พฤติกรรมแรงอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนกว๊านพะเยาผสมซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพด

Unconfined Compression Behaviour of Cement Treated Phayao Lakebed Sedimentary Soil Admixed with Corn Husk Fibre

พิสิษฐ์ ผลาสิงห์[1,*] ธนกร ชมภูรัตน์[2] ธนกฤต เทพอุโมงค์[3] และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง[4]

[1,4] ศูนย์เชี่ยวชาญวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

[2,3] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

**Corresponding author; E-mail address: 6472058921@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนาสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อเป็นทางเลือกในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้างและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งแล้วนั้น ยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังเช่น ดินตะกอนกว๊านพะเยา และเปลือกข้าวโพด ซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งและมีจำนวนมากในพื้นที่จังหวัดพะเยา การกองเก็บและการกำจัดวัสดุดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอย่างมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมแรงอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนกว๊านพะเยาผสมปูนซีเมนต์ที่เสริมเส้นใยข้าวโพด โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของดินแห้ง และความยาวเส้นใย 10 20 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 7 วัน ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวพบว่าการเพิ่มเส้นใยช่วยเปลี่ยนพฤติกรรมเปราะของตัวอย่างดินตะกอนกว๊านพะเยาผสมปูนซีเมนต์ ให้เป็นพฤติกรรมเหนียวและช่วยลดการสูญเสียกำลังหลังจากกำลังอัดสูงสุด ท้ายสุดของงานวิจัยนี้จะนำเสนออัตราส่วนและความยาวที่เหมาะสมของเส้นใยข้าวโพดสำหรับนำไปใช้ในงานวิศวกรรม

คำสำคัญ: ดินตะกอน, ปูนซีเมนต์, เส้นใยเปลือกข้าวโพด, กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

Abstract

Research on the use of waste materials to develop engineering properties is recently popular in the construction industry. This research outcome can reduce construction costs and increase the value of waste materials, as well as provide a positive benefit to the environment. Phayao Lake sedimentary soil and corn husks are the waste materials in Phayao province. Due to limited storage and disposal of materials, it leads to a significant environmental problem. This research aims to study the unconfined compressive strength of Phayao Lake sedimentary soil mixed with cement and corn fibre. The experiments are performed based on the unconfined compression test. The specimens are tested at the cement content of 7%, fibre content of 1.0% by dry weight soil at curing time of 7 days, which vary the fibre length of 10, 20 and 40 mm, respectively. From the results, it is found that the addition of fibres changes the brittleness behaviour of cement treated sedimentary soil to the ductile behaviour, and also reduces strength drop after the peak. Finally, this research can define the optimum ratio and length of corn fibre for engineering application.

Keywords: Sediment, Cement, Corn husk fibre, Unconfined compressive strength

1. บทนำ

งานวิศวกรรมการปรับปรุงดินจากวัสดุ เหลือทิ้ง ได้กลายเป็นพื้นที่การวิจัยที่สำคัญมาก ด้วยความที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลที่ดีในด้านเศรษฐกิจ และ มีประสิทธิภาพในการพัฒนาทางด้านคุณสมบัติเชิงกล [1] ด้วยเหตุผลนี้ ประกอบกับการพัฒนาในโครงสร้างพื้นฐานที่เติบโตขึ้นอย่างมาก จึงทำให้ความต้องการในการปรับปรุงดินที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ การปรับปรุงดินนั้นสามารถทำได้ในหลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและลักษณะของการนำไปใช้ หนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งที่มีความท้าทายอย่างมากในการนำมาปรับปรุงคือ ดินตะกอน เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของดินตะกอนซึ่งอาจแตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและประวัติของมัน ลักษณะโดยทั่วไปแล้วดินตะกอนจะเป็นดินที่มี ความชื้นในธรรมชาติสูง เม็ดละเอียดและมักพบสาร อินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) ปะปนอยู่ ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าที่ต่ำ จึงทำให้ไม่สามารถนำดินตะกอนมาใช้ได้โดยตรง [2] ดังเช่น ดินตะกอนทะเลสาบ จากกว๊านพะเยา

กว๊านพะเยาซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืดที่มีขนาดใหญ่ ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา ทางภาคเหนือของประเทศไทย ปัญหาการตื้นเขินอันเนื่องจากการตกตะกอนที่มาก ทำให้ทางจังหวัดพะเยา จำเป็นต้องดูดตะกอนดังกล่าวออกเพื่อเพิ่มปริมาณความจุกักเก็บน้ำ และ นำตะกอนที่ดูดทิ้งไว้ตามสถานที่กองเก็บ บริเวณรอบ ๆกว๊านพะเยา ซึ่งด้วยปริมาณดินตะกอนที่มากจึงทำให้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนกว๊านพะเยามาใช้สำหรับงานทางด้วยวิศวกรรม [2-3] หนึ่งในงานวิจัยซึ่งดำเนินการโดย ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มาเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงดินโดยอัตราส่วนระหว่าง ร้อยละ 3 5 7 และ 10 ของน้ำหนักแห้งของดินตะกอนที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ซึ่งพบว่า ด้วยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ ร้อยละ 7 ดินตะกอนมีการพัฒนากำลังรับแรงเฉือน จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว เท่ากับ 724.4 kPa ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในการเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ตามเกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงของประเทศไทย [4] นอกจากดินตะกอนของกว๊านพะเยาแล้ว เปลือกข้าวโพดในอุตสาหกรรม อาหารสัตว์ ก็เป็นหนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งที่มีอยู่จำนวนมากในจังหวัดพะเยา

ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน ในช่วงไม่กี่ปีมานี้ การเสริมแรงของดินด้วยเส้นใย เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ในหลายๆ ประเทศทั่วโลก ทั้งการปรับปรุงด้วยเส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยจากธรรมชาติ การเสริมแรงของดินด้วยเส้นใย นอกจากจะทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้ดินมีความเหนียวมากขึ้น (Ductility) อันเนื่องมาจาก ดินที่เสริมแรงด้วยเส้นใย จะมีพฤติกรรมคล้าย วัสดุประกอบ [5] การศึกษาผลของการเสริมแรงของดินด้วย วัสดุสังเคราะห์ ในงานวิจัยพบว่า การพัฒนากำลังของดิน ขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัยดังตัวอย่างเช่น ชนิดของเส้นใย ความสามารถในการรับแรงของเส้นใย เปอร์เซ็นต์ในการผสมเส้นใย และความยาวของเส้นใยที่ใช้เป็นต้น [6] เช่นเดียวกันกับ เส้นใยจากธรรมชาติ ซึ่งจากงานวิจัย การเสริมเส้นใยจาก ส่วนของลำต้น ข้าวโพดพบว่าสามารถ พัฒนากำลังรับแรงของดินที่เสริมแรงได้เป็นอย่างดี [7]

อย่างไรก็ดีด้วย งานวิจัยที่มีการใช้เส้นใยของเปลือกข้าวโพดเพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงในดินยังมีอยู่จำกัด งานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษา ผลของความยาวของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดที่ใช้ในการเสริมแรงดินตะกอนกว๊านพะเยา โดยใช้ความยาวของเส้นใย ที่ 1 ,2 และ 4 เซนติเมตร โดยจะทำการทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วัน ทดสอบโดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compression Test, UC) และนำผลที่ได้ ทำการหาค่า กำลังรับแรงสูงสุด (Peak Strength) อัตราส่วนการพัฒนากำลังรับแรงสูงสุด (Improvement Peak Strength Ratio, ISR) ดัชนีความเปราะบาง (Brittleness Index, BI) อัตราส่วนการพัฒนาความเหนียว (Improvement Toughness Ratio, ITR) และ ดัชนีความเหนียว(Toughness Index, TI) [8] และดำเนินการนำเสนอถึงความสามารถในการใช้ ดินตะกอนกว๊านพะเยา ในการเป็นวัสดุชั้นทาง



รูปที่ 1 ดินตะกอนที่ถูกดูดขึ้นมาจากกว๊านพะเยา

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุ

ดินตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ เป็นดินจากบริเวณที่กองทิ้งวัสดุรอบกว๊านพะเยา แสดงดังรูปที่ 1 จากนั้นนำมาทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 และมีค่า ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และ ค่าขีดจำกัดการหดตัวเท่ากับ 42.6 23.5 และ 19.5 ตามลำดับ ดินตะกอนกว๊านพะเยาจัดเป็นดินประเภท CL หรือ ดินเหนียวอนินทรีย์ มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ตามการจำแนกดิน แบบ (Unified Soil Classification System, USCS) ซึ่งสรุปผลแสดงดังตารางที่ 1และนำมาผสม ปูนซีเมนต์ประเภท 1 ของบริษัท SCG สูตร ไฮบริดรายละเอียดของคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2 ผสมในอัตราส่วน 7 % โดยน้ำหนักดินแห้งเพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสม และหน่วยน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนและ ส่วนผสมดินตะกอน-ซีเมนต์

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
ความถ่วงจำเพาะ, SG	2.71	-
ขีดจำกัดเหลว, LL	42.6	%
ขีดจำกัดพลาสติก, PL	23.5	%
ขีดจำกัดการหดตัว, SL	19.5	%
ค่าดัชนีพลาสติก, PI	19.1	%
ปริมาณดินเม็ดละเอียด, %f	91.8	%
การจำแนกดิน (USCS)	CL	-
หน่วยน้ำหนักแห้งของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์ที่ 7 % , γ_d	16.2	kN/m^3
ความชื้นที่เหมาะสมของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์ที่ 7% , w	23.4	%

เส้นใยข้าวโพดนำมาจาก โรงงานอุตสาหกรรม อาหารสัตว์ในจังหวัดพะเยา โดยคัดเลือกเอาเฉพาะส่วน เปลือกจากนั้นนำไปแช่น้ำและล้างให้สะอาดเพื่อง่ายต่อการแยกเส้นใย ทำการแยกเส้นใยโดยการหวี จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 115 องศาเพื่อไล่น้ำส่วนเกินและนำมาการตัด ให้ได้ 3 ขนาดคือ 1.00 2.00 และ 4.00 เซนติเมตรดังแสดงดังรูปที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ

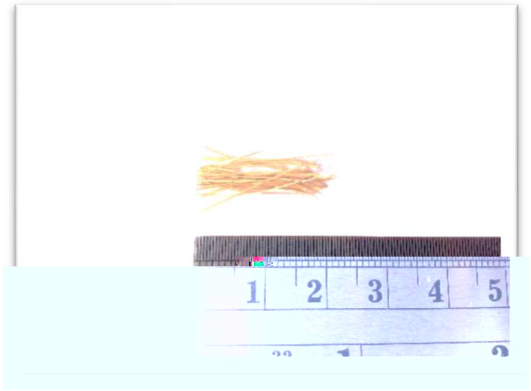
ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยแสดงดังตารางที่ 3 ตามลำดับจากนั้นเตรียมตัวอย่างให้พร้อมสำหรับการเคลือบผิวในลำดับถัดไป

ตารางที่ 2. คุณสมบัติของ ปูนซีเมนต์

ออกไซด์	ชื่อสามัญ	ปริมาณ %/ ประเภท
SiO_2	ซิลิกา	20.61
Al_2O_3	อลูมินา	5.03
Fe_2O_3	เหล็ก	3.03
SO_3	ซัลฟิวริกแอนไฮไดรต์	2.70
CaO	ไลม์	64.89
MgO	แมกนีเซีย	1.43
ความถ่วงจำเพาะ	-	3.15
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(%)	-	1.23
การจัดหมวดหมู่	-	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 ขนาดของเส้นใยเปลือกข้าวโพด (ก) เส้นใยขนาดความยาว 1.00 เซนติเมตร (ข) เส้นใยขนาดความยาว 2.00 เซนติเมตร (ค) เส้นใยขนาดความยาว 4.00 เซนติเมตร

ตารางที่ 3 คุณสมบัติพื้นฐานของ เส้นใยข้าวโพด

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	0.3	มิลลิเมตร
กำลังรับแรงดึง	335.9	เมกะปาสคาล
โมดูลัสยืดหยุ่น	16.6	จิกะปาสคาล

2.2 การรักษาพื้นผิวของเส้นใยเปลือกข้าวโพด

การรักษาพื้นผิวของเส้นใยนั้น นอกจะเพิ่มความเหนียวให้กับตัววัสดุจำพวกเส้นใยแล้ว ยังลดการดูดซึมน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการย่อยสลายตามธรรมชาติ สำหรับวิธีการจะดำเนินการโดย ใช้กระบวนการ การบำบัดด้วยด่าง (Alkali Treatment) โดยแช่ เส้นใยในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 wt.% เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดและใช้ กรดมะนาว (Acetic) ที่ความเข้มข้น 1% ในการทำให้เป็นกลาง (Neutralize) หรือค่า PH=7 และนำไปอบที่อุณหภูมิมากกว่า 80 องศาเป็นเวลา 8 ชั่วโมง [10]

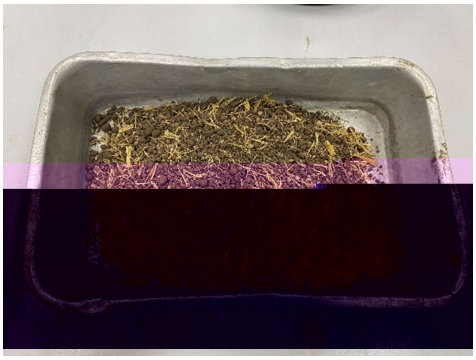
2.3 การเตรียมตัวอย่าง

นำดินตะกอนที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 4 และ ทำการเตรียมส่วนผสมโดยการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ 7% โดยน้ำหนักของดินแห้งและ อัตราส่วน เส้นใยที่ 1 % โดยน้ำหนักของดินแห้งที่ความยาว 1.00 2.00 และ 4.00 เซนติเมตร ดำเนินการผสมด้วยเครื่องผสมโดยทำการผสมดินและ ปูนซีเมนต์ให้เข้ากันก่อน จากนั้นจึงทำการเติมน้ำและผสมดิน-ซีเมนต์-น้ำ ให้เข้ากันซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2 นาทีส่วนผสมจะเข้ากันพอดี จากนั้นจึงผสมเส้นใยข้าวโพดที่เตรียมไว้โดยการเทลงในหม้อผสมอย่างระมัดระวังขณะเครื่องผสมกำลังทำงานและ เปิดเครื่องต่ออีกประมาณ 2 นาทีเพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวและเส้นใยกระจายอย่างทั่วถึงดังแสดง

ในรูปที่ 3 นำส่วนผสมไปบดอัดในโมล PVC ขนาด 2 นิ้ว x 4 นิ้ว แบ่งเป็น 3 ชั้นบดอัดครั้งละ 22 ครั้งโดยใช้ค้อนน้ำหนัก 1.619 กิโลกรัม ระยะยกเท่ากับ 35.5 เซนติเมตร [2] ทิ้งตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมงและนำตัวอย่างออกจากโมล ทำการหุ้มด้วยแผ่น พลาสติกเพื่อบ่มตัวอย่างไม่ให้สูญเสียความชื้นอย่างเป็นเวลา 7 วัน



(ก)



(ข)



(ค)

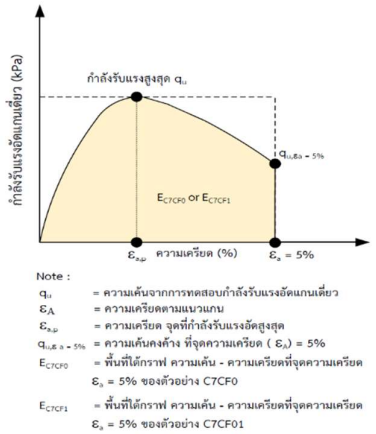
รูปที่ 3 ส่วนผสมดินซีเมนต์และเส้นใยแบ่งตามความยาวของเส้นใยเปลือกข้าวโพด (ก) 1.00 เซนติเมตร (ข) 2.00 เซนติเมตร (ค) 4.00 เซนติเมตร

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	อัตราส่วนปูนซีเมนต์ (%)	อัตราส่วน เส้นใย (%)	ความยาวเส้นใย (mm)
C7CF0	7	0	0
C7CF1L1		1	10
C7CF1L2			20
C7CF1L4			40

2.4 การทดสอบ กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

หลังจากบ่มตัวอย่างครบ 7 วัน นำแผ่นพลาสติกออกและทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง การทดสอบกำลังอัดโดยไม่มีแรงด้านข้างจะดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องกดตัวอย่าง (Compression Machine) ตามมาตรฐาน ASTM D5102 และใช้ความเร็วในการกดอยู่ที่ 1.0 มิลลิเมตร/นาที (1% Strain) ทำการทดสอบและบันทึกค่าการทรุดตัวและแรงกด เพื่อนำไปหาค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกน (σ) และการทรุดตัวที่เปลี่ยนแปลง (ε) โดยจะทำการกดทดสอบจนกระทั่งได้ค่าการทรุดตัวทีเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 5% ของความสูงตัวอย่างจึงหยุดการทดสอบ และนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียด (Stress – Strain Curve) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล โชว์ดังแสดงในรูปที่ 4 โดย $q_{u,p}$ คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างสามารถรับได้ ซึ่งจะสอดคล้องกันกับความเครียดนะจุดที่ชิ้นตัวอย่างรับแรงสูงสุด $\varepsilon_{a,peak}$ ในส่วนของ $q_{u,\varepsilon_{a}=5\%}$ คือความเครียดคงค้าง (Residual Stress) ที่การทรุดตัวที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 5 % $(\varepsilon_{5\ \%})$ และสำหรับความเหนียวของวัสดุหรือ การดูดซับพลังงาน E สามารถหาได้จากพื้นที่ ใต้กราฟของความสัมพันธ์ ของความเค้น (σ) และ ความเครียด (ε) ซึ่งสามารถอธิบาย สมบัติเชิงกลของ การเสริมแรงในดินได้

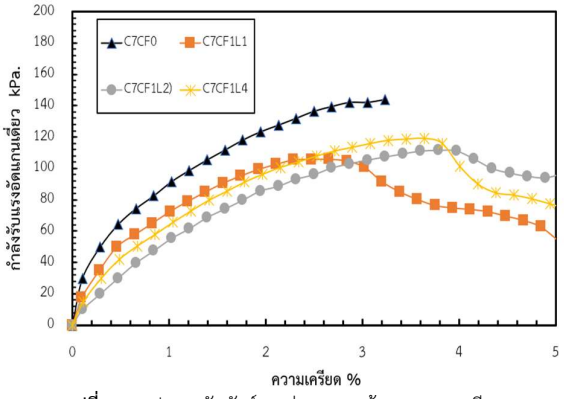


รูปที่ 4 กราฟผลการทดสอบและนิยามสัญลักษณ์ของการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว

3. ผลการทดสอบและอภิปลายผล

3.1 ลักษณะเฉพาะของ กราฟ ความเค้นและความเครียด

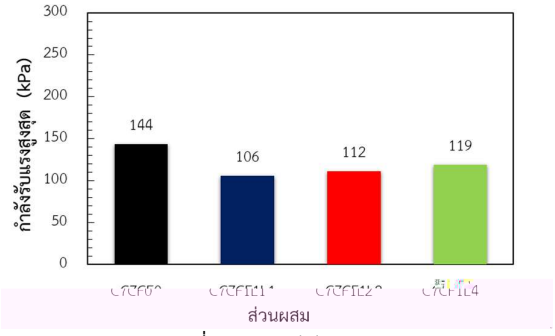
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ของการทดสอบ UC Test ของการเสริมแรงดินตะกอนกว้านพะเยาด้วยเส้นใยจากข้าวโพด ด้วยอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ และมีความยาวต่างกันคือ 1.00 2.00 และ 4.00 เซนติเมตร จากกราฟจะเห็นว่า ผลของการเสริมแรงด้วยเส้นใยข้าวโพดในดินตะกอนกว้านพะเยาทุกความยาว ทำให้ตัวอย่างดินมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม จากแบบเปาะเป็นแบบเหนียว หรือคือยังมีความเค้นคงค้างอยู่จนถึงค่าความเครียดที่ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงพฤติกรรมของความเหนียวที่ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับการเสริมแรงด้วยเส้นใย ที่จะเกิดการวิบัติทันทีหลังจากที่ค่าความเค้นถึงจุดสูงสุด ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลจากค่ากำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ของตัวเส้นใยที่ช่วยทำหน้าที่ในการยึด ก้อนตัวอย่างไว้ด้วยกัน และเมื่อพิจารณาถึง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งหาได้จาก ค่าความชันของกราฟ ความเค้น-ความเครียด กลับพบว่าให้ผลในทางลบมากกว่า ตัวอย่างดินที่ไม่ได้ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมีนัยยะ โดย ตัวอย่าง C7CF1L2 จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่น้อยที่สุด อาจอธิบายได้ว่าเกิดจากการลดลงของผิวสัมผัส บริเวณระนาบวิบัติของตัวอย่าง ของการทดสอบ UC เนื่องจากการแทนที่ของเส้นใยจึงทำให้ กลไกการเชื่อมแน่นระหว่างดินตะกอนและปูนซีเมนต์เกิดน้อยลงโมดูลัสยืดหยุ่น จึงมีค่าลดลงและ ไม่เกิดกลไกใดๆของการเสริมแรงด้วยเส้นใยในช่วงนี้



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นและความเครียด

3.2 กำลังรับแรงสูงสุด

ผลของกำลังสูงสุด ในการทดสอบ UC Test แสดงดังรูปที่ 6 จากรูปตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใย มีค่า q_u เท่ากับ 144 kPa และในกรณีที่เสริมแรงเส้นใยด้วยความยาวเท่ากับ 1.00 2.00 และ 4.00 เซนติเมตร พบว่ากำลังสูงสุด q_u มีค่าเท่ากับ 106 112 และ 119 ตามลำดับจะเห็นผลของการเสริมแรงดินตะกอนด้วยเส้นใยข้าวโพดทำให้กำลังรับแรงสูงสุดมีค่าต่ำกว่า ดินตะกอนที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลมาจากการกระจายตัวและรวมตัวกันที่ไม่สม่ำเสมอของเส้นใย กล่าวคือในกรณีที่เส้นใยมีการรวมตัวกันที่มากเกินไปในบริเวณ ระนาบวิบัติของก้อนตัวอย่าง จะทำให้ผิวสัมผัสของซีเมนต์ ลดลงและเนื่องจาก กำลังรับแรงหลักของก้อนตัวอย่างของการทดสอบ UC มาจากปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นของดินตะกอนและปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณา เฉพาะตัวอย่างที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเส้นใยดังเช่นพบว่า ตัวอย่าง C7CF1L4 มีกำลังรับแรงที่สูงที่สุดเป็นลำดับที่สอง รองลงมาคือตัวอย่าง C7CF1L2 และ C7CF1L1 มีค่ากำลังรับแรงที่ต่ำที่สุด สำหรับคำอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวคือ หลังจากการวิบัติของพันธะเคมีระหว่างดินตะกอนและปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นกำลังหลักในการรับแรงแล้ว เส้นใยจะช่วยให้ดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์มีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย และเนื่องจากการวิบัติของเส้นใยเกิดจาก 2 สาเหตุหลักๆคือ การวิบัติจากการ ดึงหลุด และการวิบัติจาก การขาดของเส้นใย ในกรณีของเส้นใยที่สั้นมักจะเกิดการวิบัติแบบดึงหลุดก่อนที่จะเกิดความเสียหายต่อเส้นใย ดังเช่นกรณี ของ C7CF1L1 ซึ่งมีความยาวเส้นใยเพียง 1 เซนติเมตร ทำให้เกิดการวิบัติแบบดึงหลุดก่อน อีกกรณีคือเส้นใยเกิดการวิบัติจากการขาดของเส้นใยซึ่งจะเกิดในกรณีที่เส้นใยมีความยาวมาก ดังเช่น C7CF1L4 ที่มีความยาวเส้นใยเท่ากับ 4 เซนติเมตร ซึ่งเนื่องด้วยระยะฝังของเส้นใยที่มากทำให้เกิดการขาดก่อนที่เส้นใยจะหลุด ทั้งนี้ในส่วนของ C7CF1L2 ที่มีความยาวของเส้นใยเท่ากับ 2 เซนติเมตร มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการวิบัติทั้ง 2 แบบ เนื่องจากประสิทธิภาพของเส้นใย ขนาดความยาว 4 เซนติเมตรยังคงมีสูง สังเกตุได้จากการที่กำลังการรับแรงสูงสุดยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่องกล่าวคือในกรณีเฉพาะการเสริมแรงดินตะกอนด้วยเส้นใยข้าวโพด ตัวอย่าง C7CF1L4 ยังคงทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพที่สุดหากเปรียบเทียบกับ C7CF1L1 และ C7CF1L2

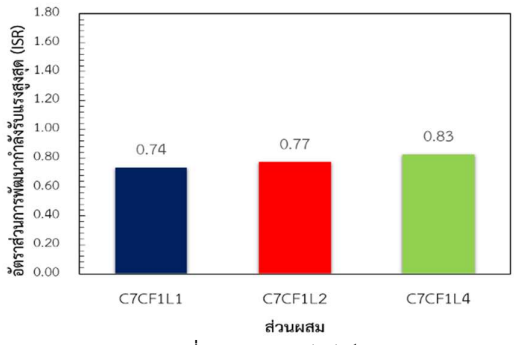


รูปที่ 6 กราฟกำลังรับแรงสูงสุด

3.3 อัตราส่วนการพัฒนากำลังรับแรงสูงสุด

การพัฒนากำลังรับแรงสูงสุด เป็นค่าอัตราส่วนที่บอกถึงความสามารถในการพัฒนาด้านกำลังของดินตะกอนที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกำลังรับแรงสูงสุดของตัวอย่าง C7CF1L1 C7CF1L2 และ

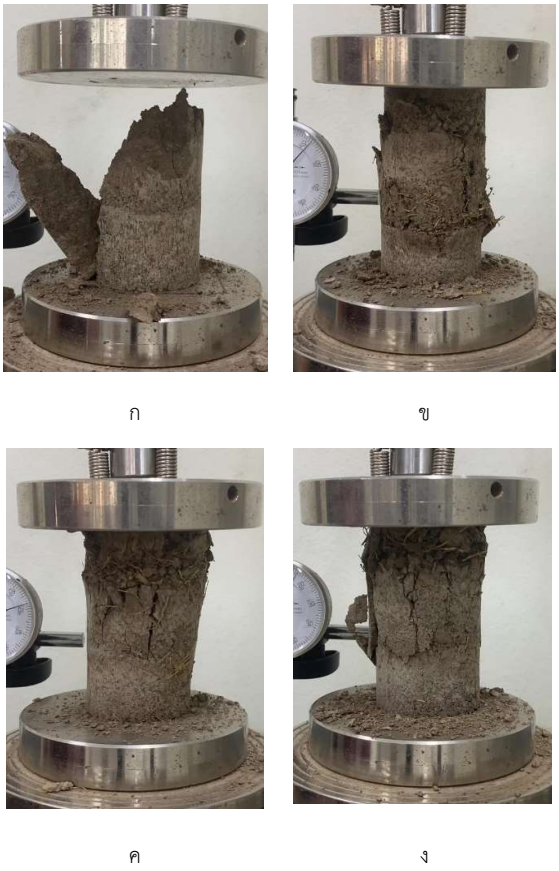
C7CF1L4 หารด้วยกำลังรับแรงสูงสุดของตัวอย่าง C7CF0 หรือตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7 ค่า ISR ของดินตะกอนกว๊านพะเยา เสริมความยาวเส้นใย 1.00 2.00 และ 4.00 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.74 0.77 และ 0.83 ตามลำดับ ซึ่งถ้าหากค่าดังกล่าวต่ำกว่า 1 คือการเสริมเส้นใยทำให้กำลังรับแรงสูงสุดของดินมีค่าต่ำกว่าดินตะกอนที่ไม่ได้ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใย และยังหมายความว่า การเสริมเส้นใย ที่ความยาวเส้นใย 1.00 2.00 และ 4.00 เซนติเมตร สามารถพัฒนากำลังรับแรงได้เพียง 74 77 และ 83 เปอร์เซ็นต์ของ ดินที่ไม่ได้เสริมแรงเท่านั้น ซึ่งสาเหตุดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนของ หัวข้อ ก่อนหน้าว่า กำลังรับแรงสูงสุดขึ้นอยู่กับทั้งความยาวของเส้นใยและ รูปแบบการวิบัติของเส้นใยที่ความยาวต่างกัน จากการพิจารณา ทั้งกำลังรับแรงสูงสุด และ ค่า ISR จึงอาจพอสรุปได้ว่าการผสมเส้นใยที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินแห้ง และใช้ความยาวที่ต่างกัน ตั้งแต่ 1-4 เซนติเมตร ไม่ได้ให้ผลที่ดีในด้านการพัฒนากำลังรับแรงของดิน ตะกอนกว๊านพะเยาที่ผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 7 เท่าใดนัก และในส่วนต่อไปเราจึงควรไปพิจารณาที่ความเหนียว ของการเสริมแรงดินตะกอนกว๊านพะเยา



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ ISR

3.4 รูปแบบการวิบัติของดิน

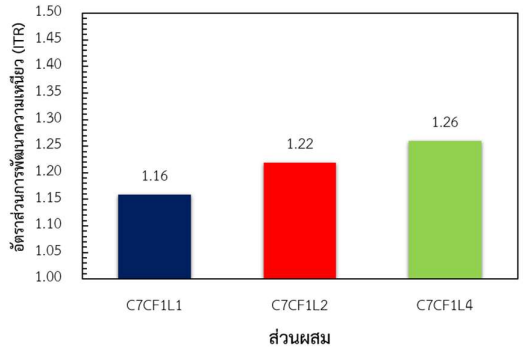
รูปที่ 8 แสดงรูปแบบการ วิบัติของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 เสริมแรงด้วยเส้นใยจากข้าวโพดหลังจากการทดสอบ UC Test จะเห็นว่าดินตัวอย่าง C7CF0 มีการวิบัติทันทีหลังจากรับแรงกระทำสูงสุด และเห็นระนาบวิบัติชัดเจนโดยยังคงสัดส่วนรูปร่างของก้อนตัวอย่างไว้ ซึ่งแตกต่างจากดินตะกอนที่ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใย ในอัตราส่วน ร้อยละ 1 ดังเช่นตัวอย่าง C7CF1L1 ที่มีการบวมตัวเล็กน้อยและแสดงระนาบวิบัติเหมือนกันกับตัวอย่าง C7CF0 แต่ยังคงยึดเหนี่ยวก้อนดินไว้ด้วยกัน และในตัวอย่าง C7CF1L2 และ C7CF1L4 ที่จะเห็นการบวมตัวของตัวอย่างดินก่อนการวิบัติอย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า ตัวอย่างดิน C7CF0 มีพฤติกรรมเป็นแบบเปาะ และดินตัวอย่าง C7CF1L1 C7CF1L2 และ C7CF1L4 มีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อ 3.1 และงานวิจัยรูปแบบการวิบัติและการเปลี่ยนรูปแบบพฤติกรรมจากแบบเปาะไปเป็นแบบเหนียวของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ [16]



รูปที่ 8 การวิบัติของดินตัวอย่าง (ก) C7CF0 (ข) C7CF1L1 (ค) C7CF1L2 และ (ง) C7CF1L4

3.5 อัตราส่วนการพัฒนาความเหนียว

รูปที่ 9 แสดงค่าอัตราส่วนการพัฒนาความเหนียวของดินตะกอนที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากการดูดซับพลังงานของดินตะกอนที่เสริมแรงส่วนด้วยค่าการดูดซับพลังงาน ของดินที่ไม่ได้ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งจากการทดลองพบว่า ความยาวของเส้นใยมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเหนียวของดินดังตัวอย่างดิน C7CF1L1 C7CF1L2 และ C7CF1L4 ซึ่งมีค่า ITR เท่ากับ 1.16 , 1.22 และ 1.26 ตามลำดับ จะเห็นว่าการพัฒนาความเหนียว มีผลแปรผันตรงกับความยาวของเส้นใย ซึ่งสาเหตุเป็นเพราะ ประสิทธิภาพในการทำงานของเส้นใยที่ต่างกัน ดังเช่นในเส้นใยขนาดความยาว 4 เซนติเมตรที่จะมีประสิทธิภาพในการพัฒนาความเหนียวมากกว่า อีก 2 แบบเพราะว่ามีระยะฝังที่เพียงพอและการวิบัติในระนาบเกิดจากการ ดึงขาดจึงทำให้ ดินมีการดูดซับพลังงานที่มากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเสริมเส้นใยในดินซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความเหนียวของดินมากกว่ากำลังรับแรงของดิน



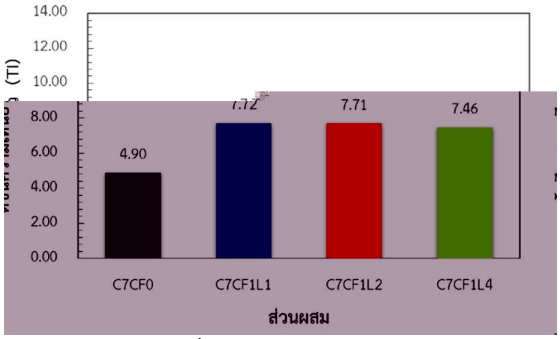
รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ ITR

3.6 ดัชนีความเหนียว

การประเมินค่าความเหนียวของดินซีเมนต์ เสริมด้วยเส้นใยอีกวิธีที่นิยมใช้กันคือ ใช้ดัชนีความเหนียวซึ่งหาได้จากสมการที่ 1

$$TI_{uc} = \frac{E}{0.05q_u} \quad (1)$$

โดยค่า E คือค่าการดูดซึมพลังงาน หรือ พื้นที่ใต้กราฟ ความเค้นและความเครียดของดินและ q_u คือกำลังรับแรงสูงสุดของดินตัวอย่างนั้น ๆ จากรูปที่ 10 แสดงค่าดัชนีความเหนียวของดินตะกอน ตัวอย่าง C7CF0 C7CF1L1 C7CF1L2 และ C7CF1L4 ซึ่งมีค่า TI เท่ากับ 4.90 7.72 7.71 และ 7.46 ตามลำดับ จะเห็นว่าแม้ C7CF1L4 จะมีการพัฒนาความเหนียวที่ดี จากการประเมินโดยใช้ค่า ITR แต่ในการประเมิน ความเหนียวโดยใช้ดัชนีความเหนียว กลับพบว่า C7CF1L4 มีค่า TI ที่ต่ำกว่า ทั้ง C7CF1L1 และ C7CF1L2 นั้นเพราะว่า ค่าดัชนีความเหนียว จะสูงได้ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ การดูดซับพลังงาน และกำลังรับแรงสูงสุด ซึ่งหากการพัฒนากำลังรับแรงมีการพัฒนาที่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับการดูดซับพลังงาน จะทำให้ ดินมีพฤติกรรมเป็นวัสดุเปาะมากกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่า C7CF1L4 มีความเป็นวัสดุเปราะมากกว่า อีก 2 ความยาว เล็กน้อย



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ TI

4. สรุปผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนกว๊านพะเยาเสริมด้วยเส้นใยเปลือกข้าวโพด เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงที่ ความยาวเส้นใยที่แตกต่างกัน 3 ขนาดโดยสามารถสรุปผลออกมาได้ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงของดินตะกอนและปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 เสริมด้วยเส้นใยเปลือกข้าวโพดพบว่า ที่ปริมาณการใส่เส้นใยข้าวโพด 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน กำลังรับแรงของดินมีค่าที่ต่ำกว่าดินตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการเสริมแรง อย่างไรก็ดีถ้าพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะดินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยพบว่า ความยาวของเส้นใยมีผลทำให้ กำลังรับแรงของดินเพิ่มขึ้น

4.2 การเพิ่มความยาวของเส้นใยเปลือกข้าวโพด ส่งผลโดยตรงให้ดินมีความเหนียวมากขึ้นอย่างมีนัยยะ อันจะเห็นได้จากผลการประเมินค่าดัชนีความเหนียว และอัตราส่วนการพัฒนาความเหนียว ซึ่ง ดินที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจะได้ค่าที่สูงกว่า ดินที่ไม่ได้ผสมเส้นใยและผลสอดคล้องกันทั้งสองตัวชี้วัดจึงอาจกล่าวได้ว่า ประโยชน์สูงสุดของการเสริมแรงในดินตะกอนกว๊านพะเยาด้วยเส้นใยจะเพิ่มความเหนียว มากกว่าเพิ่มกำลังของดิน และในงานวิจัยนี้ความยาวเส้นใยข้าวโพดที่ ให้ดัชนีความเหนียว (TI) มากที่สุดคือ ความยาว 1 เซนติเมตรซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.72 และในส่วนของการประเมินโดยการใช้อัตราส่วนการพัฒนาความเหนียวพบว่า เส้นใยความยาว 4 เซนติเมตรให้ค่า ITR สูงที่สุดคือ 1.26

4.3 จากผลการวิจัยนำดินตะกอนกว๊านพะเยาและเปลือกข้าวโพด ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากในจังหวัดพะเยา ซึ่งถือเป็นจุดประสงค์หลักในการวิจัย พบว่าแม้ผลการทดสอบด้านกำลังจะไม่สามารถนำมาใช้ในงานวิศวกรรมการทางได้ เนื่องจากกรมทางหลวงได้กำหนดไว้ว่า ดินซีเมนต์ที่ออกแบบสำหรับงานทางจะต้องมีค่าขั้นต่ำเท่ากับ 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 689 kPa สำหรับชั้นรองพื้นทาง ซึ่งตัวอย่างทดสอบมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดดังกล่าว อย่างไรก็ดีจากผลการวิจัย หากเพิ่มระยะเวลาในการบ่มและทำการทดลองในอัตราส่วนเส้นใยที่มีช่วงกว้างขึ้น ทั้งปริมาณและความยาว ดินตะกอนกว๊านพะเยาดูมีแนวโน้มในการพัฒนากำลังที่ดีและมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนากำลังจนถึงข้อกำหนดดังกล่าวได้

เอกสารอ้างอิง

[1] El-Badawy, SM. Gabr, AR. El-Hakim, RTA .(2019). Recycled Materials and By-Products for Pavement Construction. *Handbook of Ecomaterials*, pp.1-22.

[2] Chompoorat, T. Maikhun, T. Likitlersuang, S.(2019). Cement improved lakebed sedimentary soil for road construction. *Proc Inst Civil Eng – Ground Improve* .

[3] Maikhun, T. Buakla, A. Chompoorat, T. Likitlersuang, S.(2016). Investigation of strength characteristics of Phayao lake sedimentary soil improved by cement and fly ash. *The 21st National Convention on Civil Engineering*, Songkhla, Thailand (in Thai), 2016.

[4] (Department of Highways), DOH.(1989). Standard of soil cement subbase.

[5] Rabab'ah, S. Hattamleh, OA. Aldeeky, H. Alfoul, BA. (2021). Effect of glass fiber on the properties of expansive soil and utilization as subgrade. *Case Studies in Construction Materials*,14.

[6] Jamsawang, P. Suansomjeen, T. Sukontasukkul, P. Jongpradist, P. Bergado, DT. (2018).Comparative flexural performance of compacted cement-fiber-sand. *Geotextiles and Geomambranes*.

[7] Tran, KQ. Satomi, T. Takahashi, H. (2018). Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fiber. *Construction and Building Materials*, 178, pp.204-210.

[8] Chindaprasirt, P. Jamsawang, P.Sukontasukkul, P. Jongpradist, P. Likitlersuang, S. (2021) Comparative mechanical Performances of Cement-treated sand reinforced with fiber for road and pavement applications. *Transportation Geotechnics*, 30.

[9] Singh, PP. Nath, G. (2022). Effect of Interfacial Roughness on Mechanical and Thermo-Acoustic Behavior of Corn Husk Fiber. *Journal of Natural fiber*, pp1-16.

[10] Luo, H. Zhang, C. Xiong, G. Wan, Y. (2015). Effects of Alkali and Alkali/Silane Treatment of Corn fibers on Mechanical and Thermal Prooerties of Its Composites With Polylactic Acid. *Polymer Composites*, 37.

[11].Chompoorat, T. Likitlersuang, S. Thepumong, T .Tanapalungkorn, W. Jamsawang, P. Jongpradist, P. (2021). Solidification of sediments deposited in reservoirs with cement and fly ash for road construction. Int. *J. of Geosynth. and Ground Eng*, 85.

[12] Chompoorat, T. Thepumong, T. Taesinlapachai, S. Likitlersuang, S.(2021). Repurposing of stabilised dredged lakebed sediment in road base construction. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 2719–2730.

[13] Horpibulsuk, S. Rachan, R. Suddeepong, A.(2010). Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay. *Construction and Building Materials*, 25, 1521–1531.

[14] Chompoorat, T. Thanawong, K. Likitlersuang, S. (2021). Swell-shrink behaviour of cement with fly-ash stabilised lake bed sediment. *Bull. Eng. Geol. Environ*, 80, 2617–2628.

[15] Iamchaturapatr, J. Piriyakul, K. Petcherdchoo, A. (2022). Characteristics of sandy soil treated using EICP-based urease enzymatic acceleration method and natural hemp fibers. *Case Stud. Constr.* Mater, 16, e00871.

[16] Hatibu, N. D.R.P. Hettiaratchi.The transition from ductile flow to brittle failure in unsaturated soils.J *Agric. Eng.Res* 1993.319-328.