ผลกระทบของปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดของดินลูกรังที่ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

EFFECT OF CEMENT AND POLYMER ADMIXTURE ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF LATERITIC SOIL USED FOR BASE LAYER

ณัฐวุธ วิกสิตเจริญกุล[1,*], วรัช ก้องกิจกุล[1] และ ฐิติกร โพธิ์ศรีบิ้ง[2]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ
[2] สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท จ.กรุงเทพฯ
[*]Corresponding author address: wuttition@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาผลกระทบของการเติมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์เข้ากับวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์สำหรับใช้ในการทำชั้นพื้นทางของถนน โดยใช้ดินลูกรังที่มาจากจังหวัดชลบุรี โดยจะทำการทดสอบกับดินลูกรังดังกล่าวผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณ 0 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยมวลแห้งของดินลูกรัง แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวเพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำที่ทำให้ดินลูกรังมีค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวตามมาตรฐานกรมทางหลวง จากนั้นได้ทำการเพิ่มสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ในดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ที่ 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์โดยสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์มีสมบัติทำให้วัสดุดินซีเมนต์มีความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นในช่วงปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่ 2-6 เปอร์เซ็นต์ต่อมวลซีเมนต์ โดยสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจากค่าปริมาณซีเมนต์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของมวลแห้งของดินลูกรังและค่าปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ได้ และการเพิ่มสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ในตัวอย่างดินซีเมนต์ยังส่งผลทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัดมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่เพิ่มสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์

คำสำคัญ: *ดินลูกรัง, ปูนซีเมนต์, สารผสมเพิ่มโพลิเมอร์, กำลังอัด, ชั้นพื้นทาง*

Abstract

Study of the effect from adding the polymer admixture to lateritic soil mixed with cement for use in a base layer studies using the lateritic soil from Chonburi province. Performing the test with the lateritic soil mixed with Portland cement type I at 0, 2, 4, 6, and 8 percent by mass of dry lateritic soil to find the minimum cement content that causes the lateritic soil to have compressive strength follow the Department of Highways standard. After that, add the polymer admixture in lateritic soil mixed with cement at 2, 4, 6, and 8 percent by mass of cement content. The result of samples with polymer admixture in 2-6 percent by mass of cement content tends to be higher the compressive strength value than the soil-cement sample without polymer admixture. The compressive strength value can be predicted by the cement content value in unit of percent by mass of dry lateritic soil and the polymer admixture content value in unit of percent by mass of cement. In addition, the polymer admixture effects to increase in the value of Young's modulus and the value of compressive toughness index in soil-cement samples higher than the soil-cement sample without the polymer admixture.

Keywords: *lateritic soil, cement, polymer admixture, compressive strength, base layer.*

1. คำนำ

กรมทางหลวงชนบทมีหน้าที่หลักในการสร้างถนนที่จะเชื่อมโครงข่ายเพื่อการเชื่อมเส้นทางธุรกิจต่าง ๆ ในหลายพื้นที่ โดยถนนในประเทศไทยมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ ถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง โดยถนนที่กรมทางหลวงชนบทสร้างเป็นหลักคือถนนลาดยาง ซึ่งในปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างมีสมบัติทางวิศวกรรมผ่านเกณฑ์มาตรฐานมีอยู่อย่างจำกัด และโครงการก่อสร้างหลายแห่งอยู่ไกลจากแหล่งหินคลุกที่ใช้เป็นวัสดุพื้นทาง ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่ง นอกจากนี้การขนส่งผ่านรถบรรทุกอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อการจราจรและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

ในปัจจุบันจึงมีการนำวัสดุที่มีในพื้นที่งานก่อสร้างนั้นมาพัฒนาให้มีกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวที่ผ่านมาตรฐานนำมาใช้ในการซ่อมแซมชั้นพื้นทางโดยแทนที่หินคลุกที่ถูกขุดออก ซึ่งงานวิจัยในอดีตมีการนำวัสดุหลายชนิดมาผสมกับซีเมนต์และสารผสมเพิ่มอื่น ๆ เพื่อให้ได้วัสดุชั้นพื้นทางที่มีกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ [1-3] ถึงแม้ว่าการผสมด้วยซีเมนต์จะสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดของดินลูกรังให้เทียบเคียงกับหินคลุกได้ แต่สมบัติด้านอื่น เช่น ความต้านทานการล้า (Fatigue cracking) อาจด้อยกว่า หรือเมื่อถูกน้ำกระทำเข้าออกวัสดุเป็นวงรอบ (Wet-dry cycle) สมบัติ

ของดินลูกรังผสมซีเมนต์อาจด้อยลง และการเสื่อมลงของสมบัติของดินลูกรังผสมซีเมนต์อาจเกิดขึ้นด้วยอัตราที่รวดเร็วกว่าหินคลุก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินผสมซีเมนต์ แต่การนำสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์มาผสมเข้ากับดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ อาจจะทำให้กำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงไป จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินลูกรังผสมซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

บทความวิจัยฉบับนี้จึงทำการทดลองโดยนำซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ผสมเข้ากับดินลูกรังเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดของดินลูกรังที่ปรับปรุงคุณภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการนำซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์มาใช้พัฒนาวัสดุชั้นพื้นทางและวัสดุชั้นพื้นทางหมุนเวียนในการซ่อมถนน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1.เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุชั้นพื้นทางที่ผสมด้วยซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 2.หาอัตราส่วนผสมสารผสมโพลิเมอร์ที่เหมาะสมที่ตอบสนองต่อความต้องการด้านกำลังรับแรงอัด และ 3.เปรียบเทียบสมบัติด้านอื่น ๆ ระหว่างดินลูกรังที่ผสมปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์กับดินลูกรังที่ผสมปูนซีเมนต์อย่างเดียว

โดยเป็นการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์เข้ากับวัสดุดินลูกรังสำหรับใช้ในการก่อสร้างชั้นพื้นทางของถนนเน้นที่การศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุโดยจะตรวจสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุตามมาตรฐาน DH-S 204/2556 [4] ได้แก่ การทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (Sieve Analysis test) การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test) และการทดสอบหาขีดความข้นเหลวของดิน (Atterberg's limit test) หลังจากนั้น ใช้การทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว (Unconfined Compressive Strength test) ตามมาตรฐาน DH-T 105/2515 [5] ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของตัวอย่างทั้งหมด

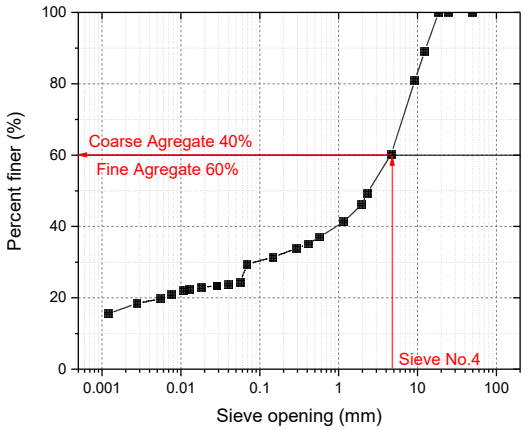
2. วัสดุที่ใช้

2.1. ดินลูกรัง

ดินลูกรังเป็นวัสดุธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Sub-base) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรับน้ำหนักจากการกระทำของน้ำหนักบรรทุกจราจรที่ผิวถนน และเป็นวัสดุที่ถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางด้วยการผสมกับซีเมนต์ (Soil-cement base) อีกด้วย โดยดินลูกรังที่ใช้นำมาจากจังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มีสมบัติผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงแล้ว สมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 และอัตราส่วนระหว่างมวลหยาบกับมวลละเอียดของดินที่ใช้แสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติดัชนีของดินลูกรัง

Index	Result	เกณฑ์มาตรฐาน
Specific Gravity	2.645	-
Liquid Limit (%)	34.0	≤ 40.0
Plastic Limit (%)	23.1	-
Plastic Index (%)	13.8	≤ 15.0
Optimum Moisture Content (%)	11.5	-
Maximum Density (g/cm^3)	1.910	-



รูปที่ 1 เส้นโค้งการกระจายขนาดคละของดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.2. ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานหลักในคอนกรีต โดยจะนำมาใช้ในงานที่ต้องการค่ากำลังรับแรงอัดและความทนทาน ซึ่งเป็นสมบัติหลักทางวิศวกรรม หน้าที่ของปูนซีเมนต์ คือ เติมเต็มช่องว่างระหว่างมวล ทำให้วัสดุมีสมบัติไม่ซึมผ่านน้ำ สร้างกำลังให้คอนกรีต และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานมวลต่าง ๆ ให้เป็นชิ้นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ผ่านกระบวนใด ๆ มาก่อน เพื่อเป็นการจำลองการใช้งานในการก่อสร้างจริงซึ่งจะไม่ได้ผ่านกระบวนการใด ๆ เช่นกัน

2.3. สารผสมเพิ่มโพลิเมอร์

งานวิจัยนี้ใช้สารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ ที่เรียกว่า Renolith ประกอบไปด้วย สารผสมของน้ำ Acrylic resin Calcium salt Mineral oil และ Cellulose เหมาะสำหรับปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์ (Soil-cement) ให้มีสมบัติความแข็งคล้ายคอนกรีต ในงานก่อสร้างชั้นพื้นทางถนน (Road base) และรองพื้นทาง (Sub-base) ทำหน้าที่เป็นสารผสมเพิ่มความหนืด (Thickener) เคลือบอนุภาค (Film former) ช่วยยึดเกาะ เชื่อมการแตกร้าว และป้องกันการซึมผ่านของน้ำในดินซีเมนต์และถนนหินคลุก โดยสารผสมเพิ่มนี้จะต้องเก็บไว้ในที่แห้งและร่มโดยจะเก็บไว้ได้ยาวนานถึง 24 เดือนในภาชนะ

ปิด และในการผสมตัวอย่างจะนำสารผสมนี้ผสมเข้ากับน้ำก่อนแล้วจึงค่อยนำมาผสมกับดินลูกรังและซีเมนต์

ในการออกแบบตามคู่มือของผลิตภัณฑ์จะใช้การกำหนดค่าปริมาณซีเมนต์เริ่มต้นที่ 3 เปอร์เซ็นต์ของมวลดินแห้ง และเปลี่ยนปริมาณซีเมนต์เป็น 4 5 6 7 และ 8 เปอร์เซ็นต์ของมวลดินแห้ง โดยทำการกำหนดปริมาณของ Renolith ที่ใช้ไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ เพื่อหาปริมาณซีเมนต์ที่ทำให้ตัววัสดุมีค่ารับกำลังสูงสุด แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการหาปริมาณซีเมนต์และปริมาณของ Renolith ที่เหมาะสมจริงๆ จึงได้ทำการกำหนดปริมาณซีเมนต์และ Renolith โดยไม่ได้ใช้ปริมาณตามในคู่มือของผลิตภัณฑ์

3. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวในการหาค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของตัวอย่างดินลูกรังผสมซีเมนต์และดินลูกรังผสมซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ ตัวอย่างที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยการผสมแห้งระหว่างดินลูกรังและซีเมนต์ แล้วเทน้ำและสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์มาผสมเพิ่มเข้าไป จากนั้นทำการบดอัดด้วยวิธีตามมาตรฐานการทดสอบการบดอัดดิน แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test) ในโมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกจากโมลแล้วทำการห่อหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกใสและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ก่อนทดสอบนำตัวอย่างแช่ในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที และปิดผิวหน้าตัวอย่างด้วยปูนปลาสเตอร์เพื่อทำให้ผิวเรียบ แล้วจึงนำไปทำการทดสอบตามมาตรฐาน DH-T 105/2515 [5] ด้วยความเร็วในการกดตัวอย่างที่ 1.25 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังในรูปที่ 2 โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวต้องไม่ต่ำกว่า 1,724 กิโลปาสคาล

รูปที่ 2 ตัวอย่างการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้เริ่มจากการทำการทดสอบหาสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุตามที่มาตรฐานของกรมทางหลวง DH-S 204/2556 [4] ได้แก่ การทดสอบหาขนาดเม็ดดิน การทดสอบการบดอัดดิน และการทดสอบหาขีดความข้นเหลวของดิน หลังจากนั้นทำการทดสอบแรงอัดแบบทิศทางเดียวกับตัวอย่างดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่ C = 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ของมวลแห้ง (Solid) ของดินลูกรัง ตามลำดับ เพื่อหาปริมาณซีเมนต์ขั้นต่ำที่ทำให้วัสดุสามารถรับกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวได้ 1,724 กิโลปาสคาล

ในขั้นตอนถัดไปจะใช้ปริมาณซีเมนต์จากขั้นตอนก่อนหน้าซึ่งได้ 3.2 เปอร์เซ็นต์ของมวลแห้งของดินลูกรัง มาเป็นปริมาณซีเมนต์เริ่มต้น จากนั้นทำการผสมดินลูกรังกับซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ (P) ในปริมาณ 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ตามลำดับ และทำซ้ำกับตัวอย่างที่เพิ่มปริมาณซีเมนต์เป็น 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ปริมาณของวัสดุแต่ละอย่างในแต่ละตัวอย่างแสดงดังในตารางที่ 2 และนำไปทำการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด นำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาสมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว

ตารางที่ 2 ปริมาณวัสดุในแต่ละตัวอย่างทดสอบ

C (%)	P (%)	มวลแห้งของดินลูกรัง (กรัม)	น้ำ (กรัม)	มวลซีเมนต์ (กรัม)	มวลสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ (กรัม)
3.2	0	2300	264.5	73.6	0.00
	2	2300	264.5	73.6	1.47
	4	2300	264.5	73.6	2.94
	6	2300	264.5	73.6	4.42
	8	2300	264.5	73.6	5.89
2.0	0	2300	264.5	46.0	0.00
	2	2300	264.5	46.0	0.92
	4	2300	264.5	46.0	1.84
	6	2300	264.5	46.0	2.76
	8	2300	264.5	46.0	3.68
4.0	0	2300	264.5	92.0	0.00
	2	2300	264.5	92.0	1.84
	4	2300	264.5	92.0	3.68
	6	2300	264.5	92.0	5.52
	8	2300	264.5	92.0	7.36

หลังจากนั้นวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเหนียวอันเนื่องจากแรงอัด (Compressive Toughness Index) จากผลการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวด้วยวิธีการของ Deng และคณะ [6] เพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์กับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์

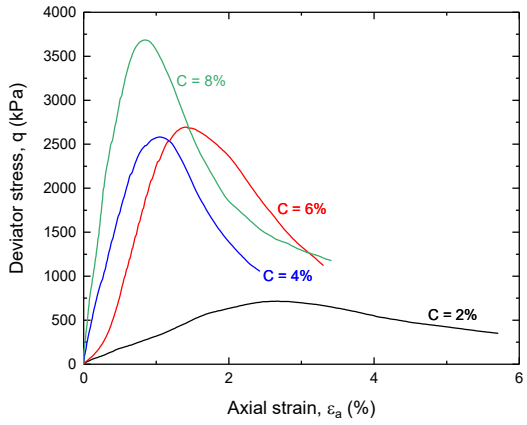
4. ผลการทดสอบและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปริมาณส่วนผสมต่าง ๆ ของวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ โดยจะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1.การออกแบบปริมาณซีเมนต์ 2.การออกแบบปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 3.การหาสมการความสัมพันธ์ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด และ 4.วิเคราะห์หาดัชนีความเหนียวอันเนื่องจากแรงอัด แล้วจึงทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์กับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์

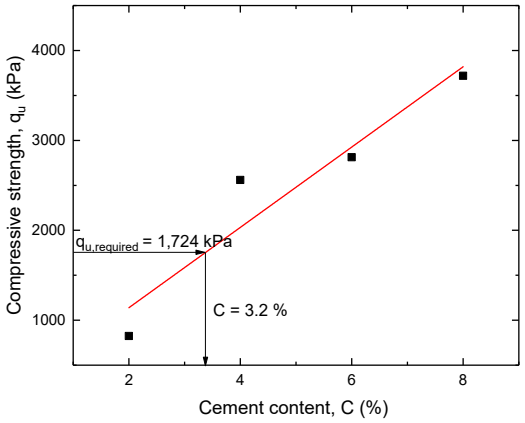
4.1. ส่วนผสม

ในขั้นตอนนี้จะหาปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ในการผสมเข้ากับดินลูกรัง โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมซีเมนต์หลังจากบ่ม 7 วัน จะต้องได้ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวไม่น้อยกว่า 1,724 กิโลปาสคาล

ปริมาณของซีเมนต์ที่เหมาะสมใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 3.2 เปอร์เซ็นต์ของมวลดินแห้ง สามารถหาได้จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 หลังจากนั้นทำการเพิ่มสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่ 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ที่ใช้ และทำการทดลองด้วยปริมาณค่า P เท่าเดิม แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณค่า C เป็น 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ของมวลแห้งของดินลูกรังตามลำดับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดแนวแกนของตัวอย่างดินลูกรังผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



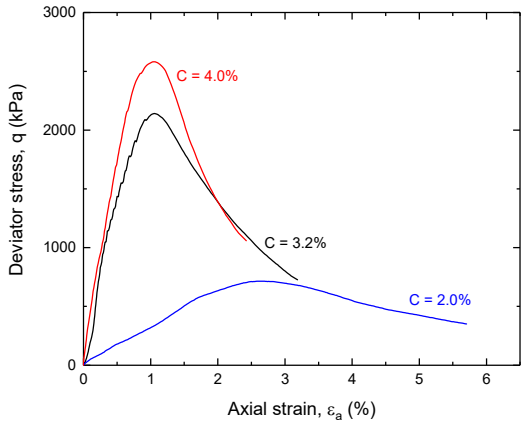
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับปริมาณซีเมนต์สำหรับดินลูกรังที่ผสมซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

4.2. การทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว

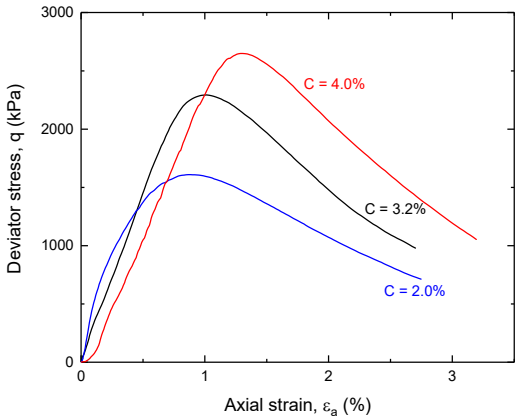
ผลการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวของวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3 และ รูปที่ 5-10

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของวัสดุดินลูกรังผสมซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์

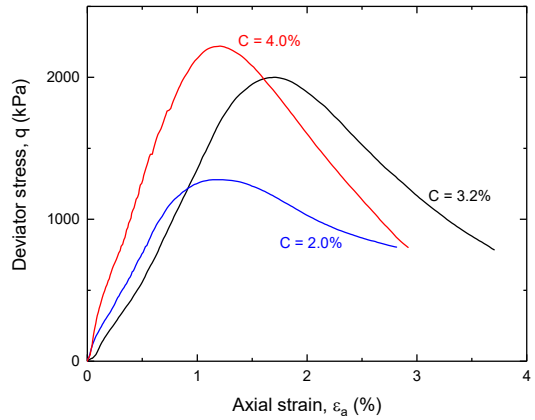
ปริมาณซีเมนต์ (%)	ปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ (%)	กำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวสูงสุด (กิโลปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น (เมกะปาสคาล)
3.2	0	2117	273.42
	2	1983	347.98
	4	2032	183.95
	6	2329	373.32
	8	2148	327.55
2.0	0	824	58.54
	2	1362	121.69
	4	1595	175.75
	6	1677	204.37
	8	1462	130.35
4.0	0	2560	218.75
	2	2310	246.31
	4	2395	252.95
	6	2603	264.97
	8	2254	143.48



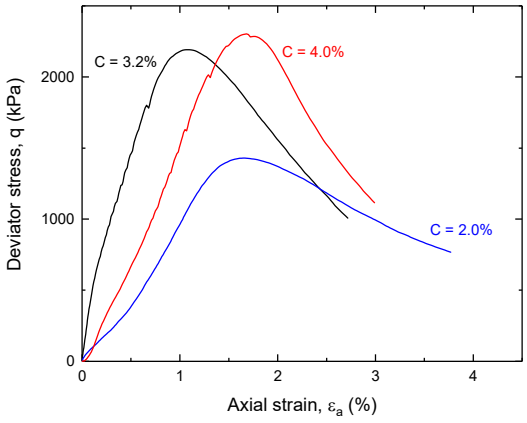
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดแนวแกน ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 0 เปอร์เซ็นต์



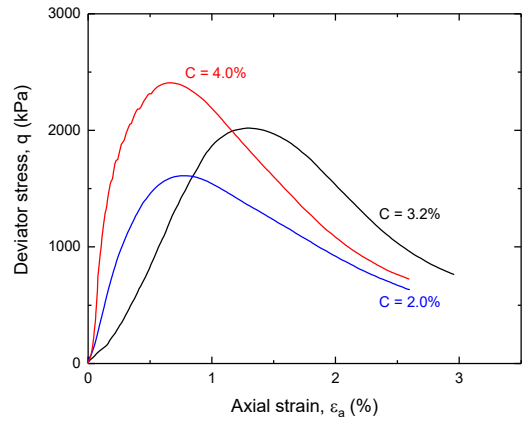
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดแนวแกน ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 6 เปอร์เซ็นต์



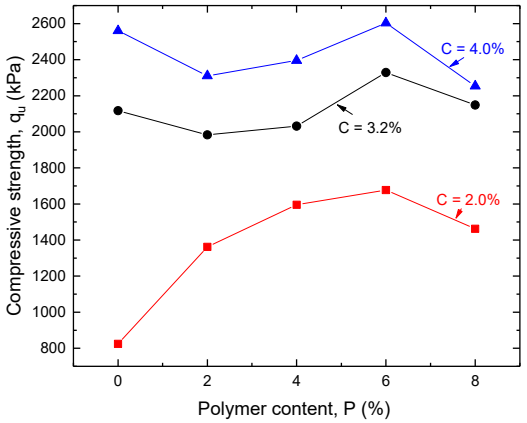
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดแนวแกน ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดแนวแกน ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 8 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนกับความเครียดแนวแกน ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 4 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2-6 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ 6 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ หากใส่ในปริมาณที่มากกว่านี้จะทำให้กำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวมีค่าลดลง เป็นไปตามบทความวิจัยของ Kumar [1] ที่ได้ผลสรุปว่า ตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวสูงสุดมากที่สุด และที่ปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวสูงสุดลดลง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์เท่ากัน ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจะเพิ่มขึ้นแบบแปรผันตามกับปริมาณซีเมนต์

การใส่สารผสมเพิ่มโพลิเมอร์มีผลทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E50) ของตัวอย่างมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อใส่มากเกินกว่าปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์เท่ากัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งเท่ากับ 3.2 เปอร์เซ็นต์ต่อมวลของดินลูกรังจะมีค่ามากที่สุด

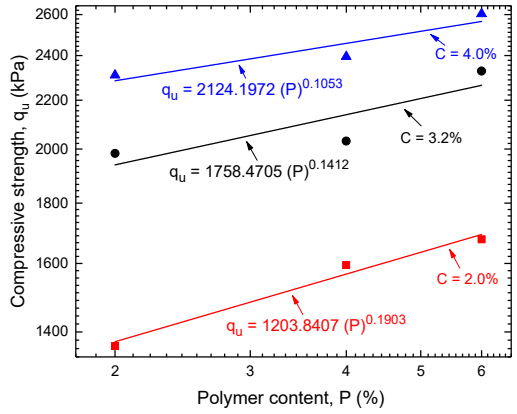
4.3. การพัฒนาสมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวต่อปริมาณซีเมนต์และสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์สามารถหาได้โดยการนำข้อมูลในช่วงที่ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 10 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ในมาตราส่วนลอการิทึม (Log scale) และสร้างสมการการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ดังแสดงในรูปที่ 11 พร้อมกับได้สมการเส้นตรง ดังสมการที่ (1) ซึ่งได้แนวทางจากการศึกษาของ Fuangfu [7]

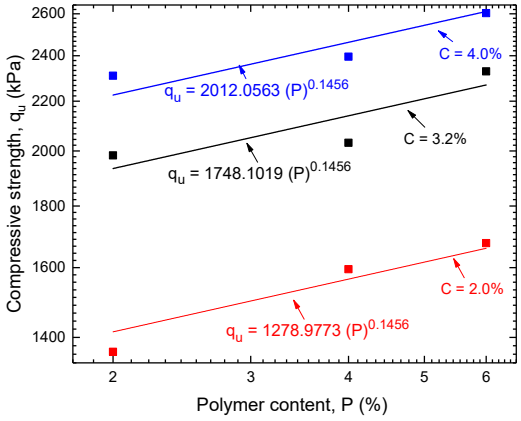
$$q_u = K(\mathrm{P})^{\mathrm{m}} \quad (1)$$

ในการนำเสนอตัวแปรที่เป็นตัวแทนของผลทดสอบทั้งหมด จึงทำการเฉลี่ยค่าของตัวแปร m จากรูปที่ 11 และสร้างสมการการถดถอยเชิงเส้นอีกครั้งโดยใช้ค่า m เฉลี่ย (m_{avg}) ซึ่งจะได้ค่าคงที่ *K* ดังแสดงในรูปที่ 12 พร้อมกับได้สมการเส้นตรง ดังสมการที่ (2)

$$q_u = K(\mathrm{P})^{\mathrm{m}_{avg}} \quad (2)$$



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ เฉพาะช่วงที่ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวเพิ่มขึ้น

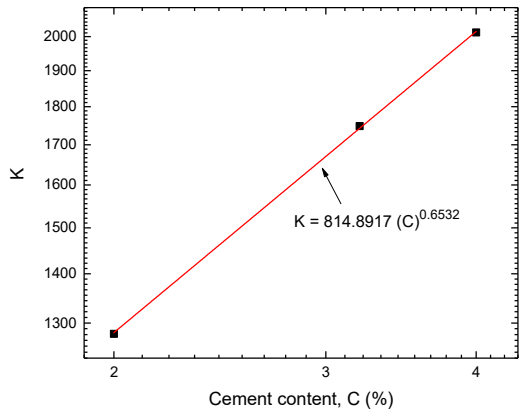


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ ที่ใช้ค่า m เท่ากับ m เฉลี่ย

ต่อมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจุดตัดแกน y (*K*) จากรูปที่ 12 กับปริมาณซีเมนต์ในมาตราส่วนลอการิทึมและสร้างสมการการถดถอยเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยสมการการถดถอยเชิงเส้นดังกล่าวจะเกิดเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า *K* และปริมาณซีเมนต์ดังสมการ (3) จากนั้นนำค่า *K* ในสมการ (3) แทนที่ในสมการ (2) จะได้สมการการคำนวนหาค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวดังสมการ (4)

$$K = A(\mathrm{C})^{\mathrm{B}} \quad (3)$$

$$q_{\mathrm{u}} = A(C)^{\mathrm{B}}(P)^{\mathrm{m}_{avg}} \quad (4)$$



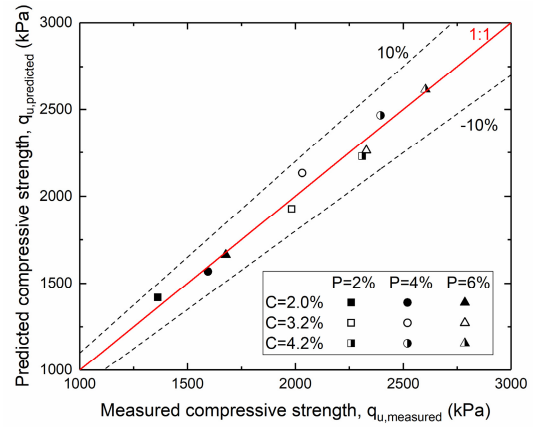
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจุดตัดแกน y กับปริมาณซีเมนต์

หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากรูปที่ 12 และรูปที่ 13 แทนในสมการที่ (4) จะได้สมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวด้วยค่าปริมาณซีเมนต์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของมวลแห้งของดินลูกรังและค่าปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ดังแสดงในสมการ (5)

$$q_u = 814.8917(C)^{0.6532}(P)^{0.1456} \quad (5)$$

เมื่อ q_u คือ ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (กิโลปาสคาล)
C คือ ปริมาณซีเมนต์ (เปอร์เซ็นต์)
P คือ ปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ (เปอร์เซ็นต์)

ขั้นตอนสุดท้ายสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวที่ได้จากสมการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงใน รูปที่ 14 เพื่อทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวที่ได้จากสมการการทำนาย ซึ่งเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากสมการการทำนายมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าจากการทดลอง



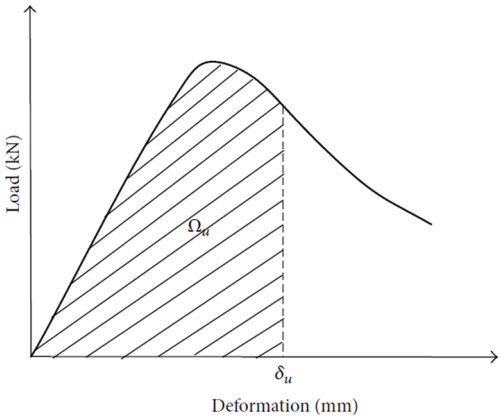
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจากสมการการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลอง

4.4. วิเคราะห์หาค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัด (COMPRESSIVE TOUGHNESS INDEX)

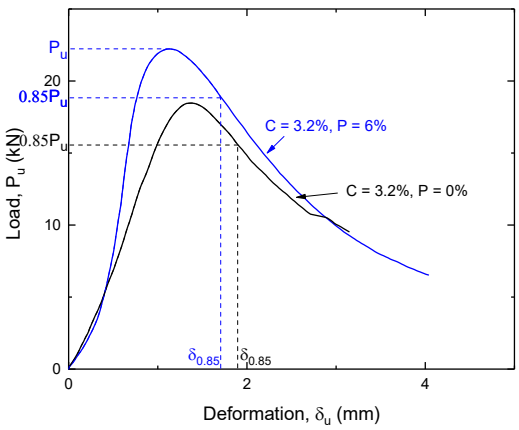
จากงานวิจัยในอดีตของ Deng และคณะ [6] แสดงวิธีการหาค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัดโดยใช้พื้นที่ใต้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการเสียรูป ดังแสดงในสมการ (6) และรูปที่ 15

$$W_{cu} = \frac{\Omega_u}{Al} \quad (6)$$

เมื่อ W_{cu} คือ ค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัด (กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตร)
Ω_u คือ พื้นที่ใต้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการเสียรูป
A คือ พื้นที่รับหน่วยแรง (ตารางเซนติเมตร)
l คือ ความสูงของตัวอย่าง (เซนติเมตร)



รูปที่ 15 การวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัด [6]



รูปที่ 16 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัดของงานวิจัยนี้

โดยในงานวิจัยนี้เลือกคำนวนพื้นที่ใต้กราฟและค่าการเสียรูปที่ 85 เปอร์เซ็นต์ของค่าหน่วยแรงสูงสุด (Peak) ตามแนวทางจากการศึกษาของ Deng และคณะ [6] ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 16 จะได้ค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัดระหว่างตัวอย่างดินซีเมนต์

ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์กับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ไม่ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัด

ปริมาณซีเมนต์ (%)	ปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ (%)	ค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัด (กิโลนิวตันต่อตารางเซนติเมตร)
2.0	0	0.0178
	2	0.0186
	4	0.0176
	6	0.0196
3.2	0	0.0247
	2	0.0268
	4	0.0273
	6	0.0258
4.0	0	0.0258
	2	0.0281
	4	0.0289
	6	0.0324

จากการศึกษาของ Deng และคณะ [6] ค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัดบ่งบอกถึงความทนทานต่อการรับแรงอัดของตัวอย่าง จากตารางที่ 4 สามารถสรุปได้ว่าการใส่สารผสมเพิ่มโพลิเมอร์มีผลทำให้ค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น และแสดงให้เห็นว่าความทนทานต่อการรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการทดสอบกำลังอัดทิศทางเดียวของตัวอย่างดินซีเมนต์และตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ ได้ผลสรุปดังนี้

1. เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในตัวอย่างดินซีเมนต์จะส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของตัวอย่างมีค่ามากขึ้น

2. สำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวจะเพิ่มขึ้น เมื่อใส่สารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ที่ปริมาณ 2-6 เปอร์เซ็นต์ต่อมวลซีเมนต์ โดยถ้าหากใส่สารผสมเพิ่มโพลิเมอร์น้อยกว่าหรือมากกว่าช่วงปริมาณนี้ จะส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวมีค่าน้อยลง

3. ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวสามารถทำนายได้จากค่าปริมาณซีเมนต์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของมวลแห้งของดินลูกรังและค่าปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของมวลซีเมนต์ ดังจะเห็นได้จากผลการทำนายในการศึกษาครั้งนี้

4. เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มโพลิเมอร์ในตัวอย่างดินซีเมนต์มีผลทำให้ค่าดัชนีความเหนียวเนื่องจากแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมทางหลวงชนบท และบริษัท รีโนลิท เทคโนโลยี จำกัด สำหรับข้อมูลและวัสดุที่ใช้ในการจัดทำบทความวิจัยฉบับนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Kumar C.C., Amarnath M.S. (2017). Studies on Properties of Polymer Treated Soil-Cement Mixes. *International Journal of Engineering and Technical Research* V6(04). DOI: 10.17577/IJERTV6IS040774

[2] Ibrahim Q.A., James O.A., Itunuoluwa A.M. (2018). Renolith Appraisal on Lateritic Soils Along Oshogbo-Iwo Road in Southwest Nigeria. *International Journal of Science and Qualitative Analysis* V4(01). DOI: 10.11648/j.ijsqa.20180401.11

[3] Owolabi T.A., Aderinola O.S. (2014). An Assessment of Renolith on Cement-Stabilized Poor Lateritic Soils. *Sci-Afric Journal of Scientific Issues, Research and Essays* V2(05).

[4] DH-S 204/2556 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base). *Bureau of Road Research and Development*, Department of Highways.

[5] DH-T 105/2515 วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน (เทียบเท่า AASHTO T208). *Bureau of Road Research and Development*, Department of Highways.

[6] Deng M., Han J., Liu H., Qin M., Liang X. (2015). Analysis of Compressive Toughness and Deformability of High Ductile Fiber Reinforced Concrete. *School of Civil Engineering*. Xi'an University of Architecture and Technology. China

[7] Faungfu M. (2018). *Effects of Gradations of Basalt Aggregate on The Engineering Properties of Asphalt Concrete*. Department of Civil Engineering. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand