิเคราะห์หาค่ามาตรฐานประเมินเกณฑ์มาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพดินชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์[4-6]และดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยจุลินทรีย์[7] แต่ทั้งนี้จะต้องทำการหาค่าความสัมพันธ์ทางวิศวกรรม ระหว่างค่าคุณสมบัติด้านพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีคลื่นสั่นสะเทือน และค่าคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุโครงสร้างทางผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ แต่เนื่องด้วยมาตราฐานการทดสอบการทดสอบ (Free-Free Resonant Frequency) มีขนาดของตัวอย่างทดสอบไม่เท่ากัน กับมาตราฐานหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง

โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ(1) ศึกษาผลกระทบขนาดตัวอย่างที่อัตราส่วน D/L ที่ต่างกัน และ (2) เพื่อความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบแบบไม่ทำลายกับประสิทธิภาพของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ซึ่งสามารถนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบและทำนายคุณภาพหินคลุกที่ได้รับผสมด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์สำหรับงานโครงสร้างทางในอนาคต

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

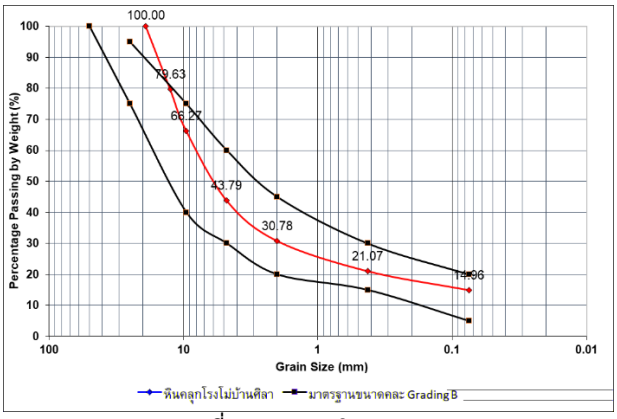
2.1

หินคลุกเป็นวัสดุที่นิยมในการนำมาใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง เนื่องจากมีขนาดคละที่ดีและมีความแข็งแรงสูงโดยในงานวิจัยนี้ใช้หินคลุกจากโรงโม่บ้านศิลา จังหวัดสุโขทัย โดยผ่านการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ทล.-ม. 203/2556 [8] ตามตารางที่1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติหินคลุกตามมาตราฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

วิธีการทดสอบคุณสมบัติ	ผลการทดสอบ	เกณฑ์มาตรฐาน	มาตรฐาน
Los Angeles Abrasion Test	31%	< 40	ทล.-ท. 203/2515
Soundness	2%	< 9	ทล.-ท. 213/2531
Liquid Limit (LL)	24%	< 25	ทล.-ท. 102/2515
Plastic Limit (PL)	18%	-	ทล.-ท. 103/2515
Plasticity Index (PI)	6%	< 6	ทล.-ท. 103/2515
CBR (Unsoaked)	94%	> 80	ทล. ท. 109/2017

และมีขนาดคละแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดคละหินคลุก

2.2

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นิยมใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคาร และ ถนนเป็นต้น

2.3

(SA)

นิยมใช้สำหรับเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงดีขึ้น และยังมีคุณสมบัติกันน้ำได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น SA เป็นโคพอลิเมอร์แบบน้ำ



รูปที่ 2 พอลิเมอร์ชนิดสไตรีนอะคริลิค (SA)

ตารางที่2 คุณสมบัติของพอลิเมอร์

Property	SA
รูปร่าง	ของเหลว
ร้อยละของแข็งทั้งหมด	54.0 – 56.0
pH	7.0 – 9.0
ความเหนียว (Brookfield RVT,CPS)	500 – 2,000
Ionic nature	Anionic
ความถ่วงจำเพาะ	1.000 - 1.100
ความหนาแน่นของไอ	< 1 water
จุดเดือด	100°c
การละลายน้ำ	กระจายน้ำในตัว

(SBR)

เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตโดยการเตรียมโคโพลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวตาไดอีนด้วยวิธีโพลิเมอไรเซชั่นแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)เป็นยางที่ใช้ในงานทั่วไป ราคาไม่แพง

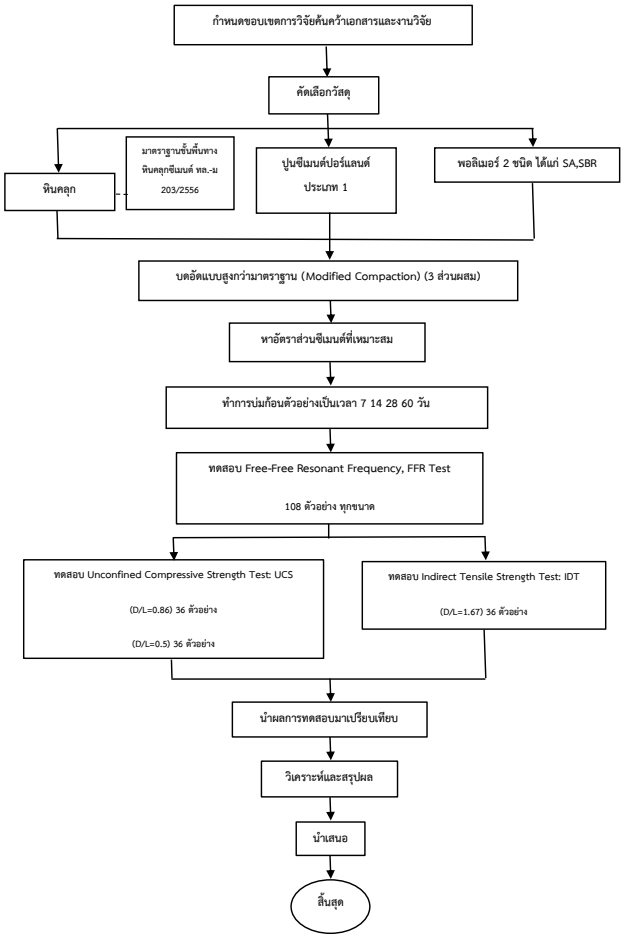


รูปที่ 3 พอลิเมอร์ชนิดสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR)

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1

โดยขั้นตอนการออกแบบและการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

3.2 Compaction Test

ในงานวิจัยนี้ทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท. 108/2517 [9]เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และ ค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) โดยแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.8 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) โดยทำการทดสอบในส่วนผสมดังนี้ หินคลุก หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA และ หินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR โดยหินคลุกผสมซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดใช้อัตราส่วนน้ำ:พอลิเมอร์ ที่ 50:50 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่สามารถดูดซึมน้ำได้ต่ำสุดและมีค่าความทนทานสูงสุดจากการทดสอบ Durability [2] จากการทดสอบผสมเบื้องต้นอัตราส่วนผสมพอลิเมอร์เกินร้อยละ50 ดินจับตัวเป็นก้อน

3.3

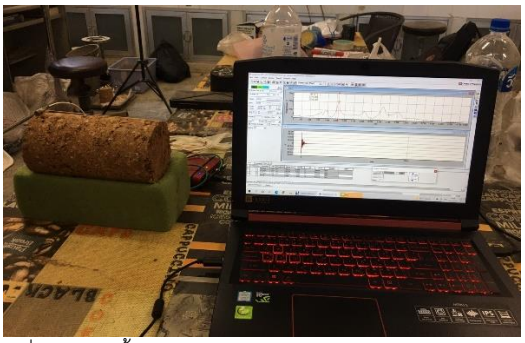
ในการออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะผสมกับหินคลุกและน้ำให้ถือเอาค่ากำลังรับแรงอัดแท่งตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ทำการทดสอบวิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) จากก้อนตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน7วันแล้วนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

3.4 Free-Free Resonance Test (FFR)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบคลื่นสั่นสะเทือนด้วยวิธี FFR ตามมาตรฐาน ASTM C215-02 [10] เป็นการทดสอบก้อนตัวอย่างแบบไม่ทำลาย เพื่อวิเคราะห์ความถี่สั่นพ้อง (Resonant frequency) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างโดยได้กำหนดขนาดอัตราส่วนของตัวอย่างที่ D/L =0.5 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบขนาดตัวอย่างที่อัตราส่วน D/L = 0.86 (ตัวอย่าง UCS) และ D/L = 1.56 (ตัวอย่าง IDT)

โดยรูปแบบในการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบจะมี 3 รูปแบบ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นที่แตกต่างกัน ได้แก่ Transverse, Torsional และ Longitudinal โดยในการศึกษานี้ได้ดำเนินการทดสอบเพียงรูปแบบ Torsional เพื่อศึกษาความความเร็วคลื่นเฉือนซึ่งในอนาคตสามารถคำนวนย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนได้ โดยการทดสอบนั้นจะใช้ Accelerometer ซึ่งติดตั้งไว้บริเวณปลายของตัวอย่างในทิศทางตั้งฉากกับด้านยาวของตัวอย่าง และทำการเชื่อมต่อกับ Spectrum Analyzer และคอมพิวเตอร์เพื่อทำการตรวจวัดและประมวลผล ตามรูปที่ 5 โดยก้อนตัวอย่างนั้นจะถูกวางไว้บนฟองน้ำเพื่อให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพ Free Boundary [10] หลังจากนั้น ทำการเคาะตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่งในทิศทางตั้งฉากกับตัวรับสัญญาณจำนวน 10-20 ครั้ง ต่อ 1 การทดสอบ เพื่อทำการทดสอบหาความเร็วคลื่นเฉือน (S-Wave)



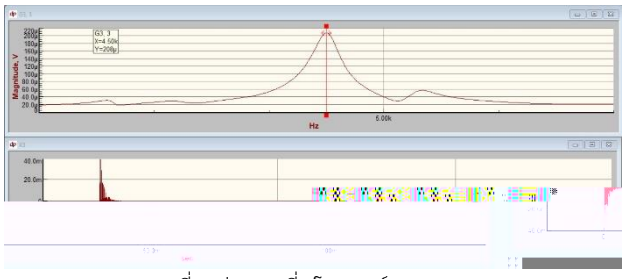
รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ FFR แบบ Torsion

โดยค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในโดเมนของเวลาจะถูกแปลงเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ เพื่อหาค่าความถี่พ้อง (ค่าความถี่ที่มีความสูงของคลื่นสูงที่สุด) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยสมการดังนี้

(1)

โดยที่ คือ ค่าความเร็วคลื่นเฉือน, f คือความถี่พ้องของตัวอย่าง, L คือความยาวตัวอย่าง และ คือ ความยาวคลื่น

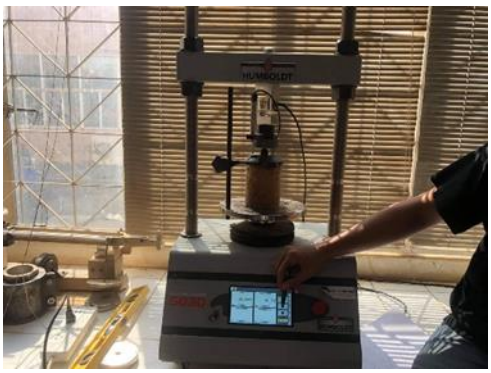
ในการทดสอบจะทดสอบทุกตัวอย่างในงานวิจัยนี้ก่อนทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดึงทางอ้อมเพื่อหาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบแบบไม่ทำลายกับประสิทธิภาพของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์



รูปที่ 6 ค่าความถี่เรโซแนนท์ (บน)
และค่าสัญญาณที่ตรวจได้ในโดเมนเวลา(ล่าง)

3.5 (Unconfined Compressive Strength)

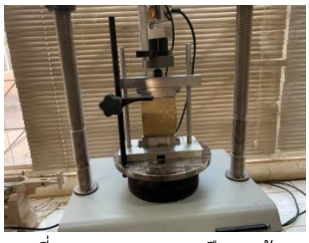
การทดสอบนี้ทดสอบตามมาตรฐานของกรมทางหลวงการทดลองที่ทล-ท. 105/2515 [11] โดยทำการทดสอบทั้งหมด 2 ขนาดตัวอย่าง คือ อัตราส่วนD/L = 0.5 และ D/L = 0.87 ทำการขึ้นก้อนตัวอย่างตามข้อ3.2 โดยทำการบ่มที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยบ่มก้อนตัวอย่างในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงทำการวัดขนาดส่วนสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างเข้าเครื่องกด โดยให้อัตราการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ร้อยละ 2 ของความสูงตัวอย่างต่อนาที บันทึกค่าทุกๆ10วินาที จนค่าแรงกดลดลงจึงหยุดการทดสอบ โดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 ตัวอย่าง/1ส่วนผสม/1อายุบ่ม ทั้งหมด 72 ตัวอย่าง



รูปที่ 7 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

3.6 INDIRECT TENSILE STRENGTH :IDT)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมก้อนตัวอย่างภายใต้มาตรฐาน ASTM D6931-2017 [12] โดยตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง101.6 มม.(4นิ้ว) สูงประมาณ 70 มิลลิเมตร โดยใช้หินคลุกประมาณ 1200 กรัม บดอัด 3 ชั้น ชั้นละ25 ครั้ง ที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน แกะตัวอย่างทำการวัดขนาดตัวอย่าง แล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมงจากนั้นพักไว้ 15 นาที วางตัวอย่างบนแท่นปรับให้ได้ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบจากนั้นทำการตั้งอัตราการเคลื่อนที่แนวดิ่ง 50 mm/min ให้แรงจนตัวอย่างวิบัติโดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 ตัวอย่าง/1ส่วนผสม/1อายุบ่ม ทั้งหมด 36 ตัวอย่าง

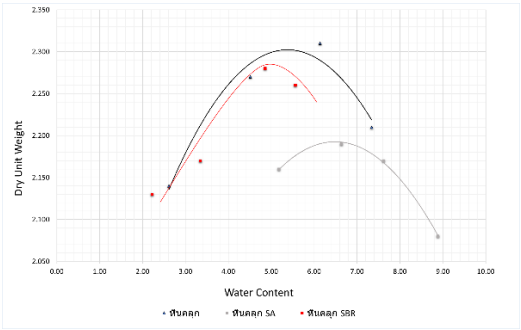


รูปที่ 8 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

4.1 COMPACTION TEST

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่าวัสดุหินคลุกที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด Maximum Dry Density (MDD) และเมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ทำให้วัสดุนี้มีค่าความหนาแน่นลดลงโดยวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ชนิด SBR มีค่าความหนาแน่นสูงสุด สูงกว่าวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ชนิด SA เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิด SA มีความข้นเหนียวกว่าพอลิเมอร์ชนิด SBR และต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่าจึงทำให้ค่าความหนาแน่นต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 Compaction Test

โดยในการทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้ค่าปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด Optimum Moisture Content (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด Maximum Dry Density (MDD) ตารางที่ 1 เพื่อขึ้นก้อนตัวอย่างในการทดสอบต่างๆต่อไป

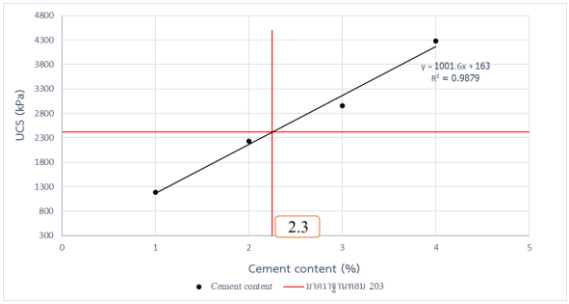
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ **Compaction test** แบบสูงกว่ามาตรฐาน

Type	OMC(%)	MDD (g/cm^3)
crushed rock	5.8	2.31
crushed rock + SA	6.4	2.19
crushed rock + SBR	5	2.28

4.2

ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามร้อยละของวัสดุผสมซีเมนต์เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203/2556 ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) พบว่าหินคลุกโรงโม่บ้านศิลา ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ผ่านมาตรฐาน 2413 กิโลพาสคัล ที่ร้อยละ 2.3 แสดงดังรูปที่ 10 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์

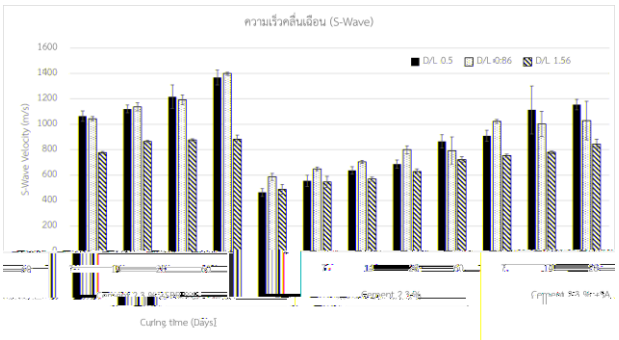
โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 2.3 ซึ่งได้จากการทดสอบข้างต้น ทุกส่วนผสมเพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์,ซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA และ ซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด
กับปริมาณซีเมนต์ (ร้อยละ)

4.3 (S-Wave)

การทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหินคลุกทั้ง 3 ส่วนผสม คือ หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์, หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA และชนิด SBR ที่อัตราส่วนผสมพอลิเมอร์กับน้ำ 50/50 ทั้ง 3 ขนาดของตัวอย่างที่แตกต่างกัน คือ D/L=0.5, D/L=0.86 และ D/L=1.56 เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง และ L คือความยาวของก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน



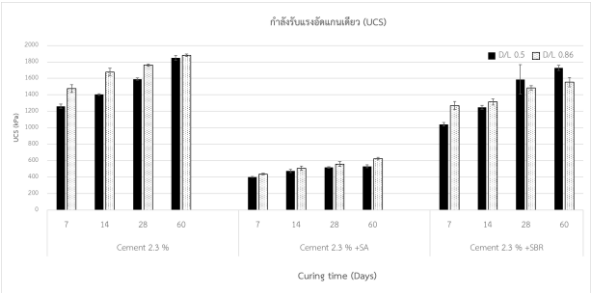
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือน
กับอายุการบ่ม

จากการทดสอบค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Free-Free Resonant) จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์, ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR มีแนวโน้มของค่า S-wave เพิ่มขึ้นในระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น แต่ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR มีค่าน้อยกว่าก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เล็กน้อย และตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA แทบจะไม่มีการพัฒนา เมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR แสดงดังรูปที่ 11

โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบความเร็วคลื่นเฉือนพบว่า อัตราส่วน D/L = 1.56 ส่งผลโดยตรงกับค่าความเร็วคลื่นเฉือน และ ที่อัตราส่วน D/L = 0.86 ส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความแปรปรวนของการทดสอบ

4.4 (Unconfined Compressive Strength test : UCS)

การทดสอบหากำลังอัดแกนเดียวผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหินคลุกทั้ง 3 ส่วนผสม คือ หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์, หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA และชนิด SBR ที่อัตราส่วนผสมพอลิเมอร์กับน้ำ 50/50 ทั้งหมด 2 ขนาดตัวอย่างที่แตกต่างกัน คือ D/L=0.5, D/L=0.86 ตัวอย่างที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน



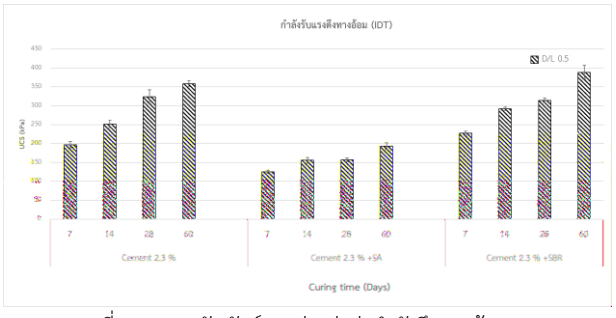
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม

จากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวจะเห็นได้ว่า ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์, ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR มีแนวโน้มของค่ากำลังอัดแกนเดียว เพิ่มขึ้นในระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น แต่ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR มีค่าน้อยกว่าก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เล็กน้อยและก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA แทบจะไม่มีการพัฒนา เมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBRเนื่องจากซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีกว่าพอลิเมอร์ชนิด SBR ซึ่งมีความข้นหนืดน้อยกว่าพอลิเมอร์ชนิด SA ทำให้มีกำลังที่สูงกว่า และพอลิเมอร์ชนิด SA ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 12 ซึ่งอัตราส่วน D/L 0.87 จะให้ค่ากำลังที่สูงกว่า อัตราส่วน D/L 0.5 ซึ่งเกิดจากผลกระทบของอัตราส่วน D/L และความชะลูดของตัวอย่างทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

4.5 (Indirect Tensile Strength Test : IDT)

การทดสอบหาค่ากำลังดึงทางอ้อมผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหินคลุกทั้ง 3 ส่วนผสม คือ หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์, หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA และชนิด SBR ที่อัตราส่วนผสมพอลิเมอร์กับน้ำ 50/50 โดยตัวอย่างมีขนาดตามที่กล่าวไว้ข้างต้นที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 12

จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์, ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR มีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม เพิ่มขึ้นในระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น แต่ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR มีค่ามากกว่าก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เล็กน้อย เพราะว่าพอลิเมอร์ชนิด SBR มีสมบัติการรับแรงดึงได้ดี และตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA แทบจะไม่มีการพัฒนา หรือพัฒนาน้อยมาก เมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์, ก้อนตัวอย่างหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงทางอ้อม กับอายุการบ่มของขนาดก้อนตัวอย่าง D/L=1.56

4.6

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเคลื่อนเฉือนกับกำลังรับน้ำหนักแกนเดียวของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นเฉือนและและกำลังรับแรงมีความสอดคล้องกับระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกับความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบ FFR จะแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลัง อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของขนาดตัวอย่าง (D/L) ก็ได้ส่งผลต่อความเร็วคลื่นเฉือนและกำลังแกนเดียว แต่ลักษณะแนวโน้วการพัฒนากำลังนั้นยังมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังอัดแกนเดียวที่ขนาดอัตราส่วนตัวอย่าง D/L =0.5 รูปที่ 13 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังอัดแกนเดียวที่ขนาดอัตราส่วนตัวอย่าง D/L =0.86 รูปที่ 14 จะพบว่าวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์และพอลิเมอร์ชนิด SBR มีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันส่วนวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิ-เมอร์ชนิด SA มีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกับสองวัสดุข้างต้น

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังอัดแกนเดียวที่ขนาดอัตราส่วนตัวอย่าง D/L =0.5

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังอัดแกนเดียวที่ขนาดอัตราส่วนตัวอย่าง D/L =0.86

4.7

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเคลื่อนเฉือนกับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นเฉือนและกำลังรับแรง มีความสอดคล้องกับระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับดึงทางอ้อมกับความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบ FFR แสดงดังรูปที่ 15

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังรับแรงดึงทางอ้อมc

5. บทสรุป

จากการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบแบบไม่ทำลายกับประสิทธิภาพของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์

1.อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงตัวอย่าง (D/L) ส่งผลกระทบต่อค่าการทดสอบความเร็วคลื่นเฉือนและกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เมื่ออัตราส่วน D/L น้อยจะให้ความเร็วคลื่นเฉือนและค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลง

2.การปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR ช่วยเสริมให้วัสดุมีกำลังรับแรงดึงทางอ้อมได้ดีกว่า วัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ แต่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง และการปรับปรุงคุณภาพหินคลุกด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวัสดุลดลง ทั้งสองสาเหตุเกิดจากการสันนิฐานว่า ซีเมนต์มีการทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีกว่าพอลิเมอร์ชนิด SBR และพอลิเมอร์ชนิด SA ตามลำดับ

3.ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม ทั้ง 3 ส่วนผสม คือ หินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์, หินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SBR, หินคลุกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์ชนิด SA ด้วยวิธี FFR พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นเฉือนและกำลังรับแรง มีความสอดคล้องกับระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกับความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบ FFR จะแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลัง (Power function) แสดงตารางที่ 3 ซึ่งสามารถนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบและการทำนายผลการทดสอบคุณภาพวัสดุที่ได้รับผสมด้วยซีเมนต์พอลิเมอร์จากสมการข้างต้นสำหรับงานโครงสร้างทางในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนกับประสิทธิภาพของวัสดุ

การทำนายการทดสอบและชนิดของหินคลุก		สมการความสัมพันธ์ Vs (m/s)
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (D/L=0.5)	Cement 2.3%	$0.2486X^{1.23}$
	Cement 2.3%+SA	$9.3374X^{0.6193}$
	Cement 2.3%+SBR	$0.0884X^{1.3997}$
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ; UCS (D/L=0.86)	Cement 2.3%	$8.2605X^{0.7513}$
	Cement 2.3%+SA	$0.541X^{1.0553}$

6. ข้อเสนอแนะ

ผลการทดสอบงานวิจัยนี้เป็นเพียงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้นและได้ทำการทดสอบเพียงวัสดุหินคลุกเพียงอย่างเดียว ซึ่งยังไม่ครอบคลุมผลกระทบและปัจจัยเมื่อทำการทดสอบหน้างานจริงเท่านั้น ดังนั้นการศึกษานี้จึงไม่ได้รวมถึงปัจจัยที่อาจจะมีผลกระทบ เมื่อทำการทดสอบบริเวณหน้างานจริง ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณหน้างานจริงและการทดสอบวัสดุชนิดอื่นเพิ่มเติม จะช่วยให้สามารถหาค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นค่ามาตรฐาน ในการควบคุมคุณภาพของวัสดุได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณคณะทางภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ

ขอบคุณขอขอบคุณนายชิติพัทธ์ สมฤทธิ์, นายณัฐการ กิติวงค์อิน และนายวิศรุต ไชยจันดี นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ให้ความร่วมมือในการทำการทดสอบต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การอ้างอิง

[1] กัญจน์ สลีวงศ์., พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม., กรกฎ นุสิทธิ์. (2020). การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้อยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์-โพลีเมอร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 15-17 กรกฎาคม, ชลบุรี, ประเทศไทย.

[2] ไอรดาภรณ์ หาดแก้ว., กรกฎ นุสิทธิ์., ทวีศักดิ์ แตะกระโทก. (2020). คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ผสมยางพาราและดินซีเมนต์ผสมยางสไตรีนอะคริลิค. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 15-17 กรกฎาคม, ชลบุรี, ประเทศไทย.

[3] Sepehr Rezaeimalek., Reza Nasouri., Jie Huang., Sazzad Bin-Shafique. (20 September 2018). Curing Method and Mix Design Evaluation of a Styrene- Acrylic Based Liquid Polymer for Sand and Clay Stabilization. ASCE (The American Society of Civil Engineers).

[4] ชิตินทรีย์ โสภณพงษ์. (2016). การศึกษาค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างชั้นวัสดุพื้นทางและรองพื้นทางผสมซีเมนต์โดยวิธีทดสอบ Free-Free Resonance Test. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21., 28-30 มิถุนายน., จ.สงขา., ประเทศไทย

[5] เบญญาภา ผันน้อย. (2021). การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยจุลินทรย์ในดินเหนียวกรุงเทพโดยใช้สปอร์แบคทีเรีย.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26., 23-25 มิถุนายน., ออนไลน์., ประเทศไทย

[6] W. Spencer Guthrie, Stephen Sebesta, and Tom Scullion (2002), SELECTING OPTIMUM CEMENT CONTENTS FOR STABILIZING AGGREGATE BASE MATERIALS. Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas

[7] N. Yoobanpot, P. Jamsawang, H. Poorahong, et al., Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash, Engineering Geology (2020)

[8] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง.,กรมทางหลวง.(2556). ทล.-ม.203/2556มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์. กรุงเทพฯ

[9] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง.,กรมทางหลวง.(2517). ทล.-ท.108/2517., วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตราฐาน. กรุงเทพฯ

[10] ASTM C215, Standara Test Method for Fundamental Transverse, Longitudina;,andTorsional Frequencies of Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999

[11] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง.,กรมทางหลวง.(2556). ทล.-ท.105/2515การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว Unconfined Compressive Strength Test . กรุงเทพฯ

[12] American Society for Testing and Materials (2017). ASTM D 6931. Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures. ASTM International.