



การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เส้นใย PET และเส้นใยขนไก่

นายจรัสพงษ์ ภูทอง

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เส้นใย PET และเส้นใยขนไก่



นายจรัสพงษ์ ภูทอง

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เส้นใย PET และเส้นใยขนไก่

โดย นายจรัสพงษ์ ภูทอง

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรารัตน์พร นวลสุวรรณค์)

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กীরติกานต์ พิริยะกุล)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน)

ชื่อ : นายจรัสพงษ์ ภูทอง
ชื่อการค้นคว้าอิสระ : การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟุ้ง
เส้นใย PET และเส้นใยขนไก่
สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติกันต์ พิริยะกุล
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

สารนิพนธ์นี้ศึกษาวิธีการเพิ่มกำลังการรับแรงอัดของดินเหนียวกรุงเทพมหานครด้วยการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 (Ordinary Portland Cement type 1) ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) และเส้นใยธรรมชาติจากขนไก่ (Chicken Feather) โดยจะทำการทดสอบแบบทำลายจากวิธีการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) และการทดสอบแบบไม่ทำลายแบบเบ็นเดอร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ้ง เส้นใยพลาสติก (PET) และเส้นใยขนไก่ และหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง ซึ่งใช้ปริมาณเส้นใยร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยปริมาตร ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30

ตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa ผู้วิจัยพบว่าเส้นใยพลาสติก (PET) แต่ไม่เหมาะสมที่ใช้สำหรับงานรองพื้นทาง ผู้วิจัยแนะนำให้พัฒนาเส้นใยพลาสติก (PET) ที่มีความสามารถรับแรงเสียดทานได้มากขึ้น และปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 7% โดยกำลังอัดมีค่าเท่ากับคือ 823.76 และปริมาณซิลิกาฟุ้งไม่เกิน 9% ยิ่งไปกว่านั้นผู้วิจัยพบว่าเมื่อเติมเส้นใยขนไก่ที่ปริมาณ 2.5% และใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 5% ทรายซีเมนต์บดอัดมีค่ากำลังอัด 707.64 kPa

(มีจำนวนทั้งสิ้น 47 หน้า)

คำสำคัญ : ทรายซีเมนต์บดอัด เส้นใยขนไก่ เส้นใยพลาสติก(PET) และซิลิกาฟุ้ง

อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก

Name : Mr. Jaratpong Pootong
Independent Study Title : Enhancement of the compressive strength for sand mixed with cement, silica fume, PET and chicken feather fibers
Major Field : Construction Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Independent Study Advisor : Associate Professor Dr. Keeratikarn Piriyakul
Academic Year : 2024

ABSTRACT

This paper studies methods for increasing the compressive strength of Bangkok clay by mixing Ordinary Portland Cement type 1, silica fume and natural fibers from chicken feathers. Perform a destructive test using the uniaxial compression test method (Unconfined Compression Test). and non-destructive Bender Element Test to find the appropriate ratio between cement. Silica fume, PET and feather fibers and find the relationship between the compressive strength and the curing time of the samples. which uses fiber quantities of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 percent by volume and cement amounts of 2, 4, 6, 8 and 10 percent by dry weight. Silica fume contents were 5, 10, 15, 20, 25 and 30 percent by dry weight.

According to the Department of Highways' standard for soil cement subbase, which is set at 689 kPa, the researcher found that plastic fibers (PET) are not suitable for use in base course applications. The researcher recommends developing plastic fibers (PET) with greater friction resistance. The optimal cement content was found to be 7%, yielding a compressive strength of 823.76 kPa, while the silica fume content should not exceed 9%. Furthermore, the researcher found that when adding 2.5% chicken feather fibers and using 5% cement content, the compacted sand-cement mixture achieved a compressive strength of 707.64 kPa

(Total 47 Pages)

Keywords: Compacted cement sand Chicken feather fibers Plastic fibers (PET) and Silica fume

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติگانต์ พิริยะกุล ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำติดตามดูแลตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว จนสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของสารนิพนธ์ฉบับนี้ได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน คณะกรรมการสอบสารนิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อชี้แนะที่เป็นประโยชน์ ทำให้สารนิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ในมหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกและดูแลในการทำ การวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่ส่งเสริมค่าเล่าเรียนและที่คอย ผลักดันให้กำลังใจส่งเสริมการศึกษาในระดับปริญญาโทเสมอมา และขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษา และเพื่อนร่วมชั้นเรียนวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่คอย เป็นแรงกระตุ้นผลักดันให้ผู้วิจัยต้องตั้งใจศึกษาจนประสบความสำเร็จ

จรัสพงษ์ ภู่อทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง (ถ้ามี).....	ช
สารบัญรูปภาพ (ถ้ามี).....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 การปรับปรุงคุณภาพดิน	3
2.3 การเสริมแรงด้วยเส้นใย.....	6
2.4 การทดสอบเบนด์เออร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test)	10
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	15
3.1 วัสดุที่ใช้การเตรียมตัวอย่างทรายซีเมนต์.....	15
3.2 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	21
3.3 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	16
4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET fiber) ที่เหมาะสม ที่ปริมาณซีเมนต์ 3%	16
4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET fiber) ที่เหมาะสม ที่ปริมาณซีเมนต์ 5%	30
4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET fiber) ที่เหมาะสม ที่ปริมาณซีเมนต์ 7%	32
4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสม.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาซีเมนต์ที่เหมาะสม	36
4.6 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสม	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล	30
5.1 ข้อสรุปปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่เหมาะสมกับการบดอัด(กลุ่มตัวอย่าง A B และC).....	30
5.2 ข้อสรุปปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับการบดอัด (กลุ่มตัวอย่าง A, B, C และ D). 40	
5.3 ข้อสรุปปริมาณซิลิกาฟูมที่เหมาะสมกับการบดอัด (กลุ่มตัวอย่าง D).....	40
5.4 ข้อสรุปปริมาณเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสมกับการบดอัด(กลุ่มตัวอย่าง E)	40
บรรณานุกรม.....	41
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือนของดินผสมซีเมนต์	43
ประวัติผู้เขียน.....	47

สารบัญตาราง (ถ้ามี)

หน้า

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายงานก่อสร้างในกรุงเทพ (Physical properties of the Bangkok construction sand) [17]	16
ตารางที่ 3-2 สารประกอบและคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 – 5 [18]	17
ตารางที่ 3-3 สารประกอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วถ่านหิน และซิลิกาฟูม [19]	18
ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติสำคัญของชนไก่ [20]	20
ตารางที่ 3-5 แสดงอัตราส่วนผสมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด	24



สารบัญรูปภาพ (ถ้ามี)

หน้า

ภาพที่ 2-1	รูปแบบของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของเส้นใยธรรมชาติ [11]	8
ภาพที่ 2-2	ระบบการทำงานของชุดทดสอบเบ็นเดอร์อีลีเมนต์ [15]	11
ภาพที่ 3-1	กราฟแสดงการกระจายของเม็ดดิน(Grain Size Distribution Curve) [17]	15
ภาพที่ 3-2	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	17
ภาพที่ 3-3	ซิลิกาฟุ่ม Elkem.....	19
ภาพที่ 3-4	เส้นใยขนไก่.....	20
ภาพที่ 3-5	ขนาดเส้นใยพลาสติก (PET).....	21
ภาพที่ 3-6	แสดงตัวอย่างแบบหล่อทรงกระบอก.....	22
ภาพที่ 3-7	แสดงตัวอย่างแบบหล่อทรงกระบอก.....	22
ภาพที่ 3-8	การบดอัดตัวอย่างทรายซีเมนต์ลงในแบบ	23
ภาพที่ 3-9	การเก็บตัวอย่าง	23
ภาพที่ 3-10	ตัวอย่างการทดสอบทรายซีเมนต์บดอัด ที่ 28 วัน แบบไม่ถูกจำกัด	26
ภาพที่ 3-11	ตัวอย่างผลการทดสอบแบบไม่ถูกจำกัด.....	26
ภาพที่ 3-12	ตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดทดสอบโดยวิธีเบ็นเดอร์อีลีเมนต์	28
ภาพที่ 3-13	ตัวอย่างผลการทดสอบโดยวิธีเบ็นเดอร์อีลีเมนต์.....	28
ภาพที่ 4-1	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม A.....	16
ภาพที่ 4-2	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม A.....	30
ภาพที่ 4-3	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม B.....	31
ภาพที่ 4-4	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม B.....	32
ภาพที่ 4-5	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม C.....	33
ภาพที่ 4-6	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม C.....	34
ภาพที่ 4-7	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม D.....	35
ภาพที่ 4-8	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) จากกลุ่มตัวอย่าง A, B, C และ D	36
ภาพที่ 4-9	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม E	37
ภาพที่ 4-10	ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม C.....	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทรายซีเมนต์บดอัด เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างมากในงานด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในงานโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน เขื่อน และฐานราก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการรับแรงอัดที่ดีเยี่ยม เมื่อเทียบกับทรายธรรมดา การผสมปูนซีเมนต์เข้ากับทรายช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความมั่นคงของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งยังสามารถเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของชั้นทางและโครงสร้างต่าง ๆ ในอดีตวัสดุธรรมชาติที่มีคุณภาพดี เช่น ดินลูกรังหรือหินคลุก มักถูกใช้เป็นวัสดุหลักในชั้นโครงสร้างของถนนหรือฐานราก แต่ด้วยปัญหาการขาดแคลนแหล่งวัสดุในบางพื้นที่ ประกอบกับต้นทุนการขนส่งที่สูง การหาทางเลือกใหม่ในการปรับปรุงวัสดุพื้นถิ่นให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพจึงเป็นแนวทางที่ได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ทรายแม่น้ำซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่หาได้ง่าย มีต้นทุนต่ำ และมีปริมาณมากในหลายพื้นที่ ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้แทนวัสดุหลักเดิม โดยการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์ แม้ว่าทรายซีเมนต์จะมีความแข็งแรงที่ดี แต่ลักษณะการเสียรูปของวัสดุนี้กลับมีพฤติกรรมคล้ายวัสดุเปราะ (Brittle Material) โดยเฉพาะเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยร้าวหรือความเสียหายเมื่อวัสดุรับแรงเกินขีดจำกัด จึงมีความจำเป็นในการศึกษาการปรับปรุงวัสดุเพิ่มเติม เช่น การผสมเส้นใย หรือวัสดุเสริมอื่น เช่น ซิลิกาฟุ่ม เพื่อเพิ่มความเหนียว ลดความเปราะ และเพิ่มความมั่นคงในการใช้งานระยะยาว

ผ่านมามีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยหลากหลายชนิด ทั้งเส้นใยจากการสังเคราะห์และเส้นใยจากธรรมชาติ โดยผ่านการทดสอบหลากหลายรูปแบบ เช่น การรับกำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength Test) การทดสอบการรับกำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength Test) การทดสอบกำลังดัด (Flexural Strength Test) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear Test) และการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) เป็นต้น ซึ่งพบว่า การเสริมเส้นใยจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ เช่น กำลังรับแรงดึงและอัด มุมเสียดทาน ความสามารถในการดูดซับพลังงาน พฤติกรรมการรับกำลังดัด กำลังรับแรงคงเหลือ (Residual Strength) และมีประสิทธิภาพในการยับยั้งรอยแตกที่เกิดขึ้น

ปัจจุบันปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากวัสดุสังเคราะห์ หรือขยะพลาสติก กำลังเป็นปัญหาที่ทั่วโลกให้ความสนใจ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ ซิลิกาฟุ่ม เส้นใยพลาสติก (PET)

จากขวดน้ำพลาสติก และเส้นใยชนไก่จากอุตสาหกรรมปศุสัตว์ มาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของทรายซีเมนต์บดอัด เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมด้วยการทดสอบการทดสอบแบบไม่ทำลายแบบเป็นเดอร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test) และแบบทำลายโดยวิธีการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่เหมาะสมกับทรายซีเมนต์บดอัด
- 1.2.2 เพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับทรายซีเมนต์บดอัด
- 1.2.3 เพื่อหาปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมกับทรายซีเมนต์บดอัด
- 1.2.4 เพื่อปริมาณเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสมกับทรายซีเมนต์บดอัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 งานวิจัยนี้ใช้ทรายก่อสร้าง
- 1.3.2 งานวิจัยนี้ใช้เส้นใย PET จากขวดน้ำดื่มพลาสติก ยี่ห้อสิงห์ และเส้นใยชนไก่จากอุตสาหกรรมปศุสัตว์ ผสมที่ร้อยละ 0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0 และ 2.5 โดยปริมาตร
- 1.3.3 งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 TPI ผสมที่ร้อยละ 3, 5 7 และ 8 โดยน้ำหนักแห้ง
- 1.3.4 งานวิจัยนี้ใช้ซิลิกาฟุ่ม Elkem ผสมที่ร้อยละ 5 , 10 , 15 , 20 , 25 และ 30 โดยน้ำหนักแห้ง
- 1.3.5 งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM D1633-17
- 1.3.6 งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายแบบเป็นเดอร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test) ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM D8295-19

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม เส้นใย PET และเส้นใยชนไก่ด้วยการทดสอบแบบทำลายโดยวิธีการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) และการทดสอบแบบไม่ทำลายแบบเป็นเดอร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดินเป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐานที่มนุษย์นำมาใช้มานานนับพันปี โดยในยุคเริ่มแรก ดินและโคลนถูกนำมาใช้ร่วมกับไม้เพื่อสร้างที่อยู่อาศัยแบบชั่วคราวในสมัยที่มนุษย์ยังคงอพยพโยกย้ายถิ่นฐาน [1] ด้วยความพร้อมของทรัพยากรดินที่มีอยู่ทั่วโลก จึงไม่น่าแปลกใจที่ประชากรกว่าครึ่งโลกยังคงอาศัยอยู่ในที่พักอาศัยที่สร้างขึ้นจากดิน [2,3] ในยุคปัจจุบัน การนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ทดแทนวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ที่มีราคาสูง กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากเป็นแนวทางในการลดต้นทุน และใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุด ตัวอย่างเช่น ในประเทศออสเตรเลียราว 20% ของที่อยู่อาศัยที่สร้างขึ้นใหม่เลือกใช้วัสดุธรรมชาติอย่างดินในท้องถิ่นมาผลิตเป็นบล็อกเพื่อใช้สร้างผนังบ้าน [4] ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดค่าใช้จ่าย แต่ยังมีจุดเด่นในด้านความคงทน แข็งแรง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังจะเห็นได้จากอาคารเก่าแก่หลายแห่งทั่วโลกที่ยังคงมีสภาพดีแม้จะใช้วัสดุดินในการก่อสร้าง จากแนวโน้มดังกล่าว ได้เกิดการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด การปรับปรุงคุณภาพดินหมายถึงกระบวนการที่ช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดิน เช่น การเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ความทนทานต่อการสึกกร่อน การรองรับน้ำหนักจากการใช้งานจริง ตลอดจนความต้านทานต่อสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง

วิธีการปรับปรุงดินมีหลากหลาย เช่น การบดอัด การทำให้แน่นด้วยวิธีเฉพาะทาง หรือการเติมสารปรับปรุงที่อยู่ในรูปของของเหลวหรือผงลงไปในดิน โดยการเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของดิน คุณสมบัติของแร่ดินเหนียวที่มีอยู่ สารที่นำมาใช้ปรับปรุง ต้นทุน รวมถึงความสะดวกในการปฏิบัติงานในสภาพแวดล้อมจริง

2.2 การปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดินทางวิศวกรรม (Soil Improvement หรือ Ground Improvement) คือกระบวนการหรือเทคนิคทางวิศวกรรมที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของดิน เพื่อให้เหมาะสมกับการก่อสร้างหรือใช้งานทางวิศวกรรมโยธา เช่น การสร้างอาคาร ถนน เขื่อน สนามบิน และโครงสร้างพื้นฐานอื่น ๆ โดยทั่วไป ดินธรรมชาติบางชนิด เช่น ดินอ่อน ดินทราย หรือดินพรุ อาจมีความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำ หรือมีปัญหาการทรุดตัว การยุบตัว หรือการพังทลาย ซึ่งจำเป็นต้องปรับปรุงก่อนการก่อสร้าง

ตระกูล จีระ (2554) [5] ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของดินผสมซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอายุการบ่ม จากความเร็วคลื่นเฉือนโดยการใช้ชุดทดสอบเบนเดอร์อีลีเมนต์และจากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด ดินที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นดินเหนียวกรุงเทพมหานครที่ระดับความลึก 10.00-16.00 เมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, G_s) เป็น 0.58 ความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content, W_n) เป็น 84.3 % และความหนาแน่น 1470 กก./เมตร³ มีขีดเหลว (Liquid Limit, LL) เป็น 88 % นำดินเหนียวกรุงเทพมหานครมาผสมน้ำให้มีความชื้นเท่ากับขีดจำกัดเหลวผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคิดเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนัก ดินเปียกจำนวน 12 ตัวอย่างนำไปบ่มจนครบอายุการบ่มตามต้องการคือ 3,7,14,28 และ 90 วัน เมื่อตัวอย่างดินผสมซีเมนต์ที่ครบอายุการบ่มจะถูกนำมาทดสอบเบนเดอร์อีลีเมนต์และการทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด จากการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของดินผสมซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม อายุการบ่ม ผู้วิจัยพบว่า ความเร็วคลื่นเฉือนที่เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดังสมการ $V_s = 42.097 \ln(t) + 207.03$ และโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดังสมการ $G_0 = 39.577 \ln(t) + 49.661$ โดยค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ S_u เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

ดังสมการ $S_u = 129.06 \ln(t) + 8.5654$ ดังนั้นค่า $S_u / S_{u \max}$ และ $V_s / V_{s \max}$ เพิ่มขึ้นอย่างสอดคล้องกัน โดยแสดงความสอดคล้องกันของวิธีโคนามิกซ์และวิธีสแตติกส์ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่า $S_u / S_{u \max}$ และ $V_s / V_{s \max}$ ของดินกรุงเทพมหานครผสมซีเมนต์ 20% พบว่ากำลังของตัวอย่างดินเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลจากอายุ การบ่มที่เพิ่มขึ้น

ธนศ เกษกลิ่น (2556) [6] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้กระบวนการไบโอซีเมนต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการพัฒนากำลังดิน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวอย่างดินทราย เนื่องจากมีสมบัติการซึมผ่านน้ำได้สูงจากนั้นทำการเติมสารละลายยูเรีย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ เอนไซม์ยูรีเอส กำหนดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสควบคุมที่ร้อยละ 10,20 และ 30 (v/v) ตามลำดับ ทำการตรวจวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียฟิเคชัน ด้วยวิธีการเนสเลอร์ (Nessler method) วัดความเปลี่ยนแปลงค่าความเป็น กรด-ด่าง(pH) และตรวจสอบกำลังของดินทรายที่เพิ่มขึ้นด้วยความเร็วคลื่นเฉือน โดยวิธีการทดสอบเบนเดอร์อีลีเมนต์ (Bender Element Test) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Test) ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้และไม่ใช้เอนไซม์ยูรีเอส

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยกระบวนการไบโอซีเมนต์ โดยใช้จุลินทรีย์ในธรรมชาตินั้น พบว่าการเกิดของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต ทำได้ค่อนข้างช้า แต่เมื่อมีการนำเอนไซม์ยูรีเอสมาใช้ พบว่าอัตราการเกิดของแอมโมเนียในตัวอย่างดินและค่าพีเอชของสารละลายที่ บำบัดด้วยกระบวนการไบโอซีเมนต์เกิดค่อนข้างสูงในระยะเวลาอันสั้น พร้อมทั้งค่าพีเอชที่แปรผันตามความเร็วคลื่นเฉือนที่นำมาใช้ ในการวัดอัตราการพัฒนากำลังของดินสามารถบอกได้ถึงโมดูลัสเฉือน

ของตัวอย่างที่ไม่มีการเติมเอนไซม์ยูรีเอสน้อยกว่ามาก และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเอนไซม์ที่ใส่ลงในตัวอย่างดินที่ร้อยละ 10 20 และ 30 พบว่าตัวอย่างปริมาณเอนไซม์ที่ร้อยละ 20 มีอัตราการเกิดแอมโมเนียม ที่มากที่สุด และใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายยูเรีย ที่รวดเร็วกว่าปริมาณอื่นๆ และค่าพีเอชเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ตามที่คาดการณ์ไว้อัตราการพัฒนากำลังของดินในขบวนการไบโอซีเมนต์สามารถคาดการณ์ด้วยสมการคณิตศาสตร์ โดยใช้ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าความสัมพันธ์มีค่า R^2 ระหว่าง 0.81 ถึง 0.6 สำหรับการทดลองการใส่เอนไซม์ยูรีเอส ร้อยละ 10 ถึง 30

ทงศักดิ์ ออกผล (2561) [7] ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความตึงน้ำภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินด้านกำลังด้วย การใช้ซีเมนต์เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติด้านความตึงน้ำที่เหมาะสม ก่อนที่จะนำดินไปใช้ก่อสร้างคันดิน การศึกษานี้ได้ใช้ตัวอย่างดินมาผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนปริมาณ 0, 2, 5, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นนำมาผสมกับน้ำในปริมาณ ค่าความชื้นเหมาะสมซึ่งได้จาก การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของแต่ละอัตราส่วนผสม การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึม ผ่านของน้ำด้วยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน จากการทดสอบ พบว่าตัวอย่างดินเหนียวที่ทำการศึกษาก่อเป็นดินประเภท Clay of High Plasticity (CH) และ Clay of Low Plasticity (CL) โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.68 และ 2.77 และมีปริมาณสารอินทรีย์เฉลี่ย 8.81 และ 8.27% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ตัวอย่างดินเหนียว ปากแม่น้ำที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมซีเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-9} m/s ตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมซีเมนต์ใน สัดส่วนปริมาณ 2, 5, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ผลการทดสอบ ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำ CH และ CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1.6×10^{-10} และ 2×10^{-11} m/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของน้ำของทั้งตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำ CH และ CL ไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนตามเวลาแต่ทั้งตัวอย่างดินเหนียวปากแม่น้ำ CH และ CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 9×10^{-12} ถึง 1×10^{-10} m/s การศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์มีไม่ผลต่อ การเพิ่มคุณสมบัติความตึงน้ำของดิน ดินเหนียวปากแม่น้ำที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการ ผสมซีเมนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมเป็นไปตามคำแนะนำของการนำดินไปใช้ในการก่อสร้างส่วนที่รับน้ำหนักของทำนบกั้น

พิธาน ไพโรจน์ (2562) [8] ได้ทำการศึกษการเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมผงซิลิกาจากการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง โดยวัดความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากเบนด์อริลิเมนต์ซึ่งติดตั้งไว้ที่ฝาดรอบด้านบนและแท่นของเครื่องทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง เพื่อให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเฉือนได้ ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำหาได้จากการทดสอบ

ที่อัตราความเครียด 1 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที่ ระหว่างที่มีการบันทึกค่าโมดูลัสเฉือน ผลการวิจัยพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อบดอัดดินผสมผงซิลิกาในอัตราที่เพิ่มขึ้นแต่ความความเครียดลดลง ณ จุดวิกฤติ ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพดินคันทางโดยใช้ซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มระหว่างการบดอัดดินในการก่อสร้างสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคันทางได้

วฤธ รัตนรุ่งโรจน์ และคณะ (2563) [9] ได้ศึกษาศักยภาพของการใช้ตะกรันเหล็กบดละเอียดจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเถ้าชีวมวลจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมาปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพโดยผสมกับปูนซีเมนต์ตามหลักการของวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อมจากการศึกษาพบว่าสัดส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ : ผงตะกรันเหล็ก: เถ้าชีวมวล เท่ากับ 0.750 : 0.125 : 0.125 เป็นสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดเมื่อนำสารเชื่อมประสานมาผสมกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ที่อัตราส่วน 150, 200 และ 250 kg/m³ พบว่าดินมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และเปอร์เซ็นต์ CBR (California Bearing Ratio) ผลจากการทดสอบคุณสมบัติดินทางด้าน Physico – chemical Properties โดย X-ray Diffractometer (XRD) ผลการทดลองยืนยันศักยภาพของการใช้กากอุตสาหกรรมดังกล่าวเป็นสารเชื่อมประสานในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์ในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

2.3 การเสริมแรงด้วยเส้นใย

การเสริมแรง (Reinforcement) ด้วยวัสดุชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติที่ต้องการลงไปในวัสดุอื่นใดที่ขาดแคลนคุณสมบัติ นั้น ดังนั้นการเสริมแรงในทางปฐพีกลศาสตร์จะนิยามได้ว่าเป็นเทคนิคเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินในการปรับปรุงตัวแปร (Parameter) ต่างๆ เช่น กำลังรับแรงเฉือนลดการยุบตัวอันเกิดจากการรับกำลังอัด ความหนาแน่น และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ โดยที่สามารถนำมาประยุกต์เข้ากับงานทางวิศวกรรมได้หลายอย่าง เช่น Stone columns, Root piles หรือ Micro piles, Soil nailing และ Reinforced earth ซึ่งการเสริมแรงในดิน (Reinforced earth) นั้นจัดได้ว่าเป็นวัสดุประกอบและสามารถเพิ่มเสถียรภาพ ในการเพิ่มการรับกำลังและการลดการทรุดตัวหรือการเคลื่อนตัวด้านข้าง

เส้นใยสามารถแบ่งตามชนิดได้เป็น 2 ประเภท 1.) เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เป็นเส้นใยที่ทำจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ปอ เยื่อไผ่ เส้นใยมะพร้าว เป็นต้น ในช่วงแรกของการใช้การเสริมแรง นิยมใช้กันมากแต่ด้วยเนื่องจากคุณสมบัติด้านความคงทนและสึกหรอที่ด้อยประสิทธิภาพเมื่อผ่านไประยะเวลานาน จึงมีการคิดค้นเส้นใยสังเคราะห์ขึ้น 2.) เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fiber) เป็นวัสดุที่คงทนต่อความชื้น มีความสามารถในการรับกำลังดึงได้มากกว่าจึงนิยมใช้กันอย่างมากในยุคปัจจุบัน

โดยเส้นใยสังเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็นชนิดตามวัสดุที่ใช้ผลิต เช่น โพลีโพรพิลีน โพลีเอสเตอร์ โพลีเอสเตอร์ลิน เส้นใยแก้ว ไนลอน และเหล็ก เป็นต้น

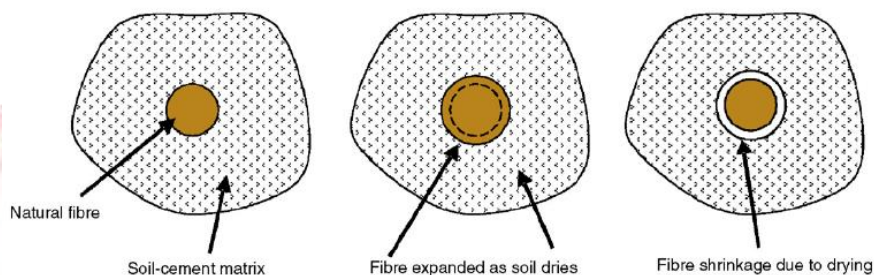
2.2.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber) แรกเริ่มในการเสริมแรงด้วยเส้นใยในงานก่อสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้มีความสามารถใช้งานได้หลากหลาย การใช้เส้นใยมาเสริมแรงนั้นสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลายเช่น เหล็ก ตันไผ่ ปอ เป็นต้น โดยทั่วไปจะพบมากในการใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตซึ่งในสมัยก่อนจะใช้วัสดุเสริมแรงที่ทำมาจากธรรมชาติ โดยจะใช้วัสดุเสริมแรงที่มีขนาดเล็กเช่น ปอ หรือ ป่าน โดยการทดสอบพบว่าค่ากำลัง ความเหนียว และความยืดหยุ่นของวัสดุมีการพัฒนาขึ้นจากการใช้ปริมาณเส้นใยธรรมชาติมากกว่า 3% โดยน้ำหนักดินแห้ง (Ghavami และคณะ, 1999) [10] ซึ่งการเสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นที่ยอมรับในงานดินซีเมนต์ ในด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเกิดจากที่เส้นใยมีส่วนช่วยในการลดรอยแตกที่เกิดขึ้นในเมตริกของดินซีเมนต์ ในเทอมของความยืดหยุ่นของวัสดุจะมีความสำคัญอย่างยิ่งในด้านการรับกำลังในกรณีเฉพาะเช่น การเกิดแผ่นดินไหวที่เกิดการสั่นสะเทือนมากทำให้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นด้วยการเสริมแรงด้วยเส้นใยมีความปลอดภัยต่อชีวิตมากกว่าในการมีระยะเวลาในการหนีออกมาจากสิ่งปลูกสร้างเพื่อไม่ให้เกิดการติดอยู่ภายในตัวอาคารขณะที่โครงสร้างเริ่มพังทลาย การเสริมแรงด้วยเส้นใยในดินซีเมนต์สามารถบ่งบอกประสิทธิภาพของวัสดุประกอบได้จากความยาวของเส้นใยและเส้นใยผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีขนาดที่หลากหลายมาก เช่น เส้นใยป่านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 23 μm (Baley, 2002) หรือวัสดุประกอบดินซีเมนต์อาจจะใช้เส้นใยจากลำต้นของตันทันไผ่เป็นวัสดุเสริมแรง เส้นใยเหล็กพบได้มากในโครงสร้างคอนกรีตและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานดินซีเมนต์ได้ด้วย ซึ่งเส้นใยเหล็กเองจะพบได้หลากหลายรูปร่าง โดยการเสริมแรงวัสดุประกอบที่นิยมมากที่สุดคือใช้แท่งเหล็กเสริมแรง (reinforced steel bar) และรูปร่างที่เป็นเส้นใยเหล็กจากการแปรรูปรีดเป็นตาข่าย (mesh) หรือเส้นใยขนาดเล็ก (Fiber)

ในปัจจุบันการศึกษาความสามารถของเส้นใยมีความสำคัญมากขึ้น การศึกษาเรื่องผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและดินซีเมนต์เมตริก โดยตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของพื้นผิวสัมผัสของเส้นใยและดินซีเมนต์มี 3 ตัวแปรดังนี้

1. กำลังเฉือนของดินที่กระทำต่อผิวสัมผัสของเส้นใยและความขรุขระของเส้นใย
2. แรงเสียดทานบนพื้นผิวสัมผัสของเส้นใยเนื่องจากการขยายตัวของดินซีเมนต์
3. คุณสมบัติด้านความเหนียวของดิน

ตัวแปรทั้ง 3 ตัวจะส่งผลกระทบต่อสภาพธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไปในด้านการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งเส้นใยธรรมชาติจะได้รับผลกระทบอย่างมาก เส้นใยธรรมชาติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะที่กำลังปมวัสดุประกอบดินซีเมนต์ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อแรงยึดเกาะที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้น

ใยและดินซีเมนต์ให้มีค่าต่ำลง ในขณะที่ผสมและสภาพแห้งของผลิตภัณฑ์ คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติเมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะดูดความชื้นเข้าไปในตัวเส้นใย ซึ่งจะส่งผลต่อดินซีเมนต์เมตริก ภายหลังจากการบ่มจนมีสภาพแห้งความชื้นในตัวเส้นใยจะถูกดูดออกมาในการสร้างผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจนหมด ซึ่งจะเกิดช่องว่างรอบๆผิวสัมผัสของเส้นใยและทำให้แรงยึดเกาะที่ผิวสัมผัสของเส้นใยธรรมชาตินั้นอ่อนแอลงดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-1 [11]



ภาพที่ 2-1 รูปแบบของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของเส้นใยธรรมชาติ [11]

2.2.2 เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber)

เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อเสียในด้านเสื่อมของคุณภาพวัสดุจากตัวแปรทางธรรมชาติ เช่น ความชื้นหรือความร้อน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของดินซีเมนต์ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงมีการคิดค้นสร้างเส้นใยขึ้นมาจากวัสดุชนิดต่างๆเพื่อให้มีความทนทานที่สูงขึ้นในการใช้งานในระยะยาว ในการเปลี่ยนแปลงความชื้น ความร้อน ความเย็น และปฏิกิริยาอัลคาไลน์ที่เกิดจากปูนซีเมนต์ และยัง ไม่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของดินซีเมนต์ที่กำหนดไว้ ซึ่งข้อดีของเส้นใยสังเคราะห์ในการใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในดินซีเมนต์สามารถระบุได้คร่าวๆดังนี้ (Synthetic fiber for concrete. NRMCA. MD 20910. 1994 แหล่งที่มา :[http:// www.nrmca.org](http://www.nrmca.org))

1. ลดรอยแตกเนื่องจากการหดตัวของซีเมนต์
2. ลดการซึมผ่านของน้ำ
3. เพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุ
4. ป้องกันการพังทลายแบบฉับพลัน

วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตเส้นใยนั้นมีหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1 ที่กล่าวถึงชนิดของเส้นใยพลาสติกที่นิยมใช้ในงานเสริมแรง ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีข้อเด่นข้อด้อยแตกต่างกันไปทำให้การเลือกใช้งานมีความเหมาะสมแตกต่างกัน ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการวิจัยโดยใช้เส้นใยพลาสติกปรับปรุงคุณภาพดินชนิดต่างๆ แต่ก็ยังไม่งานวิจัยใดกล่าวถึงผลกระทบของชนิดของเส้นใยต่อดินประเภทเดียวกัน

กัญจน์ สลิวงส์ และคณะ (2563) [12] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังด้วยมาตรฐานด้วยวัสดุผสม ซีเมนต์ โพลีเมอร์ (cement-polymer mixture) เพื่อลดปริมาณการใช้

ซีเมนต์ลงในการปรับปรุงคุณภาพดิน ให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งในปัจจุบันซีเมนต์ถูกใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังอยู่ด้วย แต่เนื่องด้วยดินปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงแต่มีความสามารถในการรับแรงดัด และก็ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากน้ำและความชื้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างซีเมนต์และโพลีเมอร์(Polymers)ที่นำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐาน โดยมีเป้าประสงค์ที่จะให้โพลีเมอร์มาช่วยในการพัฒนาความสามารถในการรับแรงดัดและการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากน้ำและความชื้น โดยการศึกษาพิจารณาการพัฒนา กำลังรับแรงอัดแกนเดียว กำลังการรับแรงดัด และความสามารถในการดูดซึมน้ำของดินลูกรังด้วยมาตรฐานที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 และโพลีเมอร์ ในการทำเป็นตัวเชื่อมประสานของดินลูกรัง โดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยโพลีเมอร์ที่ 0, 5, 10, 15, 20% และที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ด้วยโพลีเมอร์ 10% มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวดีที่สุด และมีการพัฒนาการรับแรงดัด ร่วมกับการหาค่าของน้ำที่ต่ำ ดังนั้น ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะสามารถนำไปใช้ในการรักษาเสถียรภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐานสำหรับการใช้งานบนถนน

สุรัตน์ ศรีจันทร์ และคณะ (2563) [13] ได้ศึกษาผลของขนาดและปริมาณของเส้นพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีต่อกำลังต้านทานแรงอัดของอิฐดินดิบ การทดลองจะใช้เส้นพลาสติกโพลีเอทิลีนขนาดกว้าง 0.25 ซม.และ 0.5 ซม. ที่มีรูปทรงอัตราส่วนความยาว 1:1, 1:5, และ 1:10 ผสมกับดินเหนียวด้วยเส้นขนาดเดียวและแบบคละสองขนาด กำหนดสัดส่วนของเส้นพลาสติกแต่ละขนาดด้วยปริมาณร้อยละ 0-2 โดยน้ำหนักของดินแห้ง นาดตัวอย่าง ทดลองไปทดสอบแรงอัดแกนเดียว จากนั้นจึงคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตเป็นอิฐดินดิบแล้ว ศึกษา กำลังอัดของก้อนอิฐ ผลการศึกษาพบว่า ดินเหนียวทดลองมีความเป็นพลาสติกสูง มีความหนาแน่นแห้ง สูงสุด 1.346 ตัน/ลบ.ม. ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมร้อยละ 30 ผลของกำลังอัดแกนเดียว (qu) ของดินเหนียวผสม เส้นพลาสติกมีค่าอยู่ระหว่าง 1.47-3.74 กก./ตร.ซม. โดยเส้นพลาสติกอัตราส่วนความยาว 1:5 ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนความยาว 1:10 และ 1:1 ตามลำดับ ทั้งนี้กำลังอัดแกนเดียวไม่ได้แปรผัน ตามปริมาณและขนาดของเส้นพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญแต่ขึ้นอยู่กับโอกาสกระจายตัวและรูปแบบการวางตัว ของเส้นพลาสติกในเนื้อดิน ผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐดินดิบพบว่าเส้นพลาสติกขนาด 0.25x1.25 ซม. ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 13.54 กก./ตร.ซม. รองลงมาได้แก่ ส่วนผสมเส้น 17 พลาสติกแบบคละขนาด 0.5x0.5 ซม. กับ 0.5x2.5 ซม. และเส้นพลาสติกขนาด 0.5x2.5 ซม. ตามลำดับ

จักรวาล ต้นสกุล และคณะ (2561) [14] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินซีเมนต์มวลเบาด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีน สำหรับใช้ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อน การศึกษาจะมุ่งเน้นการปรับปรุงจุดต่อเรื่องการแตกหักง่ายและเพื่อเพิ่มความเหนียวให้วัสดุ โดยทำการทดสอบตัวอย่างแบบแรงอัดแบบไม่

ถูกจำกัด งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยมีสัดส่วนปริมาตรเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ต่างกันในส่วนร้อยละ 0, 1, 2, 3 และ 4 กับดินซีเมนต์มวลเบาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 100, 150 และ 200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตัวอย่างที่ใช้มีหน่วยน้ำหนัก 8, 10 และ 12 กิโลนิวตัน/ลูกบาศก์เมตร ในการทดสอบนี้ได้ใช้เส้นใยยาว 6 และ 12 มิลลิเมตรจากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า การใส่เส้นใยโพลีโพรพิลีนทำให้พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนียวและค่าความเค้นคงค้างตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยและอัตราการลดลงของการสูญเสียความเค้นหลังจุดวิบัติ นอกจากนี้ยังพบว่า อิทธิพลการเพิ่มของปริมาณและความยาวเส้นใยมีผลอย่างไม่มีนัยต่อการเพิ่มของค่ากำลังรับแรงอัด

2.4 การทดสอบเบนด์อีลีเมนต์ (Bender Element Test)

การทดสอบบีมเอลีเมนต์เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการประเมินวัสดุทางธรณีแบบไม่ทำลาย ซึ่งอาศัยการสร้างและการวัดคลื่นเฉือน บีมเอลีเมนต์เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแผ่นคู่ขนานสองแผ่นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุยืดหยุ่น เมื่อมีแรงดัดกระทำต่อบีมเอลีเมนต์ คลื่นเฉือนจะถูกสร้างขึ้นในวัสดุระหว่างแผ่นทั้งสอง ความเร็วของคลื่นเฉือนเหล่านี้สามารถวัดได้และนำมาใช้เพื่อกำหนดสมบัติของวัสดุ

การทดสอบบีมเอลีเมนต์เป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและสามารถใช้ได้หลากหลายในการประเมินวัสดุทางธรณี โดยสามารถดำเนินการได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

2.4.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ASTM D8295-19 Standard Test Method for Determination of Shear Wave Velocity and Initial Shear Modulus in Soil Specimens using Bender Elements

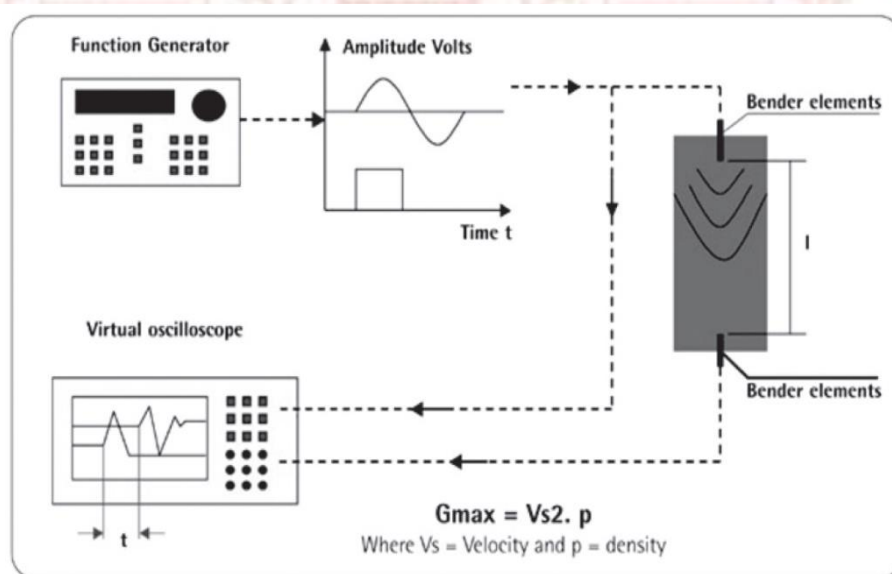
2.4.2 ความสำคัญและการใช้งาน

2.4.2.1 โมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (G_{max}) ของตัวอย่างดินภายใต้สภาวะความเค้นและเวลาที่กำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์พลศาสตร์เชิงความเค้นต่ำ เช่น การพยากรณ์พฤติกรรมของดิน การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างในระหว่างแผ่นดินไหว การระเบิด และแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรหรือการจราจร

นอกจากนี้ G_{max} ยังมีความสำคัญต่อสถานการณ์การรับแรงซ้ำแบบความเครียดต่ำ เช่น แรงที่เกิดจากลม หรือคลื่นในมหาสมุทร ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับความเครียดขนาดเล็ก ผลลัพธ์ของค่าความแข็งแรงของดินที่ระดับความเครียดสูงอาจได้มาจากการทดสอบแรงบิดเฉือน (torsional shear test) ตัวอย่างเช่น ค่าความเร็วของคลื่นเฉือนและ G_{max} สามารถใช้เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวอย่างดินต่าง ๆ ในโปรแกรมทดสอบในห้องปฏิบัติการ และยังสามารถใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการวัดในสนามได้อีกด้วย

2.4.2.2 การทดสอบ torsional resonant column (ASTM D4015) มักถูกใช้เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ค่าความเครียดเฉือนต่ำถึง 0.01% หรือสูงกว่านั้นเล็กน้อย โดยผลการทดสอบแบบ resonant column สามารถให้ข้อมูลดังต่อไปนี้ G_{max} เทียบกับเวลา โมดูลัสเฉือนเทียบกับค่าความเครียด อัตราส่วนแดมปีง (damping ratio) เทียบกับเวลา อัตราส่วนแดมปีงเทียบกับค่าความเครียด ในขณะที่การทดสอบเบนเดอร์อีลีเมนต์สามารถให้ข้อมูลได้เพียงอย่างเดียวคือ G_{max} เทียบกับเวลา โดยระดับความเครียดในเบนเดอร์อีลีเมนต์มีค่าต่ำมากและค่าความเครียดไม่คงที่ตลอดเส้นทางการเดินทางของคลื่นเฉือน เนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากวัสดุและเรขาคณิต (material and geometric damping) ดังนั้น เบนเดอร์อีลีเมนต์จึงไม่สามารถใช้ประเมินค่ามอดูลัสเฉือนเทียบกับค่าความเครียด และไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราส่วนแดมปีงได้ อย่างไรก็ตาม เบนเดอร์อีลีเมนต์สามารถติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการประเภทต่าง ๆ ซึ่งทำให้สามารถวัดค่าความแข็งแรงของดินทั้งในช่วงความเครียดต่ำและความเครียดสูงในตัวอย่างเดียวกันภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบนั้น ๆ ซึ่งอาจช่วยลดความจำเป็นในการทดสอบแบบ resonant column เพิ่มเติม

2.4.3 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดสอบ Bender Elements



ภาพที่ 2-2 ระบบการทำงานของชุดทดสอบเบนเดอร์อีลีเมนต์ [15]

2.4.3.1 เบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวส่ง เบนเดอร์อีลีเมนต์ที่เชื่อมต่อแบบขนาน โดยมีสายไฟที่เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดผิวด้านนอกทั้งสองและอีกสายหนึ่งเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดกลาง การไหลกระแสของแผ่นเซรามิกทั้งสองในเบนเดอร์อีลีเมนต์นี้ (ที่อยู่ระหว่างพื้นผิวอิเล็กโทรดทั้งสาม) จะอยู่ในทิศทางเดียวกันไปทางด้านเดียว เบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวส่งจะถูกติดตั้งถาวรในแผ่นท้าย

ที่ตรงข้ามกับเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวรับ สายไฟและการเชื่อมต่อของเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวส่งควรถูกหุ้มเพื่อป้องกันเสียงรบกวนทางไฟฟ้าที่อาจมีผลกระทบต่อสัญญาณที่ส่งไปยังเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวส่ง

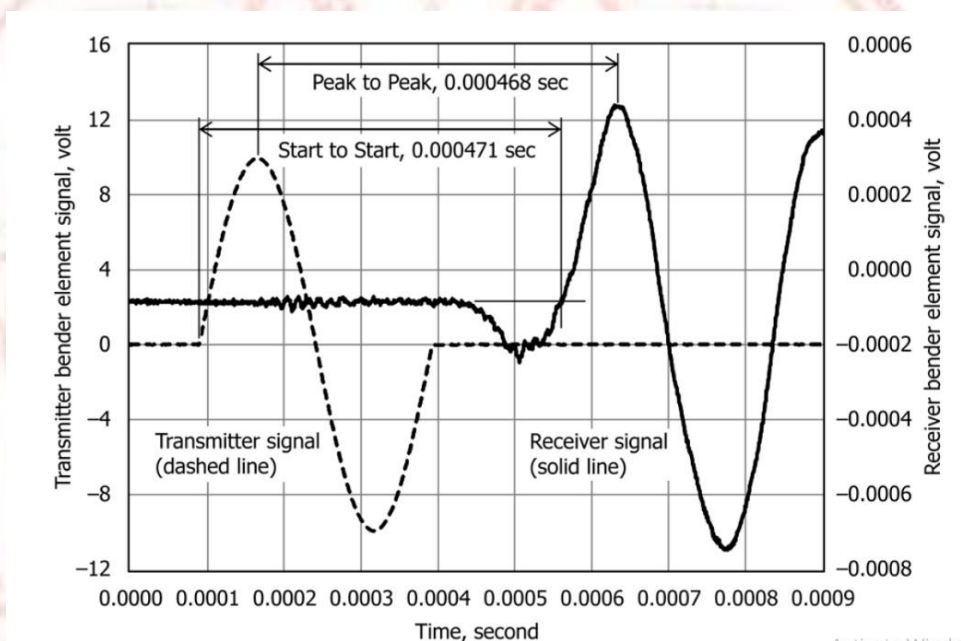
2.4.3.2 เบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวรับ เบนเดอร์อีลีเมนต์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม โดยมีสายไฟที่เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดผิวด้านนอกด้านหนึ่งและอีกสายหนึ่งเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดผิวด้านนอกอีกด้านหนึ่ง การโพลาไรเซชันของแผ่นเซรามิกทั้งสองในเบนเดอร์อีลีเมนต์นี้ (ที่อยู่ระหว่างพื้นผิวอิเล็กโทรดทั้งสาม) จะอยู่ในทิศทางตรงข้ามกันไปยังอิเล็กโทรดกลาง สายไฟและการเชื่อมต่อของเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวรับควรถูกหุ้มเพื่อป้องกันเสียงรบกวนทางไฟฟ้าที่อาจถูกจับได้ในสัญญาณที่บันทึกจากตัวรับ

2.4.3.3 เครื่องสร้างสัญญาณ (Function Generator) อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณขับเคลื่อนสำหรับเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวส่ง เครื่องนี้ต้องสามารถสร้างสัญญาณพัลส์คลื่นไซน์แบบช่วงเดียวที่มีความถี่ปรับได้ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1 kHz ถึง 50 kHz ความแอมพลิจูดของคลื่นไซน์ที่สร้างขึ้นควรมีขนาดเพียงพอที่ให้สัญญาณที่รับได้สามารถสังเกตได้ชัดเจน จะเป็นประโยชน์หากเครื่องสร้างสัญญาณนี้สามารถตั้งโปรแกรมให้ส่งพัลส์คลื่นไซน์แบบช่วงเดียวโดยอัตโนมัติพร้อมทั้งมีการหน่วงเวลาระหว่างพัลส์แต่ละอัน เพื่อใช้ฟังก์ชันการเฉลี่ยในอุปกรณ์การบันทึก สัญญาณที่หน่วงเวลาไม่ควรสั้นเกินไป ควรพอสำหรับการเคลื่อนที่ทั้งหมดในเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวรับจากพัลส์คลื่นเฉือนที่ก่อนหน้านี้ได้จางหายไปโดยสมบูรณ์ สำหรับการทดสอบโทรแกนทั่วไป การหน่วงเวลาแบบอนุรักษนิยมอาจอยู่ที่ประมาณ 0.1 วินาที

2.4.3.4 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Recorder) อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกข้อมูล อาจเป็นออสซิลอสโคปดิจิทัลที่แยกออกมา หรือออสซิลอสโคปที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เครื่องนี้ต้องมีช่องรับข้อมูลสองช่อง หนึ่งสำหรับสายจากเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวส่ง และอีกหนึ่งสำหรับสายจากเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวรับ อุปกรณ์ที่ใช้พื้นดินร่วม (common ground) มักใช้กันทั่วไป แต่ในบางกรณีอาจต้องใช้การเชื่อมต่อที่แตกต่างออกไป อุปกรณ์ที่ใช้วัดสำหรับการทดสอบบนตัวอย่างใดก็ตามต้องมีความละเอียดเวลาอย่างน้อยหนึ่งไมโครวินาที ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$) และความละเอียดแอมพลิจูดอย่างน้อยสิบไมโวลต์ (10^{-5} V) สำหรับสัญญาณจากตัวรับ อุปกรณ์ต้องสามารถแสดงกราฟเวลาแบบซ้อนของทั้งสองเบนเดอร์อีลีเมนต์ในขณะที่ทำการทดสอบ และควรมีเคอร์เซอร์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้เพื่อให้สามารถตีความเวลาเดินทางของคลื่นเฉือนที่วัดได้ เครื่องควรมีฟังก์ชันการหน่วงสัญญาณเริ่มต้นที่สามารถบันทึกการเริ่มต้นของสัญญาณจากตัวส่งได้ และควรมีฟังก์ชันการเฉลี่ยที่สามารถเฉลี่ยข้อมูลจากพัลส์คลื่นเฉือนหลาย ๆ อันที่ได้รับการวัดเพื่อกำจัดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นแบบสุ่มจากสัญญาณของตัวรับ

2.4.3.5 แอมพลิฟายเออร์พลังงานและตัวกรองสัญญาณเพิ่มเติม ควรหลีกเลี่ยงการใช้หน่วยเหล่านี้ในการเชื่อมต่อระหว่างเบนเดอร์อีลีเมนต์และเครื่องบันทึกข้อมูล เนื่องจากอาจทำให้สัญญาณบิดเบี้ยวและเกิดข้อผิดพลาดในการวัดเวลาเดินทางของคลื่นเฉือน หากการใช้แอมพลิฟายเออร์พลังงานระหว่างเครื่องสร้างสัญญาณและเบนเดอร์อีลีเมนต์ตัวส่งเป็นสิ่งจำเป็น ควรติดตั้งก่อนการเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล หากสัญญาณจากตัวรับมีเสียงรบกวนทางไฟฟ้าที่สุ่มมากเกินไปทำให้การตีความยาก ควรใช้ฟังก์ชันการเฉลี่ยในเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อกำจัดเสียงรบกวนแทนการใช้ตัวกรองสัญญาณแยกต่างหากที่อาจส่งผลกระทบต่อการวัด

2.4.4 การแปลงเวลาการเดินทางของคลื่นเฉือนในโดเมนเวลา



ภาพที่ 2-3 คลื่นเบนเดอร์อีลีเมนต์ และระยะเวลาเดินทางคลื่นเฉือน [16]

ภาพที่ 2-3 แสดงตัวอย่างการวัดองค์ประกอบเบนเดอร์ที่เกิดขึ้นจริงบนตัวอย่างดินทรายที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ภายใต้การทดสอบไตรแอกเซียล ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณจากองค์ประกอบเบนเดอร์ตัวส่งสอดคล้องกับแกนแนวตั้งหลัก ในขณะที่ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณจากองค์ประกอบเบนเดอร์ตัวรับสอดคล้องกับแกนแนวตั้งรอง แกนนอนแสดงถึงทั้งสองสัญญาณ โดยที่จุดเวลาเป็นศูนย์ถูกกำหนดให้อยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งก่อนเริ่มต้นสัญญาณของตัวส่งอย่างอิสระ มีวิธีการแปลงเวลาการเดินทางของคลื่นเฉือน (T_s) ในโดเมนเวลาสองวิธีที่ใช้ในวิธีทดสอบนี้ ได้แก่ เริ่มต้นถึงเริ่มต้น (Start to Start) และ จุดสูงสุดถึงจุดสูงสุด (Peak to Peak)

2.4.4.1 จุดสูงสุดถึงจุดสูงสุด (Peak to Peak)

เมื่อความถี่ของสัญญาณจากองค์ประกอบเบนเดอร์ตัวส่งและตัวรับมีค่าใกล้เคียงกัน เวลาการเดินทางของคลื่นเฉือนสามารถวัดได้จากจุดสูงสุดแรกของสัญญาณตัวส่งไปยังจุดสูงสุดแรกของ

สัญญาณตัวรับ ในตัวอย่างของรูปที่ 3 วิธีการจุดสูงสุดถึงจุดสูงสุดให้ค่าเวลาที่ 468 ไมโครวินาที วิธีนี้มักเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในการวัดเวลาการเดินทางของคลื่นเฉือนในตัวอย่างดิน เนื่องจากวิธีนี้มีความไวต่อผลกระทบจากสนามใกล้ (near-field effects) ในน้อยกว่าวิธีอื่น

2.4.4.2 เริ่มต้นถึงเริ่มต้น (Start to Start)

หลังจากที่สัญญาณจากตัวส่งเริ่มต้นขึ้น สัญญาณจากตัวรับยังคงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในแนวนอนอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง ก่อนที่จะลดลงเล็กน้อยแล้วกลับทิศทางขึ้นไปอีกครั้ง การลดลงของสัญญาณในช่วงแรกนี้ถือว่าเป็นผลกระทบจากสนามใกล้ ก่อนที่คลื่นเฉือนจะเดินทางมาถึงแนวโน้มของสัญญาณแนวนอนเริ่มต้นของตัวรับสามารถนำมาใช้คาดการณ์ข้ามผ่านบริเวณที่มีผลกระทบจากสนามใกล้ไปยังจุดที่เส้นนี้ตัดกับกราฟของสัญญาณตัวรับ เวลาการเดินทางของคลื่นเฉือนจะถูกวัดจากจุดเริ่มต้นของสัญญาณตัวส่งไปยังจุดตัดดังกล่าว ซึ่งในตัวอย่างของรูปที่ 2-3 วิธีการเริ่มต้นถึงเริ่มต้นให้ค่าเวลาที่ 471 ไมโครวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับ 468 ไมโครวินาที ที่ได้จากวิธีจุดสูงสุดถึงจุดสูงสุด

2.4.5 ตัวอย่างการคำนวณ

2.4.5.1 ความเร็วของคลื่นเฉือน (Shear wave Velocity)

ความเร็วของคลื่นเฉือนสามารถคำนวณได้จากการวัดองค์ประกอบเบนเดอร์ โดยใช้สมการดังต่อไปนี้:

$$V = \frac{L_i - L_b}{T_s - T_c}$$

โดยที่ V_s คือความเร็วของคลื่นเฉือนที่วัดเป็นหน่วย (ม./วินาที) L_i คือความยาวของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯที่ใช้ในการทดสอบ (ม.) L_b คือความยาวรวมของการทดสอบองค์ประกอบดัดที่วัดได้ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (ม.) T_s คือเวลาที่วัดได้ของการเคลื่อนที่ ของคลื่นเฉือนผ่านวัตถุจากหน่วยการปล่อยคลื่นไปยังหน่วยรับคลื่น T_c คือปัจจัยแก้ไขความล่าช้า

2.4.5.2 โมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (Initial Shear modulus)

$$G_{\max} = \frac{\rho V_s^2}{10^6}$$

โดยที่: $G_{\max}$ = โมดูลัสเฉือนเริ่มต้นของตัวอย่างดิน, MPa, ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่างดิน, กก./ม.³ และ V_s = ความเร็วคลื่นเฉือน, m/s

บทที่ 3

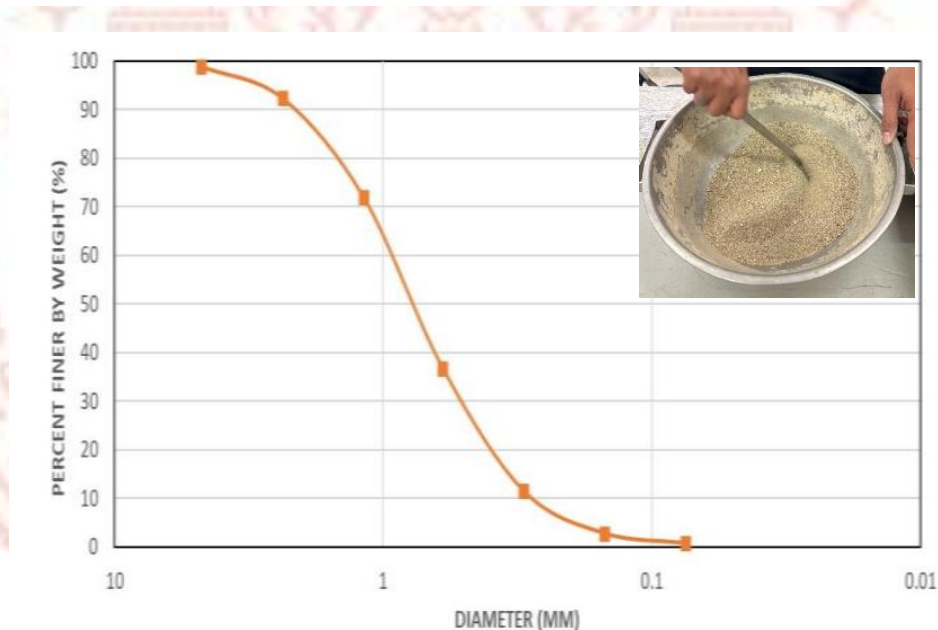
การดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะแสดงรายละเอียดขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย โดยกล่าวถึง วัสดุที่ใช้เตรียมตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด สัดส่วนที่ใช้ผสมและวิธีการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาผลกระทบของการเสริมแรงและพฤติกรรมการรับกำลังดัดในทรายซีเมนต์บดอัด

3.1 วัสดุที่ใช้การเตรียมตัวอย่างทรายซีเมนต์

3.1.1 ทราย

ทรายในงานวิจัยนี้ได้ใช้เป็นทรายที่สามารถหาได้จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง หรือร้านวัสดุก่อสร้างในกรุงเทพมหานครที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีการกระจายของเม็ดดิน(Grain Size Distribution Curve) ดังภาพที่ 3-1 และมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 กราฟแสดงการกระจายของเม็ดดิน(Grain Size Distribution Curve) [17]

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายงานก่อสร้างในกรุงเทพ (Physical properties of the Bangkok construction sand) [17]

Property	Value
Specific gravity (G_s)	2.65
Gravel content (%)	10.52
Sand content (%)	80.58
Fine content (%)	8.90
D_{60} (mm)	0.93
D_{30} (mm)	0.49
D_{10} (mm)	0.29
Coefficient of Uniformity (C_u)	3.21
Coefficient of Curvature (C_c)	0.89
Soil classification (USCS)	SP
Maximum, and minimum void ratios	0.83, 0.28
Maximum dry unit weight (kN/m^3)	15.70
Optimum moisture content (%)	6.19

3.1.2 ปูนซีเมนต์

เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงาน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบของวัตถุดิบจะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผา การปรับส่วนผสมประกอบทางเคมีจะให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติต่างกัน เมื่อผสมกับน้ำปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

ปูนซีเมนต์พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโคโลไมต์ ($MgCO_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้กันทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอนอลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด โดยจะเกิดเป็นสารประกอบหลักสำคัญ 4 ชนิด เช่น ไตรแคลเซียมซิลิเกต, ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต, เตตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์จะอยู่ในรูปของผลึกที่ละเอียดมากโดยมีส่วนประกอบทางเคมีและชื่อย่อ ดังตารางที่ 3-2 ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) ตามมาตรฐาน มอก.15-2562 ตามรูปที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สารประกอบและคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 – 5 [18]

สารประกอบและคุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C ₃ S	49	46	56	25	30
C ₂ S	25	29	15	50	46
C ₃ A	12	6	12	5	5
C ₄ AF	8	12	8	12	13
ความละเอียด (เบลน, ซม. ² /กรัม)	3,000	3,000	4,500	3,000	3,000
กำลังอัด (3 วัน, กก./ซม. ²)	180	150	310	80	120
ความร้อนปฏิกิริยา (28 วัน, จูล/กรัม)	400	330	430	270	310



ภาพที่ 3-2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.3 ซิลิกาฟุ้ง (SiO₂) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมครอน ตามภาพที่ 3-3 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ(Fume) ของ SiO ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆของซิลิ

กาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 mm และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 ม²/ก (โดยวิธี Nitrogen Absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง (0.1 mm) เป็นขนาดที่เล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO₂ ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทาปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO₂ ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO₂ ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน จะพบว่ามียังองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังตารางที่ 3-3 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ซิลิกาฟุ้ง ยี่ห้อ Elkem ตามภาพที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 สารประกอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหิน และซิลิกาฟุ้ง [19]

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เถ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟุ้ง
SiO ₂	20	48	92
Al ₂ O ₃	5	26	0.7
Fe ₂ O ₃	3	10	1.2
CaO	60	5	0.2
MgO	1.1	2	0.2
SO ₃	2.4	0.7	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.6
LOI	2	3	-



ภาพที่ 3-3 ซิลิกาฟุ่ม Elkem

3.1.4 เส้นใยขนไก่

ขนไก่เป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีโครงสร้างที่กลวง ส่งผลให้มีความหนาแน่นต่ำกว่าวัสดุอื่น เช่น ขนแกะ (1.3 g/cm^3) และเส้นใยเซลลูโลส (1.5 g/cm^3) ขนไก่เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีความเป็นระเบียบสูง จัดเป็นหนึ่งในโครงสร้างเคราตินที่ซับซ้อนที่สุดในสัตว์มีกระดูกสันหลัง ประกอบด้วยเคราติน 91% น้ำ 8% และไขมัน 1% ขนไก่มีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความเหนียวสูง เป็นฉนวนความร้อน มีความหนาแน่นต่ำ ไม่ก่อให้เกิดการขัดสี และกันน้ำได้ดี โครงสร้างของขนไก่มีลักษณะเป็นลำต้นหลัก (rachis) ที่แตกกิ่งออกไปในแนวนาน โดยกิ่งเหล่านี้ถูกยึดด้วย barbicels ที่เป็นขอเกี่ยว ซึ่งคุณสมบัติสำคัญของขนไก่ดังแสดงในตารางที่ 3-4 ในการวิจัยนี้ใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตปศุสัตว์ ที่ผ่านการทำความสะอาดและขจัดคราบมัน (wax) และผ่านการอบแห้งแล้ว มีความถ่วงจำเพาะ 0.58 ตามรูปที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติสำคัญของขนไก่ [20]

คุณสมบัติ	ค่า
ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Young's modulus)	50,000 N/mm ²
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)	10-70 N/mm ²
ปริมาณความชื้น (Moisture content)	16-20%
อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio)	30-50
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	0.7-1.2
ความหนาแน่น (Density)	0.8 g/cm ³



ภาพที่ 3-4 เส้นใยขนไก่

3.1.5 เส้นใยพลาสติก

งานวิจัยครั้งนี้เส้นใยพลาสติกชนิด PET จากขวดน้ำดื่ม ยีห้อสิงห์ ผ่านกระบวนการย่อยด้วยเครื่องจักรจากโรงงานรีไซเคิลพลาสติก มีขนาดเฉลี่ย 60 mm. x 6.0 mm ความหนา 0.18 mm. มีอัตราส่วนขนาด (Aspect Ratio) 10 : 1 และมีความถ่วงจำเพาะ 1.34 [21] ตามรูปที่ 3-5



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3-5 ขนาดเส้นใยพลาสติก (PET)

3.2 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ขนาดของแบบหล่อ PVC ขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3-6 โดยทำทรายแม่น้ำและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาผสมรวมให้เข้ากันดี จากนั้นนำเส้นใยมาผสมกับทรายซีเมนต์เมื่อคลุกเคล้าเส้นใยกระจายจนทั่วเนื้อดีแล้ว จึงเติมน้ำผสมเพิ่มลงไปให้มีมีความชื้นอย่างทั่วถึง ดังรูปที่ 3-7



ภาพที่ 3-6 แสดงตัวอย่างแบบหล่อทรงกระบอก



ภาพที่ 3-7 แสดงตัวอย่างแบบหล่อทรงกระบอก

3.2.2 เตรียมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดลงในแบบหล่อ ก่อนจะนำตัวอย่างเทใส่แบบหล่อให้ทำการให้น้ำมันพืชเป็นชั้นบางๆ เพื่อการถอดตัวอย่างทำได้โดยง่าย จากนั้นทำการเททรายซีเมนต์ที่ผสมไว้เป็นเป็นชั้นๆ จำนวน 3 ชั้น แล้วบดอัดทรายซีเมนต์ให้ได้ความหนาแน่นความชื้นเหมาะสมให้ใกล้เคียงตามดังวิธีการบดอัดดิน (Optimum Moisture Content) ดังรูปที่ 3-8 เมื่อทำการบดอัดเสร็จแล้วให้ทำการเก็บตัวอย่างโดยการปิดแผ่นพลาสติกอย่างมิดชิด เก็บในห้องที่ไม่มี ความชื้นในอุณหภูมิห้องปกติ ก่อนวันทำการทดสอบ ดังรูปที่ 3-9



ภาพที่ 3-8 การบดอัดตัวอย่างทรายซีเมนต์ลงในแบบ



ภาพที่ 3-9 การเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 3-5 แสดงอัตราส่วนผสมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด

No.	OPC (%)	PET FIBER (%)	Chicken FIBER (%)	W/C	OMC (%)	OPC (%) : SILICAFUME (%)	CURING TIME (day)
A1	3	0	0	0.5	6.19	100:0	28
A2	3	0.5	0	0.5	6.19	100:0	28
A3	3	1.0	0	0.5	6.19	100:0	28
A4	3	1.5	0	0.5	6.19	100:0	28
A5	3	2.0	0	0.5	6.19	100:0	28
A6	3	2.5	0	0.5	6.19	100:0	28
B1	5	0	0	0.5	6.19	100:0	28
B2	5	0.5	0	0.5	6.19	100:0	28
B3	5	1.0	0	0.5	6.19	100:0	28
B4	5	1.5	0	0.5	6.19	100:0	28
B5	5	2.0	0	0.5	6.19	100:0	28
B6	5	2.5	0	0.5	6.19	100:0	28
C1	7	0	0	0.5	6.19	100:0	28
C2	7	0.5	0	0.5	6.19	100:0	28
C3	7	1.0	0	0.5	6.19	100:0	28
C4	7	1.5	0	0.5	6.19	100:0	28
C5	7	2.0	0	0.5	6.19	100:0	28
C6	7	2.5	0	0.5	6.19	100:0	28

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

No.	OPC (%)	PET FIBER (%)	Chicken FIBER (%)	W/C	OMC (%)	OPC (%) : SILICAFUME (%)	CURING TIME (day)
D1	8	0	0	0.5	6.19	100:0	28
D2	8	0	0	0.5	6.19	95:05	28
D3	8	0	0	0.5	6.19	90:10	28
D4	8	0	0	0.5	6.19	85:15	28
D5	8	0	0	0.5	6.19	80:20	28
D6	8	0	0	0.5	6.19	75:25	28
D7	8	0	0	0.5	6.19	70:30	28
E1	5	0	0	0.5	6.19	100:0	28
E2	5	0	0.5	0.5	6.19	100:0	28
E3	5	0	1.5	0.5	6.19	100:0	28
E4	5	0	2.5	0.5	6.19	100:0	28

3.3 การทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.3.1 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัดตามมาตรฐาน ASTM D1633-17 (UCS) ตามรูปที่ 3-10 วัตถุประสงค์คือเพื่อเปรียบเทียบความสามารถของแรงอัดแบบไม่จำกัดกับความเร็วของคลื่นเฉือน ซึ่งระยะเวลาจะกำหนดความแข็งแรง ซึ่งหมายความว่าคลื่นเฉือนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในวัสดุที่มีความหนาแน่น การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัดมีข้อดีของการทดสอบ เช่น ประหยัดเวลาในการทดสอบ รู้ผลการทดสอบได้อย่างรวดเร็ว ขั้นตอนการทดสอบนั้นง่ายมาก แม้ว่าการทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัดจะทำลายตัวอย่างที่ทดสอบก็ตาม ในการทดลองกับตัวอย่างทรายซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ตัวอย่างทรายซีเมนต์จะถูกบรรจุในกระบอกสูบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และความสูง 100 มม. จากนั้นจึงห่อหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในภาชนะพลาสติกที่มีฝาปิดสนิท โดยมีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 3-10 ตัวอย่างการทดสอบทรายซีเมนต์บดอัด ที่ 28 วัน แบบไม่ถูกจำกัด



ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างผลการทดสอบแบบไม่ถูกจำกัด

ตัวอย่างจะถูกทดสอบโดยใช้วิธี UCS ด้วยความเร็ว 2 mm/min การทดสอบนี้ให้เราทราบค่า U_c (Unconfined Compressive Strength) คือ ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ดินสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก

$$U_C = P_{\max}/A \quad (3-1)$$

โดยที่ U_C คือ ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ดินสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก (kPa)

L คือ ค่าแรงสูงสุดที่ดินรับได้ (kg)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของดินตัวอย่าง (cm^2)

3.3.2 วิธีการทดสอบเบ็นเดอร์ลีเมนต์

รูปที่ 3-12 แสดงตัวอย่างการวัดคลื่นเฉือน รูปแบบของสัญญาณพัลส์ไซน์ที่ส่งผ่านเครื่องส่งออสซิลโลสโคปที่ส่งความถี่คลื่นเฉือนพัลส์ไซน์ที่เกิดจากการเดินทางของคลื่นไซน์ผ่านตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดกลับไปยังคอมพิวเตอร์ต้นทางสัญญาณ การส่งสัญญาณผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างคลื่นพัลส์ไซน์จะส่งสัญญาณแอมพลิฟายด์ 10 V ที่ความถี่ 10 kHz ผ่านตัวแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อกตามคำแนะนำของผู้ผลิต เมื่อคลื่นเดินทางผ่านความสูงของตัวอย่างดินเหนียวแล้ว องค์ประกอบตัวรับจะรับสัญญาณคลื่นเฉือนที่เดินทางผ่านตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดในการเดินทางเฉือน ปริมาณเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ การตรวจสอบระยะเวลาเดินทางของคลื่นเฉือน จากรูปที่ 3-13 คลื่นที่เข้าสู่จุดสูงสุดของคลื่น 1 จะถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการนับเวลาเดินทางจากการส่งไปยังจุดสูงสุดของคลื่น 2 เป็นจุดสิ้นสุดของการเดินทางของคลื่นรับ ดังนั้น V_s (แสดงเป็น V_{s-vh}) สามารถพบร่วมกันได้ (ASTM D1633-17 และ ASTM D8295-19) โดยใช้สมการ (3-2) ต่อไปนี้

$$V_s = L/T \quad (3-2)$$

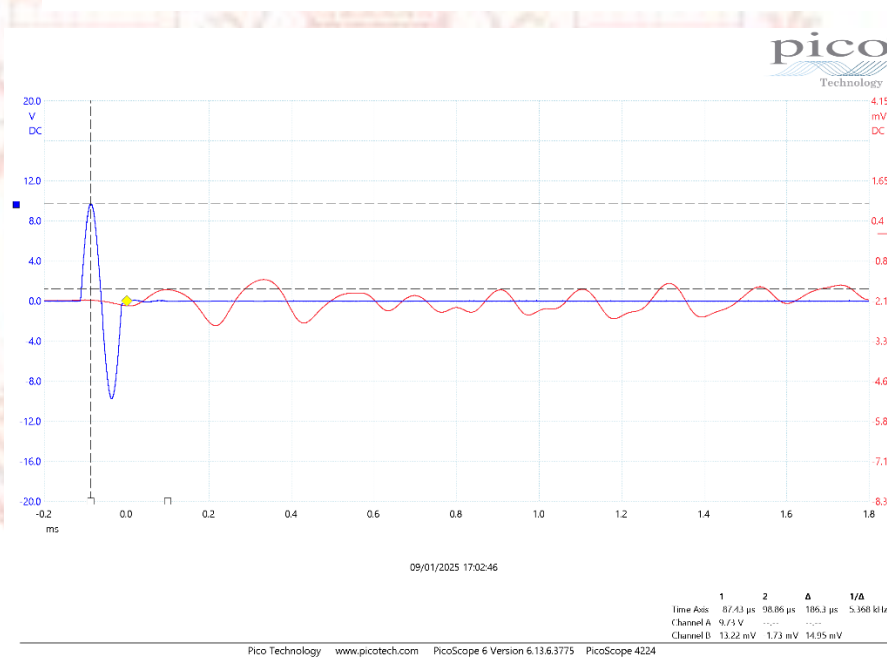
โดยที่ V_s คือ ความเร็วของคลื่นเฉือนที่วัดเป็นหน่วย (ม./วินาที)

L คือ ระยะทางระหว่างปลายทั้งสองข้างเบ็นเดอร์ (m)

T คือ ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ (s)



ภาพที่ 3-12 ตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดทดสอบโดยวิธีเบนเดอร์อีลีเมนต์



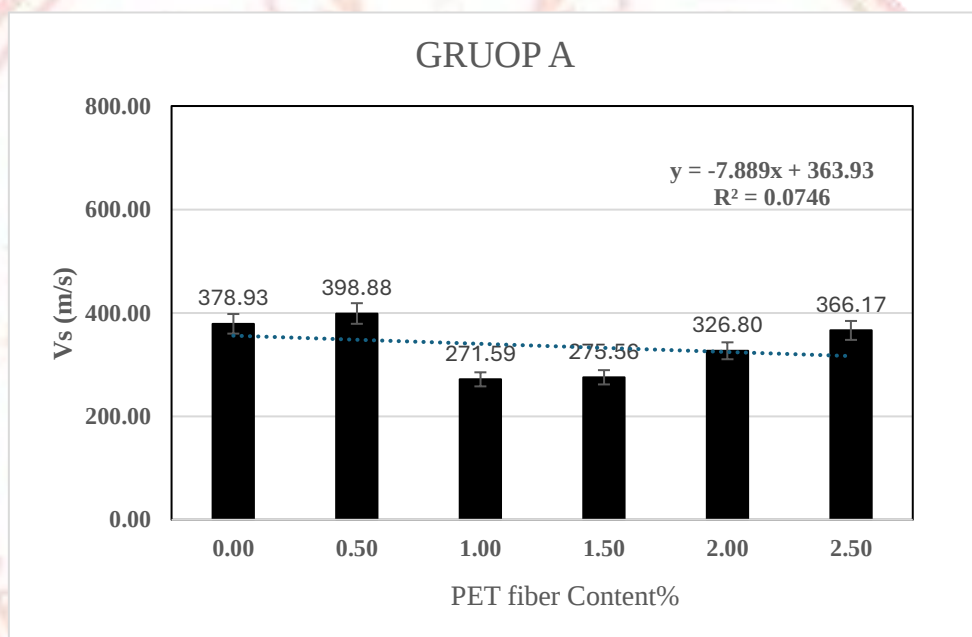
ภาพที่ 3-13 ตัวอย่างผลการทดสอบโดยวิธีเบนเดอร์อีลีเมนต์

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

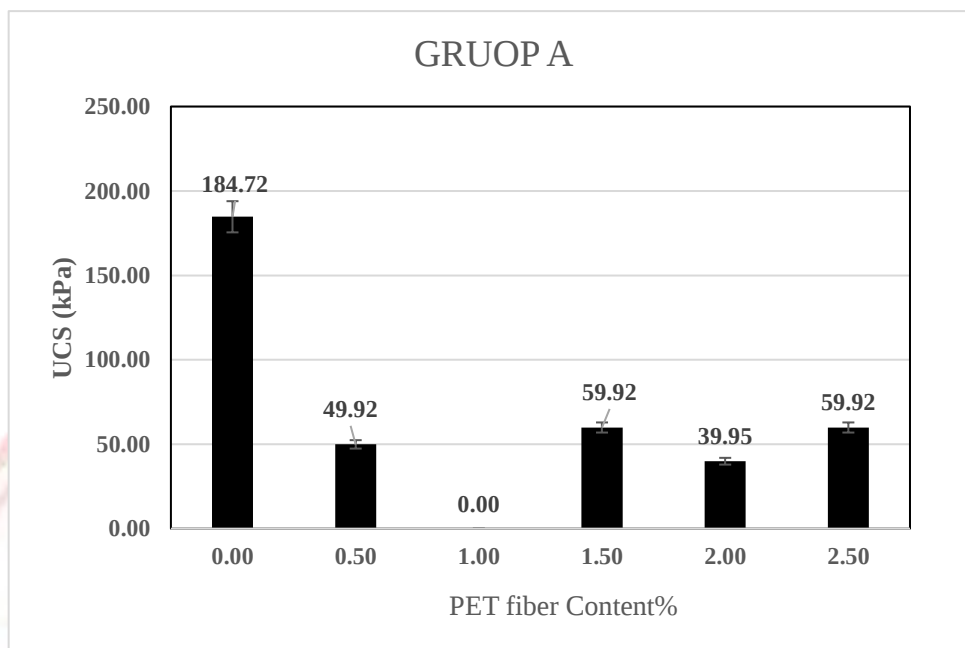
4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET fiber) ที่เหมาะสม ที่ปริมาณซีเมนต์ 3%

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัดที่ใช้ปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) เพื่อศึกษาหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่แตกต่างกัน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังอัดในทรายซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ 3% โดยจัดให้เป็น กลุ่ม A



ภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม A

จากภาพที่ 4-1 แสดงความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) เทียบกับปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ของการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ปริมาณซีเมนต์ 3% หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติกในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0% ได้ค่าความเร็วคลื่น 378.93 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0.5% ได้ค่าความเร็วคลื่น 398.88 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.0% ได้ค่าความเร็วคลื่น 271.59 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.5% ได้ค่าความเร็วคลื่น 275.56 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.0% ได้ค่าความเร็วคลื่น 326.80 m/s และปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.5% ได้ค่าความเร็วคลื่น 366.17 m/s จะเห็นได้ว่าความเร็วคลื่น (V_s) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่ใส่เพิ่มขึ้น

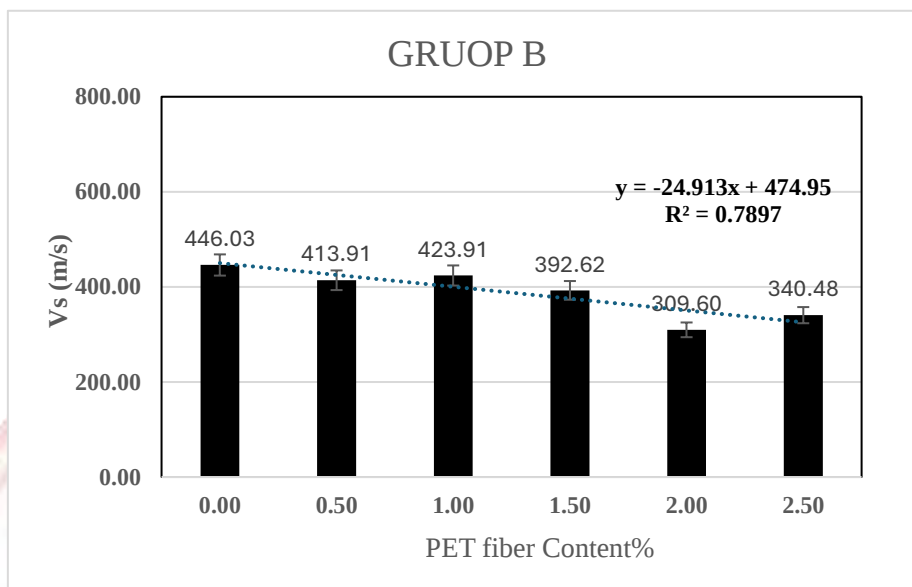


ภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม A

จากภาพที่ 4-2 แสดงค่า UCS เทียบกับปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่ปริมาณซีเมนต์ 3% หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติกในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 184.72 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 49.92 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 59.92 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 2% ได้ค่ากำลังอัด UCS 39.95 kPa และปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 59.92 kPa จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของทรายซีเมนต์บดอัดลดลงเมื่อใส่เส้นใยพลาสติก เนื่องจากการเตรียมตัวอย่าง ทำให้ทรายกับเส้นใยพลาสติก (PET) แยกเป็นชั้น ๆ

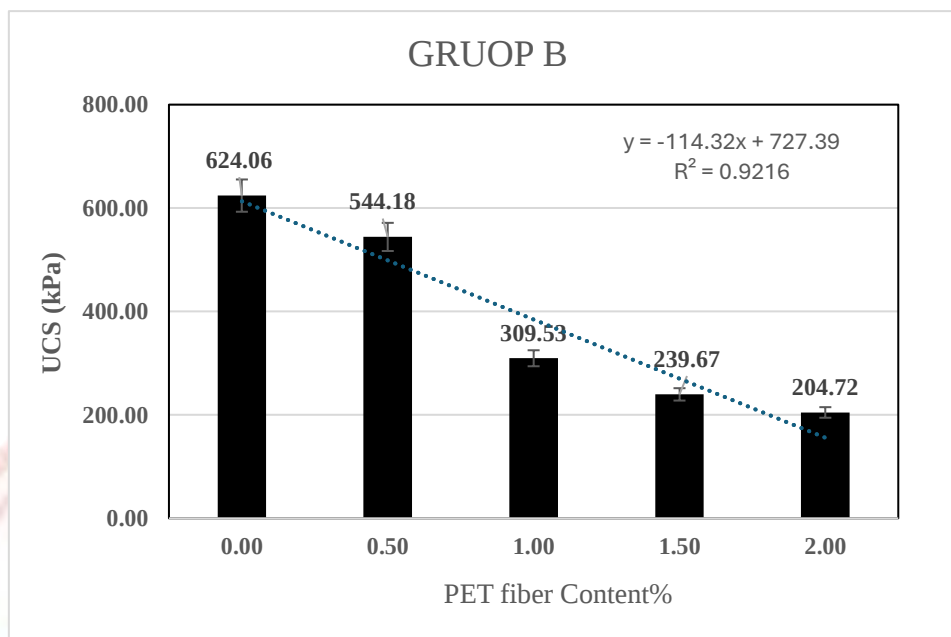
4.2 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET fiber) ที่เหมาะสม ที่ปริมาณซีเมนต์ 5%

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัด ที่ใช้ปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่แตกต่างกัน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังอัดในทรายซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ 5% โดยจัดให้เป็น กลุ่ม B



ภาพที่ 4-3 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม B

จากภาพที่ 4-3 แสดงความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) เทียบกับปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ของการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ปริมาณซีเมนต์ 5% หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติกในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0% ได้ค่าความเร็วคลื่น 446.03 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0.5% ได้ค่าความเร็วคลื่น 413.91 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.0% ได้ค่าความเร็วคลื่น 423.91 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.5% ได้ค่าความเร็วคลื่น 392.62 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.0% ได้ค่าความเร็วคลื่น 309.60 m/s และปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.5% ได้ค่าความเร็วคลื่น 340.48 m/s จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณคอนกรีต 5% ค่าความเร็วคลื่น (V_s) ของทรายซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ตามปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่ใส่เพิ่มขึ้น

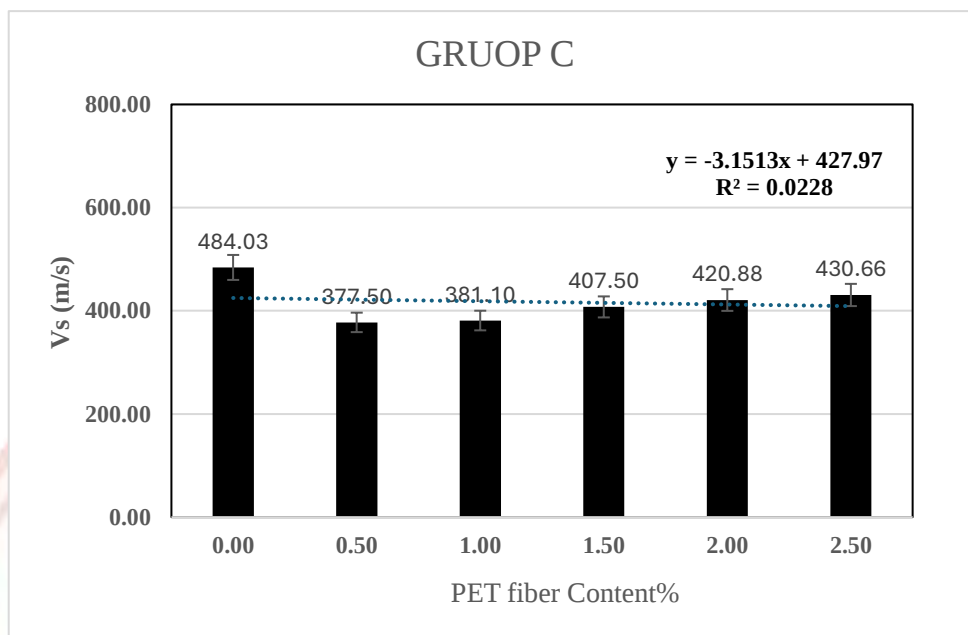


ภาพที่ 4-4 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม B

จากภาพที่ 4-4 แสดงค่า UCS เทียบกับปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่ปริมาณซีเมนต์ 5% หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติกในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 624.06 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 544.18 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 309.53 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 239.67 kPa และปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 204.72 kPa จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของทรายซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยพลาสติกมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่า UCS ที่ปริมาณซีเมนต์ที่ 5% ไม่ผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa

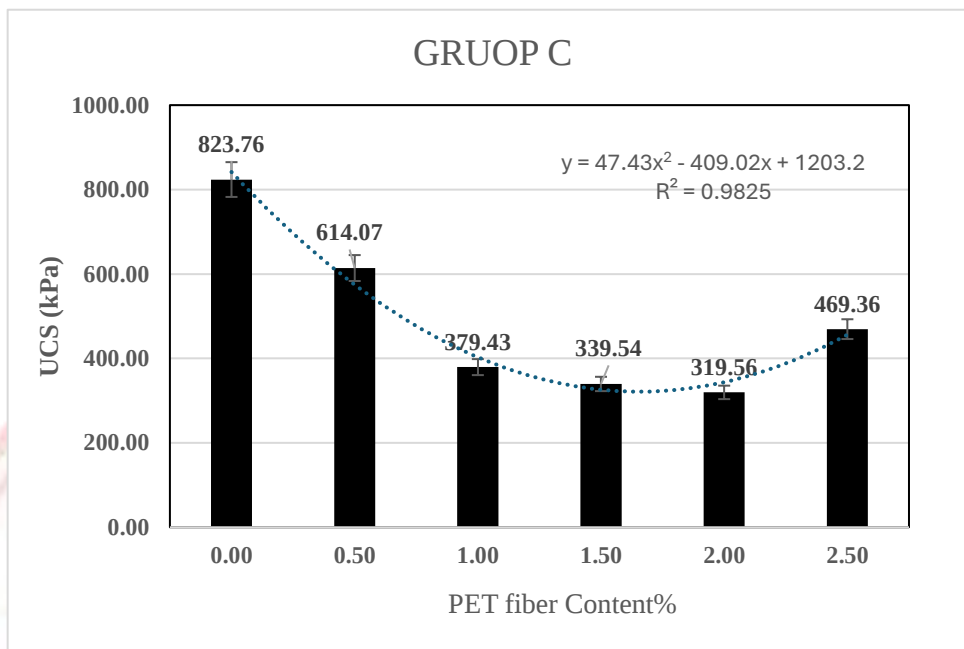
4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET fiber) ที่เหมาะสม ที่ปริมาณซีเมนต์ 7%

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัด ที่ใช้ปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาหาปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่แตกต่างกัน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังอัดในทรายซีเมนต์บดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ 7% โดยจัดให้เป็น กลุ่ม C



ภาพที่ 4-5 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม C

จากภาพที่ 4-5 แสดงความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) เทียบกับปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ของการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ปริมาณซีเมนต์ 7% หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติกในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0% ได้ค่าความเร็วเฉือน 484.03 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0.5% ได้ค่าความเร็วเฉือน 377.50 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.0% ได้ค่าความเร็วเฉือน 381.10 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.5% ได้ค่าความเร็วเฉือน 407.50 m/s ปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.0% ได้ค่าความเร็วเฉือน 420.88 m/s และปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.5% ได้ค่าความเร็วเฉือน 430.66 m/s จากผลการทดสอบที่ปริมาณซีเมนต์ 7% ยืนยันว่าค่าความเร็วเฉือน (V_s) ของทรายซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใส่เส้นใยพลาสติก (PET)

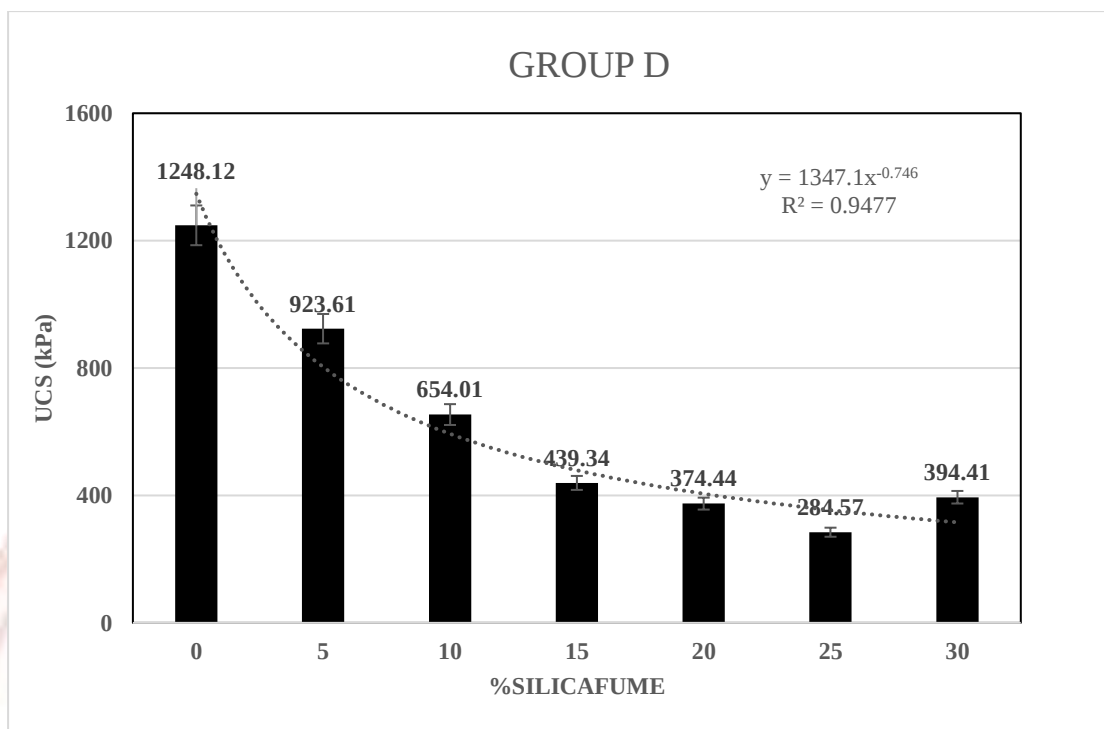


ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม C

จากภาพที่ 4-6 แสดงค่า UCS เทียบกับปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่ปริมาณซีเมนต์ 7% หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติกในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 823.76 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 0.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 614.07 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 379.43 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 1.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 339.54 kPa ปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 319.56 kPa และปริมาณเส้นใยพลาสติก 2.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 469.36 kPa จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่ผสมเส้นใยพลาสติก (PET) ไม่ผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa ผู้วิจัยแนะนำให้พัฒนาเส้นใยพลาสติก (PET) ที่มีความสามารถรับแรงเสียดทานมากขึ้นต่อไป

4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสม

หมายถึงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัดผสมซิลิกาฟุ่ม เพื่อศึกษาหาปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสม ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังอัดในทรายซีเมนต์บดอัด อีกทั้งยังมีวัตถุประสงค์เพื่อนำซิลิกาฟุ่มทดแทนซีเมนต์มาใช้ประโยชน์ในงานทรายซีเมนต์บดอัดได้ผลดีอย่างเมื่อเทียบกับงานทรายซีเมนต์บดอัดแบบปกติ โดยจัดให้เป็น กลุ่ม D

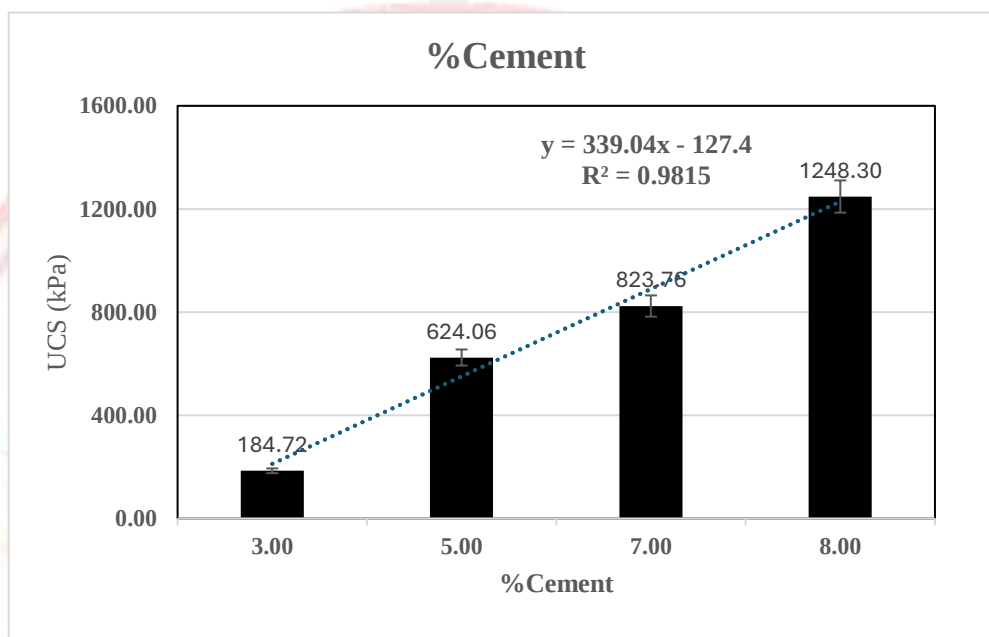


ภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม D

จากภาพที่ 4-7 แสดงค่า UCS เทียบกับปริมาณซิลิกาฟุ่มไว้ในแกน y ทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณซิลิกาฟุ่มในช่วง 0-30% โดยที่ปริมาณซิลิกาฟุ่ม 0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 1248.12 kPa ปริมาณซิลิกาฟุ่ม 5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 923.61 kPa ปริมาณซิลิกาฟุ่ม 10% ได้ค่ากำลังอัด UCS 654.01 kPa ปริมาณซิลิกาฟุ่ม 15% ได้ค่ากำลังอัด UCS 439.34 kPa ปริมาณซิลิกาฟุ่ม 20% ได้ค่ากำลังอัด UCS 374.44 kPa ปริมาณซิลิกาฟุ่ม 25% ได้ค่ากำลังอัด UCS 284.57 kPa และปริมาณซิลิกาฟุ่ม 30% ได้ค่ากำลังอัด UCS 394.41 kPa จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของทรายซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาฟุ่มมากขึ้น จากผลการวิจัยแนะนำให้ใช้ปริมาณซิลิกาฟุ่มไม่เกิน 9% เพื่อให้มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa

4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาซีเมนต์ที่เหมาะสม

หมายถึงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัดที่ใส่ปริมาณซีเมนต์แตกต่างกัน เพื่อศึกษาหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังอัดในทรายซีเมนต์บดอัด จากกลุ่มตัวอย่าง A, B, C และ D

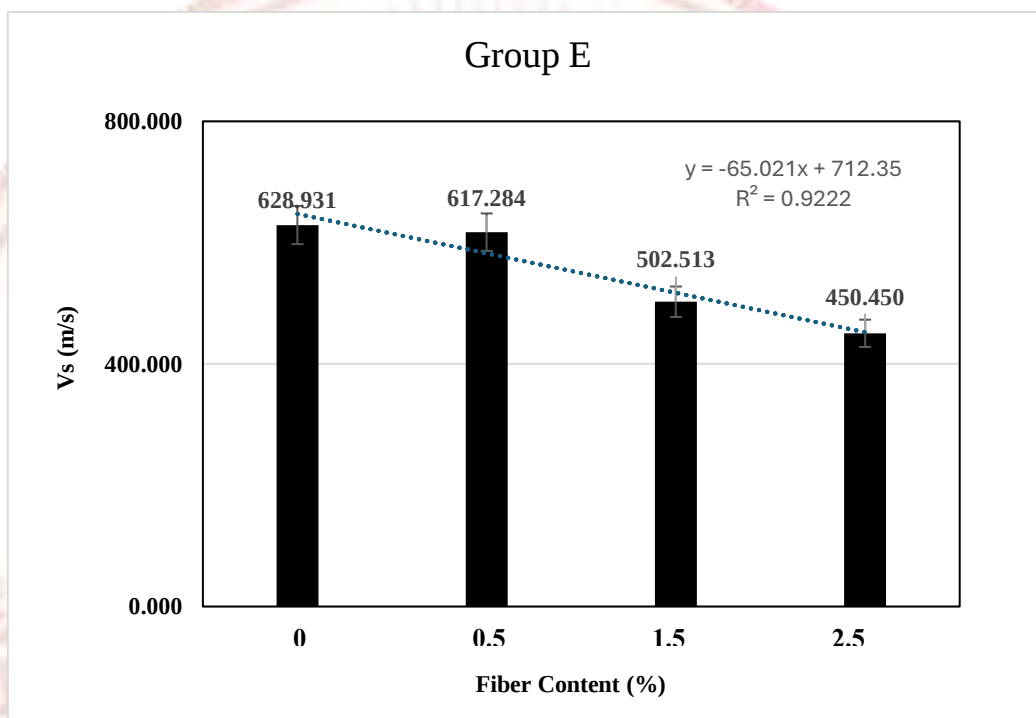


ภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS)
จากกลุ่มตัวอย่าง A, B, C และ D

จากภาพที่ 4-8 แสดงค่า UCS เทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ในช่วง 3-8% โดยที่ปริมาณซีเมนต์ 3% ได้ค่ากำลังอัด UCS 184.72 kPa ปริมาณซีเมนต์ 5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 624.06 kPa ปริมาณซีเมนต์ 7% ได้ค่ากำลังอัด UCS 823.76 kPa ปริมาณซีเมนต์ 8% ได้ค่ากำลังอัด UCS 1248.12 kPa ตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa ผู้วิจัยแนะนำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ไม่ต่ำกว่า 7%

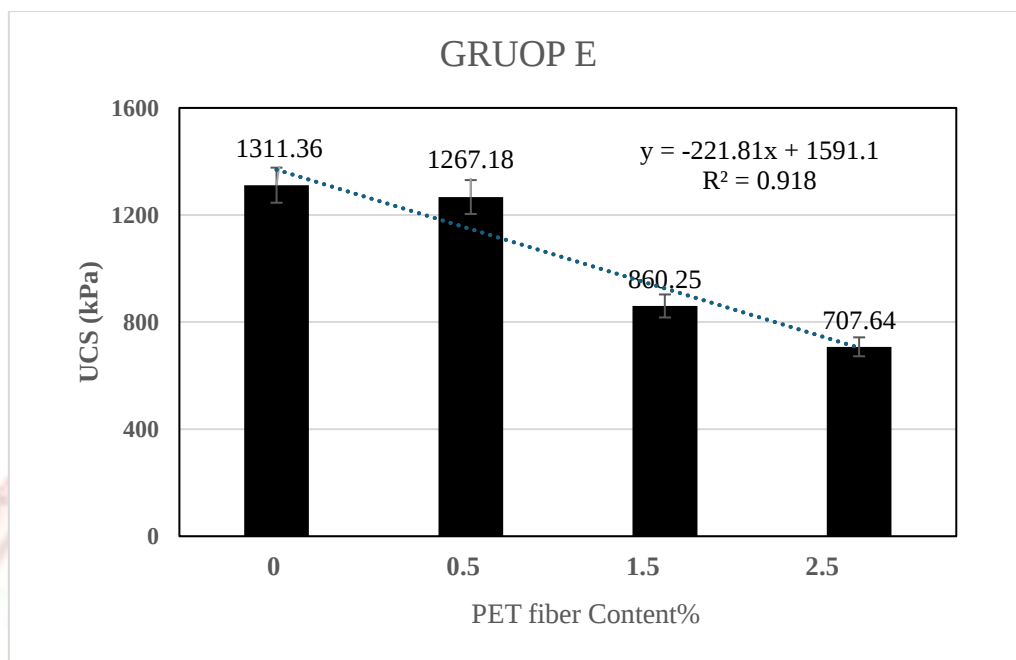
4.6 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสม

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมแรงด้วยเส้นใย เพื่อศึกษาหาปริมาณเส้นใยชนไก่ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังอัดในทรายซีเมนต์บดอัด อีกทั้งยังมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเส้นใยแก้วมาใช้ประโยชน์ในงานทรายซีเมนต์บดอัดได้ผลดีอย่างเมื่อเทียบกับงานทรายซีเมนต์บดอัดแบบปกติ โดยจัดให้เป็นกลุ่ม E



ภาพที่ 4-9 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ทำลาย (Bender Element) กลุ่ม E

จากภาพที่ 4-9 แสดงความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) เทียบกับปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ของการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ปริมาณซีเมนต์ 5% หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยชนไก่ในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยชนไก่ 0% ได้ค่าความเร็วเฉือน 628.93 m/s ปริมาณเส้นใยชนไก่ 0.5% ได้ค่าความเร็วเฉือน 617.28 m/s ปริมาณเส้นใยชนไก่ 1.5% ได้ค่าความเร็วเฉือน 502.51 m/s และปริมาณเส้นใยชนไก่ 2.5% ได้ค่าความเร็วเฉือน 450.450 m/s จากผลการทดสอบที่ปริมาณซีเมนต์ 5% ยืนยันว่าค่าความเร็วเฉือน (V_s) ของทรายซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใส่เส้นใยชนไก่



ภาพที่ 4-10 ผลการทดสอบซีเมนต์ทรายบดอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) กลุ่ม C

จากภาพที่ 4-10 แสดงค่า UCS เทียบกับปริมาณเส้นใยชนไก่ หลังจากบ่ม 28 วัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใยชนไก่ในช่วง 0-2.5% โดยที่ปริมาณเส้นใยชนไก่ 0% ได้ค่ากำลังอัด UCS 1311.36 kPa ปริมาณเส้นใยชนไก่ 0.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 1267.18 kPa ปริมาณเส้นใยชนไก่ 1.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 860.25 kPa และสุดท้ายปริมาณเส้นใยชนไก่ 2.5% ได้ค่ากำลังอัด UCS 707.64 kPa จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของทรายซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณชนไก่มากขึ้น ทั้งนี้ตามมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa ผู้วิจัยแนะนำให้ปริมาณเส้นใยชนไก่ไม่เกิน 2.5%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยเรื่อง การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่เพื่อพัฒนากำลังอัดของทรายซีเมนต์บดอัดให้สามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้น โดยเส้นใยขนไก่ที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมปศุสัตว์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เส้นใยพลาสติก (PET) และเส้นใยขนไก่ และหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้จำแนกเป็น 3 ตัวอย่าง

1. กลุ่ม A การเพิ่มเส้นพลาสติก (PET) ที่ 0.5%, 1%, 1.5%, 2.0% และ 2.5% ต่อปริมาตรตัวอย่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ 3%
 2. กลุ่ม B การเพิ่มเส้นพลาสติก (PET) ที่ 0.5%, 1%, 1.5%, 2.0% และ 2.5% ต่อปริมาตรตัวอย่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ 5%
 3. กลุ่ม C การเพิ่มเส้นพลาสติก (PET) ที่ 0.5%, 1%, 1.5%, 2.0% และ 2.5% ต่อปริมาตรตัวอย่าง ที่ปริมาณซีเมนต์ 7%
 4. กลุ่ม D การลดปริมาณซีเมนต์และเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูม โดยความเข้มข้นของซิลิกาฟูมที่ 0%, 5%, 15% และ 25% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์
 5. กลุ่ม E การเพิ่มเส้นใยขนไก่ที่ 0.5% , 1.5% และ 2.5% ต่อปริมาตรตัวอย่าง
- โดยใช้วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) และแบบไม่ทำลาย (Bender Element) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์สามารถ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 ข้อสรุปปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่เหมาะสมกับการบดอัด(กลุ่มตัวอย่าง A B และC)

จากผลการทดสอบผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเส้นใยพลาสติก (PET) ที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มตัวอย่างนี้คือกลุ่ม C2 ที่ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ที่ 7% และเส้นใยพลาสติก ที่ 1% ที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 614.07 kPa ซึ่งมากที่สุดในกลุ่มใส่เส้นใยพลาสติก (PET) แต่ไม่เพียงพอที่จะผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa ผู้วิจัยแนะนำให้พัฒนาเส้นใยพลาสติก (PET) ที่มีความสามารถรับแรงเสียดทานได้มากขึ้นต่อไป

5.2 ข้อสรุปปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับการบดอัด (กลุ่มตัวอย่าง A, B, C และ D)

จากผลการทดสอบผู้วิจัยสามารถสรุปได้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์ ที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มตัวอย่างนี้คือกลุ่ม C1 ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 7% โดยกำลังอัดมีค่าเท่ากับคือ 823.76 kPa ซึ่งเพียงพอที่จะผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa และกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น

5.3 ข้อสรุปปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมกับการบดอัด (กลุ่มตัวอย่าง D)

จากผลการทดสอบผู้วิจัยได้ข้อสรุปได้ว่าความเข้มข้นของซิลิกาฟุ่ม ที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มตัวอย่างนี้คือ กลุ่ม D2 ที่ใส่ปริมาณซิลิกาฟุ่มปริมาณ 5% โดยกำลังอัดมีค่าเท่ากับคือ 923.61 kPa ซึ่งกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงขึ้นเมื่อซิลิกาฟุ่มเพิ่มขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของทรายซีเมนต์ลดลง จากสมการผู้วิจัยแนะนำให้ใช้ปริมาณซิลิกาฟุ่มไม่เกิน 9% เพื่อให้มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa

5.4 ข้อสรุปปริมาณเส้นใยขนไก่ที่เหมาะสมกับการบดอัด(กลุ่มตัวอย่าง E)

จากผลการทดสอบคณะวิจัยได้ข้อสรุปได้ว่าปริมาณเส้นใยขนไก่ที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มตัวอย่าง E4 ที่มีปริมาณเส้นใยขนไก่ 2.5% โดยกำลังอัดมีค่าเท่ากับคือ 707.64 kPa ซึ่งเพียงพอที่จะผ่านมาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ 689 kPa โดยกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงขึ้นเมื่อเส้นใยขนไก่เพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] McHenry C.S. “Determination of precise location and orientation of the Escherichia coli dnaE gene” J. Bacteriol. 158(1984) 455-459
- [2] Houben H. “Earth construction : A comprehensive guide” Construct Manage. (1994)
- [3] Easton D. “The rammed earth house” ISBN 978-1-933392-37-0 (1994)
- [4] Guillaud H., Joffroy T. and Odul P. (1995) “Compress earth blocks: manual of design and construction” Building Advisory Service and Information Network – BASIN
- [5] ตระกูล จีระ. อิทธิพลเนื่องจากอายุที่เพิ่มขึ้นของดินผสมซีเมนต์ โดยการทดสอบเป็นเดอร์อีลีเมนต์. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554
- [6] ธเนศ เกษกลิ่น. ขบวนการไปโอซีเมนต์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดิน. วิชานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556
- [7] ทนงค์ดี ออกผล. การศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการที่บน้ำของดินเหนียวปากแม่น้ำ. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2561
- [8] พิธาน ไพโรจน์. เพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลาปาง ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม 2562 – มิถุนายน 2562
- [9] วฤต รัตนรุ่งโรจน์ และคณะ. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยปูนซีเมนต์ผสมผงตะกรันเหล็กและเถ้าชีวมวล จากโรงงานผลิตกระดาษ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร, 2563
- [10] Ghavami K., Toledo Filho R.D. and Barbosa N.P. (1999) “Behavior of composite soil reinforced with natural fibers” Cement and Concrete Composite
- [11] Hejazi S.M., Sheikhzadeh M., Abtahi S.M. and Zadhoush A. (2012) “A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers”
- [12] กัญจน์ สลึงค์ และคณะ. การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยมาตรฐานด้วยวัสดุผสมซีเมนต์-

- โพลีเมอร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จังหวัดชลบุรี, 2563
- [13] สุรัตน์ ศรีจันทร์ และวีระศักดิ์ละอองจันทร์ ผลของขนาดเส้นพลาสติกต่อกำลังต้านทานแรงอัดของอิฐดินดิบที่เสริมกำลังด้วย พลาสติกโพลีเอทิลีน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 9 ฉบับที่ 1, 2563
- [14] จักราวุธ ต้นสกุล และคณะ. การปรับปรุงพฤติกรรมหลังการวิบัติของดินซีเมนต์มวลเบาผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน วารสารวิชาการพระเจ้าเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 28 ฉบับที่ 1, 1 ม.ค. - มี.ค. 2561
- [15] Piriyaikul, K., 2010. A Development of a Bender Element Apparatus. The Journal of KMUTNB., Vol. 20, No. 2
- [16] ASTM D8295-19 Standard Test Method for Determination of Shear Wave Velocity and Initial Shear Modulus in Soil Specimens using Bender Elements.
- [17] Prapatsorn Prathungthai, Chalermpon Wungsumpow, Sakol Pochalard, Keeratikan Piriyaikul "Improving Mechanical Behaviour of Compacted Cement Sand mixed with Glass Powder from Glass Industry and Glass Fiber for Green Construction Materials" King Mongkut's University of Technology North Bangkok
- [18] ปริญญญา จินดาประเสริฐ "ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และคอนกรีต", สมาคมคอนกรีตไทย (2547)
- [19] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล "ซิลิกาฟูม", สมาคมคอนกรีตไทย ฉบับที่ 1 เดือนสิงหาคม (2550)
- [20] Jeffrey W. Kock ; (May, 2006) Physical and Mechanical Properties of Chicken Feather Materials Georgia Institute of Technology
- [21] Lattana Syllsomchanh และคณะ. ผลกระทบของการใช้เศษพลาสติกแทนที่ทรายต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย Vol.8 No.1 January-June 2020



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นและโมดูลัสเฉือนของดินผสมซีเมนต์

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบของกลุ่ม A

Group A	OPC (%)	PET FIBER CONTENT (%)	กำลังอัด (kPa)	V_s (m/s)	CURING TIME (day)
A1	3	0	184.72	378.93	28
A2	3	0.5	49.92	398.88	28
A3	3	1.0	0	271.59	28
A4	3	1.5	59.92	275.56	28
A5	3	2.0	39.95	326.80	28
A6	3	2.5	59.92	366.17	28

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบของกลุ่ม B

Group A	OPC (%)	PET FIBER CONTENT (%)	กำลังอัด (kPa)	V_s (m/s)	CURING TIME (day)
B1	5	0	624.06	446.03	28
B2	5	0.5	544.18	413.91	28
B3	5	1.0	309.53	423.91	28
B4	5	1.5	239.67	392.62	28
B5	5	2.0	204.70	309.60	28
B6	5	2.5	0	340.48	28

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบของกลุ่ม C

Group A	OPC (%)	PET FIBER CONTENT (%)	กำลังอัด (kPa)	V_s (m/s)	CURING TIME (day)
C1	8	0	823.76	484.03	28
C2	8	0.5	614.07	377.50	28
C3	8	1.0	379.43	381.10	28
C4	8	1.5	339.54	407.50	28
C5	8	2.0	319.56	420.88	28
C6	8	2.5	469.36	430.66	28

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบของกลุ่ม D

Group A	OPC (%)	FIBER CONTENT (%)	OPC (%) : SILICAFUME (%)	กำลังอัด (kPa)	CURING TIME (day)
D1	8	0	100:0	1248.12	28
D2	8	0	95:05	923.61	28
D3	8	0	90:10	654.01	28
D4	8	0	85:15	439.34	28
D5	8	0	80:20	374.44	28
D6	8	0	75:25	284.57	28
D7	8	0	70:30	394.41	28

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบของกลุ่ม E

Group A	OPC (%)	Chicken FIBER CONTENT (%)	กำลังอัด (kPa)	V_s (m/s)	CURING TIME (day)
E1	5	0	1311.36	628.93	28
E2	5	0.5	1267.18	617.28	28
E3	5	1.5	860.25	502.51	28
E4	5	2.5	707.64	450.45	28

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายจรัสพงษ์ ภูทอง
ชื่อการค้นคว้าอิสระ	การปรับปรุงกำลังอัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซีลิกาฟุ่ม เส้นใย PET และเส้นใยขนไก่
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ
ประวัติ	ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 8 มีนาคม 2536 ปัจจุบันอาศัยอยู่ 18/88 ติมาร์คคอนโด สุทธิสาร แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปี 2560 ประวัติการทำงาน ปัจจุบันทำงานที่สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร