



การปรับปรุงกำลังตัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่

นายอาสา มาศจร

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การปรับปรุงกำลังตัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟุม และเส้นใยขนไก่



การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงการค้นคว้าอิสระ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การปรับปรุงกำลังตัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่

โดย นายอาสา มาศจร

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติกานต์ พิริยะกุล)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน)

ชื่อ : นายอาสา มาศจร
 ชื่อการค้นคว้าอิสระ : การปรับปรุงกำลังตัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติกานต์ พิริยะกุล
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

สารนิพนธ์ศึกษาการเพิ่มกำลังของดินทรายบดอัด ผสมด้วยปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดปริมาณซีเมนต์และเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงดัดตลอดจนลดปริมาณของเสียเพื่อป้องกันมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้ใช้ขนไก่ซึ่งเป็นเส้นใยจากธรรมชาติที่ได้จากอุตสาหกรรมปศุสัตว์เพื่อการวิจัย วิธีการทดสอบแบบทำลาย โดยการทดสอบกำลังดัดแบบสามจุด ตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 อัตราส่วนทดลองประกอบด้วยสัดส่วนต่างๆ โดยใช้ปริมาณเส้นใยขนไก่ ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยปริมาตร ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 3, 5, และ 7 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณซิลิกาฟูมต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนผกผันที่ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 โดยน้ำหนักแห้ง จากผลการทดสอบคณะวิจัยสรุปว่า คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินทรายบดอัด ผสมด้วยปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และเส้นใยขนไก่ ได้กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น การผสมเส้นใยขนไก่มีผลต่อความเหนียวที่ระยะแอนตัว L/150 และกำลังดัดคงเหลือที่ระยะแอนตัว L/150 อัตราส่วนผสมไม่มีผลต่อดัชนีความเหนียว และอัตราส่วนกำลังสูงสุด

(มีจำนวนทั้งสิ้น 61 หน้า)

คำสำคัญ : การปรับปรุงดิน ดินทราย ซิลิกาฟูม ขนไก่ ทรายซีเมนต์

อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก

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

ABSTRACT

This study aims to investigate the flexural strength improvement of compacted sandy soil reinforced with cement, silica fume, and natural chicken feather fibers. The objective is to enhance flexural performance while reducing cement consumption and promoting the reuse of agricultural waste to mitigate environmental pollution. Mechanical testing was conducted using the three-point load test method based on ASTM C1609-10. Experimental variables included chicken feather fiber contents of 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 2.5% by volume; cement contents of 3%, 5%, and 7% by dry weight; and varying ratios of silica fume to cement at 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, and 70:30 by dry weight. The test results showed that flexural strength increased with higher cement content. The addition of silica fume in appropriate proportions significantly enhanced the cementitious performance. Moreover, the incorporation of chicken feather fibers contributed to improvements in toughness at a deflection of $L/150$ and residual flexural strength at $L/150$. However, variations in the mixing ratios had no significant effect on the ductility index (DI) or the peak strength ratio (PSR).

(Total 61 Pages)

Keywords: Soil improvement, Sand, Silica Fume, Chicken Feather, Sand Cement

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติگانต์ พิริยะกุล ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำติดตามดูแล ตลอดจนช่วย แก้ไขปัญหาต่างๆ จนสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของสารนิพนธ์ฉบับนี้ได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน คณะกรรมการสอบสารนิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อชี้แนะที่เป็นประโยชน์ ทำให้สารนิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ในมหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกและดูแลในการทำวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่ส่งเสริมค่าเล่าเรียนและที่คอย ผลักดันให้กำลังใจส่งเสริมการศึกษาในระดับปริญญาโทเสมอมา และขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษา และเพื่อนร่วมชั้นเรียนวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่คอย เป็นแรงกระตุ้นผลักดันให้ผู้วิจัยต้องตั้งใจศึกษาจนประสบความสำเร็จ

อาสา มาศจร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.1.1 ทฤษฎี	4
2.1.2 ซิลิกาฟุ่ม	6
2.1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
2.1.4 ขนไก่	10
2.1.5 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio W/C)	11
2.1.6 การปรับปรุงคุณภาพดิน	13
2.1.7 การเสริมแรงด้วยเส้นใย	14
2.1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	28
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	28
3.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ	29
3.3 การทดสอบ	33
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	35
3.5 การคำนวณกำลังรับแรงดัด	37
3.6 การคำนวณอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า	37
3.7 การคำนวณดัชนีความยืด	38
3.8 การคำนวณอัตราส่วนกำลังดัดสูงสุด	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	39
4.1 ผลการทดลองการรับน้ำหนักที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ	39
4.2 ผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณน้ำต่อซีเมนต์	41
4.3 ผลการทดลองเมื่อเพิ่มซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนต่างๆ	42
4.4 ผลการทดลองเมื่อเติมเส้นใยขนไก่	44
4.5 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน	46
4.6 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า	47
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและอภิปรายผล	49
5.1 สรุปผลการวิจัย	49
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก ก ภาพลักษณะรอยร้าวคานตัวอย่าง	53
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูลผลการทดสอบ	57
ประวัติผู้เขียน	61

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบหลักทางเคมีของทราย	5
ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติของทรายในงานก่อสร้างกรุงเทพมหานคร	6
ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม	7
ตารางที่ 2-4 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
ตารางที่ 2-5 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5	9
ตารางที่ 2-6 แสดงคุณสมบัติของชนไก่	10
ตารางที่ 2-7 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างของทรายซีเมนต์	22
ตารางที่ 2-8 การทำงานของเส้นใย	25
ตารางที่ 3-1 แสดงอัตราส่วนผสมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด	30
ตารางที่ 3-2 แสดงสัดส่วนผสมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด	30
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานทรายซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C1609	48

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 แสดงแผนภูมิขนาดคละของมวลรวม	5
รูปที่ 2-2 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟุ่มควบแน่น	8
รูปที่ 2-3 ซิลิกาฟุ่ม	8
รูปที่ 2-4 แสดงโครงสร้างของขนไก่	10
รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดของคอนกรีต	12
รูปที่ 2-6 รูปแบบของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของเส้นใยธรรมชาติ	16
รูปที่ 2-7 แกนทะลายปาล์มก่อนแปรสภาพ	18
รูปที่ 2-8 ลักษณะเส้นใยปาล์มหลังแปรสภาพ	18
รูปที่ 2-9 ค้อนสำหรับเตรียมตัวอย่าง	18
รูปที่ 2-10 แบบหล่อตัวอย่าง	19
รูปที่ 2-11 การติดตั้งเครื่องมือ	19
รูปที่ 2-12 เส้นใยโพลีโพรพิลีน	24
รูปที่ 2-13 ตัวอย่างคานทรายซีเมนต์บดอัด บ่ม 28 วัน	24
รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับระยะการแ่นตัวของ การทดสอบกำลังรับแรงดัด	27
รูปที่ 2-15 แสดงถึงปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นต่อการแตกร้าว	27
รูปที่ 3-1 ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	28
รูปที่ 3-2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	28
รูปที่ 3-3 ซิลิกาฟุ่ม	28
รูปที่ 3-4 เส้นใยขนไก่	28
รูปที่ 3-5 การผสมทรายซีเมนต์บดอัด	32
รูปที่ 3-6 การเก็บตัวอย่างในแบบหล่อ และการบ่มตัวอย่าง	33
รูปที่ 3-7 รูปแสดงการติดตั้งอุปกรณ์	33
รูปที่ 3-8 รูปแสดงการวางตัวอย่างทดสอบ	34
รูปที่ 3-9 การบันทึกข้อมูลการทดสอบในโปรแกรม	35
รูปที่ 3-10ก เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและระยะการแ่นตัว สำหรับน้ำหนักสูงสุด ครั้งแรกเท่ากับน้ำหนักสูงสุด	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-10ข เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและระยะการแอ่นตัว สำหรับน้ำหนักสูงสุดมากกว่าน้ำหนักสูงสุดในตอนแรก	36
รูปที่ 3-11ก ความหมายของค่าอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า	37
รูปที่ 3-11ข ความหมายของค่าอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า	37
รูปที่ 4-1 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม A	39
รูปที่ 4-2 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่างๆ	40
รูปที่ 4-3 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))	40
รูปที่ 4-4 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม B	41
รูปที่ 4-5 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ที่อัตราส่วน W/C ต่างๆ	42
รูปที่ 4-6 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))	42
รูปที่ 4-7 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม C	43
รูปที่ 4-8 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ผสมเส้นใยขนไก่	43
รูปที่ 4-9 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))	44
รูปที่ 4-10 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม D	45
รูปที่ 4-11 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ผสมเส้นใยขนไก่	45
รูปที่ 4-12 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))	46
รูปที่ 4-13 ความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว (Toughness at L/150,T150(N-m))	46
รูปที่ 4-14 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า ($R_{T,150}^D$)	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทรายแม่น้ำเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้ในงานอย่างแพร่หลาย โดยทรายมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีในด้านการรับแรงอัดจึงมักนำมาใช้กับงานโครงสร้างพื้นฐานและงานก่อสร้างขนาดใหญ่มากมาย แต่ทรายบดอัดที่ผสมซีเมนต์จะมีความเปราะเมื่อรับแรงอัดสูงๆ ทำให้งานโครงสร้างพื้นฐานและงานก่อสร้างฐานรากแตกร้าวเสียหายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติของดินทรายบดอัดผสมเส้นใยและซิลิกาฟุ่มให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสม

การผสมปูนซีเมนต์ลงในดินนั้นเป็นการเพิ่มกำลังอัดให้กับดิน แต่ดินที่ได้นั้นไม่ได้มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มมากนัก ซึ่งการเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับดินซีเมนต์นั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี โดยการเพิ่มเถ้าจัมซึ่ง R. Mahdi, et.al (2016) ได้ทำการศึกษาเถ้าจัมและเถ้าลอยในงานคอนกรีตเพื่อทดแทนทรายและซีเมนต์พบว่าความสามารถในการทำงานของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณเถ้าจัมเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ทราย เมื่ออายุ 90 วันขึ้นไปในทางกลับกันยิ่งเถ้าจัมมากจะทำให้การรับกำลังอัดลดน้อยลงและการเสริมเส้นใยโดย Mu Chen, et.al. (2015) ได้ศึกษาการประเมินในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการพฤติกรรมความแข็งแรงของสารผสมดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยโพลิโพรพิลีนการวิจัยพบว่าสารเติมแต่งสามารถปรับปรุงความแข็งแรงและความเหนียว ในการผสมดินโดยการปรับปรุงดินซีเมนต์จะนำเถ้าจัมและเส้นใยแก้วมาผสมเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงอัดและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น

ชนไก่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟาร์มสัตว์ปีก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะมูลฝอยโดยปกติแล้วนิยมกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ เผาทำลาย ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากคุณสมบัติบางประการของชนไก่ เช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ที่อยู่ในช่วง 10 – 70 MPa และมีมอดุลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) มีค่าอยู่ในช่วง 3 – 50 GPa ซึ่งเทียบได้กับเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ[2] ด้วยเหตุนี้หากมีการนำเส้นใยชนไก่มาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ เช่น การรับกำลังดึงและอัด มุมเสียดทาน และกำลังรับแรงดัด

จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นผู้จัดทำได้แนวคิดที่จะศึกษาการเพิ่มกำลังของดินทรายบดอัดผสมด้วยปูนซีเมนต์ ผสมซิลิกาฟุ่มและเส้นใยชนไก่เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมด้วยการทดสอบแบบ

ทำลายโดยวิธีการทดสอบกำลังดัด (Three point load test) ภายหลังจากการบ่มที่ 28 วัน ที่สามารถทำให้ดินทรายนำมาปรับปรุงคุณภาพมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมในการรับแรงอัดได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่มและเส้นใยขนไก่ ด้วยการทดสอบกำลังดัด (Three point load test)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ต่อกำลังดัดของดินทราย

1.2.3 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในงาน ทรายซีเมนต์บดอัด

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการเสริมเส้นใยขนไก่ต่อกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัด

1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดที่เสริมด้วยวัสดุต่างๆ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ใช้ทรายแม่น้ำ ที่สามารถหาได้ทั่วไปจากโครงการก่อสร้าง หรือร้านวัสดุก่อสร้างใน กรุงเทพมหานคร กำหนดอัตราส่วนผสมของน้ำและทรายคงที่ที่ความชื้น 6.19%

1.3.2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement Type 1) มาตรฐาน มอก.15-2532 โดยกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมตัวอย่างที่อัตราส่วน 3% 5% และ 7% โดยน้ำหนักแห้ง

1.3.3 ใช้ซิลิกาฟุ่ม (SiO_2) ผสมเพิ่มในอัตราส่วนต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนผกผันกัน ได้แก่ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30

1.3.4 ขนไก่ที่นำมาทดสอบสามารถหาได้จากผลิตภัณฑ์ที่นำขนไก่มาใช้ประโยชน์ โดยยังคง สภาพลักษณะของเส้นขนไก่ นำมาทำความสะอาดละเอียดเพื่อลดความชื้น โดยอัตราส่วนผสมของขนไก่ อยู่ที่ 0% 0.5% 1% 1.5% 2% และ 2.5% โดยปริมาตร

1.3.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มคือ 28 วัน

1.3.6 ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของทรายซีเมนต์บดอัดเสริมเส้นใยขนไก่ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงดัด ASTM C1609-10

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ ชิลิกาฟุม และเส้นใยขนไก่ ด้วยการทดสอบกำลังดัด

1.4.2 ได้ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลต้านกำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์บดอัดผสมชิลิกาฟุมผสมขนไก่ในสัดส่วนต่างๆ

1.4.3 ได้ทราบถึงอัตราส่วนของทรายซีเมนต์บดอัดที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์สูงสุดได้

1.4.4 สามารถนำไปต่อยอดการนำขนไก่มาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรม เพื่อลดขยะที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมปศุสัตว์ได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ทรายเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีการนำใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลานาน มีการประมาณการการใช้ทรายของอุตสาหกรรมที่นำทรายจากแม่น้ำมาใช้มีปริมาณมากกว่า 60% ของจำนวนทรายทั้งหมดที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตทั่วโลก ถึงแม้ว่าการนำทรายมาใช้ยังคงมีส่วนที่ต้องคำนึงถึงด้านคุณสมบัติ ของทรายแม่น้ำที่นำมาใช้ทางด้านคุณภาพและลักษณะที่แตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด ความแปรผัน ที่กล่าวมานี้อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของส่วนผสมที่มีการนำทรายเข้ามาเป็นส่วนผสมและการกำหนดความเหมาะสมของทราย ก่อนนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมซึ่งจะทำให้ คุณสมบัติของส่วนผสมที่มีทรายผสมผสมอยู่มีคุณภาพ ดีและทนทาน แต่ยังคงพบ ปัญหาโดยเฉพาะรอยแตกร้าวของวัสดุที่ผสมด้วยทราย

การปรับปรุงคุณภาพทรายเป็นกระบวนการใดๆที่ทำให้ทรายที่มีอยู่ตามธรรมชาติมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น เช่น เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน เพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อน ความสามารถในการรับแรงอัด ความสามารถในการรับแรงดัด โดยอาจใช้วิธีการต่างๆ เช่น การบดอัด การทำให้แน่นด้วยเทคนิคเฉพาะ หรือการใช้สารผสมเพิ่มมาเติมลงในทราย โดยจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆหลายประการ เช่น คุณสมบัติเดิมของทรายที่ทำการปรับปรุง แร่ธาตุส่วนประกอบของสารผสมเพิ่มที่นำมาใช้ปรับปรุง ราคาต้นทุน หรืออาจจะเป็นความสะดวกในการปฏิบัติงาน เป็นต้น

2.1.1 ทราย

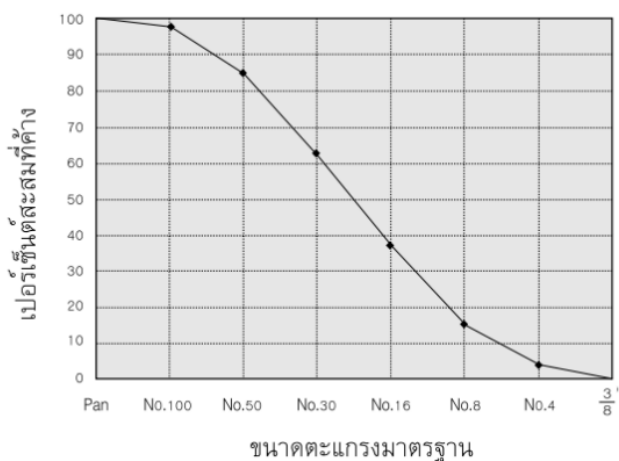
ทรายมีลักษณะทางกายภาพที่โดดเด่น เช่น ความแข็ง ทนต่อสารเคมี ทนความร้อน และราคาที่ไม่สูงมากนัก ทรายมีแร่ธาตุที่ประกอบด้วย ควอตซ์ (Quartz) ซึ่งพบมากที่สุด ในทราย มีความแข็งแรงสูง และทนการกัดกร่อน เฟลด์สปาร์ (Feldspar) เป็นกลุ่มแร่ที่พบรองจากควอตซ์ ไมก้า (Mica) แคลไซต์ (Calcite) เป็นต้น

องค์ประกอบทางเคมีของทรายนั้น ขึ้นอยู่กับแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบ โดยทั่วไปทรายมีองค์ประกอบหลักดังแสดงในตารางที่ 2-1

ธาตุ	สูตรเคมี	เปอร์เซ็นต์ในทรายทั่วไป
ซิลิกา (Silica)	SiO_2	60 - 99%
อะลูมินา (Alumina)	Al_2O_3	5 - 15%
เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide)	Fe_2O_3	1 - 5%
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	CaO	1 - 10%
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	MgO	0.5 - 5%
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium Oxide)	K_2O	1 - 3%
โซเดียมออกไซด์ (Sodium Oxide)	Na_2O	0.5 - 3%

ตารางที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบหลักทางเคมีของทราย

ทรายที่ใช้ในงานวิศวกรรมนั้น ต้องมีขนาดละเอียดที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการอัดแน่นที่ดี ซึ่งการวิเคราะห์ขนาดละเอียดนั้นสามารถทำได้โดยการเก็บตัวอย่างมาปริมาณหนึ่ง นำมาร่อนบนตะแกรงขนาดต่างๆ ซึ่งวางเรียงกันตามขนาดช่องว่างของตะแกรงจากขนาดใหญ่สุดอยู่ข้างบน จนถึงขนาดเล็กสุด โดยการเขย่าชุดตะแกรงดังกล่าวแล้วนำผลที่ได้มาชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าน้ำหนักที่ค้าง เบอ์เซ็นต์ ค้าง เบอ์เซ็นต์ที่ค้างสะสม และเบอ์เซ็นต์ที่ผ่านสะสม สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิตัวอย่างได้ ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แสดงแผนภูมิขนาดละเอียดของมวลรวม

ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย เป็นตัวบ่งบอกว่าลักษณะทรายนั้นหยาบหรือทรายละเอียด ค่าโมดูลัสความละเอียดไม่สามารถใช้บอกขนาดละเอียดของมวลรวมได้ แต่สามารถใช้ควบคุมความสม่ำเสมอของมวลรวมที่มาจากแหล่งเดียวกัน ทรายที่มีโมดูลัสความละเอียดสูงคือทรายที่มีความหยาบมากกว่าทรายที่มีโมดูลัสความละเอียดต่ำ

ทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายที่สามารถหาได้จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง หรือร้านวัสดุก่อสร้างในกรุงเทพมหานครที่มีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2-2

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 void ratio	0.83
Minimum void ratio	0.28
Maximum dry unit weight (kN/m^3)	15.70
Optimum moisture content (%)	6.19

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติของทรายในงานก่อสร้างกรุงเทพมหานคร

2.1.2 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นชื่อเรียกวาสดผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของการผลิตซิลิกอนเมทัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ตซ์(Quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี Electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง $2000^{\circ}C$ ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO_2 ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้

องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO_2 ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็น ส่วนใหญ่ และมีมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไปส่วนที่เหลือเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 Fe_2O_3 CaO MgO และออกไซด์อื่นอีกร้อยละ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO_2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟุ้ง ดังแสดงในตารางที่ 2-3

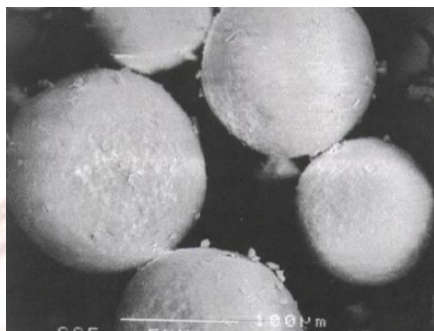
องค์ประกอบทางเคมี	ซิลิกาฟุ่ม
Silicon dioxide (SiO ₂),%	92.00
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃),%	0.70
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃),%	1.20
Calcium oxide (CaO),%	0.20
Magnesium oxide (MgO),%	0.20
ออกไซด์อื่น ๆ	2.6
ความถ่วงจำเพาะ	2.20

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่ม

คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่มที่เห็นเด่นชัด คือ เป็นฝุ่นผงละเอียดมากสี เทาดำหรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟุ่มควบแน่นจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ่มหลายๆ อนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ่มมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200000 ถึง 250000 ตร.ซม./กรัม ขนาดของอนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 15 เท่า เพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการนำซิลิกาฟุ่มมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า ซิลิกาฟุ่มควบแน่น

การใช้ซิลิกาฟุ่มในงานคอนกรีต โดยทั่วไปจะใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อคอนกรีตสดเนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงมาก จึงต้องการปริมาณน้ำที่มากขึ้นในการผสมคอนกรีต สามารถแก้ไขโดยใช้สารลดน้ำเข้าช่วย ในการเขี่ยน้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา และยังไม่มีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของคอนกรีต ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วการใช้ซิลิกาฟุ่มผสมคอนกรีตจะได้กำลังอัดสูงมาก มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำมากด้วย การใช้ ซิลิกาฟุ่มในปริมาณที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ 3 ถึง 4 เท่าการใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 จะช่วยลดการขยายตัวของปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกาได้ดี ในปัจจุบันนิยมใช้ซิลิกาฟุ่มในคอนกรีตกำลังสูงเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก

สิ่งที่ควรระวังคือ ในการผสมควรมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งคอนกรีต ตรวจสอบว่าสามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษได้ดีเพื่อจะลดปริมาณน้ำลง



รูปที่ 2-2 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟุ่มควบแน่น



รูปที่ 2-3 ซิลิกาฟุ่ม

ความแตกต่างระหว่างซิลิกาฟุ่มควบแน่น (Densified Silica Fume) และซิลิกาฟุ่มไม่ควบแน่น (Undensified Silica Fume) ซิลิกาฟุ่มหรือไมโครซิลิกา มักมีอยู่ในสามรูปแบบหลัก ได้แก่ ซิลิกาฟุ่มไม่ควบแน่น (Undensified), ซิลิกาฟุ่มกึ่งหนึ่ง (Half Densified) และซิลิกาฟุ่มควบแน่น (Densified) ซึ่งซิลิกาฟุ่มควบแน่นเป็นประเภทที่ใช้บ่อยที่สุดในอุตสาหกรรมคอนกรีต กระบวนการผลิตซิลิกาฟุ่มควบแน่นเกิดขึ้นจากการนำซิลิกาฟุ่มไม่ควบแน่นมาผ่านกระบวนการเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของมวล (bulk density) ซึ่งสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 400-720 กิโลกรัม/เมตร³ การเพิ่มความหนาแน่นมักทำได้โดยการหมุนอนุภาคไมโครซิลิกาในไซโล ซึ่งการหมุนนี้ทำให้เกิดการสะสมของประจุผิวที่ทำให้อนุภาคซิลิกาฟุ่มเกิดการหดตัว ทั้งซิลิกาฟุ่มควบแน่นและไม่ควบแน่นมีขนาดน้ำหนักที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจพบได้โดยการชั่งน้ำหนัก โดยที่ ซิลิกาฟุ่มควบแน่น มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 550-650 กิโลกรัม/เมตร³ และซิลิกาฟุ่มไม่ควบแน่น มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 250-350 กิโลกรัม/เมตร³ [16]

2.1.3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงาน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบของวัตถุดิบจะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผา การปรับส่วนประกอบทางเคมีจะให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติต่างกัน เมื่อผสมกับน้ำปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

ปูนซีเมนต์พบครั้งแรกที่เมืองพอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโคบอลต์ ($MgCo_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาในที่ใช้กัน

ทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ต โดยจะเกิดเป็นสารประกอบหลักสำคัญ 4 ชนิด เช่น ไตรแคลเซียมซิลิเกต, ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต, เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์จะอยู่ในรูปของผลึกที่ละเอียดมากโดยมีส่วนประกอบทางเคมีและชื่อ ย่อดังตารางที่ 2-4

ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ตารางที่ 2-4 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [15]

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัว และแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ สารประกอบและคุณสมบัติบางประการได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-5

สารประกอบและคุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C_3S	49	46	56	25	30
C_2S	25	29	15	50	46
C_3A	12	6	12	5	5
C_4AF	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

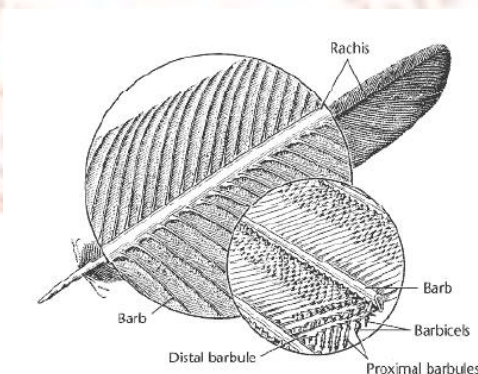
ตารางที่ 2-5 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 [15]

2.1.4 ขนไก่ (Chicken Feather)

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 ไม่ก่อให้เกิดการขีดสี และกันน้ำได้ดี โครงสร้างของขนไก่มีลักษณะเป็นลำต้นหลัก (rachis) ที่แตกกิ่งออกไปในแนวขนาน โดยกิ่งเหล่านี้ถูกยึดด้วย barbicels ที่เป็นขอเกี่ยว ซึ่งคุณสมบัติสำคัญของขนไก่ดังแสดงในตารางที่ 2-6

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

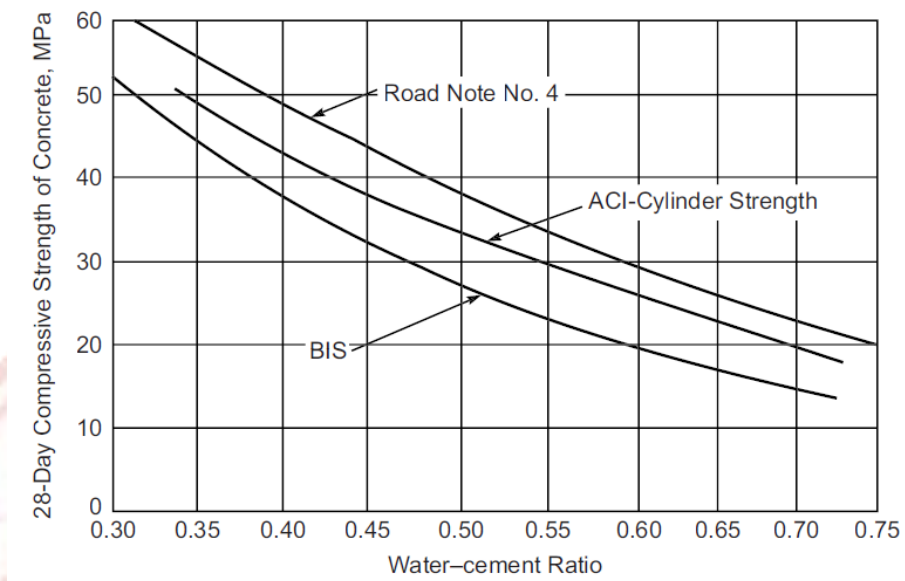
ตารางที่ 2-6 แสดงคุณสมบัติของขนไก่ [2]



รูปที่ 2-4 แสดงโครงสร้างของขนไก่

2.1.5 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio W/C)

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) คืออัตราส่วนของน้ำหนักน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต โดยเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย มักแสดงเป็นทศนิยม น้ำมีความจำเป็นต่อปฏิกิริยาเคมี (ไฮเดรชัน) ที่เกิดขึ้นระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งนำไปสู่การแข็งตัวของคอนกรีต กระบวนการนี้จะสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) ซึ่งเป็นสารยึดเกาะหลักในคอนกรีต ปริมาณน้ำมีอิทธิพลอย่างมากต่อความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว ซึ่งจะกำหนดคุณสมบัติหลายประการของคอนกรีต ในทางทฤษฎี อัตราส่วน W/C ประมาณ 0.35 เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างสมบูรณ์ น้ำปริมาณนี้จำเป็นต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน อย่างไรก็ตาม อัตราส่วน W/C ที่ต่ำเช่นนี้มักจะส่งผลให้ส่วนผสมมีความแข็งและยากต่อการใช้งาน ดังนั้น ในทางปฏิบัติ มักจะต้องใช้น้ำในปริมาณที่สูงกว่าเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทที่เพียงพอสำหรับการผสม การขนส่ง การเท และการบดอัดคอนกรีต น้ำส่วนเกิน นอกเหนือจากที่จำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะสร้างช่องว่างหรือรูพรุนภายในคอนกรีตที่แข็งตัวเมื่อระเหยไป รูพรุนเหล่านี้สามารถส่งผลเสียต่อความแข็งแรง ความทนทาน และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต ความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ต้องการตามทฤษฎีและในทางปฏิบัติ ทำให้เกิดความสมดุลที่สำคัญในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งบ่งชี้ถึงความสำคัญของการปรับให้เหมาะสมและการมีบทบาทของสารผสมเพิ่ม โดยทั่วไปแล้ว อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าจะนำไปสู่แรงอัดที่สูงขึ้น คือหลักการที่ได้รับการยอมรับอย่างดีในเทคโนโลยีคอนกรีต ซึ่งมักเรียกว่ากฎของ Abrams ในทางกลับกัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงกว่าโดยทั่วไปจะส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง อัตราส่วนที่สูงมาก (เช่น สูงกว่า 0.60) สามารถผลิตคอนกรีตสดที่ "เหลวเหมือนซूप" และคอนกรีตที่แข็งตัวที่อ่อนแอและมีรูพรุนได้ ผลกระทบของปริมาณน้ำต่อความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว น้ำส่วนเกินจะสร้างช่องว่างที่ใหญ่ขึ้นและมีจำนวนมากขึ้นเมื่อระเหยไป ซึ่งจะลดความหนาแน่นและความแข็งแรงของเมทริกซ์คอนกรีต อัตราส่วน W/C ที่ต่ำกว่าจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นและกะทัดรัดมากขึ้น โดยมีความพรุนน้อยลง ซึ่งนำไปสู่ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งแรงขึ้นและความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างเพสต์กับอนุภาคของมวลรวมที่แข็งแรงขึ้น [18]



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดของคอนกรีต [19]

2.1.6 การปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดินเป็นกระบวนการใดๆที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นเช่นเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงอัด เพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อนสามารถรับน้ำหนักจากการจราจรและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศเป็นต้นโดยอาจใช้วิธีการต่างๆเช่นการบดอัด[5] การทำให้แน่นด้วยเทคนิคเฉพาะหรือโดยการเติมสารผสมเพิ่มด้วยวัสดุเชื่อมประสาน[5] โดยการเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆหลายประการเช่นคุณสมบัติของดินส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวราคาและความสะดวกในการทำงานเป็นต้น ซึ่งวิธีการปรับปรุงคุณภาพสามารถแบ่งประเภทได้ 3 วิธีทั้งวิธีทางกายภาพ ทางกลและทางเคมี โดยทั่วไปในงานก่อสร้างหลักๆ มักมีการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM D1632 (Compressive Strength of Soil-Cement Mixtures)

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานก่อสร้าง โดยใช้ดินจากแหล่งดั้งเดิมหรือบริเวณใกล้เคียงมาเป็นวัตถุดิบในการผสม เนื่องจากดินจากแต่ละพื้นที่มักมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต่างกัน การเลือกใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงจึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินเป็นสำคัญ โดยทั่วไป ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินจะอยู่ในช่วง 0-10% โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์จะช่วยให้กำลังของวัสดุสูงขึ้นตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงเกินไป อาจไม่คุ้มค่าในแง่เศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะในงานก่อสร้างที่มีงบประมาณจำกัด เช่น งานก่อสร้างบ้านราคาประหยัด จึงแนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์ไม่เกิน 7.5% นอกจากนี้ กำลังของดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม โดยเฉพาะหลังจากบ่มเป็นเวลา 7 วันไปจนถึง 21-28 วัน ซึ่งกำลังอัดของดินซีเมนต์สามารถเพิ่มขึ้นได้มากถึง 70% ดังนั้น การทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ควรทำหลังจากบ่มอย่างน้อย 21 วัน เพื่อให้ได้ค่ากำลังที่แม่นยำและน่าเชื่อถือ

อย่างไรก็ตาม การผสมปูนซีเมนต์ลงในดินอาจทำให้เกิดรอยแยก เนื่องจากการหดตัวของดินซีเมนต์ระหว่างการบ่ม นอกจากนี้ ดินที่ใช้ในงานวิศวกรรมบางกรณีอาจเกิดแรงดัดในโครงสร้างดินส่งผลให้เกิดรอยแยกขยายตัว เมื่อดินได้รับความชื้นหรือน้ำ รอยแยกดังกล่าวอาจเพิ่มขนาดขึ้นจนทำให้โครงสร้างดินหรือคันทางวิบัติได้

การเสริมกำลังของดินด้วยเส้นใยสังเคราะห์จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับดิน โดยช่วยลดการเกิดรอยแยกและเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างดินมีความมั่นคงมากขึ้นและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม

2.1.7 การเสริมแรงด้วยเส้นใย

การเสริมแรง (Reinforcement) คือการนำวัสดุชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติที่ต้องการมาผสมหรือแทรกในวัสดุหลัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านที่วัสดุหลักขาดแคลน การเสริมแรงในทางปฐพีกลศาสตร์ (Geotechnical Engineering) จึงหมายถึงเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน โดยเน้นการพัฒนาตัวแปร (Parameter) ต่างๆ เช่น

- กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength): เพิ่มความต้านทานแรงเฉือนของดิน
- ลดการยุบตัวจากกำลังอัด (Compression Resistance): ลดการทรุดตัวของดินเมื่อได้รับแรงอัด
- ความหนาแน่น (Density): เพิ่มความหนาแน่นเพื่อให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น
- ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Permeability): ลดการซึมผ่านของน้ำเพื่อลดปัญหาการกัดเซาะหรือการพังทลาย

การเสริมแรงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมได้หลายประเภท เช่น

- Stone Columns: เสริมแรงดินอ่อนโดยใช้เสาหินเพื่อรองรับน้ำหนัก
- Root Piles หรือ Micro Piles: เสริมกำลังรับแรงเฉือนในดินอ่อนโดยใช้เสาเข็มขนาดเล็ก
- Soil Nailing: ใช้เหล็กยึดดินตามแนวลาดเอียงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ
- Reinforced Earth: ใช้แถบเสริมแรงหรือแผงเสริมแรงเพื่อเพิ่มกำลังและลดการเคลื่อนตัวด้านข้าง

การเสริมแรงในดิน (Reinforced earth) ถือเป็นวัสดุประกอบที่ช่วยเพิ่มความเสถียรภาพของโครงสร้างและพัฒนาประสิทธิภาพในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว และลดการเคลื่อนตัวด้านข้างอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงสามารถแบ่งตามชนิดได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fiber) เส้นใยสังเคราะห์เป็นวัสดุที่มีความคงทนต่อความชื้นและมีความสามารถในการรับกำลังดัดได้มากกว่าทำให้เป็นที่นิยมอย่างมากในยุคปัจจุบัน เส้นใยสังเคราะห์สามารถแบ่งออกตามชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิต เช่น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene), โพลีเอสเตอร์ (Polyester), โพลีเอทิลีน (Polyethylene), เส้นใยแก้ว (Glass fiber), ไนลอน

(Nylon), เหล็ก (Steel fiber) การเลือกใช้เส้นใยแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการและลักษณะของงาน เพื่อให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการเสริมแรงวัสดุ

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น ปอ เยื่อไผ่ เส้นใยมะพร้าว เป็นต้น ในช่วงแรกของการนำมาใช้ในการเสริมแรง เส้นใยธรรมชาติได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากหาได้ง่ายและต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติด้านความคงทนและความต้านทานต่อการสึกหรอของเส้นใยธรรมชาติยังค่อนข้างต่ำ เมื่อผ่านระยะเวลาใช้งานนาน ทำให้ประสิทธิภาพลดลง จึงมีการคิดค้นเส้นใยสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อทดแทน

เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber) ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาใช้เสริมแรงในงานก่อสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย การเลือกใช้เส้นใยในการเสริมแรงสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้เส้นใยเหล็ก ดินไฟ หรือปอ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปมักพบการใช้งานในโครงสร้างคอนกรีต โดยในอดีตมักเลือกใช้วัสดุเสริมแรงจากธรรมชาติที่มีขนาดเล็ก เช่น ปอ หรือป่าน เพื่อเพิ่มความเหนียว ความยืดหยุ่น และกำลังของวัสดุ [7]

จากการวิจัยพบว่าการใช้เส้นใยธรรมชาติมากกว่า 3% โดยน้ำหนักดินแห้ง จะช่วยพัฒนาค่ากำลัง ความเหนียว และความยืดหยุ่นของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเทคนิคการเสริมแรงด้วยเส้นใยนี้ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานดินซีเมนต์ เนื่องจากสามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันเนื่องมาจากคุณลักษณะของเส้นใยที่ช่วยลดรอยแตกร้าวในเมทริกซ์ดินซีเมนต์

นอกจากนี้ ความยืดหยุ่นของวัสดุมีบทบาทสำคัญในการรับแรง โดยเฉพาะในสถานการณ์เฉพาะ เช่น การเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งทำให้วัสดุที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีความปลอดภัยต่อชีวิตมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นจะช่วยยืดระยะเวลาการพังทลาย ทำให้ผู้คนมีโอกาสรอดพ้นจากอาคารได้ทันเวลา

การประเมินประสิทธิภาพของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสามารถพิจารณาจากความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย เช่น เส้นใยป่านที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ $23\text{ }\mu\text{m}$ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เส้นใยจากลำต้นของไผ่ หรือแม้แต่เส้นใยเหล็กในโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งเส้นใยเหล็กสามารถมีได้หลากหลายรูปแบบ เช่น แท่งเหล็กเสริมแรง (Reinforced Steel Bar) เส้นใยเหล็กขนาดเล็ก (Fiber) หรือโครงตาข่ายเหล็ก (Mesh)

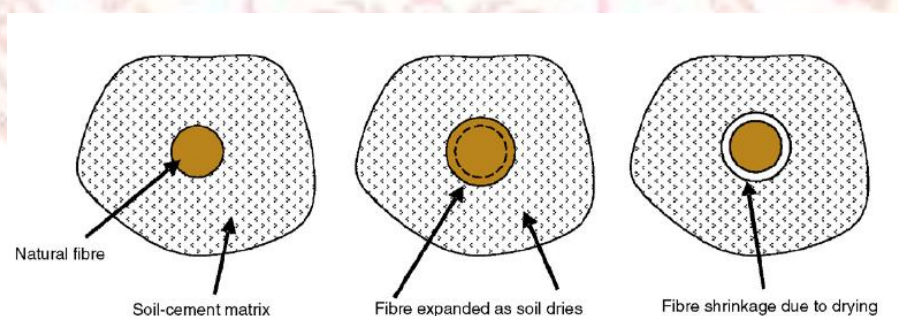
การนำเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยเหล็กมาใช้ในการงานดินซีเมนต์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงและเพิ่มความทนทานของวัสดุ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการคุณสมบัติการรับแรงสูงและความยืดหยุ่นที่ดี

ในปัจจุบัน การศึกษาความสามารถของเส้นใยมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและดินซีเมนต์เมทริก เนื่องจากคุณสมบัติของพื้นผิวสัมผัสส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของวัสดุเสริมแรง ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของพื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและดินซีเมนต์มีอยู่ 3 ตัวแปรดังนี้

1. กำลังเฉือนของดินที่กระทำต่อผิวสัมผัสของเส้นใยและความขรุขระของเส้นใย
2. แรงเสียดทานบนพื้นผิวสัมผัสของเส้นใยเนื่องจากการขยายตัวของดินซีเมนต์
3. คุณสมบัติด้านความเหนียวของดิน

ตัวแปรทั้ง 3 ตัวนี้ส่งผลต่อสภาพธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไปในด้านความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งเส้นใยธรรมชาติจะได้รับผลกระทบอย่างมาก โดยเฉพาะในระหว่างกระบวนการบ่มวัสดุประกอบดินซีเมนต์ ซึ่งอาจทำให้แรงยึดเกาะที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยและดินซีเมนต์ลดลง

ในกระบวนการผสมและสถานะที่ผลิตภัณฑ์แห้ง คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติในการดูดซับความชื้นเมื่อตัวเส้นใยสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นจะส่งผลกระทบต่อดินซีเมนต์เมทริก โดยเมื่อบ่มจนผลิตภัณฑ์มีสภาพแห้ง ความชื้นภายในเส้นใยจะถูกดึงออกมาจนหมดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้เกิดช่องว่างรอบผิวสัมผัสของเส้นใย ทำให้แรงยึดเกาะของเส้นใยธรรมชาติที่ผิวสัมผัสอ่อนแอลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-6 [8]



รูปที่ 2-6 รูปแบบของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของเส้นใยธรรมชาติ [8]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยปาล์ม [9] ปูนซีเมนต์มักนิยมนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน แต่อย่างไรก็ตามดินซีเมนต์มักแสดง พฤติกรรมความเปราะมากกว่าดินที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ เพื่อปรับปรุงความเปราะที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงมีแนวคิดในการนำ เส้นใยสังเคราะห์หรือเส้นใยธรรมชาติมาเสริมแรงในดินซีเมนต์งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของทรายซีเมนต์ เสริมเส้นใย โดยทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 5 และ 7% ปริมาณเส้นใย 0.5, 1.0 และ 2.0% และความยาวเส้นใย 10, 20 และ 40 มิลลิเมตร ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและกำลังดัดพบว่าการเพิ่ม เส้นใยช่วยเปลี่ยนพฤติกรรมเปราะของตัวอย่างทรายซีเมนต์ให้เป็นพฤติกรรมความเหนียวและช่วยลดการสูญเสียกำลังหลังจากกำลังสูงสุด โดยกำลังอัดของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยแสดงการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเพิ่มปริมาณเส้นใยหลัง จากนั้นจะมีการลดลงซึ่งปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 1.0% ขณะที่กำลังดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยกับ การเพิ่มปริมาณเส้นใย แต่กำลังรับแรงดัดคงค้างกับความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณการเพิ่มปริมาณ เส้นใย อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าซึ่งแสดงถึงความสามารถในการรับกำลังดัดของตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใย แสดงการเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มเส้นใย อย่างไรก็ตามสังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์มีผลเล็กน้อยต่อ ค่าของอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับกำลังดัดของตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใย ขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยมากกว่ากำลังของเมทริกซ์

การเตรียมตัวอย่างแต่ละการทดสอบจะเริ่มจากการผสมทรายกับปูนซีเมนต์ให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำเส้นใยปาล์มที่เตรียมไว้ดังรูปที่ 2-7 และ 2-8 ใส่ลงไปและทำการผสมให้มีการกระจายตัวที่ดีไม่มีกองรวมกันอยู่จุดใดจุดหนึ่ง โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมตัวอย่างได้แก่ 5% และ 7% ของน้ำหนักทรายแห้ง โดยในแต่ละปริมาณปูนซีเมนต์จะใช้ปริมาณเส้นใย 0.5, 1.0 และ 2.0% ที่มีความยาว 10, 20 และ 40 มิลลิเมตร เมื่อวัสดุทั้งสามส่วนเข้ากันดีแล้วจึงทำการเติมน้ำลงไป โดยประมาณน้ำที่ใช้เป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสม ($W_{opt} = 10\%$) ซึ่งได้จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกบดอัดลงในแบบด้วยค้อนบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ในแต่ละตัวอย่างจะทำการควบคุมหนาแน่นไม่น้อยกว่า 95 % ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max} = 19.5 \text{ kN/m}^3$) เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จแล้วจำทำการหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและทิ้งไว้เป็นเวลา 28 วัน

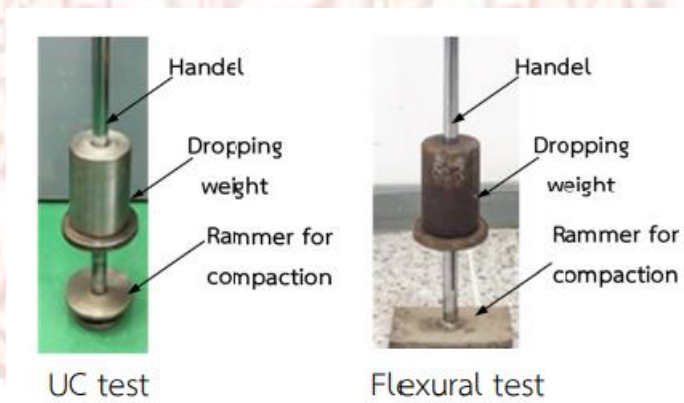
อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test) และการทดสอบกำลังดัด (Flexural strength test) ดังรูปที่ 2-9 ละ 2-10



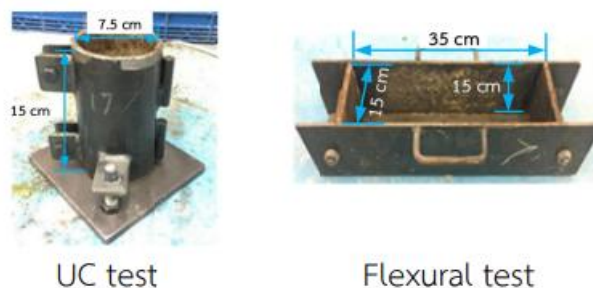
รูปที่ 2-7 แกนทะลายปาล์มก่อนแปรสภาพ [9]



รูปที่ 2-8 ลักษณะเส้นใยปาล์มหลังแปรสภาพ [9]



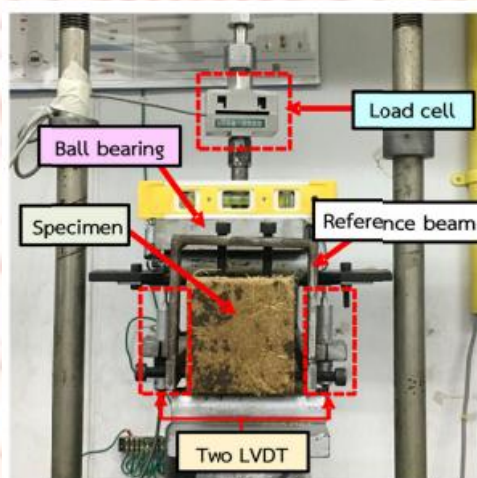
รูปที่ 2-9 ค้อนสำหรับเตรียมตัวอย่าง [9]



รูปที่ 2-10 แบบหล่อตัวอย่าง [9]

ในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทำตามมาตรฐาน ASTM D2116-00 เพื่อหาอิทธิพลของเส้นใยต่อกำลังอัดของทรายซีเมนต์ การวัดกำลังของตัวอย่างใช้ Load cell และการวัดการเคลื่อนในแนวตั้งใช้ LVDT โดยการทดสอบจะใช้อัตราการกดอยู่ที่ 1.5 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบกำลังดัด (Flexural strength test) จะทำตามมาตรฐาน ASTM D 1609-10 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 2-11 ซึ่งการโค้งตัวของคานตัวอย่างจำทำการติดตั้ง LVDT ทั้ง 2 ด้านของคานตัวอย่าง



รูปที่ 2-11 การติดตั้งเครื่องมือ [9]

โดยทั่วไปพฤติกรรมการรับกำลังดัดตัวอย่างคานทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ 1) การโค้งตัวแบบ Softening 2) การโค้งตัว Hardening

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลการเส้นใยปาล์มต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังอัดและกำลังดัดของทรายซีเมนต์ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์ (5% และ 7%) ปริมาณเส้นใย (0.5, 1. และ 2.0%) และความยาวเส้นใย (10, 20 และ 40 มิลลิเมตร) ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

2.2.1.1 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแสดงให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยทำให้พฤติกรรมความเค้น-ความเครียด ของตัวอย่างทรายซีเมนต์ที่คล้ายกับวัสดุที่มีความเปราะเป็นวัสดุที่มีความเหนียว โดยตัวอย่างสามารถรับกำลังได้ต่อไปหลังจากถึงค่ากำลังสูงสุด นอกจากนั้นพฤติกรรมความเหนียวของตัวอย่างซึ่งแสดงด้วยดัชนีความเปลี่ยนรูป (Deformation index, DI) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้นใย

2.2.1.2 การเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงแรกหลังจากนั้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง โดยปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 1.0%

2.2.1.3 ตัวอย่างคานทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยปาล์มแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนัก-การโก่งตัวแบบ Softening ในทุกปริมาณและความยาวของเส้นใย โดยเส้นใยส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังดัดสูงสุดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายและปูนซีเมนต์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) หรือกำลังของเมทริกซ์ (Matrix) เป็นหลัก

2.2.1.4 กำลังดัดคงค้าง (Residual strength) ของตัวอย่างคานทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยที่ระยะโก่งตัว $L/150$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณและความยาวของเส้นใยซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสูญเสียพลังงานหลังการแตกร้าว

2.2.1.5 กำลังดัดเทียบเท่า (Equivalent flexural strength ratio, $R_{T,150}^D$) ซึ่งแสดงถึงการทำงานของเส้นใยหลังการแตกร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใย โดยที่ปริมาณเส้นใยที่เท่ากันพบว่า เส้นใยที่ยาวกว่าจะให้ค่า $R_{T,150}^D$ ที่มากกว่าเพราะมีพื้นที่ในการจับยึดระหว่างทรายซีเมนต์กับเส้นใยที่มาก

2.2.2 อิทธิพลของเส้นใยแก้วและของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนที่มีต่อกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัด [10]

การใช้ถ่านหินในกระบวนการผลิตพลังงานและอุตสาหกรรมต่าง ๆ นับว่าเป็นสาเหตุสำคัญของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทั่วโลกต้องเผชิญ ในภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้าง จึงได้มีการพัฒนา "ปูนซีเมนต์คาร์บอนต่ำ" เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ ยังมีการนำวัสดุทดแทนอย่างเถ้าลอยและตะกอนมาใช้ในการผลิตคอนกรีตเพื่อลดการใช้ซีเมนต์ ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญหนึ่งในกรณีศึกษาที่น่าสนใจคือการนำเถ้าลอย ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะในประเทศไทย มาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมดินเหนียวกรุงเทพ จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยสามารถนำมาใช้แทนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ลดการใช้ซีเมนต์โดยตรง ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกแล้ว ยังช่วยจัดการของเสียจากโรงไฟฟ้าอีก

ด้วยนอกจากนี้ ยังมีการนำเถ้าจากเตาเผาขยะชุมชนมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตอีกทางหนึ่ง โดยข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ระบุว่า ในปี พ.ศ. 2565 ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนในประเทศไทยมีมากถึง 26.59 ล้านตัน การนำเถ้าจากเตาเผาขยะเหล่านี้มาใช้ในคอนกรีตจึงเป็นอีกแนวทางในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ทราายน้ํานํ้าถือเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีต โดยมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลก ประมาณว่ากว่า 60% ของทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตทั่วโลกมาจากทรายแม่น้ำ อย่างไรก็ตาม ทรายแม่น้ำจากแหล่งต่าง ๆ มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีต การคัดเลือกทรายที่เหมาะสมก่อนนำมาใช้งานจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีความแข็งแรงและทนทาน แม้จะมีการนำทรายมาใช้ที่เหมาะสม แต่ปัญหาเรื่องรอยแตกร้าวยังคงเกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทราย หนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของดินซีเมนต์และลดการแตกร้าวคือการเสริมด้วยเส้นใย การเพิ่มปริมาณเส้นใยในส่วนผสมจะช่วยลดจำนวนและความกว้างของรอยแตกร้าว เส้นใยเหล่านี้มีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น แรงดึงสูง ความต้านทานการเสียดสีดี และกระจายตัวได้ดี ทำให้เกิดการยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างเส้นใยกับสารประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ช่วยเพิ่มความทนทานและลดความเสียหายของโครงสร้าง ผลการวิจัยพบว่า การเสริมเส้นใยในดินซีเมนต์ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดัดของทรายเสริมซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาส่วนผสมของทรายซีเมนต์บดอัดเสริมเส้นใยแก้ว โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าจากเตาเผาขยะชุมชน (Municipal Solid Waste Incineration) ผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์และเพิ่มประสิทธิภาพกำลังดัด แนวทางนี้สามารถนำของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยชุมชนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและพัฒนานวัตกรรมวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งวัสดุใหม่นี้ได้รับการตั้งชื่อว่า "ทรายซีเมนต์บดอัดสีเขียว (Green Compacted Cement Sand)"

โดยนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะเถ้าลอยและเถ้าจากเตาเผาขยะชุมชน รวมถึงเส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุผสม เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์และเพิ่มกำลังรับแรงดัดของวัสดุ ทรายถูกเตรียมให้มีความชื้นคงที่ที่ร้อยละ 6.19 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) คงที่ที่ร้อยละ 0.5 สำหรับทุกสัดส่วนการผสม โดยใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย เถ้าจาก และเส้นใยแก้ว

การทดสอบกำลังรับแรงดัดดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ United Test รุ่น WDW-100Y ซึ่งติดตั้งตัววัดน้ำหนักแบบ Load Cell ขนาด 100 kN ในขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำคานตัวอย่างวางบนแท่นทดสอบ โดยวางด้านเรียบให้สัมผัสกับแท่นกดน้ำหนัก พร้อมจัดตำแหน่งหัวกดให้อยู่ที่ระยะกึ่งกลางของคานทดสอบ และกำหนดระยะพาดตัวอย่างเท่ากับ 225 มิลลิเมตร การตั้งค่าโปรแกรมทดสอบ

กำหนดอัตราการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.05 มม./นาที่ และระยะเวลาการแอ่นตัวสุทธิไม่เกิน 3 มิลลิเมตร หรือจนกว่าตัวอย่างจะเกิดความเสียหาย หลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น ทำการเก็บข้อมูลที่บันทึกไว้เพื่อนำมาวิเคราะห์โดยแปลงเป็นพารามิเตอร์ระหว่างน้ำหนักและระยะเวลาการแอ่นตัวตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็นหกกลุ่มหลักและสองกลุ่มควบคุม โดยกลุ่ม A ศึกษาผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์ กลุ่ม B ศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยแก้ว กลุ่ม C ศึกษาผลกระทบของความยาวเส้นใยแก้ว กลุ่ม D ศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าลอย กลุ่ม E ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม และกลุ่ม F ศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าจมนอกจากนี้ยังมีกลุ่ม CM และกลุ่ม CM+FB ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างควบคุม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

Group	Cement Content (g)	Fiber Content (g)	Cement (g)	Fiber Length (mm)	Fly Ash (g)	Bottom Ash (g)	Day
A1	94.12	44.82	70.59	6	23.53	0	28
A2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
A3	219.61	44.82	164.71	6	54.90	0	28
B1	156.87	0.00	117.65	6	39.22	0	28
B2	156.87	22.41	117.65	6	39.22	0	28
B3	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
B4	156.87	67.23	117.65	6	39.22	0	28
B5	156.87	89.64	117.65	6	39.22	0	28
C1	156.87	44.82	117.65	3	39.22	0	28
C2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
C3	156.87	44.82	117.65	12	39.22	0	28
D1	156.87	44.82	141.18	6	15.69	0	28
D2	156.87	44.82	133.34	6	23.53	0	28
D3	156.87	44.82	125.49	6	31.37	0	28
D4	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
D5	156.87	44.82	109.81	6	47.06	0	28
D6	156.87	44.82	101.96	6	54.90	0	28
D7	156.87	44.82	94.12	6	62.75	0	28
E1	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	7
E2	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	14
E3	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
E4	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	60
E5	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	90
F1	156.87	44.82	117.65	6	39.22	0	28
F2	156.87	44.82	117.65	6	29.41	9.80	28
F3	156.87	44.82	117.65	6	19.61	19.61	28
F4	156.87	44.82	117.65	6	9.80	29.41	28
F5	156.87	44.82	117.65	6	0	39.22	28
CM	156.87	0	0	0	0	0	28
CM+FB	156.87	44.82	0	6	0	0	28

ตารางที่ 2-7 แสดงสัดส่วนการผสมตัวอย่างของทรายซีเมนต์ [10]

สรุปได้ว่ากำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์มีผลโดยตรงต่อกำลังของเมทริกซ์ โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผสมคือร้อยละ 5 นอกจากนี้ ความเหนียวที่ระยะการแ่นตัว (Toughness at L/150) ของทรายซีเมนต์บดอัดยังแปรผันโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

ในการเสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว พบว่าปริมาณเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 1.0 ถึง 1.5 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมกับทรายซีเมนต์บดอัด เนื่องจากค่า DI และ PSR ที่เท่ากับ 1 แสดงถึงพฤติกรรมการแ่นตัวแบบวัสดุอ่อน (Softening) นอกจากนี้ ความยาวของเส้นใยแก้วยังมีผลโดยตรงต่อระยะการแ่นตัวของทรายซีเมนต์บดอัด โดยความยาวที่เหมาะสมสำหรับผสมคือ 12 มิลลิเมตร ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในทรายซีเมนต์บดอัด ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 15 ซึ่งเป็นช่วงที่ให้กำลังดัดและความสามารถในการแ่นตัวสูงที่สุด ในส่วนของการใช้เถ้าจมน พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยต่อเถ้าจมน (FA:BA) คือ 25:75 ซึ่งให้ค่าความเหนียว (Toughness at L/150) สูงที่สุด

ระยะเวลาการบ่มเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัด โดยระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 28 ถึง 90 วัน โดยกำลังดัดจะเพียงพอเมื่อบ่มนานตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป และที่ระยะเวลา 90 วัน พบว่ามีค่าความเหนียวสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าการบ่มเป็นระยะเวลานานช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดัดและความทนทานของวัสดุผสมอย่างชัดเจน

2.2.3 การปรับปรุงกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดด้วยเส้นใยโพลีพรพิลีน [11]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดด้วยการเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีน ซึ่งเป็นวัสดุที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มความทนทานและยับยั้งการเคลื่อนที่ของรอยแตกกว้างในดินมวลเม็ด ผลการทดลองพบว่าจำนวนรอยแตกกว้างของวัสดุแปรผันตามปริมาณเส้นใยที่เติมเข้าไป โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าความลาดชันของเส้นกราฟสะท้อนถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังดัดสูงสุดเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดเริ่มต้นด้วยการกำหนดขนาดของตัวอย่างคานทดสอบ ซึ่งมีขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร และยาว 350 มิลลิเมตร โดยเริ่มจากการนำทรายมาผสมกับปูนซีเมนต์และคลุกเคล้าจนเข้ากันดี เมื่อการผสมเสร็จสิ้นแล้ว จะมีการเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีนลงไปในทรายซีเมนต์ เมื่อเส้นใยกระจายทั่วเนื้อวัสดุได้ดีแล้ว จะเติมน้ำเพิ่มลงไปในส่วนผสม หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกเทลงในแบบหล่อคานเป็นชั้น ๆ และบดอัดด้วยค้อนไม้กระทั่งเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักแห้งที่ใกล้เคียงกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่สุด (Optimum Moisture Content) โดยการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 3%, 5%, และ 7% ของน้ำหนักดินแห้ง และแต่ละ

ปริมาณจะใช้ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนในสัดส่วน 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5%, และ 2% ของน้ำหนักดินแห้งเช่นเดียวกัน การเตรียมตัวอย่างจะมีการทำซ้ำ 3 ตัวอย่างในแต่ละสัดส่วน โดยเตรียมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด (Plain Compacted Cement-sand หรือ PCS) ด้วยวิธีการเดียวกัน เพื่อใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมภายใต้แรงกด เมื่อการบดอัดเสร็จสิ้น ตัวอย่างจะถูกห่อหุ้มด้วยพลาสติกใสเพื่อรักษาความชื้น แล้วบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วันก่อนที่จะนำมาทดสอบการรับแรงกด



รูปที่ 2-12 เส้นใยโพลิโพรพิลีน



รูปที่ 2-13 ตัวอย่างคานทรายซีเมนต์บดอัด บ่ม 28 วัน

หลังจากการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน ตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบการรับแรงกดตามมาตรฐาน ASTM C 1609 – 10 โดยเริ่มต้นด้วยการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ ซึ่งมีมาตรวัดน้ำหนักเป็นแบบ Load Cell ขนาด 20 kN และใช้มาตรวัดระยะแอนตัว (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่แต่ละด้านของคานตัวอย่างในตำแหน่งกึ่งกลางคานเพื่อหาค่าระยะแอนตัวเฉลี่ย LVDT จะติดตั้งบนคานอ้างอิงที่ปลายทั้งสองด้าน ซึ่งยึดกับจตุรรองรับ เพื่อวัดระยะแอนตัวสุทธิ โดยการวัดจะทำที่กึ่งกลางคานเทียบกับจตุรรองรับ การควบคุมอัตราการแอนตัวจะให้เพิ่มขึ้นที่อัตรา 0.05 มม./นาท โดยใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าในการควบคุมการแอนตัว การทดสอบจะดำเนินไปจนกว่าตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ ซึ่งจะปรากฏรอยแตกร้าวและมีระยะแอนตัวสุทธิถึง 4 มิลลิเมตร หลังจากนั้นการทดสอบจะหยุดและเก็บข้อมูลผลการทดสอบ

สามารถสรุปได้ดังนี้ การเสริมเส้นใยในดินมวลเม็ดช่วยหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของรอยร้าว (Crack Arrest) และทำให้รอยร้าวเกิดการแตกแขนง (Crack Branching) หรือเบี่ยงออก (Crack Deviating) โดยจำนวนของรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใย ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยอยู่ที่ 2% จะมีจำนวนรอยร้าวสูงที่สุด โดยทั้งในตัวอย่างของ PCS และ FRCS จะมีการแตกหักของวัสดุ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดสูงสุดกับปริมาณเส้นใยเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าความลาดชันของกราฟนี้จะบ่งบอกถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังดัดสูงสุด โดยที่ กำลังดัดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์ในวัสดุ นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดัดคงเหลือกับปริมาณเส้นใยก็เป็นเส้นตรง โดยกำลังดัดคงเหลือหลังจากเกิดการแตกร้าวหรือหลังจากที่ กำลังดัดสูงสุดครั้งแรก จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังของเมทริกซ์เช่นกัน เส้นใยในวัสดุจะช่วยป้องกันไม่ให้รอยร้าวขยายขนาดและเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของคานาภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยเส้นใยจะทำงานได้ดีขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยกับส่วนจับยึดจะเพิ่มขึ้นตาม

อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าจะขึ้นอยู่กับปริมาณเส้นใยมากกว่ากำลังของเมทริกซ์ ซึ่งหมายความว่าเมื่อใช้เส้นใยชนิดเดียวกันในปริมาณที่เท่ากัน อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่าจะใกล้เคียงกัน

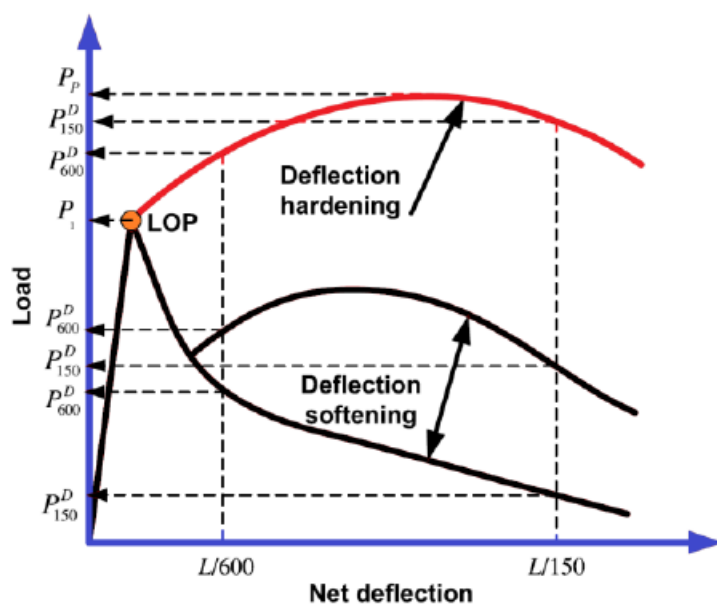
Specimen	First Peak Load P ₁ (kN)	Peak Load P _p (kN)	Deflection					
			L/600 (0.5 mm)		L/150 (2 mm)			
			P ₆₀₀ ^D (kN)	f ₆₀₀ ^D (MPa)	P ₁₅₀ ^D (kN)	f ₁₅₀ ^D (MPa)	T ₁₅₀ ^D (N-m)	R _{T,150} ^D (%)
3% cement								
0% fiber	0.96	0.96	0.25	0.074	0.02	0.005	0.37	19
0.5% fiber	0.88	0.88	0.41	0.123	0.69	0.207	1.15	65
0.75% fiber	1.20	1.14	0.93	0.280	1.10	0.331	2.06	86
1% fiber	1.42	1.20	1.46	0.437	1.51	0.453	3.08	109
1.5% fiber	1.49	1.00	1.63	0.488	1.92	0.575	3.41	115
2% fiber	1.50	1.00	1.80	0.541	2.25	0.674	4.01	134
5% cement								
0% fiber	2.58	2.58	0.87	0.261	0.33	0.100	1.39	27
0.5% fiber	1.58	1.58	1.00	0.299	0.95	0.285	2.17	68
0.75% fiber	2.24	2.24	1.76	0.527	2.03	0.610	3.97	88
1% fiber	2.40	3.20	2.46	0.737	3.20	0.960	5.48	114
1.5% fiber	2.65	4.34	3.52	1.055	4.32	1.296	7.75	125
2% fiber	2.25	5.20	4.21	1.263	5.12	1.535	9.03	137
7% cement								
0% fiber	4.31	4.31	1.28	0.10	0.54	0.163	2.37	28
0.5% fiber	3.87	3.87	3.02	0.285	3.56	1.069	6.65	86
0.75% fiber	4.04	4.70	4.60	0.610	4.50	1.349	8.75	108
1% fiber	4.35	6.14	4.78	0.960	6.14	1.841	10.82	124
1.5% fiber	4.13	6.52	5.07	1.296	6.47	1.940	10.98	133
2% fiber	3.83	8.14	5.87	1.535	8.17	2.417	13.64	143

ตารางที่ 2-8 การทำงานของเส้นใย [11]

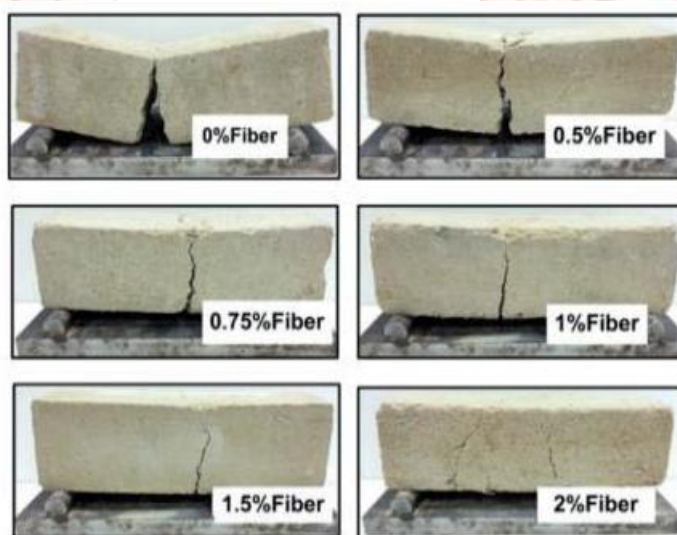
งานวิจัยของ[17] ได้ทำการทดสอบวัดค่าการรับกำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัดผสมเส้นใยพบว่า ดินซีเมนต์สามารถรับกำลังอัดและกำลังเฉือนได้ดี แต่มีข้อจำกัดในการรับกำลังดัดที่ต่ำ จึงได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโดยการเพิ่มเส้นใยที่มีค่าการรับกำลังดัดสูงเพื่อเสริมแรง วัสดุดังกล่าวมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันไปตามการทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองแบบ ตามรูปที่ 2-14 คือ พฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle behavior) และพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile behavior) พฤติกรรมแบบเปราะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุแสดงค่าการรับกำลังสูงสุดแรก (P_1) ที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งค่า P_1 นี้จะใกล้เคียงหรือตรงกับค่าการรับกำลังสูงสุดของวัสดุ (P_p) และเมื่อเกินจุดวิบัติแล้ว ค่าการรับกำลังจะตกลงมาอย่างรวดเร็วในลักษณะที่มีความชันสูง ในขณะที่พฤติกรรมแบบเหนียวจะมีความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยจะเห็นความแตกต่างระหว่างค่าการรับกำลังสูงสุดแรก (P_1) และค่าการรับกำลังสูงสุดของวัสดุ (P_p) อย่างชัดเจน หากค่าการรับกำลังสูงสุดของวัสดุ (P_p) สูงกว่าค่า P_1 จะถือว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุแข็ง (Deflection hardening) แต่หากค่าการรับกำลังสูงสุดของวัสดุต่ำกว่าค่า P_1 จะถือว่าวัสดุนั้นมีลักษณะเป็นวัสดุอ่อน (Deflection softening) การทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัดตามมาตรฐาน ASTM C 1609-10 ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง (Load) และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางตัวอย่าง (Displacement) พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ค่าความเหนียวหรือการดูดซับพลังงานของวัสดุที่เพิ่มขึ้นจากการใช้เส้นใยเสริมแรง ว่าค่าความเหนียวนั้นสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและระยะการแอ่นตัวที่ $L/150$ โดยค่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่ใช้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการรับกำลังดัด และช่วยให้วัสดุสามารถดูดซับพลังงานและกระจายไปยังส่วนอื่นๆ โดยการทำหน้าที่ของเส้นใยเหมือนกับรากของต้นไม้ ซึ่งจะช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยแตกและกระจายพลังงานไปยังบริเวณใกล้เคียง ทำให้วัสดุมีความสามารถในการรับกำลังดัดมากขึ้นหลังจากจุดวิบัติ

รูปแบบการวิบัติที่เกิดจากการพังทลายของส่วนจับยึดในดินซีเมนต์จะเปลี่ยนไปจากเดิม โดยเส้นใยจะช่วยลดรอยแตกแบบระนาบเดียวให้กลายเป็นรอยแตกแบบกระจายที่แพร่ไปจากกึ่งกลางตัวอย่าง รูปที่ 2-15 ส่วนอัตราค่าการรับกำลังดัดเทียบเท่าจะถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าการรับกำลังที่เกิดขึ้นจริงจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและระยะการแอ่นตัว กับค่าการรับกำลังตามทฤษฎี โดยอัตราส่วนที่มากกว่า 100 จะเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุจากตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย

ค่าการรับกำลังจริงหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ของกำลังและระยะการแอ่นตัวที่ $L/150$ ส่วนค่าการรับกำลังตามทฤษฎีหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟจากความสัมพันธ์ของค่าการรับกำลังสูงสุดแรกและระยะการแอ่นตัวที่ $L/150$



รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับระยะการแอ่นตัวของการทดสอบกำลังรับแรงดัด
คานทรายซีเมนต์ผสมเส้นใย [17]



รูปที่ 2-15 แสดงถึงปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นต่อการแตกร้าว [17]

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะแสดงรายละเอียดขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย เพื่อศึกษาผลกระทบการเพิ่มกำลังอัดของดินทรายบดอัดผสมด้วยปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และเส้นใยขนไก่เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยกล่าวถึงการเตรียมตัวอย่างทดสอบ สัดส่วนผสมและวิธีการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.1.1 ทราย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างในประเทศไทย ตามรูปที่ 3-1
- 3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) ตามมาตรฐาน มอก.15-2532 ตามรูปที่ 3-2
- 3.1.3 ซิลิกาฟุ่ม (SiO_2) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมครอน ตามรูปที่ 3-3
- 3.1.4 ขนไก่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเนื้อไก่ มีลักษณะเป็นเส้นใยโปรตีนเคราติน ที่ผ่านการทำความสะอาดและขจัดคราบมัน (wax) และผ่านการอบแห้งแล้ว ตามรูปที่ 3-4
- 3.1.5 น้ำสะอาด ปราศจากสารอินทรีย์ สารเคมี และไม่มีการปนเปื้อน



รูปที่ 3-1 ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4



รูปที่ 3-2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 3-3 ซิลิกาฟุ่ม



รูปที่ 3-4 เส้นใยขนไก่

3.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

จากตัวอย่างวัสดุสำหรับการทำตัวอย่าง สามารถคำนวณหาปริมาณสัดส่วนผสม เพื่อนำมาเปรียบเทียบการทดสอบการรับแรงดัดในอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน โดยทำการแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ A B C และ D เพื่อเปรียบเทียบการทดสอบการรับแรงดัดในอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน โดยกลุ่ม A ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ (OPC) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 3%, 5% และ 7% โดยน้ำหนักแห้ง กลุ่ม B ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่างกัน ได้แก่ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 โดยคงสัดส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ไว้ที่ 5% ต่อน้ำหนักทราย กลุ่ม C ใช้อัตราส่วนของซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนผกผันกัน ได้แก่ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 โดยควบคุมอัตราส่วนซีเมนต์ไว้ที่ 5% และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไว้ที่ 0.5 โดยน้ำหนัก และกลุ่ม D ใช้ปริมาณเส้นใยที่ต่างกัน ได้แก่ ใส่เส้นใยที่ 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่างควบคุมปริมาณทรายที่ 3,385 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 3-1 และตารางที่ 3-2 และหาอัตราส่วนวัสดุส่วนผสมได้จากสมการที่ (3-1) และ (3-2)

$$W_s = \rho_{dry(max)} \times V \quad (3-1)$$

$$W = \rho_{dry(max)} \times V \times OMC \quad (3-2)$$

โดยที่ W_s = ปริมาณดินที่ใช้ (g)

V = ปริมาตรของตัวอย่าง (cm^3)

ρ_{dry} = ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (g/cm^3)

OMC = ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)

C = ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ (g)

X = จำนวนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ที่ใช้ (%)

ตารางที่ 3-1 แสดงอัตราส่วนผสมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด

No.	OPC (%)	FIBER CONTENT (%)	W/C	OMC (%)	OPC (%) : SILICAFUME (%)	CURING TIME (day)
A1	3	0	0.5	6.19	100:0	28
A2	5	0	0.5	6.19	100:0	28
A3	7	0	0.5	6.19	100:0	28
B1	5	0	0.25	6.19	100:0	28
B2	5	0	0.50	6.19	100:0	28
B3	5	0	0.75	6.19	100:0	28
B4	5	0	1.00	6.19	100:0	28
C1	5	0	0.5	6.19	100:0	28
C2	5	0	0.5	6.19	95:05	28
C3	5	0	0.5	6.19	90:10	28
C4	5	0	0.5	6.19	85:15	28
C5	5	0	0.5	6.19	80:20	28
C6	5	0	0.5	6.19	75:25	28
C7	5	0	0.5	6.19	70:30	28
D1	5	0	0.5	6.19	100:0	28
D2	5	0.5	0.5	6.19	100:0	28
D3	5	1.0	0.5	6.19	100:0	28
D4	5	1.5	0.5	6.19	100:0	28
D5	5	2.0	0.5	6.19	100:0	28
D6	5	2.5	0.5	6.19	100:0	28

ตารางที่ 3-2 แสดงสัดส่วนผสมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัด

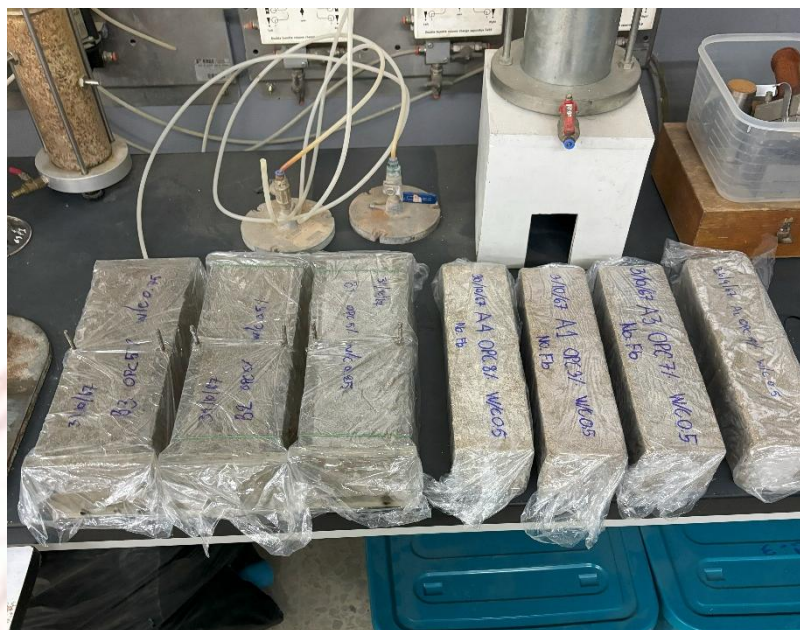
No.	SAND (g)	OPC (g)	FIBER CONTENT (g)	W/C (g)	OMC (g)	OPC (g) : SILICAFUME (g)	CURING TIME (day)
A1	3385	101.55	0	51	210	101.55 : 0	28
A2	3385	169.25	0	85	210	169.25 : 0	28
A3	3385	236.95	0	118	210	236.95 : 0	28
B1	3385	169.25	0	42	210	169.25 : 0	28
B2	3385	169.25	0	85	210	169.25 : 0	28
B3	3385	169.25	0	127	210	169.25 : 0	28
B4	3385	169.25	0	169	210	169.25 : 0	28
C1	3385	169.25	0	85	210	169.25 : 0	28
C2	3385	160.79	0	85	210	160.79 : 8.46	28
C3	3385	152.33	0	85	210	152.33 : 16.93	28
C4	3385	143.86	0	85	210	143.86 : 25.39	28
C5	3385	135.40	0	85	210	135.40 : 33.85	28
C6	3385	126.94	0	85	210	126.94 : 42.31	28
C7	3385	118.48	0	85	210	118.48 : 50.78	28
D1	3385	169.25	0	85	210	169.25 : 0	28
D2	3385	169.25	5.42	85	210	169.25 : 0	28
D3	3385	169.25	10.85	85	210	169.25 : 0	28
D4	3385	169.25	16.27	85	210	169.25 : 0	28
D5	3385	169.25	21.69	85	210	169.25 : 0	28
D6	3385	169.25	27.12	85	210	169.25 : 0	28

3.2.1 การผสมตัวอย่างจะทำการนำทรายมาผสมกับปูนซีเมนต์ คลุกเคล้าให้เข้ากันดี จากนั้นนำชนไก่ที่ผ่านการทำความสะอาดและอบแห้งแล้วมาผสมกับทรายซีเมนต์ และผสมให้ชนไก่มีการกระจายตัวเข้ากับทรายซีเมนต์จนดีแล้ว จึงเติมน้ำลงไป และคลุกเคล้าให้ทั่วถึง ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 การผสมทรายซีเมนต์บดอัด

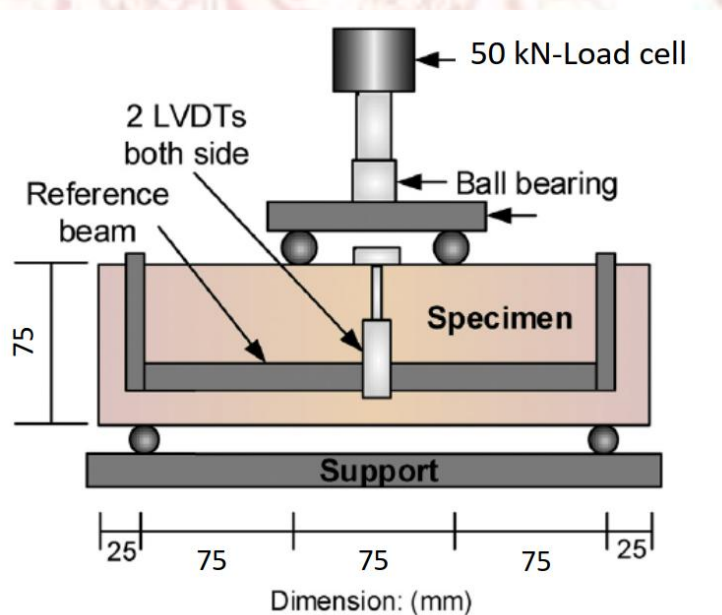
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดในแบบหล่อ โดยใช้แบบหล่ออะคริลิคขนาด $75 \times 75 \times 300$ มิลลิเมตร ก่อนนำตัวอย่างเทใส่แบบหล่อ ให้ทำการตรวจสอบว่าแบบหล่อมีการขึ้นล้อยึดแน่นดีแล้ว จากนั้นจึงทาน้ำมันทาแบบเป็นชั้นบางๆ เพื่อการถอดแบบและนำก้อนตัวอย่างออกได้โดยง่าย แล้วจึงเทส่วนผสมที่ได้เตรียมไว้เป็นชั้นทีละชั้น ความหนาประมาณ 3 เซนติเมตร แล้วใช้ค้อนไม้กระทุ้ง เพื่อให้ได้ความหนาแน่นสูงที่สุด ในปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Moisture Content) เมื่อบดอัดทรายซีเมนต์ผสมชนไก่จนเต็มแบบหล่อแล้ว ให้ทำการห่อก้อนตัวอย่างด้วยพลาสติก แล้วจึงทำการบ่มเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำมาทดสอบการรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 การเก็บตัวอย่างในแบบหล่อ และการบ่มตัวอย่าง

3.3 การทดสอบ

การทดสอบการรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 โดยใช้เครื่องทดสอบการแอ่นตัว (Flexural Strength Tests) ดังรูปที่ 3-7 ร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์วัดการโก่งตัว (LVDT) เพื่อวัดการเสียรูปของคานตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้



รูปที่ 3-7 รูปแสดงการติดตั้งอุปกรณ์

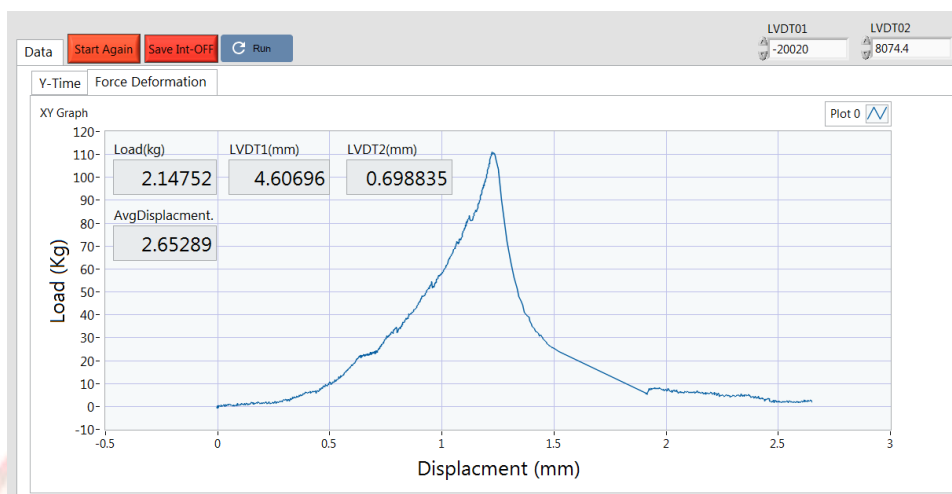
3.3.1 นำคานตัวอย่างวางบนแท่นเครื่องทดสอบ โดยให้ระนาบผิวสัมผัสของคานตัวอย่าง ตั้งอยู่บนจุดรองรับ และจุดถ่ายแรงในลักษณะที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของคานตัวอย่าง และจัดวาง ตำแหน่งของคานตัวอย่างโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ให้จุดถ่ายแรงอยู่ในระยะ $L/3$ ของคานทดสอบ และจุดรองรับตั้งอยู่ที่ระยะ 225 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 รูปแสดงการวางตัวอย่างทดสอบ

3.3.2 ตั้งค่าโปรแกรมการทดสอบ โดยกำหนดให้การเคลื่อนตัวของเครื่องทดสอบเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร/นาที จนกว่าตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการวิบัติ

3.3.3 นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาแปรผลหาความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับ ระยะการโก่งตัวและตัวแปรต่าง ๆ นำมาใช้คำนวณเพื่อหาอิทธิพลของเส้นใยต่อพฤติกรรมการรับกำลัง ดัดของทรายซีเมนต์



รูปที่ 3-9 การบันทึกข้อมูลการทดสอบในโปรแกรม

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดสอบจะได้ข้อมูลแรงดัด และการแอ่นตัว ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะถูกนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่กระทำต่อคานทดสอบ และการแอ่นตัวของคานทดสอบดังรูปที่ 3-9 ตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 ซึ่งโดยทั่วไปพฤติกรรมการรับกำลังดัดตัวอย่างทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ 1) การโค้งตัวแบบ Softening และ 2) การโค้งตัวแบบ Hardening ดังรูปที่ 3.10ก และ 3.10ข ประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้

L = ช่วงความยาวพาดคาน

P_p = น้ำหนักสูงสุด

P_1 = น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

δ_p = ระยะการแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุด

δ_1 = ระยะการแอ่นตัวสุทธิที่น้ำหนักสูงสุดครั้งแรก

f_p = กำลังดัดสูงสุด

f_1 = กำลังดัดสูงสุดครั้งแรก

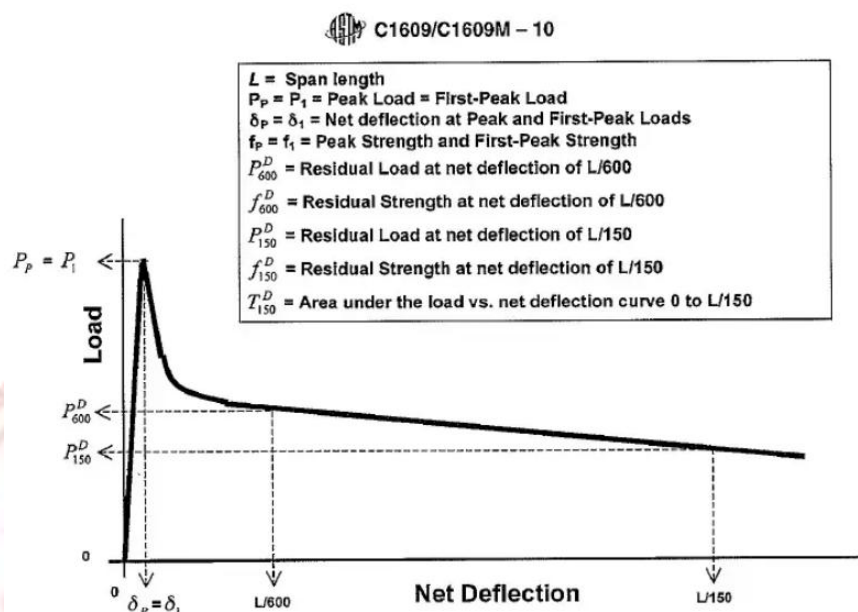
P_{600}^D = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวสุทธิ $L/600$

f_{600}^D = กำลังดัดคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวสุทธิ $L/600$

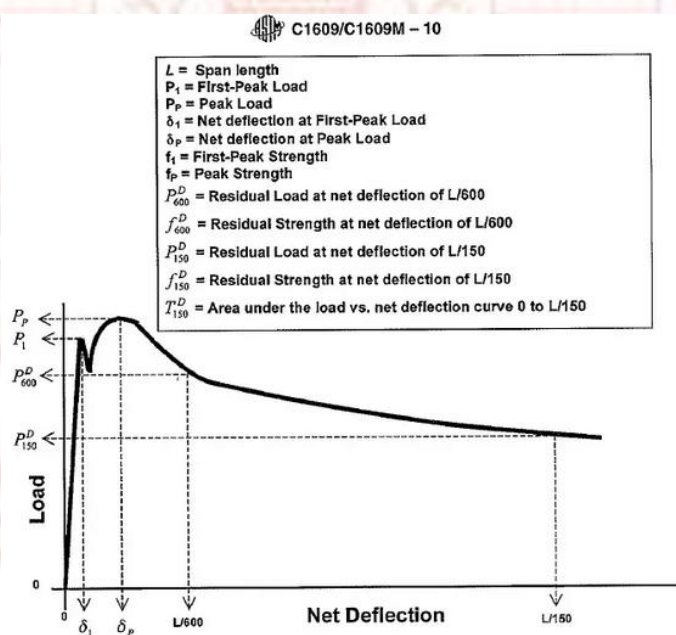
P_{150}^D = น้ำหนักคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวสุทธิ $L/150$

f_{150}^D = กำลังดัดคงเหลือที่ระยะแอ่นตัวสุทธิ $L/150$

T_{150}^D = พื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะแอ่นตัว ตั้งแต่ 0 ถึง $L/150$



รูปที่ 3-10ก เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและระยะการแอ่นตัว สำหรับน้ำหนักสูงสุดครั้งแรก
เท่ากับน้ำหนักสูงสุด [3]



รูปที่ 3-10ข เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและระยะการแอ่นตัว สำหรับน้ำหนักสูงสุดมากกว่า
น้ำหนักสูงสุดในตอนแรก [3]

3.4.1 การคำนวณกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

กำลังรับแรงดัดสูงสุด (Peak Load Flexural Strength) คำนวณได้จากแรงดัดสูงสุดที่คานาได้รับก่อนการแตกร้าว ดังสมการที่ 3-3

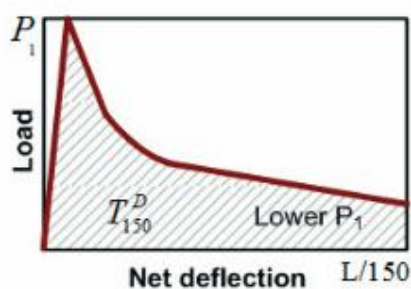
$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3-3)$$

โดยที่ f = กำลังรับแรงดัด (MPa)
 P = แรงดัดสูงสุด (Kg.)
 L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (mm.)
 B = ความกว้างของคานา (mm.)
 d = ความลึกของคานา (mm.)

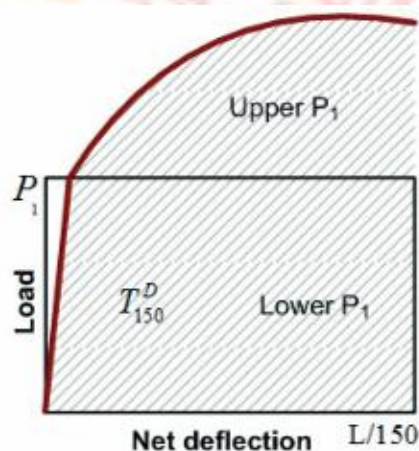
3.4.2 การคำนวณอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า

อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเส้นใยต่อการดูดซับพลังงานหรือความเหนียวของทรายซีเมนต์ ซึ่งสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างน้ำหนักกับระยะการแอ่นตัวต่อน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกคูณกับระยะการแอ่นตัวที่ $L/150$ ดังภาพที่ 3-11ก และ 3-11ข โดยค่า $R_{T,150}$ ที่สูงกว่า 100% บ่งบอกว่าตัวอย่างจะมีความเหนียวสูง ในทางกลับกันหากค่า $R_{T,150}$ ที่น้อยกว่า 100% หมายถึงตัวอย่างจะมีความเหนียวต่ำ ดังสมการที่ 3-4

$$R_{T,150} = \frac{150T_{150}}{\frac{P_1 L}{bd^2}} \times 100\% = \frac{T_{150}}{P_1 \frac{L}{bd^2}} \times 100\% \quad (3-4)$$



(ก) ค่า $R_{T,150}^D < 100\%$



(ข) ค่า $R_{T,150}^D > 100\%$

รูปที่ 3-11ก และ 3-11ข ความหมายของค่าอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า [11]

$$DI = \frac{\delta_p}{\delta_1} \quad (3-5)$$

โดยค่า **DI** บ่งบอกคุณสมบัติความเป็นวัสดุเหนียว (Ductile) ของตัวอย่าง ดังสมการที่ 3-5

$$PSR = \frac{f_p}{f_1} \quad (3-6)$$

โดยค่า **PSR** ที่มีค่าเท่ากับ 1 บ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการอ่อนแบบวัสดุอ่อน (Softening) แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 1 จะบ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการอ่อนแบบวัสดุเหนียว (Hardening) ดังสมการที่ 3-6



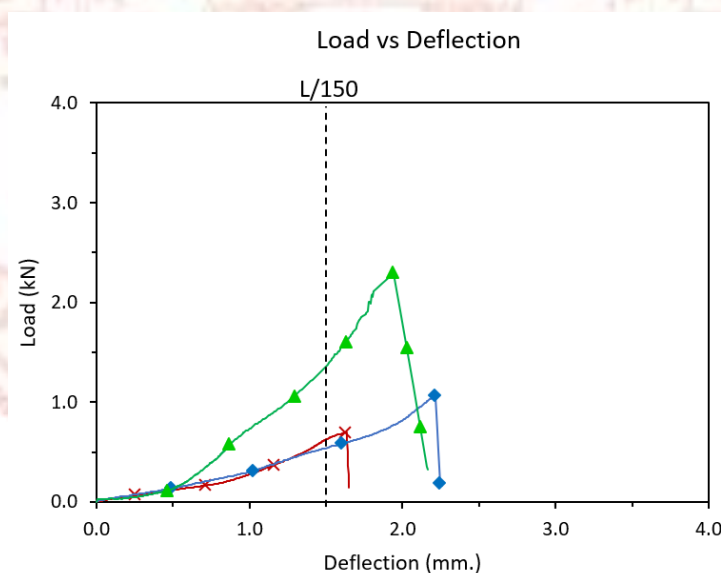
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบ รวมทั้งการวิเคราะห์คุณสมบัติของทรายซีเมนต์บดอัด ผสมซิลิกาฟูม ผสมขี้เถ้า ที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะศึกษาคุณสมบัติในด้านกำลังการรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 และประสิทธิภาพในการรับกำลังดัดของวัสดุ จำพวกกำลังรับแรงดัดสูงสุด ดัชนีความยืด อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุด และความเหนียว เพื่อศึกษาผลกระทบจากอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังศึกษาถึงความสามารถในการรับกำลังของเส้นใยเมื่อผสมกับทรายซีเมนต์บดอัด เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทรายซีเมนต์บดอัดตามปกติ

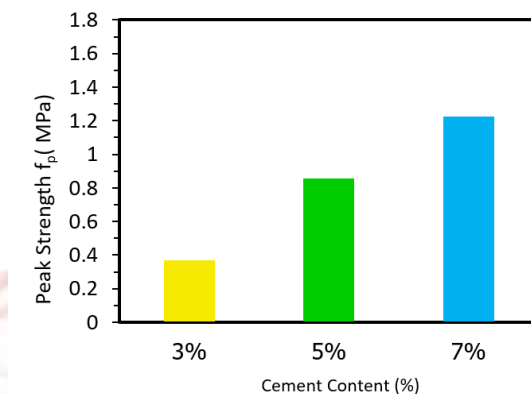
4.1 ผลการทดลองการรับน้ำหนักที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

จากกลุ่มตัวอย่างกลุ่ม A ที่มีอัตราส่วนปริมาณซีเมนต์บดอัดที่ต่างกัน โดยตัวอย่าง A1 มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 3 ตัวอย่าง A2 มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 ตัวอย่าง A3 มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 7 หลังจากทำการบ่มที่ 28 วัน แล้วนำมาทำการทดสอบแบบทำลายโดยวิธีทดสอบกำลังดัด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4-1



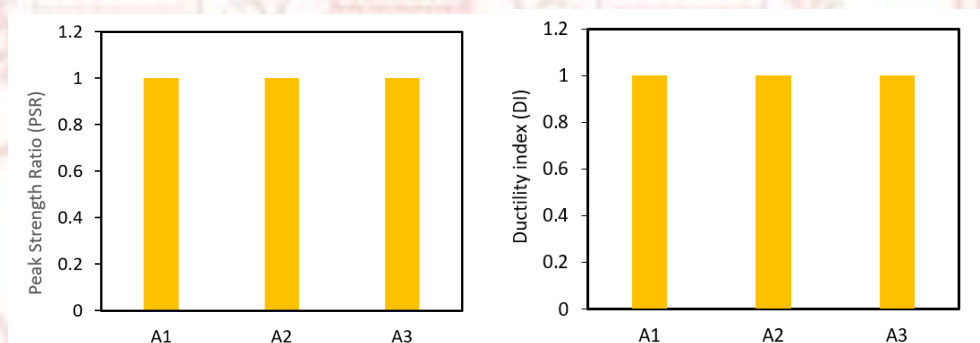
รูปที่ 4-1 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม A

จากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักที่แสดงในแกน Y พบว่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อตัวอย่างได้รับน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึงที่สุดแล้ว จากนั้นน้ำหนักที่กระทำจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทรายผสมซีเมนต์นั้นแสดงพฤติกรรมของวัสดุที่มีความเปราะ



รูปที่ 4-2 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่างๆ

จากรูปที่ 4-2 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มของกำลังดัดสูงสุดที่แปรผันตามปริมาณซีเมนต์ที่ผสมในทรายซีเมนต์บดอัด โดยตัวอย่าง A3 ซึ่งมีอัตราส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 7 ให้กำลังดัดสูงสุด รองลงมาคือ A2 ซึ่งมีอัตราส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 และ A1 ซึ่งมีอัตราส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 3 ให้กำลังดัดที่น้อยที่สุด

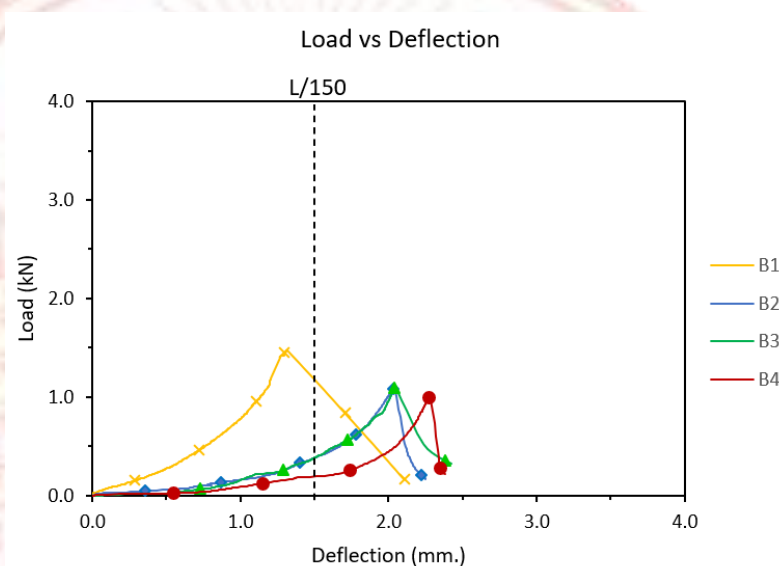


รูปที่ 4-3 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))

จากรูปที่ 4-3 แสดงอัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และค่าดัชนีความเหนียวมีค่าเท่ากับ 1 บ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุอ่อน (Softening)

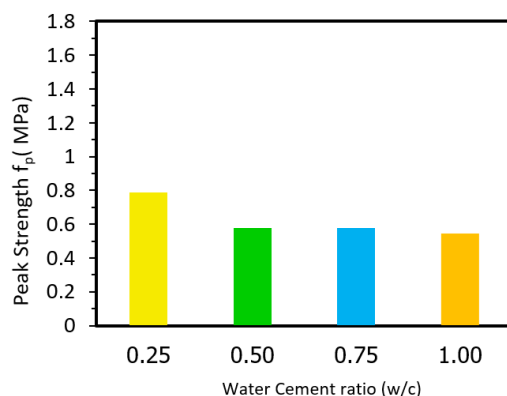
4.2 ผลการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณน้ำต่อซีเมนต์

กลุ่มตัวอย่าง B ซึ่งมีการแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) โดย B1 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.25 B2 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 B3 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.75 และ B4 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.0 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการรับกำลังดัดในทรายซีเมนต์บดอัด ซึ่งได้ผลการทดสอบกำลังดัดดังรูปที่ 4-4



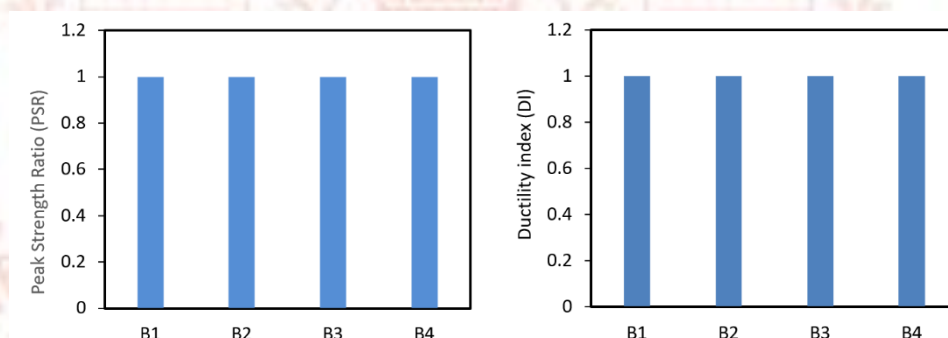
รูปที่ 4-4 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม B

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักของกลุ่มตัวอย่างนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก อาจเป็นเพราะเนื่องมาจากปริมาณน้ำและซีเมนต์ในกลุ่มตัวอย่างนี้มีสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณทรายที่ใช้ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่าง B1 ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.25 ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดสูงกว่าตัวอย่างอื่น เมื่อก่อนตัวอย่างรับน้ำหนักถึงขีดจำกัดแล้ว มีการลดลงของน้ำหนักลงอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวอย่างแสดงพฤติกรรมของวัสดุที่มีความเปราะ



รูปที่ 4-5 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ที่อัตราส่วน W/C ต่างๆ

จากรูปที่ 4-5 แสดงให้เห็นถึงกำลังดัดสูงสุดของคานตัวอย่างกลุ่ม B ซึ่งมีการแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยจะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง B1 ซึ่งมีอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.25 นั้นให้กำลังดัดสูงสุด รองลงมาคือ B2 กับ B3 และ B4 ซึ่งมีอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.0 ให้กำลังดัดต่ำสุดตามลำดับ



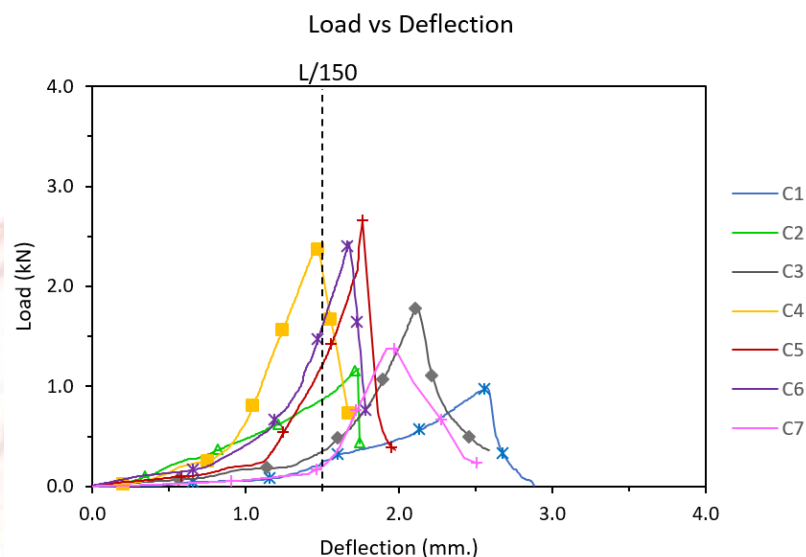
รูปที่ 4-6 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))

จากรูปที่ 4-6 แสดงอัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และค่าดัชนีความเหนียวมีค่าเท่ากับ 1 บ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแบบวิสคูอัส (Softening)

4.3 ผลการทดลองเมื่อเพิ่มซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนต่างๆ

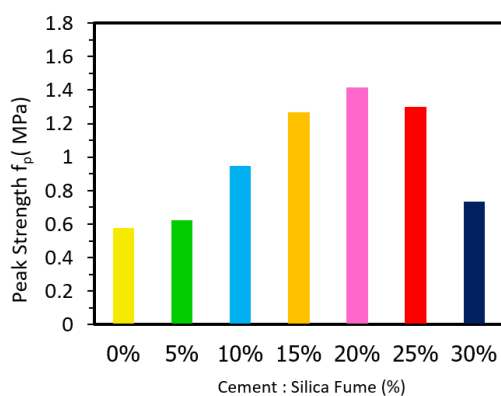
กลุ่มตัวอย่าง C ซึ่งมีการเติมซิลิกาฟุ่มเข้าไปต่ออัตราส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ โดยตัวควบคุมคือตัวอย่าง C1 ซึ่งไม่มีการเติมซิลิกาฟุ่ม ตัวอย่าง C2 มีการเติมซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 ตัวอย่าง C3 เติมซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วน 90 : 10 ตัวอย่าง C4 เติมซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วน 85 : 15 ตัวอย่าง C5 เติมซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วน 80 : 20 ตัวอย่าง C6

เติมซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วน 75 : 25 และตัวอย่าง C7 เติมซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ที่อัตราส่วน 70 : 30 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณซิลิกาต่อการรับกำลังดัดของทรายซีเมนต์



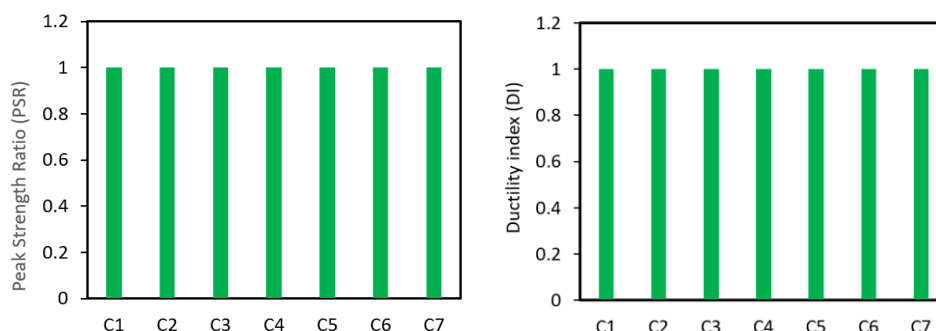
รูปที่ 4-7 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม C

จากการทดสอบความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดัด เมื่อเติมซิลิกาฟุ่มในตัวอย่างที่ปริมาณต่างๆ พบว่ามีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวควบคุม โดยอัตราส่วนการแทนที่ที่ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 80 : 20 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มน้ำหนกให้ก่อนตัวอย่างถึงขีดจำกัดแล้วมีการลดลงของการรับน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มซิลิกาฟุ่มในทรายซีเมนต์บดอัดมีการแสดงพฤติกรรมของวัสดุที่มีความเปราะ



รูปที่ 4-8 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่ม

จากรูปที่ 4-8 แสดงผลกำลังดัดสูงสุดของคานตัวอย่างเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มต่อซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการเพิ่มของกำลังดัดในตัวอย่างในอัตราสูงขึ้นตามปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มถึงจุดอิ่มตัวส่งผลให้กำลังดัดสูงสุดลดลง

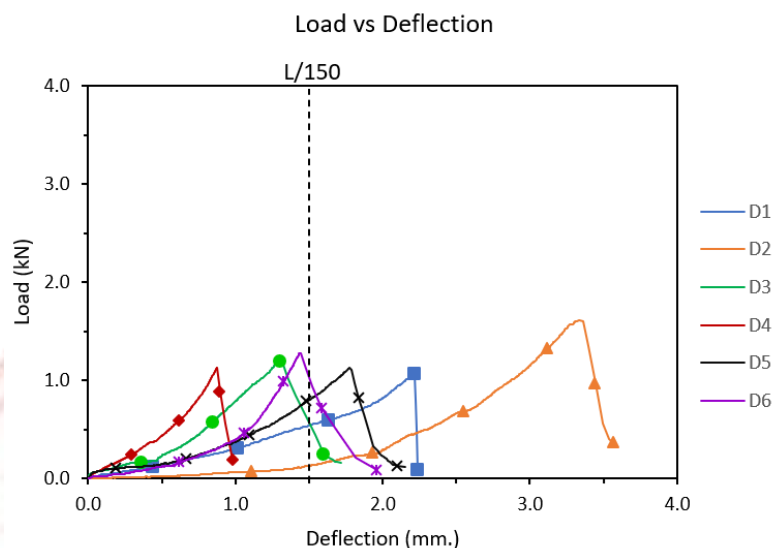


รูปที่ 4-9 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))

จากรูปที่ 4-9 แสดงอัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และค่าดัชนีความเหนียวมีค่าเท่ากับ 1 บ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแบบวัสดุอ่อน (Softening)

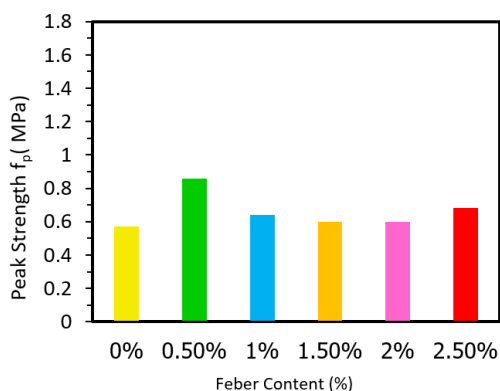
4.4 ผลการทดลองเมื่อเติมเส้นใยชนไก่

กลุ่มตัวอย่าง D มีการเติมเส้นใยชนไก่เพื่อหาความสัมพันธ์ของการรับแรงดัดในอัตราส่วนปริมาณเส้นใยต่างๆกับการไม่เติมเส้นใย โดยกำหนดให้คานตัวอย่าง D1 เป็นตัวควบคุมโดยไม่มีการเติมเส้นใยชนไก่ ตัวอย่าง D2 มีการเติมเส้นใยชนไก่ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 ตัวอย่าง D3 มีการเติมเส้นใยชนไก่ที่อัตราส่วนร้อยละ 1.0 ตัวอย่าง D4 มีการเติมเส้นใยชนไก่ที่อัตราส่วนร้อยละ 1.5 ตัวอย่าง D5 มีการเติมเส้นใยชนไก่ที่อัตราส่วนร้อยละ 2.0 และตัวอย่าง D6 มีการเติมเส้นใยชนไก่ที่อัตราส่วนร้อยละ 2.5 ตามลำดับ



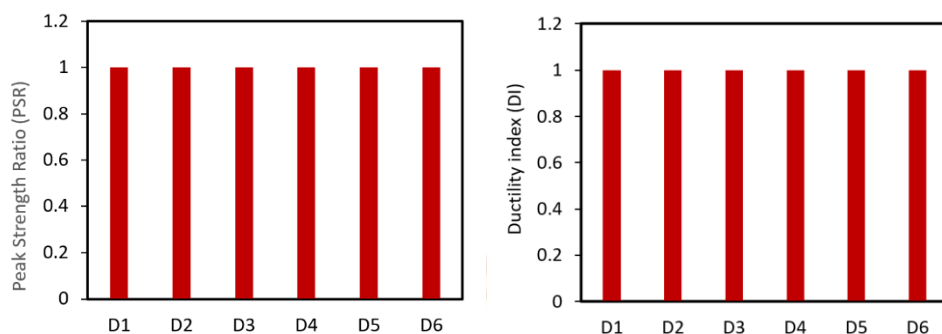
รูปที่ 4-10 ผลการทดสอบแรงดัดทรายซีเมนต์บดอัดกลุ่ม D

จากการทดสอบความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดัดและการแอ่นตัว เมื่อเติมเส้นใยชนไก่ในตัวอย่างที่ปริมาณต่างๆ พบว่าที่การเติมเส้นใยชนไก่ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 จะมีระยะการแอ่นตัวที่สูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยชนไก่ในอัตราส่วนเพิ่มขึ้นกลับไม่ส่งผลต่อระยะการแอ่นตัว และการเพิ่มปริมาณเส้นใยชนไก่ในคานตัวอย่างไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์ แต่หลังจากการเพิ่มน้ำหนักถึงขีดสุดแล้วพบว่าน้ำหนักที่กระทำลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยชนไก่ในทรายซีเมนต์บดอัดมีการแสดงพฤติกรรมของวัสดุที่มีความเปราะ



รูปที่ 4-11 กำลังดัดสูงสุดของทรายซีเมนต์ผสมเส้นใยชนไก่

จากรูปที่ 4-11 แสดงผลกำลังดัดสูงสุดของคานตัวอย่างเมื่อเติมเส้นใยชนไก่ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่ามีการเพิ่มของกำลังดัดเมื่อเติมเส้นใยชนไก่ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยชนไก่ไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพต่อกำลังรับแรงดัด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งไม่มีการเติมเส้นใยชนไก่

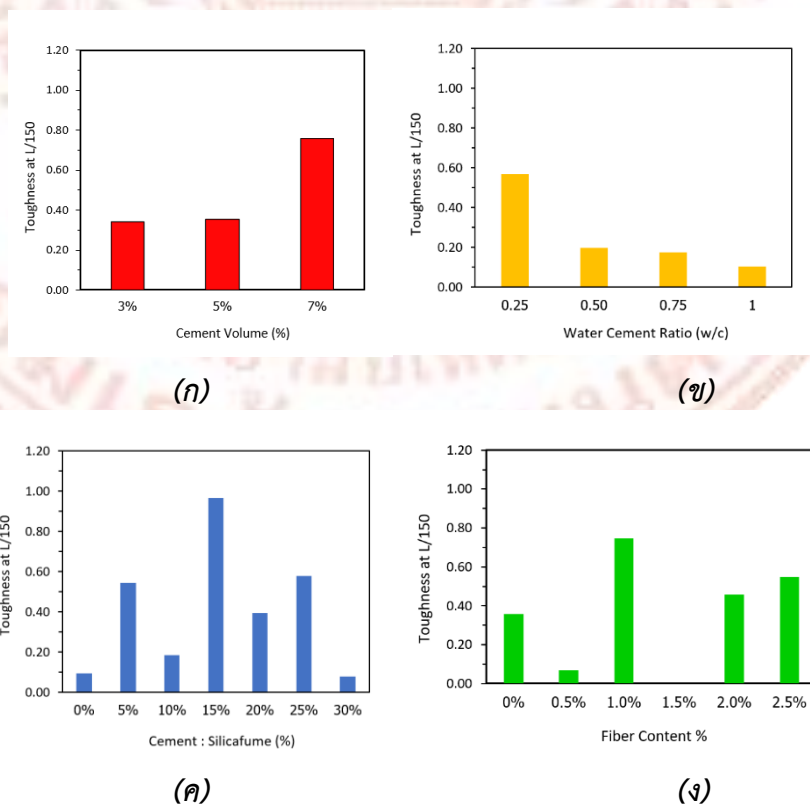


รูปที่ 4-12 อัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และดัชนีความเหนียว (Ductility Index (DI))

จากรูปที่ 4-12 แสดงอัตราส่วนกำลังดัดสูงสุดต่อกำลังดัดครั้งแรก และค่าดัชนีความเหนียวมีค่าเท่ากับ 1 บ่งบอกว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมแบบวิสคูอ้อน (Softening)

4.5 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน (ความเหนียว)

ความเหนียว (Toughness) สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการแอ่นตัวสุทธิ โดยจะพิจารณาที่การแอ่นตัวที่ระยะ $L/150$ ซึ่งในที่นี้ใช้วิธีการหาพื้นที่ใต้กราฟโดยวิธี Trapezoidal Rule โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณ ซึ่งจะแสดงผลตามรูปที่ 4-13



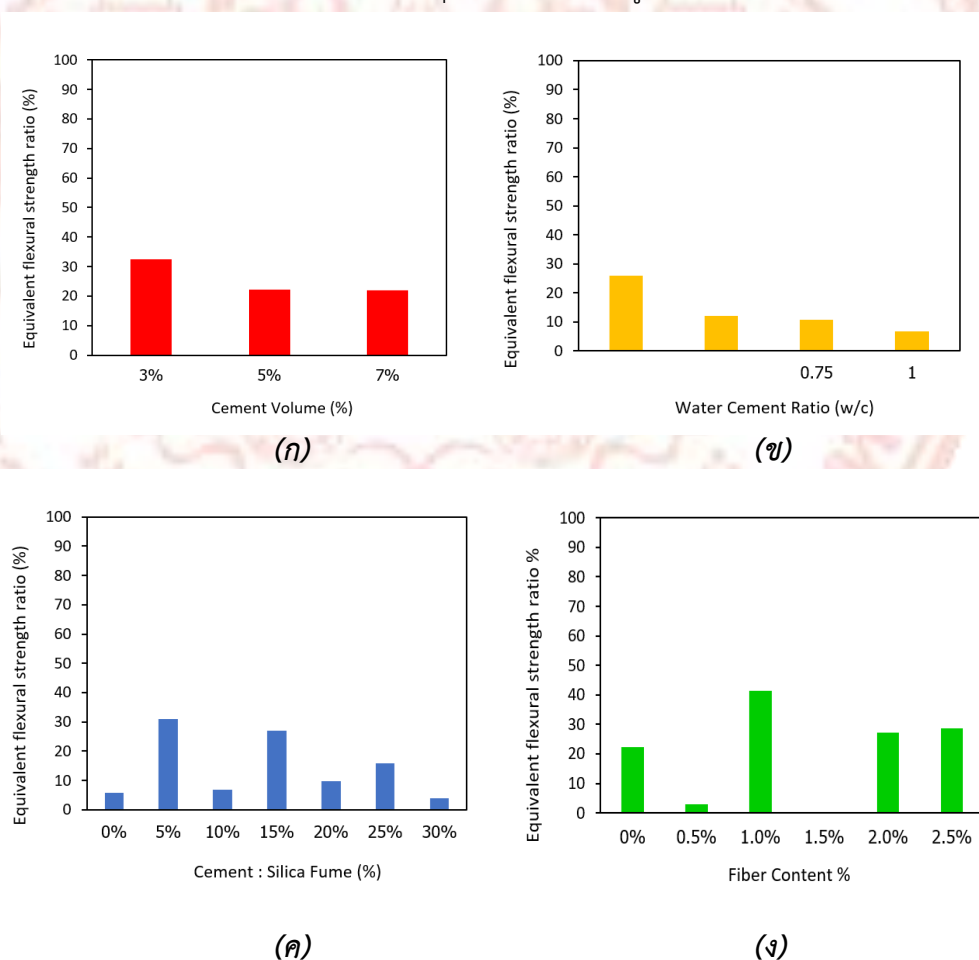
รูปที่ 4-13 ความเหนียวที่ระยะแอ่นตัว (Toughness at $L/150$, $T_{150}(N-m)$)

ความเหนียวที่ระยะแอนตัว L/150 การทดลองนี้ได้พิจารณาความเหนียวที่ระยะแอนตัวของวัสดุที่ L/150 จากรูปแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่าง C มีค่าความเหนียวแอนตัวสูงสุด รองลงมาคือกลุ่มตัวอย่าง D ในส่วนกลุ่มตัวอย่าง B และกลุ่มตัวอย่าง A มีค่าความเหนียวที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ค่า DI และ PSR ของทั้งสี่กลุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าคานตัวอย่างมีพฤติกรรมการแอนตัวแบบวัสดุอ่อน (Softening)

สังเกตได้ว่าการเพิ่มเส้นใยขนไก่ในคานตัวอย่างนั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของวัสดุหมายความว่าเส้นใยอาจยังไม่มีประสิทธิภาพในการรับความเหนียว

4.6 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า (Equivalent Flexural Strength ratio)

อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า ($R_{T,150}^D$) หมายถึง อัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการแอนตัวต่อน้ำหนักสูงสุดครั้งแรกคูณกับระยะการแอนตัวที่ L/150 ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพด้านความเหนียวของวัสดุ ดังแสดงผลตามรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 อัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่า ($R_{T,150}^D$)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดเทียบเท่า เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่าตัวอย่างทรายซีเมนต์บดอัดมีอัตราส่วนกำลังอัดเทียบเท่าที่ต่ำ จะเห็นได้จากการแสดงพฤติกรรมการแอ่นตัวแบบวัสดุอ่อน (Softening) เนื่องจากไม่มีอนุภาคใดๆคอยยึดเหนี่ยวระหว่างทรายซีเมนต์บดอัด ถึงแม้ในกลุ่มตัวอย่าง D ที่มีการเสริมเส้นใยขนไก่ พบว่าอัตราส่วนของกำลังอัดเทียบเท่ามีแนวโน้มที่ต่ำเหมือนกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้มีการเสริมเส้นใย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากประสิทธิภาพของเส้นใย หรือแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยและทรายซีเมนต์อาจยังไม่เพียงพอ

Sample	P _i (kN)	P _p (kN)	f (Mpa)	DI	PSR	Deflection			R _{T,150} (%)
						L/150 (1.5 mm.)			
						P _{L/150} (kN)	f _{L/150} (Mpa)	T _{L/150} (N-m)	
Cement Content 3%	0.696	0.696	0.371	1	1	0.624	0.333	0.340	32.57
Cement Content 5%	1.604	1.604	0.855	1	1	0.538	0.287	0.354	22.18
Cement Content 7%	2.296	2.296	1.225	1	1	1.366	0.729	0.759	22.04
W/C, 0.25	1.474	1.474	0.786	1	1	1.155	0.616	0.570	25.78
W/C, 0.50	1.082	1.082	0.577	1	1	0.384	0.205	0.197	12.14
W/C, 0.75	1.084	1.084	0.578	1	1	0.381	0.203	0.175	10.76
W/C, 1.0	1.018	1.018	0.543	1	1	0.192	0.102	0.103	6.75
Silica Fume 0%	1.082	1.082	0.577	1	1	0.259	0.138	0.094	5.79
Silica Fume 5%	1.171	1.171	0.625	1	1	0.866	0.462	0.543	30.91
Silica Fume 10%	1.778	1.778	0.948	1	1	0.35	0.187	0.183	6.86
Silica Fume 15%	2.377	2.377	1.268	1	1	1.991	1.062	0.967	27.12
Silica Fume 20%	2.652	2.652	1.414	1	1	1.224	0.653	0.394	9.90
Silica Fume 25%	2.438	2.438	1.300	1	1	1.604	0.855	0.579	15.83
Silica Fume 30%	1.375	1.375	0.733	1	1	0.196	0.105	0.079	3.83
Fiber Content 0%	1.066	1.066	0.569	1	1	0.537	0.286	0.358	22.37
Fiber Content 0.5%	1.608	1.608	0.858	1	1	0.126	0.067	0.067	2.82
Fiber Content 1.0%	1.199	1.199	0.639	1	1	0.445	0.237	0.746	41.48
Fiber Content 1.5%	1.126	1.126	0.601	1	1	0	0.000	0.000	0.00
Fiber Content 2.0%	1.126	1.126	0.601	1	1	0.799	0.426	0.459	27.18
Fiber Content 2.5%	1.279	1.279	0.682	1	1	0.942	0.502	0.548	28.56

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานทรายซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C1609

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นถึงการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังดัดของทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และเส้นใยขนไก่ โดยมีสัดส่วนในการทดสอบตามตารางที่ 3-2 และนำตัวอย่างมาทดสอบการรับกำลังดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609-10 ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และเส้นใยขนไก่ หลังจากการทดสอบผู้วิจัยได้ข้อสรุปว่า การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์บดอัดมีความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนปูนซีเมนต์ ในส่วนของกลุ่มตัวอย่างที่มีการเติมซิลิกาฟุ่ม พบว่าเมื่อเติมซิลิกาฟุ่มทดแทนคอนกรีตที่อัตราส่วนร้อยละ 20 ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเทียบเท่ากับการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 7 และพบว่าการเติมเส้นใยขนไก่ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมขนไก่ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และความสามารถในการดูดซับพลังงานและอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่ามีแนวโน้มที่ต่ำเหมือนกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมเส้นใย ทั้งนี้การนำไปใช้ในการปรับปรุงในงานทาง ผู้วิจัยแนะนำให้ใช้ปูนซีเมนต์ ร่วมกับการใช้ซิลิกาฟุ่มในการปรับปรุงคุณภาพดินทรายเนื่องจากมีแนวโน้มของการรับกำลังดัดที่ดี

5.1.2 การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ต่อกำลังดัดของดินทรายซีเมนต์ พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ส่งผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่าง โดยในตัวอย่างที่มีการควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.25 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าตัวอย่างอื่น แต่ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อื่นๆ มีแนวโน้มของกำลังรับแรงดัดที่ไม่สูง ทั้งนี้อาจตั้งข้อสังเกตได้ว่า ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์มีสัดส่วนที่น้อยกว่าเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับปริมาณของทราย จึงยังอาจไม่เห็นผลกระทบที่มีนัยยะสำคัญต่อการเพิ่มกำลังรับแรงดัด โดยผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้ปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้สอดคล้องกับปริมาณของทราย เพื่อให้การพัฒนากำลังรับแรงดัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์

5.1.3 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับซิลิกาฟุ่มที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน พบว่าในกลุ่มตัวอย่างที่มีการเติมซิลิกาฟุ่มแทนที่ซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังดัดของทรายซีเมนต์บดอัด โดยการเติมซิลิกาฟุ่มช่วยให้ความสามารถในการรับแรงดัดของทรายซีเมนต์ดีขึ้น แต่การเติมซิลิกาฟุ่มในปริมาณมาก ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากขนาด

อนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่มีขนาดเล็กมาก จึงต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อการพัฒนา กำลังที่สมบูรณ์ จึงอาจทำให้น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ

5.1.4 การศึกษาผลของการเติมเส้นใยชนไก่ต่อกำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์บดอัด พบว่า อัตราส่วนของเส้นใยชนไก่ที่เหมาะสมคือร้อยละ 0.5 เนื่องจากส่งผลให้ระยะการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น และ กำลังรับแรงดัดของทรายซีเมนต์เพิ่มขึ้น แต่การเติมชนไก่ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น และระยะการแอ่นตัวไม่ได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยเสนอว่าชนไก่อาจยังไม่ใช่วัสดุที่มี ประสิทธิภาพต่อการรับแรงดัดของทรายซีเมนต์ เนื่องจากตามผลการทดสอบบ่งบอกว่าความสามารถ ในการดูดซับพลังงานและอัตราส่วนกำลังดัดเทียบเท่ามีค่าที่ต่ำเสมือนกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้เติมเส้นใย

5.1.5 ข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้จากผลการทดลอง ผู้วิจัยเสนอว่าการเติมซิลิกาฟุ้งในทราย ซีเมนต์บดอัดส่งผลให้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมซิลิกาฟุ้งทำให้โครงสร้างของทราย ซีเมนต์บดอัดแน่นขึ้นและมีความหนาแน่นสูงขึ้นกว่าการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังช่วยลด ปริมาณรูพรุนภายในวัสดุ ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง และมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำ เพิ่มขึ้น ที่สำคัญคือ การใช้ซิลิกาฟุ้งยังมีส่วนช่วยลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ในงานก่อสร้าง ซึ่งไม่เพียงแต่ ช่วยลดต้นทุนในระยะยาว แต่ยังมีส่วนช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิต ซีเมนต์ อันเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมอีกด้วย

จากข้อสรุปที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การเสริมเส้นใยชนไก่ไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในการรับแรงดัดของทรายซีเมนต์บดอัด และการเติมซิลิกาฟุ้งจะช่วยส่งผลให้ความสามารถในการรับ แรงดัดเพิ่มขึ้นแต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแอ่นตัวของวัสดุ

บรรณานุกรม

- [1] Mu, et.al. ; (2015) Laboratory evaluation on strength behavior of cement-soil mixture improved with polypropylene"
- [2] Jeffrey W. Kock ; (May, 2006) Physical and Mechanical Properties of Chicken Fether Materials Georgia Institute of Technology
- [3] ASTM C1609-10 "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete,"(Using Beam With Third-Point Loading), American Society of Testing and Materials, pp. 1-8, January 2006
- [4] ASTM D1632 (Compressive Strength of Soil-Cement Mixtures) Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders
- [5] พิทยา แจ่มสว่าง , อิทธิพลของชนิดเส้นใยที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของทรายซีเมนต์บดอัด ; มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2561
- [6] วนิตา สัจ ; (2560) การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยขนเป็ด ขนไก่ และขนสุนัข
- [7] Ghavami K., Toledo Filho R.D. and Barbosa N.P. (1999) "Behavior of composite soil reinforced with natural fibers"Cement and Concrete Composite
- [8] Hejazi S.M., Sheikhzadeh M., Abtahi S.M. and Zadhoush A. (2012) "A simple review of doil reinforcement by using natural and synthetic fibers"
- [9] เพิ่มพร บัวทอง, สมโพธิ อยู่ไว, ฉัตรกมล เดชเรือง, "กำลังรับแรงอัดและแรงดดของทรายซีเมนต์เสริมเส้นใยปาล์ม", วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1, 2020
- [10] เฉลิมพล วังสำเนา, สกลโพลาด, พิมพ์นภัส คำมาวงศ์, สุนันทา สี่มาจารย์, อารยา บุญมี และ กীরติกานต์ พิริยะกุล "อิทธิพลของเส้นใยแก้วและของเสียจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงขยะมูล

ฝอยชุมชนที่มีต่อกำลังตัดของทรายซีเมนต์บดอัด” , วารสารวิชาการเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology 2567)

บรรณานุกรม

- [11] พิตยา แจ่มสว่าง, พานิช วุฒิพฤษ และสันติ อินทพิชัย 2557 “การปรับปรุงกำลังตัดของทราย
ซีเมนต์บดอัดด้วยเส้นใยโพลีพรพิลีน” , วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่
24 ฉบับที่ 1 ม.ค. - เม.ย. 2557
- [12] Sathiyamoorthy Margabandu , Madhavan. P ,Anilkumar, Prabhakaran, Sivakumar
“Mechanical Behaviour of Jute / Glass / Chicken Feather Reinforced Hybrid
CompositesW”, Journal of Science, Computing and Engineering Research
(JSCER) Volume-6, Issue- 4, April 2023.
- [13] ฤกษ์ ประเสริฐหล้า “ผลของซิลิกาฟุ้งและวิธีการบ่มต่อคุณสมบัติของรีแอกทีฟพาวเดอร์
คอนกรีต , มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (2556)
- [14] M. Mostafa and N. Uddin, (2016) “Experimental analysis of Compressed Earth
Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces”
Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, University
of Alabama at Birmingham
- [15] ปริญา จินดาประเสริฐ “ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และคอนกรีต” , สมาคมคอนกรีตไทย (2547)
- [16] “Difference Between Densified and Undensified Silica Fume” สืบค้นเมื่อ 30 มีนาคม
2568, HSA Microsilica, [https://microsilica-fume.com > uploads > 2021/06](https://microsilica-fume.com/uploads/2021/06)
- [17] Jamsawang P., Voottipruex P. and Horpibulsuk S. “Flexural strength
characteristics of compacted cement polypropylene fiber sand” J. Mater
Civil Eng ASCE (2015)
- [18] หนังสือ “Properties of Concrete” , Adam M. Neville; fifth edition (2011)

[19] “Concrete Technology fifth edition” Dr M L Gambhir, McGraw Hill Education
(India) Private Limited 2013



ภาคผนวก ก

ภาพลักษณะรอยร้าวคานตัวอย่าง



A1 OPC 3%



A2 OPC 5%



A3 OPC 7%



B1 W/C 0.25



B2 W/C 0.5



B3 W/C 0.75



B4 W/C 1.0



C1 Silica Fume 0%



C2 Silica Fume 5%



C3 Silica Fume 10%



C4 Silica Fume 15%



C5 Silica Fume 20%



C6 Silica Fume 25%



C7 Silica Fume 30%



D1 Fiber Content 0%



D2 Fiber Content 0.5%



D3 Fiber Content 1.0%



D4 Fiber Content 1.5%



D5 Fiber Content 2.0%



D6 Fiber Content 2.5%



ภาคผนวก ข

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ

ข้อมูลผลการทดสอบคานตัวอย่างกลุ่ม A

	A1	A2	A3
First peak strength (kN)	0.696	1.604	2.296
Peak strength (kN)	0.696	1.604	2.296
Residual strength Ratio (RSR ₁₅₀)	0.894	0.334	0.594
Ductility index	1	1	1
Toughness at L/150 (N-m)	0.34	0.354	0.759
Peak strength ratio	1	1	1
Equivalent flexural strength ratio (%)	32.57	22.18	22.04

ข้อมูลผลการทดสอบคานตัวอย่างกลุ่ม B

	B1	B2	B3	B4
First peak strength (kN)	1.474	1.082	1.084	1.018
Peak strength (kN)	1.474	1.082	1.084	1.018
Residual strength Ratio (RSR ₁₅₀)	1.469	0.665	0.659	0.353
Ductility index	1	1	1	1
Toughness at L/150 (N-m)	0.57	0.197	0.175	0.103
Peak strength ratio	1	1	1	1
Equivalent flexural strength ratio (%)	25.78	12.14	10.76	6.75

ข้อมูลผลการทดสอบคานตัวอย่างกลุ่ม C

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
First peak strength (kN)	1.082	1.171	1.778	2.377	2.652	2.438	1.375
Peak strength (kN)	1.082	1.171	1.778	2.377	2.652	2.438	1.375
Residual strength Ratio (RSR ₁₅₀)	0.448	1.386	0.369	1.570	0.865	1.233	0.267
Ductility index	1	1	1	1	1	1	1
Toughness at L/150 (N-m)	0.094	0.543	0.183	0.967	0.394	0.579	0.079
Peak strength ratio	1	1	1	1	1	1	1
Equivalent flexural strength ratio (%)	5.79	30.91	6.86	27.12	9.90	15.83	3.83

ข้อมูลผลการทดสอบคานตัวอย่างกลุ่ม D

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
First peak strength (kN)	1.066	1.608	1.199	1.126	1.126	1.279
Peak strength (kN)	1.066	1.608	1.199	1.126	1.126	1.279
Residual strength Ratio (RSR ₁₅₀)	0.944	0.146	0.695	0	1.330	1.380
Ductility index	1	1	1	1	1	1
Toughness at L/150 (N-m)	0.358	0.067	0.746	0	0.459	0.548
Peak strength ratio	1	1	1	1	1	1
Equivalent flexural strength ratio (%)	22.37	2.82	41.48	0	27.18	28.56

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	อาสา มาศจร
ชื่อการค้นคว้าอิสระ	การปรับปรุงกำลังตัดสำหรับดินทราย ผสมซีเมนต์ ซิลิกาฟุ่ม และเส้นใยขนไก่
สาขาวิชา	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง
ประวัติ	ประวัติการศึกษา ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประวัติการทำงาน 1. วิศวกรสนาม บริษัท ช.การช่าง (ลาว) จำกัด พ.ศ. 2560 - 2561 2. วิศวกรโยธา บริษัท ไทยมาร์เคน จำกัด พ.ศ. 2561 - 2565 3. วิศวกรโยธาปฏิบัติการ สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2565 - 2567 4. วิศวกรโยธาปฏิบัติการ สำนักงานทางหลวงที่ 14 (ชลบุรี) กรมทางหลวง พ.ศ. 2567 - ปัจจุบัน