



สมบัติทางกลและความทนไฟของคอนกรีตผสมด้วย
ของเสียบอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

โดย

นางสาวชรินทร์ เอี่ยมละออ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2567

MECHANICAL PROPERTIES AND FIRE RESISTANCE OF
GLASS FIBER REINFORCED POLYMER WASTE

BY

CHARINRAT AIAMLAOO



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE
OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2024

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวชรินทร์ เอี่ยมละออ

เรื่อง

สมบัติทางกลและความทนไฟของคอนกรีตผสมด้วยของเสียพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

เมื่อ วันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ. 2568

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโถม)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ เหนือคลอง)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญพิชชา สนธิอินทร์)

คณบดี



(ศาสตราจารย์ ดร.สัญญา มิตรเอม)

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | สมบัติทางกลและความทนไฟของคอนกรีตผสมด้วยของเสียพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว |
| ชื่อผู้เขียน | นางสาวชรินทร์ เอี่ยมละออ |
| ชื่อปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) |
| สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย | วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รองศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโฉม |
| ปีการศึกษา | 2567 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมด้วยของเสียพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer Waste, GFRPW) โดยพิจารณาผลกระทบของปริมาณและความยาวของเส้นใยที่แตกต่างกัน โดยปริมาณที่ศึกษา ได้แก่ 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% 2.0% 4.0% 6.0% และ 8.0% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ความยาวของเส้นใยที่ศึกษา ได้แก่ 3 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร ที่มีต่อค่าการยุบตัว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย GFRPW โดยค่าสูงสุดเพิ่มขึ้น 64.50% เมื่อเทียบกับคอนกรีตอ้างอิง กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้นสูงสุด 54.34% นอกจากนี้ กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นสูงสุด 26.73% ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ของเสียพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของคอนกรีตได้ ซึ่งเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเส้นใย, ของเสียพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, สมบัติทางกล

| | |
|--------------------------------|--|
| Thesis Title | MECHANICAL PROPERTIES AND FIRE RESISTANCE OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER WASTE |
| Author | Miss. Charinrat Aiamlao |
| Degree | Master of Engineering (Civil Engineering) |
| Major Field/Faculty/University | Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr.Chanachai Thongchom |
| Academic Year | 2024 |

ABSTRACT

This research investigates the mechanical properties of concrete incorporating glass fiber-reinforced polymer waste (GFRPW). The study examines the effects of various fiber contents (0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, and 8.0% by weight of cement) and different fiber lengths (3 cm, 4 cm, and 5 cm) on the workability, compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength of concrete. The results indicate that the workability of GFRPW-reinforced concrete decreases as the fiber content increases. However, the compressive strength improves with increasing GFRPW content, reaching a maximum increase of 64.50% compared to the reference concrete. The splitting tensile strength also shows a maximum enhancement of 54.34%, while the flexural strength increases by up to 26.73%. These findings demonstrate that incorporating glass fiber-reinforced polymer waste can effectively improve the mechanical properties of concrete. This approach provides an environmentally friendly and sustainable method for repurposing industrial waste materials in the construction industry.

Keywords: Fiber-reinforced concrete, glass fiber-reinforced polymer waste, mechanical properties

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร.ชนะชัย ทองโฉม อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ พร้อมทั้งให้ความรู้ในเรื่อง พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ รศ.ดร.สายันต์ ศิริมนตรี, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผศ.ดร.ภีม เหนือคลอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผศ.ดร.เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์ ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ รวมทั้ง ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษา

ขอขอบพระคุณ บริษัท จีเออาร์พี คิงส์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้การสนับสนุนพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วในการทำวิจัยในครั้งนี้

ชรินทร์ เอี่ยมละออ

(4)

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (1)

ABSTRACT (2)

กิตติกรรมประกาศ (3)

สารบัญ (4)

สารบัญตาราง (7)

สารบัญภาพ (8)

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 4

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 ผลกระทบของความยาวเส้นใยสังเคราะห์ต่อคุณสมบัติคอนกรีต 6

2.1.1 ผลกระทบของความยาวเส้นใยสังเคราะห์ต่อคุณสมบัติคอนกรีต 6

| | |
|---|-----|
| | (5) |
| 2.1.2 ผลกระทบของความยาวเส้นใยของเสี้ยนจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วต่อ คุณสมบัติคอนกรีต | 11 |
| 2.2 การแปรสภาพวัสดุผสมเพิ่มจาก GFRPW ต่อคุณสมบัติคอนกรีต | 12 |
| 2.3 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและความทนไฟของคอนกรีตเสริมเส้นใย | 20 |
| 2.3.1 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) | 20 |
| 2.3.2 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) | 24 |
| 2.3.3 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) | 25 |
| 2.3.4 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง | 29 |
| | |
| บทที่ 3 วิธีการวิจัย | 33 |
| | |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย | 33 |
| 3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement) | 33 |
| 3.1.2 มวลรวม (Aggregate) | 34 |
| 3.1.3 สารผสมเพิ่ม (Admixture) | 36 |
| 3.1.4 เส้นใยของเสี้ยนจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว | 36 |
| 3.1.5 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีต | 37 |
| 3.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล | 37 |
| 3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด | 38 |
| 3.2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว (Hardened) | 38 |
| 3.2.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมี ของคอนกรีต (Chemical Composition for Concrete) | 47 |
| 3.3 สรุปการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย GFRPW | 48 |
| | |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล | 49 |
| 4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการใช้งานได้ของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW | 49 |

| | |
|---|-----|
| | (6) |
| 4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW | 50 |
| 4.2.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (The Compressive Strength of Concrete reinforce with GFRPW) | 50 |
| 4.2.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (The Splitting Tensile Strength of Concrete reinforce with GFRPW) | 53 |
| 4.2.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (The Flexural Strength of Concrete reinforce with GFRPW) | 55 |
| 4.2.4 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Unit Weight of Concrete reinforce with GFRPW) | 57 |
| 4.2.5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Water Absorption of Concrete reinforce with GFRPW) | 58 |
| 4.2.6 ผลการทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง | 59 |
| 4.2.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง | 61 |
| 4.3 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Microstructure of Concrete Reinforced with GFRPW) | 62 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 65 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 65 |
| รายการอ้างอิง | 67 |
| ประวัติผู้เขียน | 71 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ค่าการยุบตัว หน่วยเป็นเซนติเมตร (W. C. Wang et al., 2020) | 11 |
| 2.2 ผลกระทบของผงของเสี้ยจาก GRP ต่อกำลังอัดของคอนกรีต (N/mm ²) ภายใต้สภาวะการบ่มที่แตกต่างกัน (Asokan et al., 2009) | 15 |
| 2.3 ผลกระทบของเส้นใยของเสี้ยจาก GRP (5%) ต่อกำลังอัดของ คอมโพสิตซีเมนต์ (Asokan et al., 2009) | 15 |
| 2.4 คุณสมบัติของแท่ง GFRP (Zhou et al., 2022) | 18 |
| 2.5 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยแก้ว (Yildirim & Özhan, 2023) | 23 |
| 3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซีเมนต์ไฮดรอลิก (TPI Polene, 2024) | 34 |
| 3.2 ส่วนผสมคอนกรีต kg/m ³ | 37 |
| 3.3 ตารางสรุปวิธีการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง | 48 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 แผนภูมินี้แสดงการเติบโตของตลาด FRP ในสหรัฐอเมริกาตามประเภทตั้งแต่ปี 2014 ถึงปี 2025 แสดงมูลค่าตลาดในหน่วยพันล้านดอลลาร์สหรัฐ (Grand View Research, 2020) | 1 |
| 2.1 เส้นใยบะซอลต์ที่ความยาว (ก) 12 มม. (ข) 18 มม. (ค) 24 มม. (ง) 30 มม. (จ) 36 มม. | 9 |
| 2.2 การเปลี่ยนแปลงการยุบตัวกับความยาวเส้นใยที่แตกต่างกัน | 9 |
| 2.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวเส้นใยต่อกำลังอัดสำหรับตัวอย่าง PC30(40) และ BF30(40)-(12~36)-0.075(0.1) (ก) กำลังรับแรงอัดที่ 30 MPa | 10 |
| 2.4 ผลของความยาวเส้นใยต่อกำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (STS) สำหรับตัวอย่าง PC30 และ BF30-(12~36)-0.1(0.15) (X. Wang et al., 2019) | 10 |
| 2.5 ตัวอย่างของเสียจาก GRP ที่ผ่านการบดทั้งส่วนผสมของผงและเส้นใย | 13 |
| 2.6 เส้นใยของเสียจาก GRP ที่ผ่านการบด (Asokan et al., 2009) | 13 |
| 2.7 ผลกระทบของผงของเสียจาก GRP ต่อความหนาแน่นของคอนกรีต | 14 |
| 2.8 ผลกระทบของเส้นใยของเสียจาก GRP ต่อความหนาแน่นของแผ่นกรูทาสถาปัตยกรรม | 14 |
| 2.9 ของเสียละเอียดจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว João R และคณะ(2011) | 16 |
| 2.10 มวลรวมหยาบและการเสริมแรงแบบไม่ต่อเนื่องหรือเข็ม (needles) | 17 |
| 2.11 มวลรวมเศษวัสดุ GFRP ที่ถูกตัด (Zhou et al., 2022) | 19 |
| 2.12 ลักษณะการวิบัติ (ก) FRP0; (ข) FRP30; (ค) FRP50; (ง) FRP70; (จ) FRP100 | 19 |
| 2.13 ผลของสัดส่วนปริมาณเส้นใยต่อกำลังอัดของคอนกรีตเสริมใยบะซอลต์สำหรับตัวอย่าง PC30(40) และ BF30(40)-12(24)-(0.075~0.4) | 20 |
| 2.14 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่มต่างๆ (W. C. Wang et al., 2020) | 21 |
| 2.15 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วในวันที่ 28 และวันที่ 56 | 21 |
| 2.16 การแปรรูปด้วยกระบวนการทางกลของใบก้างหินลมเป็นเส้นใยขนาดใหญ่ | 22 |
| 2.17 ลักษณะของเส้นใยแก้ว (Yildirim & Özhan, 2023) | 23 |
| 2.18 ผลของสัดส่วนปริมาณเส้นใยต่อกำลังต้านทานแรงดึงแบบแยก | 24 |
| 2.19 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วบ่มน้ำที่ 28 วัน | 25 |
| 2.20 การแปรรูปด้วยกระบวนการทางกลของใบก้างหินลมเป็นเส้นใยขนาดใหญ่ | 26 |
| 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว (Fu et al., 2021) | 27 |
| 2.22 แรงกระทำสูงสุดที่กระทำกับคานตัวอย่าง (Yuan et al., 2022) | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว (Yuan et al., 2022) | 28 |
| 2.24 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วในอุณหภูมิต่างๆ | 30 |
| 2.25 การนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง | 30 |
| 2.26 ผลการทดสอบ UPV ของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับการทดสอบภายใต้ความร้อนที่ 400 °C และ 600 °C (Yildirim & Özhan, 2023) | 31 |
| 2.27 ความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับการทดสอบภายใต้ความร้อนที่ 400 °C และ 600 °C (Yildirim & Özhan, 2023) | 32 |
| 3.1 แผนภูมิ Gradation Curves ของมวลรวมหยาบ | 35 |
| 3.2 แผนภูมิ Gradation Curves ของมวลรวมละเอียด | 35 |
| 3.3 สารลดน้ำที่ใช้ในงานวิจัย (Sika Indonesia, 2024) | 36 |
| 3.4 ขั้นตอนในการเตรียมเส้นใย GFRPW | 37 |
| 3.5 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Test) | 39 |
| 3.6 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) | 41 |
| 3.7 ตัวอย่างการทดสอบการตัด | 42 |
| 3.8 เตาเผาไฟฟ้า | 45 |
| 3.9 วิธีการเผาตัวอย่างคอนกรีตผสมเสริมด้วย GFRPW | 46 |
| 4.1 ผลของอัตราส่วนปริมาณเส้นใย GFRPW ต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต | 50 |
| 4.2 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน | 52 |
| 4.3 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงอัด | 53 |
| 4.4 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน | 54 |
| 4.5 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก | 55 |
| 4.6 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน | 56 |
| 4.7 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดัด | 57 |
| 4.8 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน | 58 |
| 4.9 การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน | 59 |
| 4.10 เปรียบเทียบร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW | 60 |

- 4.11 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส 62
- 4.12 SEM ของตัวอย่างคอนกรีต ก) คอนกรีตอ้างอิง ข) คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW 63
- 4.13 SEM ของตัวอย่างคอนกรีต ก) คอนกรีตอ้างอิงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP) ได้รับความนิยมรับและใช้งานอย่างแพร่หลายในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การก่อสร้าง การขนส่ง อุตสาหกรรมยานยนต์ ผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค และอุปกรณ์กีฬา เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา สมรรถนะทางกลสูง ความยืดหยุ่นในการออกแบบและผลิต ติดตั้งง่าย และทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรง (Bank, 2007). การใช้งาน FRP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกา สอดคล้องกับหลายการวิจัยและรายงานด้านการตลาดระดับโลก



ภาพที่ 1.1 แผนภูมินี้แสดงการเติบโตของตลาด FRP ในสหรัฐอเมริกาตามประเภทตั้งแต่ปี 2014 ถึงปี 2025 แสดงมูลค่าตลาดในหน่วยพันล้านดอลลาร์สหรัฐ (Grand View Research, 2020)

จากภาพที่ 1.1 มูลค่าตลาดโลกของ FRP อยู่ที่ 103.4 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ และคาดการณ์ว่าจะเติบโตด้วยอัตราเฉลี่ยประมาณ 5.2% ต่อปีในช่วงปี 2021-2028 (Grand View Research, 2020) สอดคล้องกับข้อมูลจาก Stratview Research ในปี 2021 ที่ประเมินว่าตลาด FRP จะเติบโตด้วยอัตราเฉลี่ย 6.1% ต่อปีในช่วงปี 2021-2026 (Stratview Research, 2021) ขณะที่ Markets and Markets ในปี 2021 ประเมินว่าตลาด FRP มีมูลค่า 84.5 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ และคาดการณ์ว่าจะเติบโตเป็น 131.6 พันล้านดอลลาร์ในปี 2026 (Markets and Markets, 2021) ระบุ

ว่าตลาดหลักของ FRP ประกอบด้วยประเทศจีน สหรัฐอเมริกา เยอรมนี และญี่ปุ่น ซึ่งรวมกันคิดเป็นสัดส่วนกว่า 55% ของตลาดโลก (Lucintel, 2019) แนวโน้มการเติบโตของ FRP ย่อมส่งผลต่อการใช้วัสดุนี้ในอุตสาหกรรมและการก่อสร้างในประเทศไทย ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะ FRP การจัดการของเสีย FRP จึงเป็นปัญหาที่ต้องหาแนวทางแก้ไข (Conroy et al., 2004; Pickering, 2004; Scheirs, 1998)

วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดในตลาดของ FRP และเพิ่มขึ้นในทุกๆปี เนื่องจาก GFRP ผลิตจากเส้นใยแก้วที่วางตัวตามทิศทางที่ต้องการ และมีคุณสมบัติที่ดีในการเสริมกำลังคอนกรีต โดย GFRP มีน้ำหนักเบา มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ค่าอัตราส่วนค่าความแข็งแรงและกำลัง (ต่อน้ำหนัก)สูงกว่าวัสดุดั้งเดิม มีความเสถียรเชิงรูปร่างขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง เป็นฉนวนไฟฟ้า เป็นฉนวนความร้อน เป็นฉนวนเสียง มีความสามารถในการทนต่อการหด (Ummah, 2019) มีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า 80 ปี และทนทานต่อการกัดกร่อน ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโครงสร้างลง การนำ GFRP มาใช้แทนเหล็กในการเสริมกำลังคอนกรีตมีประโยชน์มากมาย ไม่เพียงแต่ลดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็ก แต่ยังช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้าง ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง นอกจากนี้ GFRP ยังมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงกระแทกที่ดี ทำให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ต้องการความทนทานและความปลอดภัยในการใช้งานเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการพัฒนาการก่อสร้างในยุคปัจจุบันที่ต้องการวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

แนวคิดในการเสริมกำลังวัสดุก่อสร้างที่เปราะด้วยเส้นใยมีการพัฒนามาตั้งแต่สมัยโบราณ ตัวอย่างเช่น การใช้ดินเหนียวอบเสริมด้วยฟางในการสร้างกระท่อมดิน และการเสริมปูนก่อด้วยขนสัตว์ การเสริมเส้นใยในคอนกรีตเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากส่งผลให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีขึ้น ทั้งสมบัติทางกล การยึดหดตัว และความทนทาน (Ahmed & Jia, 2019) คอนกรีตเสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Concrete, GFRC) เป็นหนึ่งในนวัตกรรมสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วโลก เนื่องจากมีบทบาทในการเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และการออกแบบสถาปัตยกรรม โดย GFRC มีความหลากหลายและสามารถตอบโจทย์ความต้องการของสถาปนิกและวิศวกรได้ดี (Masuelli, 2013) เส้นใยแก้วมีบทบาทในการเสริมความแข็งแรงต่อการดัดงอ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักและลดโอกาสการเกิดการวิบัติอย่างฉับพลันของโครงสร้าง (Kene, 2012; Löber & Holschemacher, 2014) การเสริมเส้นใยมีความสามารถในการทนทานต่อการแตกหักสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมเส้นใย การเสริม

เส้นใย 0.5% เป็น 1.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ความสามารถในการทนทานต่อการแตกหักเพิ่มขึ้น การเกิดรอยแตกและความเสียหายลดลงอย่างเห็นได้ชัด (Gilbert & Bernard, 2018) การแปรรูป GFRPW เป็นเส้นใยขนาดใหญ่ใช้เสริมกำลังคอนกรีต (macro fibre reinforced concrete, MFRC) ความสามารถในการทำงานขึ้นอยู่กับอัตราส่วนปริมาณของเส้นใย เมื่อปริมาณการเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตลดลง การเสริมเส้นใยขนาดใหญ่ 1.5% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ กำลังรับแรงดัดและความเหนียวจะเพิ่มขึ้น 1.3 และ 230 เท่าตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงสุด 4.4% จากคอนกรีตปกติ (Fu et al., 2024)

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ต้องการนำเสนอถึงแนวทางที่เป็นไปได้สำหรับการศึกษาในอนาคตเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตของเสียจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer Waste, GFRPW) โดยงานวิจัยนี้ มีการใช้ GFRPW เป็นวัสดุคอมโพสิตในคอนกรีตที่สัดส่วนและความยาวแตกต่างกัน โดยศึกษาผลกระทบของ GFRPW ต่อคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ การยุบตัว หน่วยน้ำหนัก ความเป็นโพรง ศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดัดแบบผ่าซีกและกำลังรับแรงดัด ศึกษาโครงสร้างจุลภาค (SEM) รวมถึงศึกษาความสามารถในการต้านทานอุณหภูมิสูงของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ในสัดส่วนและความยาวต่าง ๆ ผลการศึกษาครั้งนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อประเมินแนวทางการนำเส้นใย GFRPW มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตเพื่อพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตและเพื่อคำนึงถึงผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม จึงนำแนวคิดการจัดการของเสียให้เกิดประโยชน์สูงสุดมาใช้กับ GFRPW

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดและอัตราส่วนที่แตกต่างกันของการใช้เส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและความทนไฟของคอนกรีต
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการใช้เส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วที่ขนาดและอัตราส่วนแตกต่างกันในของคอนกรีต
- 1.2.3 เพื่อศึกษาลักษณะของเส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ขนาดของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วที่ศึกษา 3 ขนาด คือ 3 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร
- 1.3.2 อัตราส่วนของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วที่ผสมเพิ่มเป็นร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 4.0 6.0 และ 8.0 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์
- 1.3.3 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเส้นใย GFRPW ตัวอย่างเช่น กำลังรับแรงอัด (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39, (Committee, 2021)) กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496, (Astm, 2004)) และกำลังรับแรงดัด (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C78, (Test et al., 2010)) คุณสมบัติในการต้านทานอุณหภูมิสูง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงผลกระทบของขนาดและอัตราส่วนที่แตกต่างกันของการใช้เส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและความทนไฟของคอนกรีต
- 1.4.2 ทราบถึงพฤติกรรมของการใช้เส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วที่ขนาดและอัตราส่วนแตกต่างกันในของคอนกรีต

- 1.4.3 ทราบถึงลักษณะของเส้นใยของเสี่ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)
- 1.4.4 สามารถนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้เส้นใยของเสี่ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง



บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลกระทบของความยาวเส้นใยสังเคราะห์ต่อคุณสมบัติคอนกรีต

2.1.1 ผลกระทบของความยาวเส้นใยสังเคราะห์ต่อคุณสมบัติคอนกรีต

ความยาวของเส้นใยมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตในหลายด้าน ทั้งในแง่ของกำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด ความทนทานต่อการแตกร้าว และการกระจายตัวของรอยร้าว การเพิ่มความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีต (W. C. Wang et al., 2020) เนื่องจากเส้นใยที่ยาวขึ้นจะช่วยเชื่อมโยงอนุภาคของคอนกรีตให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น และสามารถรองรับการกระจายตัวของแรงดึงในวัสดุที่เปราะอย่างคอนกรีตได้ดีมากขึ้น (Gilbert & Bernard, 2018; Vairagade & Kene, 2013)

จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยที่มีความยาวมากจะสามารถเพิ่มความทนทานต่อการแตกหักของวัสดุได้ดีกว่าเส้นใยที่มีความยาวสั้น เนื่องจากเส้นใยที่ยาวกว่าจะมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้นในการทำหน้าที่ประสานและยับยั้งการกระจายตัวของรอยร้าว อย่างไรก็ตาม เมื่อความยาวของเส้นใยมากเกินไป อาจส่งผลให้การผสมคอนกรีตมีความยุ่งยากมากขึ้นเนื่องจากเส้นใยอาจเกิดการพันกันหรือสะสมเป็นกลุ่ม ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างคอนกรีต (Lam & bin Mohamad Yatim, 2015)

ในแง่ของกำลังรับแรงดัด ความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับแรงที่มากขึ้นก่อนที่จะเกิดการแตกร้าว และลดการเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยอย่างเหมาะสมร่วมกับการควบคุมความยาวให้เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้ เส้นใยที่มีความยาวที่เหมาะสมยังสามารถเพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อการกระแทกของคอนกรีต ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้วัสดุมีความสามารถในการคงรูปได้ดีขึ้นภายใต้การใช้งานที่ต้องการความทนทานสูง (X. Wang et al., 2019)

(Gilbert & Bernard, 2018) ทำการศึกษาความสามารถในการทนทานต่อการแตกหักหลังการเกิดรอยแตกของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ถูกใช้ในโครงสร้างที่รับกำลังดัดและรับกำลังอัดร่วมกัน โดยศึกษาความสามารถในการทนทานต่อการแตกหักของคอนกรีตเสริมเส้นใยหลังจากเกิดรอยแตกเป็นครั้งแรก การใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยในการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างผิวชั้นนอกและโครงสร้างที่ต้องรับกำลังดัดและกำลังอัดร่วมกัน เช่น เสาหรือคานที่ต้องรับน้ำหนักและกำลังดัดจากภายนอก โดยตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้ในการทดสอบหล่อในรูปแบบคานที่ต้องรับกำลัง

ตัดและกำลังอัดร่วมกัน เสริมปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน 0%, 0.5% และ 1.0% โดยปริมาตร เพื่อศึกษาผลของปริมาณใยต่อความสามารถในการทนทานต่อการแตกหัก จากผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการเสริมเส้นใยมีความสามารถในการทนทานต่อการแตกหักสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมเส้นใย เมื่อเพิ่มปริมาณใยเสริมจาก 0.5% เป็น 1.0% โดยปริมาตร ความสามารถในการทนทานต่อการแตกหักเพิ่มขึ้น ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการเสริมเส้นใยแสดงการเกิดรอยแตกที่น้อยกว่าและมีความเสียหายที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมเส้นใย ตัวอย่างคอนกรีตที่มีการเสริมเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเครียดน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมเส้นใย เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเครียดลดลง

(Ahmed & Jia, 2019) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการใช้เส้นใยพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และเส้นใยแก้ว (Glass fiber, GF) ร่วมกัน (hybrid fibre) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกลและการซึมผ่านของคอนกรีต เพื่อศึกษาผลของการใช้เส้นใย PP และเส้นใย GF ร่วมกันที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง และทดสอบการซึมผ่านของคอนกรีต (water permeability) การใช้เส้นใย PP และเส้นใย GF ร่วมกัน ที่มีต่อการซึมผ่านของคอนกรีต ตัวอย่างในการทดสอบมีการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.45 ใช้เส้นใย PP และเส้นใย GF ในปริมาณ 0.1%, 0.3% และ 0.5% โดยปริมาณของคอนกรีต และทำการทดสอบตัวอย่าง ในอายุคอนกรีต 7, 28 และ 90 วัน คอนกรีตที่ไม่มีเส้นใยเสริมและคอนกรีตที่มีเส้นใยเสริมแบบเดี่ยว (PP หรือ GF) และแบบผสม (hybrid) จากผลการศึกษาพบว่า ด้านกำลังรับแรงอัดการเพิ่มปริมาณเส้นใย PP และเส้นใย GF ในคอนกรีตทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ คอนกรีตที่เสริมเส้นใยแก้ว 0.5% มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการเสริมเส้นใย และคอนกรีตที่เสริมเส้นใย PP หรือเส้นใย GF ในปริมาณอื่นๆประมาณ 15-20% และ 5-10% ตามลำดับ คอนกรีตที่เสริมเส้นใยแบบผสมในปริมาณ 0.3% มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีใยเดี่ยว ด้านกำลังรับแรงดัดการเพิ่มปริมาณเส้นใย PP และเส้นใย GF ในคอนกรีตทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตได้ คอนกรีตที่เสริมเส้นใยผสมในปริมาณ 0.3% มีกำลังรับแรงดัดสูงสุด ด้านการซึมผ่านการเพิ่มปริมาณเส้นใย PP และเส้นใย GF ในคอนกรีตทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม สามารถลดการซึมผ่านของคอนกรีตได้ คอนกรีตที่เสริมเส้นใยผสมในปริมาณ 0.3% มีการซึมผ่านต่ำสุด ในการศึกษาการใช้เส้นใยผสมในปริมาณ 0.3% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและการซึมผ่านของคอนกรีต

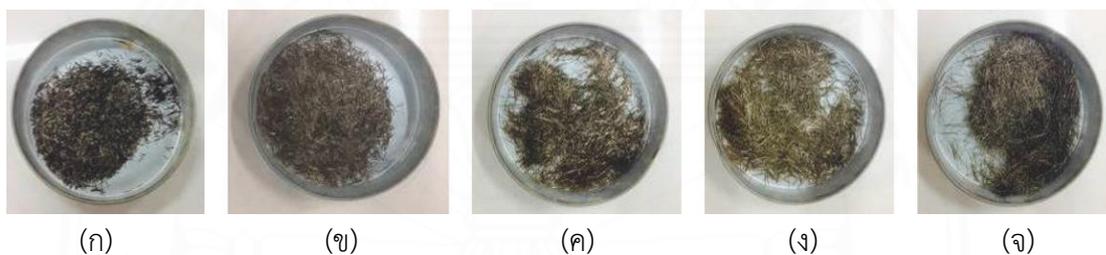
(X. Wang et al., 2019) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความยาวและปริมาณเส้นใยต่อคุณสมบัติทางกลและความต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นใยบะซอลต์ (Basalt fiber reinforced concrete, BFRC) โดยเส้นใย BFRC เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นในการเพิ่มความ

แข็งแรงและความทนทานของคอนกรีต เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการกัดกร่อน และสามารถรับแรงดึงได้ดี ในการทดสอบออกแบบคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดต่างกัน คือ 30 MPa, 40 MPa, และ 50 MPa เส้นใยที่ใช้มีความยาวต่างกัน คือ 12.0 มิลลิเมตร, 18.0 มิลลิเมตร, 24.0 มิลลิเมตร, 30.0 มิลลิเมตร และ 36.0 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2.1 ปริมาณการใส่เส้นใยอยู่ระหว่าง 0.05% - 0.4% ทำการทดสอบคุณสมบัติ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ความสามารถในการทำงาน และคุณสมบัติป้องกันการแตกร้าวจากการหดตัวแห้ง

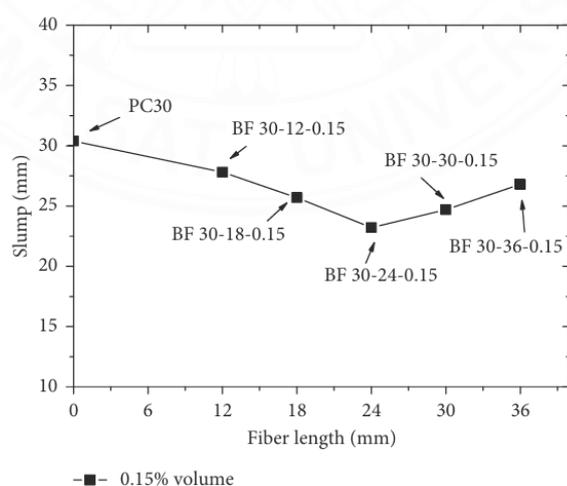
ผลการศึกษาพบว่าค่าการยุบตัว (slump) ของคอนกรีตลดลงเมื่อใช้เส้น BFRC ที่ยาวขึ้นและมีปริมาณมากขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.2 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยเมื่อปริมาณเส้นใยมีค่าสูง ทั้งนี้ยังพบว่าการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยเกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใช้ความยาวของเส้นใยที่มากกว่า 36.0 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มทั้งปริมาณและความยาวของเส้นใย BFRC การทดสอบกำลังรับแรงอัดทั้งในช่วง 7 วัน และ 28 วัน ใช้เส้นใย BFRC ที่มีปริมาณ 0.075% และ 0.10% ของปริมาตรคอนกรีต รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใย ผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย BFRC จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เส้นใย BFRC ที่ความยาว 12 มิลลิเมตร ถึง 18 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.075% ถึง 0.10% แต่การเพิ่มความยาวเส้นใยเกินกว่า 18 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการจับตัวกันของเส้นใย (clumping) ซึ่งทำให้การเพิ่มกำลังรับแรงอัดลดลงตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2.3 ความยาวเส้นใยที่เหมาะสมในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดในกรณีนี้คือ 12 มิลลิเมตร ตัวอย่าง BFRC ความยาวเส้นใย 12 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.10% มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน เท่ากับ 25.4 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่มีค่า 26.7 MPa กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ของ BFRC ความยาวเส้นใย 12 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.10% เท่ากับ 37.4 MPa ซึ่งสูงขึ้นจากตัวอย่างควบคุม (33.3 MPa) ถึง 12.3% ตัวอย่าง BFRC ที่ความยาวเส้นใย 12 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.075% และ 0.10% มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม (31.3 MPa) โดยมีค่าเป็น 32.1 MPa และ 30.3 MPa ตามลำดับ แต่ที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของ BFRC ที่ความยาวเส้นใย 12 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.075% และ 0.10% อยู่ที่ 45.4 MPa และ 44.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงขึ้นประมาณ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่มีค่ากำลังรับแรงอัด 41.3 MPa

การทดสอบกำลังรับแรงดึงทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยในช่วง 12.0 มิลลิเมตร ถึง 36.0 มิลลิเมตร และใช้ปริมาณเส้นใยที่ 0.10% และ 0.15% ของปริมาตรคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใย BFRC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งและจะลดลง เมื่อความยาวเส้นใยเกินค่าที่เหมาะสมแสดงดังภาพที่ 2.4 ตัวอย่างการทดสอบคอนกรีตธรรมดาที่มีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเท่ากับ 3.8 MPa ขณะที่คอนกรีต

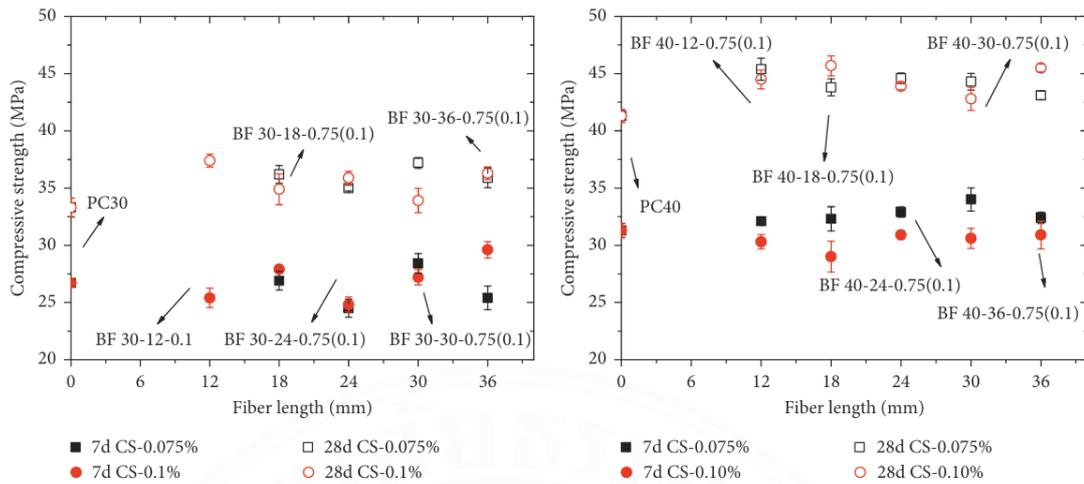
เสริมเส้นใย BFRC ที่มีความยาวเส้นใย 12.0 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.15% (BF30-12-0.15) มีค่า กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเท่ากับ 4.3 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 13% เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ ยังพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ 4.40 MPa หรือเพิ่มขึ้น 16% จากคอนกรีตธรรมดา เมื่อใช้ความยาวเส้นใยที่ 24.0 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.15% (BF30-24-0.15) เมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้นถึง 36.0 มิลลิเมตร (BF30-36-0.10 และ BF30-36-0.15) พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลง ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการจับตัวเป็นก้อน (clumping) ของเส้นใยที่เกิดขึ้นบ่อยขึ้นเมื่อใช้เส้นใยที่ยาวและมีปริมาณมาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวเส้นใยเกิน 24.0 มิลลิเมตร การเพิ่มกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกจะลดลงหรือไม่เกิดผลบวก ดังนั้น จึงแนะนำให้ใช้เส้นใย BFRC ที่มีความยาวน้อยกว่า 24.0 มิลลิเมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการใช้ปริมาณเส้นใยที่สูง



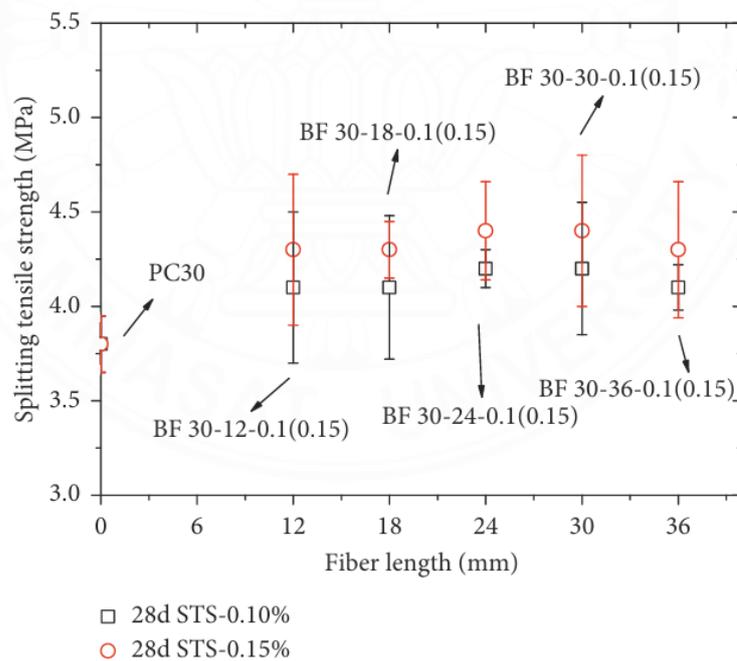
ภาพที่ 2.1 เส้นใยบะซอลต์ที่ความยาว (ก) 12 มม. (ข) 18 มม. (ค) 24 มม. (ง) 30 มม. (จ) 36 มม.
(X. Wang et al., 2019)



ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงการยุบตัวกับความยาวเส้นใยที่แตกต่างกัน
สำหรับตัวอย่าง PC30 และ BF30 (12~36)-0.15 (X. Wang et al., 2019)



ภาพที่ 2.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวเส้นใยต่อกำลังอัดสำหรับตัวอย่าง PC30(40) และ BF30(40)-(12~36)-0.075(0.1) (ก) กำลังรับแรงอัดที่ 30 MPa และ (ข) กำลังรับแรงอัดที่ 40 MPa (X. Wang et al., 2019)



ภาพที่ 2.4 ผลของความยาวเส้นใยต่อกำลังต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีก (STS) สำหรับตัวอย่าง PC30 และ BF30(40)-(12~36)-0.1(0.15) (X. Wang et al., 2019)

2.1.2 ผลกระทบของความยาวเส้นใยของเสี้ยนจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้ว ต่อคุณสมบัติคอนกรีต

(W. C. Wang et al., 2020) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งแรงและการนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใย GF ในการทดสอบใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 และค่าการยุบตัว (slump) ที่ 18 เซนติเมตร สำหรับการออกแบบส่วนผสมตาม ACI และใช้เส้นใย GF ขนาด 0.60 เซนติเมตร และ 2.54 เซนติเมตร ในอัตราส่วน 0.5% 1.0% และ 1.5% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิสูง คือ 440°C, 500°C, 580°C, 800°C และ 1000 °C ต่อกำลังรับแรงอัดและการนำความร้อนของคอนกรีต ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วขนาด 0.6 เซนติเมตร อัตราส่วน 0.5% ความต้านทานแรงอัดในวันที่ 28 วันอยู่ที่ 35.4 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 9.4% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (32.3 MPa) และยังคงแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาความแข็งแรงที่ดีขึ้นในวันที่ 49 และ 56 วัน โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นถึง 14.0% อัตราส่วน 1.0% กำลังรับแรงอัดลดลงเป็น 24.5 MPa ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ทำให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยในปริมาณมากเกินไปอาจส่งผลเสียต่อความแข็งแรง คอนกรีตเสริมเส้นใย GF ขนาด 2.54 เซนติเมตร อัตราส่วน 0.5% ความต้านทานแรงอัดในวันที่ 28 วันอยู่ที่ 33.1 MPa เพิ่มขึ้น 2.6% จากตัวอย่างควบคุม อัตราส่วน 1.0% ความต้านทานแรงอัดอยู่ที่ 34.0 MPa แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม การใช้เส้นใยแก้วที่มีความยาวสั้นในปริมาณที่เหมาะสม (0.5%) สามารถเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้ ในขณะที่การใช้เส้นใยที่มีความยาวมากก็สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ แต่ต้องอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมเช่นกัน การใช้งานเส้นใยแก้วในปริมาณมากเกินไปหรือไม่เหมาะสมจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ความต้านทานแรงอัดและการเกิดรอยแตก

ผลการศึกษาพบว่าค่าการยุบตัว (slump) ของคอนกรีตลดลงเมื่อใช้เส้นใยแก้วที่ยาวขึ้นและมีปริมาณมากขึ้นแสดงดังตารางที่ 2.1 พบว่าค่าการยุบตัวหรือความสามารถในการทำงานของคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยเมื่อปริมาณเส้นใยมีค่าสูง

ตารางที่ 2.1 ค่าการยุบตัว หน่วยเป็นเซนติเมตร (W. C. Wang et al., 2020)

| Code | C | S5 | S10 | S15 | L5 | L10 | L15 |
|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Slump | 18.1 | 15.8 | 13.2 | 11.1 | 13.2 | 9.9 | 8.4 |

2.2 การแปรสภาพวัสดุผสมเพิ่มจาก GFRPW ต่อคุณสมบัติคอนกรีต

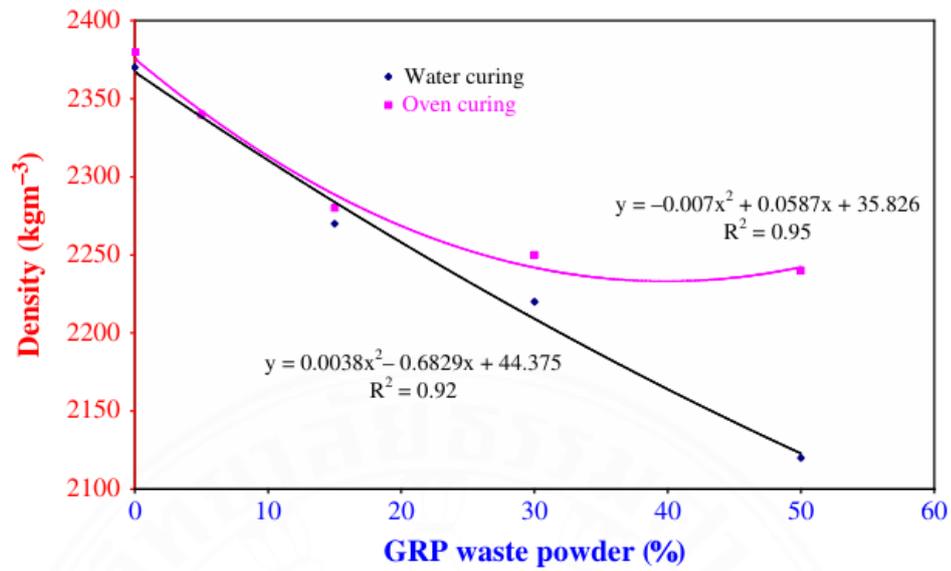
(Asokan et al., 2009) ได้ศึกษาการริ้วเคล็ดผงและเส้นใยของเสี่ยจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (glass fibrereinforced plastic, GRP) แสดงดังภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.6 ในคอนกรีตและคอมโพสิตซีเมนต์ จากการทดสอบมีการใส่ผงของเสี่ยจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาตร 0% 5% 15% 30% และ 50% มีการบ่มคอนกรีต โดยบ่มคอนกรีตในน้ำและบ่มคอนกรีตในเตาอบที่อุณหภูมิ $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลา 14 วัน 28 วัน และ 180 วัน ในการทดสอบการบ่มในน้ำพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาตรผงของเสี่ยจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้น ทั้งระยะเวลาการบ่ม 14 วัน 28 วัน และ 180 วัน แต่ในการทดสอบการบ่มในเตาอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปริมาณ 5% มีค่าสูงที่สุดทั้งระยะเวลาการบ่ม 14 วัน 28 วัน และ 180 วัน แตกต่างจากการบ่มในน้ำ และพบว่าตัวอย่างที่มีการเสริมผงของเสี่ยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมคอนกรีตในการบ่มทั้งสองแบบเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจะสามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แสดงค่าดังตารางที่ 2.2 จากภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มสัดส่วนของผงของเสี่ย GRP ในคอนกรีตทำให้ความหนาแน่นลดลงประมาณ 12% โดยความหนาแน่นต่ำสุดอยู่ที่ 2120 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่อมีผงขย GRP 50% เนื่องจากพฤติกรรมร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์และเมทริกซ์ซีเมนต์ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวัสดุอย่างมากซึ่งมีผลต่ออัตราส่วนของน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ และผลทดสอบจากตารางที่ 2.3 พบว่าการเสริมเส้นใยของเสี่ยจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมคอนกรีต 5% กำลังรับแรงดัดสูงกว่าการไม่เสริมเส้นใยของเสี่ยจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วลงในส่วนผสมคอนกรีต แผ่นคอมโพสิตซีเมนต์หนา 12 มิลลิเมตร ที่พัฒนาด้วยเส้นใยของเสี่ยจาก GRP 5% มีความหนาแน่นเฉลี่ยสูงขึ้นถึง 18% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง ภาพที่ 2.8 ในทางเดียวกันความหนาแน่นเฉลี่ยของแผ่นหนา 8 มิลลิเมตร ที่พัฒนาด้วยเส้นใยขย GRP 5% สูงขึ้นถึง 15% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง โดยที่ความหนาแน่นของเส้นใยของเสี่ยจาก GRP มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2540 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ถึง 2780 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร การเสริมเส้นใยของเสี่ยจาก GRP 5% ในคอมโพสิตซีเมนต์อาจมีส่วนช่วยเพิ่มความหนาแน่นของแผ่น



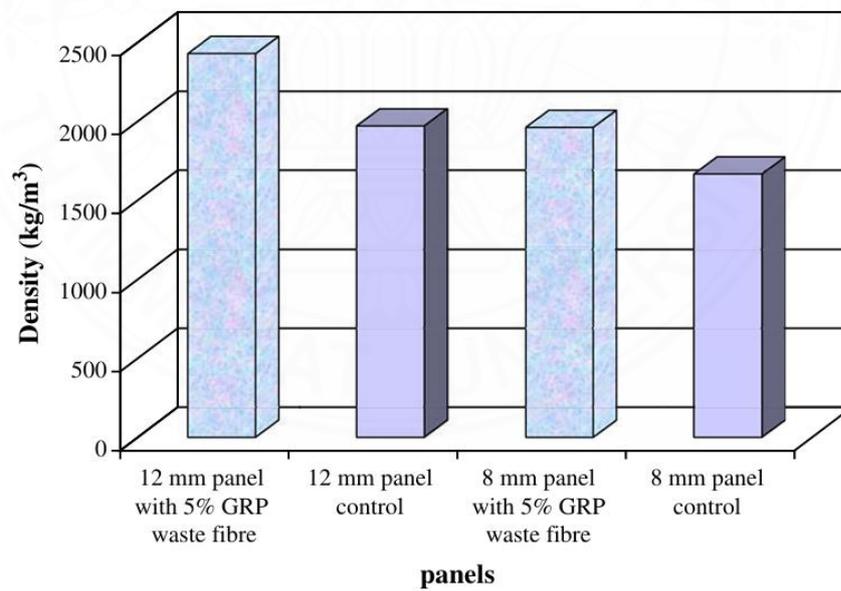
ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างของเสียจาก GRP ที่ผ่านการบดทั้งส่วนผสมของผงและเส้นใย
(Asokan et al., 2009)



ภาพที่ 2.6 เส้นใยของเสียจาก GRP ที่ผ่านการบด (Asokan et al., 2009)



ภาพที่ 2.7 ผลกระทบของผงของเสียจาก GRP ต่อความหนาแน่นของคอนกรีต
(Asokan et al., 2009)



ภาพที่ 2.8 ผลกระทบของเส้นใยของเสียจาก GRP ต่อความหนาแน่นของแผ่นกรูทางสถาปัตยกรรม
(Asokan et al., 2009)

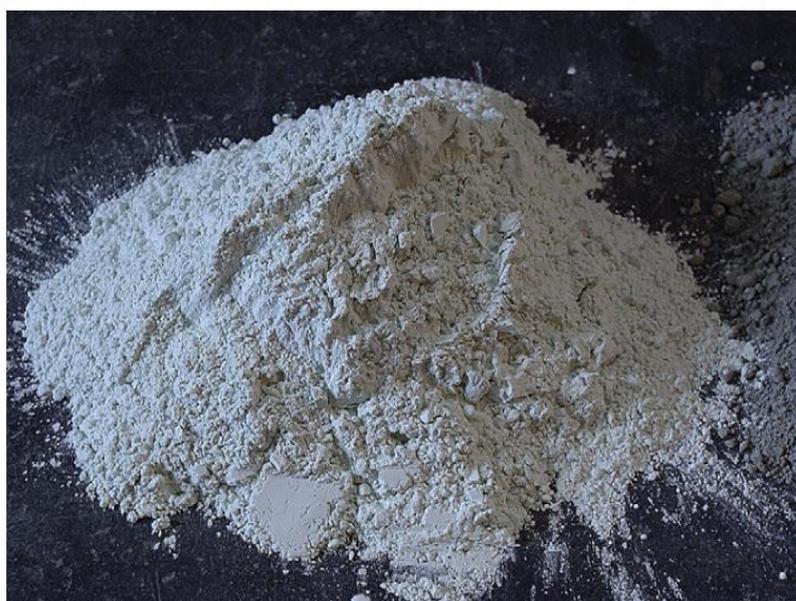
ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของผงของเสียจาก GRP ต่อกำลังอัดของคอนกรีต (N/mm²) ภายใต้สภาวะการบ่มที่แตกต่างกัน (Asokan et al., 2009)

| Exp. No. | % GRP Powder | Water Cured Specimen (N/mm ²) (mean of triplicate specimens) | | | Oven Cured Specimen (N/mm ²) (mean of triplicate specimens) | | |
|----------|--------------|---|------------|------------|--|------------|------------|
| | | 14 days | 28 days | 180 days | 14 days | 28 days | 180 days |
| 1 | 0% | 43.61±0.37 | 47.67±0.69 | 46.23±0.57 | 32.31±0.6 | 34.37±0.56 | 39.20±0.67 |
| 2 | 5% | 32.4±0.86 | 37.08±0.77 | 45.74±0.69 | 36.08±0.15 | 37.9 ±1.32 | 47.17±0.64 |
| 3 | 15% | 27.9±0.25 | 34.09±0.90 | 44.38±0.42 | 29.21±0.48 | 35.11±0.37 | 46.24±0.57 |
| 4 | 30% | 22.4±1.12 | 29.58±1.66 | 30.82±0.64 | 25.76±0.39 | 30.62±1.03 | 34.39±0.23 |
| 5 | 50% | 14.13±0.59 | 19.05±0.88 | 21.31±0.03 | 17.02 ±0.1 | 21.61±0.72 | 24.24±0.38 |

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของเส้นใยของเสียจาก GRP (5%) ต่อกำลังดัดของคอมโพสิตซีเมนต์ (Asokan et al., 2009)

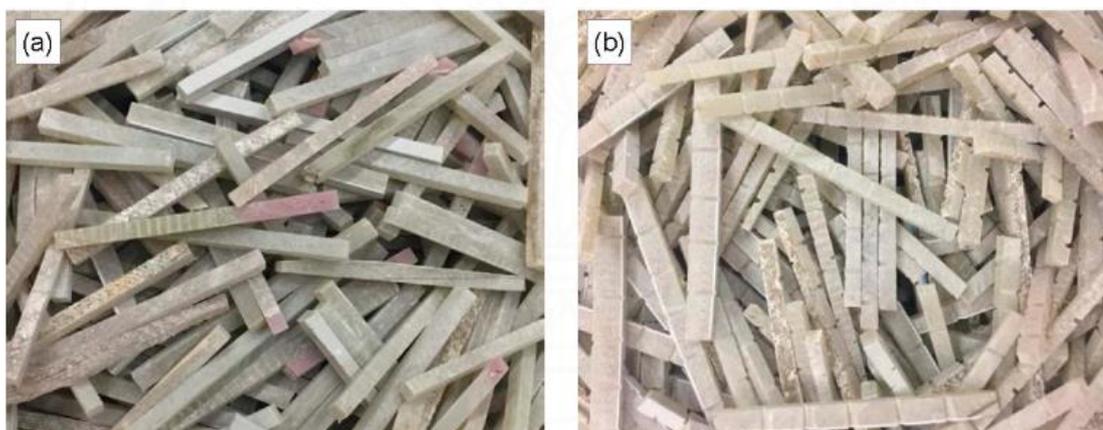
| Panel specimens | Bending strength of architectural cladding panel (N/mm ²) | |
|---|---|-------------------------|
| | GRP waste fibre (5%) | Without GRP waste fibre |
| Panel dimension: 300 mm 300mm; 12mm thickness | | |
| R1 | 17.42 | 11.99 |
| R2 | 15.28 | 9.65 |
| R3 | 16.95 | 9.86 |
| Mean | 16.55 | 10.5 |
| Standard deviation | 1.12 | 1.3 |
| Panel dimension: 300 mm 300mm; 8mm thickness | | |
| R1 | 8.12 | 6.3 |
| R2 | 9.43 | 6.73 |
| R3 | 9.08 | 6.99 |
| Mean | 8.88 | 6.67 |
| Standard deviation | 0.68 | 0.35 |

(Correia et al., 2011) ได้ทำการศึกษาการจัดการของเสียจากพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วแสดงดังภาพที่ 2.9 โดยทดสอบผสมของเสียจากพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต มีการทดสอบสมบัติสถานะที่เป็นของเหลว (Fresh State) หรือคอนกรีตสด และสถานะที่แข็งตัวแล้ว (Hardened State) ของส่วนผสมคอนกรีตซึ่งสัดส่วนของทรายถูกแทนที่ด้วยของเสียละเอียดจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่ 0% 5% 10% 15% และ 20% เพื่อศึกษาผลกระทบของการผสมของเสียจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยต่อคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าของเสียจากพอลิเมอร์เสริมด้วยเส้นใยแก้วที่ผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตสัดส่วนสูงส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีต กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญด้วยอัตราการทดแทนของเสียพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วที่สูงขึ้น ผลของการทดแทนทรายด้วยของเสียจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว 5% อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ลดลง จำเป็นต้องใช้น้ำน้อยลงในส่วนผสม การดูดซึมน้ำของคอนกรีตเมื่อทำการบ่มแบบแช่น้ำก็ลดลง และกำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด มีผลกระทบเล็กน้อยต่อความต้านทานการแตกตัวเนื่องจากแรงดึงและโมดูลัสของความยืดหยุ่นโดยลดลง 2.7% และ 3.0% ตามลำดับ ในทางกลับกันกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ลดลงถึง 19.4% เมื่อใช้อัตราการทดแทนที่สูงกว่า 5% เป็นผลให้ประสิทธิภาพของคอนกรีตในแง่ของทั้งคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความทนทานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงการใช้วัสดุเหลือใช้จากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วในปริมาณที่สูงขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลเสียต่อคุณภาพและประสิทธิภาพโดยรวม



ภาพที่ 2.9 ของเสียละเอียดจากพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว João R และคณะ(2011)

Ardavan Yazdanbakhsh และคณะ (2018) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของของเสียพอลิเมอร์เสริมใยแก้วเป็นชิ้นขนาดใหญ่ (ขนาดเซนติเมตร) แสดงดังภาพที่ 2.10 สำหรับผสมในคอนกรีต ชิ้นส่วนเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ มวลรวมหยาบและการเสริมแรงแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งที่นี้เรียกว่า “เข็ม (needles)” มวลรวมหยาบหมายถึงชิ้นส่วนขนาดใหญ่ที่ใช้เพื่อให้ความแข็งแรงและความมั่นคงให้กับส่วนผสมคอนกรีต การเสริมแรงแบบไม่ต่อเนื่องหรือ “เข็ม” เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของคอนกรีตและเพิ่มประสิทธิภาพการตัดของคอนกรีต จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมหยาบพอลิเมอร์เสริมใยแก้วรีไซเคิลลดความแข็งแรงกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญอย่างไรก็ตาม การเสริมแรงแบบไม่ต่อเนื่องหรือเข็มของเสียพอลิเมอร์เสริมใยแก้วเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของคอนกรีต นอกจากนี้หากเส้นใยแก้วอยู่ในแนวยาวองค์ประกอบเหล่านี้สามารถเพิ่มกำลังรับดึงของคอนกรีตได้อย่างมาก ซึ่งหมายความว่าคอนกรีตจะมีแนวโน้มที่จะแตกหรือแตกน้อยลงเมื่อถูกแรงดึงหรือยืดออก



ภาพที่ 2.10 มวลรวมหยาบและการเสริมแรงแบบไม่ต่อเนื่องหรือเข็ม (needles)

Ardavan Yazdanbakhsh และคณะ (2018)

(Zhou et al., 2022) คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลจาก GFRP โดยพิจารณาการจัดระดับมวลรวมด้านพฤติกรรมกำลังรับแรงอัด ศึกษาการรีไซเคิลเศษวัสดุ FRP เป็นมวลรวมหยาบเพื่อทดแทนมวลรวมหยาบธรรมชาติ (Natural coarse aggregates, NCA) ในการผลิตคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล FRP (Recycled FRP aggregate concrete, RFAC) เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการจัดการกับปริมาณเศษวัสดุ FRP จำนวนมากโดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ โดยการตัดเศษวัสดุ GFRP เป็นอนุภาค 12 ขนาด เพื่อให้การจัดระดับมวลรวมรีไซเคิล FRP (Recycled FRP aggregate, RFA)

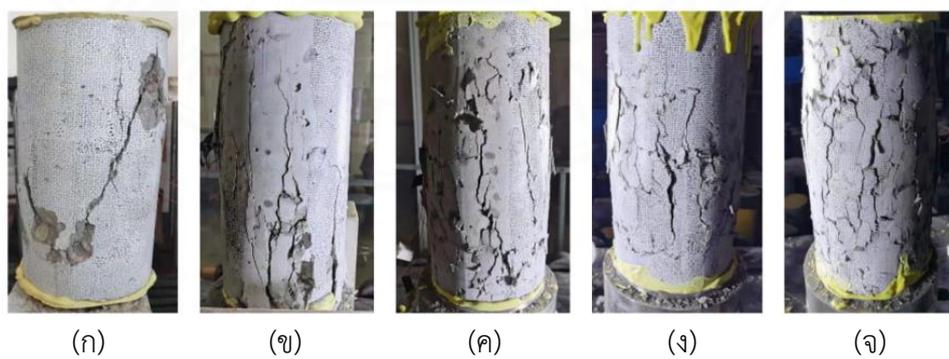
มีลักษณะใกล้เคียงกับมวลรวมหยาบธรรมชาติมากที่สุด ผลกระทบของสัดส่วนการทดแทนปริมาตร RFA ที่ศึกษาคือ 0%, 30%, 50%, 70%, 100% ต่อสมรรถนะกำลังรับแรงอัดของ RFAC ศึกษาโดยใช้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานจำนวน 15 ตัวอย่าง ได้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตภายใต้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 กำลังรับแรงอัดลูกบาศก์ประมาณ 40 MPa คุณสมบัติทางกลของแท่ง GFRP แสดงดังตารางที่ 2.4 แท่ง GFRP ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ถูกตัดเป็นทรงกระบอกที่มีความยาว 6 มิลลิเมตร, 8 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร แท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ถูกตัดเป็นทรงกระบอกที่มีความยาว 12 มิลลิเมตร และ 14 มิลลิเมตร แท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ถูกตัดเป็นทรงกระบอกที่มีความยาว 16 มิลลิเมตร, 18 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร และแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ถูกตัดเป็นอนุภาคที่มีความยาว 22 มิลลิเมตร, 24 มิลลิเมตร และ 26 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 2.11 จากการศึกษาพบว่าลักษณะการวิบัติของ RFAC แตกต่างจาก NCA โดยที่คอนกรีต NCA วิบัติโดยมีรอยร้าวหลักในแนวทแยงชัดเจน แต่ใน RFAC พบว่ารอยร้าวกระจายตัวและไม่มียรอยร้าวหลักในแนวทแยงที่เด่นชัดแสดงดังภาพที่ 2.12 ซึ่งปรากฏการณ์นี้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการทดแทน RGFA กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของ RFAC ลดลงอย่างต่อเนื่องแบบไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อสัดส่วนการทดแทน RFA เพิ่มขึ้น แต่ความเปราะหลังจุดสูงสุดลดลง เมื่อเทียบกับ NCA ค่าสัมประสิทธิ์ปัวซอง (Poisson's ratio) ของ RFAC เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการทดแทน RFA ในช่วงยืดหยุ่น และมีค่าน้อยกว่าคอนกรีต NCA

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของแท่ง GFRP (Zhou et al., 2022)

| Indicators | Value (Type) |
|-------------------------------------|--------------------|
| Tensile strength (MPa) | 920–1230 |
| Tensile modulus of elasticity (GPa) | 53 |
| Density (kg/m ³) | 1933–2070 |
| Fiber content by weight (%) | 78 |
| Fiber type | E glass fiber |
| Matrix type | Unsaturation resin |



ภาพที่ 2.11 มวลรวมเศษวัสดุ GFRP ที่ถูกตัด (Zhou et al., 2022)

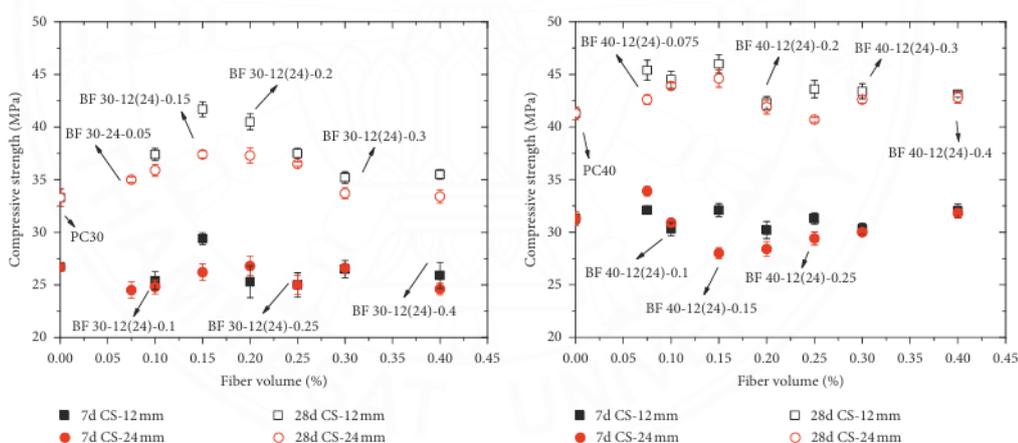


ภาพที่ 2.12 ลักษณะการวิบัติ (ก) FRP0; (ข) FRP30; (ค) FRP50; (ง) FRP70; (จ) FRP100 (Zhou et al., 2022)

2.3 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและความทนไฟของคอนกรีตเสริมเส้นใย

2.3.1 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

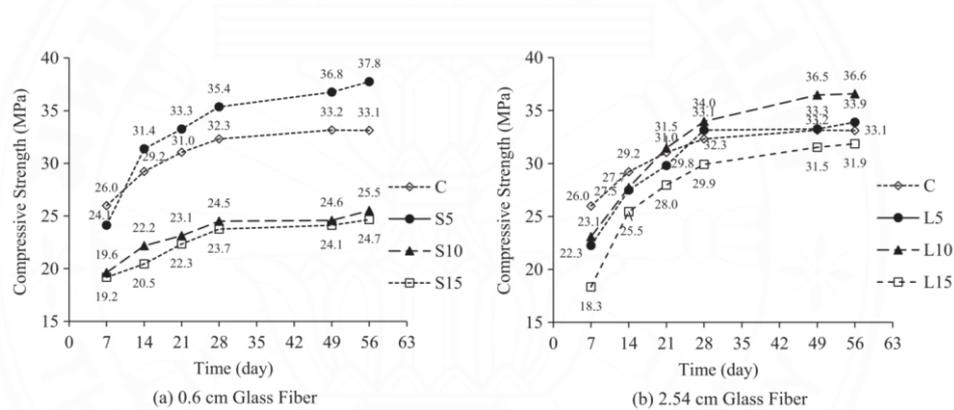
(X. Wang et al., 2019) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยบะซอลต์ (Fiber Volume Fraction) ต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต BFRC โดยใช้เส้นใยที่มีความยาว 12 มิลลิเมตร และ 24 มิลลิเมตร ซึ่งเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ สำหรับปริมาณเส้นใย 0.15% ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต BFRC เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 25.2% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีค่ากำลังรับแรงอัด 26.7 MPa โดยค่า 28 วันของคอนกรีต BFRC ที่เสริมเส้นใย 12 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.15% มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 41.7 MPa และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต BFRC เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 11.4% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยค่า 28 วันของคอนกรีต BFRC ที่เสริมเส้นใย 12 มิลลิเมตร และปริมาณเส้นใย 0.15% มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 44.6 MPa สำหรับการเพิ่มกำลังรับแรงอัดคือ 0.15% และความยาวเส้นใยที่ดีที่สุดคือ 12 มิลลิเมตร โดยการเสริมปริมาณเส้นใยมากเกินไปจะทำให้กำลังรับแรงอัดไม่เพิ่มขึ้นมากแสดงดังภาพที่ 2.13



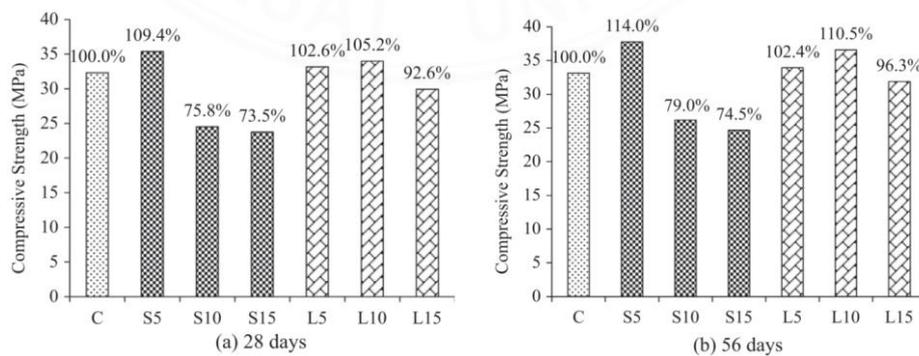
ภาพที่ 2.13 ผลของสัดส่วนปริมาณเส้นใยต่อกำลังอัดของคอนกรีตเสริมใยบะซอลต์สำหรับตัวอย่าง PC30(40) และ BF30(40)-12(24)-(0.075~0.4) (ก) กำลังอัดที่ออกแบบไว้ 30 MPa และ (ข) กำลังอัดที่ออกแบบไว้ 40 MPa (X. Wang et al., 2019)

(W. C. Wang et al., 2020) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งแรงและการนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วขนาด 0.6 เซนติเมตร และ 2.54 เซนติเมตร กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่ม

เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.14 คอนกรีตเส้นใยแก้วขนาด 0.6 เซนติเมตร คิดเป็น 0.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ (S5) ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว 1.0% และ 1.5% แสดงดังภาพที่ 2.15 การเสริมเส้นใยแก้วขนาด 0.60 เซนติเมตร เป็น 0.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และการเสริมเส้นใยแก้วขนาด 2.54 เซนติเมตร เป็น 0.5-1.0% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ความสามารถในการรับกำลังอัดในช่วงแรกต่ำกว่ากลุ่มควบคุม แต่กำลังรับแรงอัดหลังจาก 28 วันสูงกว่ากลุ่มควบคุม เมื่อปริมาณการเสริมเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตในอายุต่างๆ ต่ำกว่ากลุ่มอ้างอิง ดังนั้น การเสริมเส้นใยแก้วลงในคอนกรีตเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดควรอ้างอิงปริมาณที่เหมาะสม ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยแก้วขนาดสั้นสูงสุดที่ 0.5% และความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยแก้วขนาดยาวสูงสุดที่ 1.0%



ภาพที่ 2.14 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่มต่างๆ (W. C. Wang et al., 2020)



ภาพที่ 2.15 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วในวันที่ 28 และวันที่ 56 กับกลุ่มตัวอย่างอ้างอิง (W. C. Wang et al., 2020)

(Yuan et al., 2022) ได้ศึกษาเทคนิคในการเพิ่มมูลค่าของเส้นใยขนาดใหญ่ (macro fiber) ที่ได้จากการรีไซเคิลวัสดุ FRP แสดงดังภาพที่ 2.16 โดยนำมาใช้เสริมกำลังคอนกรีต (MFRC) ในรูปแบบคานแบบชั้น (layered beams) ซึ่งประกอบด้วยชั้นล่างที่เป็นคอนกรีตเสริมด้วยเส้นใยขนาดใหญ่ และชั้นบนที่เป็นคอนกรีตธรรมดา (PC) เพื่อปรับปรุงการใช้ประโยชน์และมูลค่าเพิ่มของเส้นใยขนาดใหญ่ ผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ของคอนกรีตมีค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง (0% macro fiber)



ภาพที่ 2.16 การแปรรูปด้วยกระบวนการทางกลของใบกังหันลมเป็นเส้นใยขนาดใหญ่
(Yuan et al., 2022)

(Yildirim & Özhan, 2023) ศึกษาความทนทานคงเหลือของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ได้รับความเสียหายจากการรับกำลังอัด โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่างตัวอย่างคอนกรีตปกติและตัวอย่างที่เสริมเส้นใยแก้ว พร้อมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติที่เกิดขึ้นหลังจากการรับแรงอัด โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 สำหรับตัวอย่างทั้งหมด ค่าการยุบตัวถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 10–15 เซนติเมตร ใช้เส้นใยแก้ว AR (alkali-resistant glass fiber) มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2.5 ลักษณะเส้นใยแสดง ในปริมาณ 0.25%, 0.5%, และ 1% โดยปริมาตรของคอนกรีต โดยตั้งชื่อชิ้นงานเป็น G0.25, G0.50 และ G1 ตามลำดับ

พบว่า การเสริมเส้นใยแก้วในส่วนผสมของคอนกรีตสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ การจัดการและการกระจายตัวของเส้นใยแก้วในคอนกรีตสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เชื่อมต่อกันช่วยให้การถ่ายโอนภาระในคอนกรีตเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังภาพที่ 2.17 โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ทำในวันที่ 7 และ 28 ของการทดสอบปรากฏว่า การเสริมปริมาณเส้นใยในคอนกรีตเพิ่มทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น คอนกรีตที่มีเส้นใยแก้วเพิ่มขึ้น (G1 series) มีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดที่ชัดเจน โดยในวันที่ 7 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นถึง 19.74% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตธรรมดา (CC samples) และในวันที่ 28 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 13.15%. ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มเส้นใยแก้วในคอนกรีตช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานแรงกดและคงสภาพความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่า แม้ว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะยังไม่สูงสุดในระยะแรก (7 วัน) โดยเส้นใยแก้วทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างชิ้นส่วนคอนกรีตที่แตกหัก ช่วยเพิ่มความคงทนของโครงสร้างในระหว่างการทดสอบแรงอัด การเพิ่มเส้นใยแก้วในคอนกรีตช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้โดยเฉพาะในระยะเวลา 7 วัน โดยในตัวอย่างที่มีเส้นใยแก้วสูงสุด (G1 series) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด 19.74% เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาในวันทดสอบแรก และเพิ่มขึ้น 13.15% ในวันที่ 28

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยแก้ว (Yildirim & Özhan, 2023)

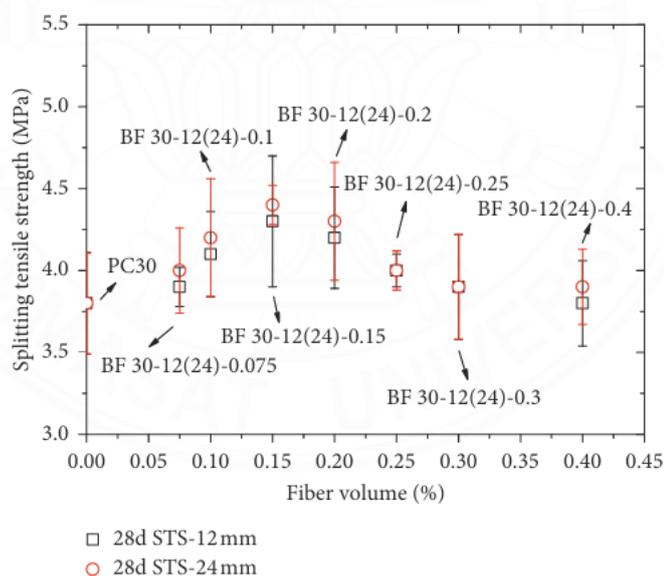
| Material | Length | Diameter | Modulus of elasticity | Specific gravity | Tensile strength | Melting Point |
|----------------|--------|------------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------------------|
| AR-Glass fiber | 12 mm | 14 μm | 72 GPa | 2.68 | 1850 MPa | 1050 $^{\circ}\text{C}$ |



ภาพที่ 2.17 ลักษณะของเส้นใยแก้ว (Yildirim & Özhan, 2023)

2.3.2 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength)

(X. Wang et al., 2019) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความยาวและปริมาณเส้นใยต่อคุณสมบัติทางกลและความต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นใยบะซอลต์ การทดสอบกำลังรับแรงดึงทำทดสอบโดยใช้เส้นใยที่มีความยาว 12 มิลลิเมตร และ 24 มิลลิเมตร และใช้ปริมาณเส้นใยต่างๆ ตั้งแต่ 0.075% ถึง 0.40% เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่าการเพิ่มเส้นใยบะซอลต์ในคอนกรีตทำให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของ BFRC เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตปกติในช่วง 3% ถึง 16% การเสริมเส้นใยบะซอลต์ช่วยสร้างโครงข่ายในคอนกรีต ซึ่งสามารถชะลอการเกิดรอยร้าวและเพิ่มกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกได้ กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงสุดของ BFRC ที่ได้จากการทดลองคือ 4.4 MPa ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเส้นใย 0.15% และความยาวเส้นใย 24 มิลลิเมตร โดยค่ากำลังรับแรงดึงแยกนี้สูงกว่าคอนกรีตปกติถึง 16% เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเกินกว่า 0.15% ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกจะลดลง เช่นในตัวอย่าง BF30-24-0.40 พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลงประมาณ 9% หรือ 0.4 MPa เมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงสุดของ BF30-24-0.15 ซึ่งอาจเกิดจากการจับตัวของเส้นใยที่มากเกินไปในระหว่างการผสมแสดงดังภาพที่ 2.18



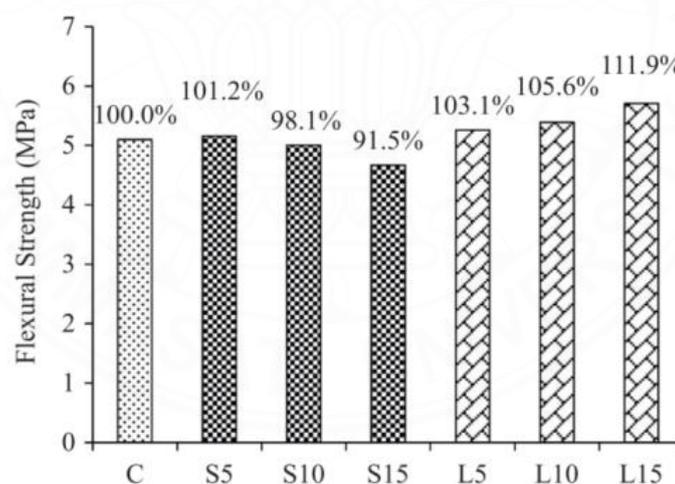
ภาพที่ 2.18 ผลของสัดส่วนปริมาณเส้นใยต่อกำลังต้านทานแรงดึงแบบแยก

(X. Wang et al., 2019)

(Yuan et al., 2022) พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณเส้นใยขนาดใหญ่ 1%, 1.5% และ 2% กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.6%, 27.6% และ 44.3% ตามลำดับ

2.3.3 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

(W. C. Wang et al., 2020) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งแรงและการนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว ภาพที่ 12.9 แสดงผลของการเสริมเส้นใยแก้วต่อความสามารถในการรับแรงดัดของคอนกรีต การเสริมเส้นใยแก้วสั้นจะไม่เพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดของคอนกรีต เมื่อปริมาณการเติมอยู่ในช่วง 1.0–1.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ความสามารถในการรับกำลังดัดจะลดลง 1.9–8.5% เมื่อปริมาณการเสริมเพิ่มขึ้น การเสริมเส้นใยแก้วยาวสามารถเพิ่มความสามารถในการรับกำลังดัดของคอนกรีตได้ เมื่อปริมาณการเติมอยู่ในช่วง 0.5–1.5% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ความสามารถในการรับกำลังดัดจะเพิ่มขึ้น 3.1–11.9% เมื่อปริมาณการเสริมเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกำลังดัดของคอนกรีต ควรใช้เส้นใยแก้วที่มีความยาวเพียงพอ

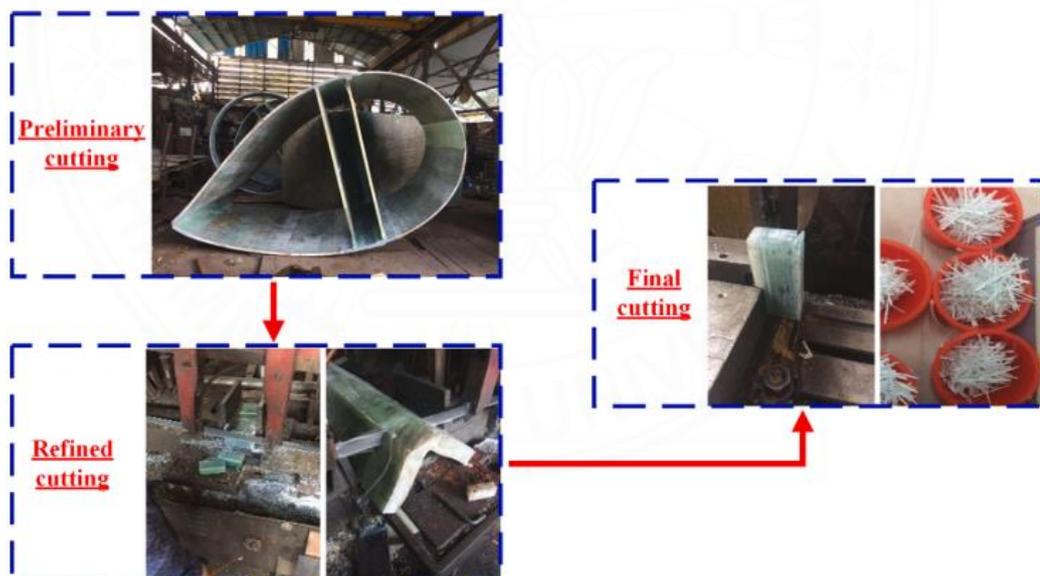


ภาพที่ 2.19 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วบ่มน้ำที่ 28 วัน

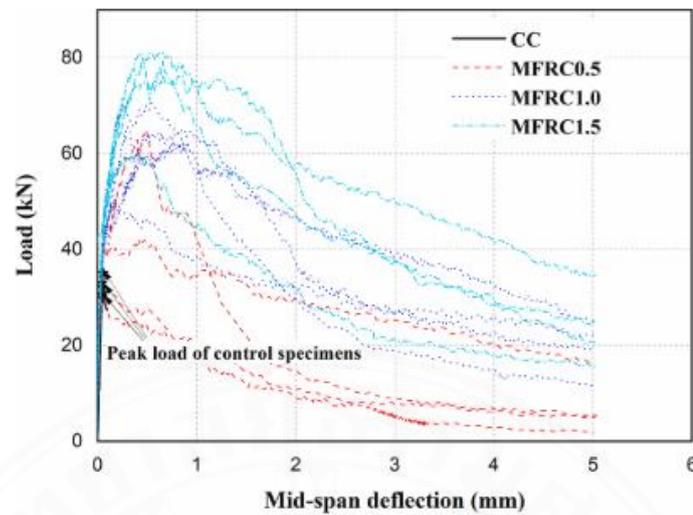
(W. C. Wang et al., 2020)

(Fu et al., 2021) ได้ทำการศึกษาการแปรรูปของเสียเป็นเส้นใยขนาดใหญ่ที่สามารถใช้เสริมคอนกรีตได้เรียกว่า คอนกรีตเสริมด้วยเส้นใยขนาดใหญ่ (macro fibre reinforced concrete, MFRC) ได้ทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเสริมด้วยเส้นใยขนาดใหญ่ เพื่อ

ประเมินผลกระทบของการเสริมเส้นใยขนาดใหญ่ลงในคอนกรีต การแปรรูปด้วยกระบวนการทางกลของใบก้างहनลมเป็นเส้นใยขนาดใหญ่แสดงดังภาพที่ 2.20 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความสามารถในการทำงานของคอนกรีตที่อัตราส่วนปริมาณของเส้นใยขนาดใหญ่ 0% 0.5% 1.0% และ 1.5% ซึ่งความสามารถในการผสมเทและหล่อรูปร่าง พบว่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนปริมาณของเส้นใยขนาดใหญ่ เมื่ออัตราส่วนปริมาณของเส้นใยขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 1.5% ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตลดลง ค่าการยุบตัวจาก 176 มิลลิเมตร ลดลงมีค่าเท่ากับ 83 มิลลิเมตร การเสริมเส้นใยขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีตอย่างมาก เมื่ออัตราส่วนปริมาตรเส้นใยขนาดใหญ่อยู่ที่ 1.5% กำลังรับแรงดัดและความเหนียวจะเพิ่มขึ้น 1.3 และ 230 เท่าตามลำดับ กำลังแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงสุด 4.4% เมื่อเติมเส้นใยขนาดใหญ่ไม่เกิน 1.5% ในคอนกรีต กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้นโดยประมาณเชิงเส้น เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยขนาดใหญ่คอนกรีตที่มีปริมาณเส้นใยขนาดใหญ่ 1.5% กำลังรับแรงดึงเฉลี่ย 4.86 MPa ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างอ้างอิงที่ไม่มีเส้นใยขนาดใหญ่ 52% ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว แสดงดังภาพที่ 2.21

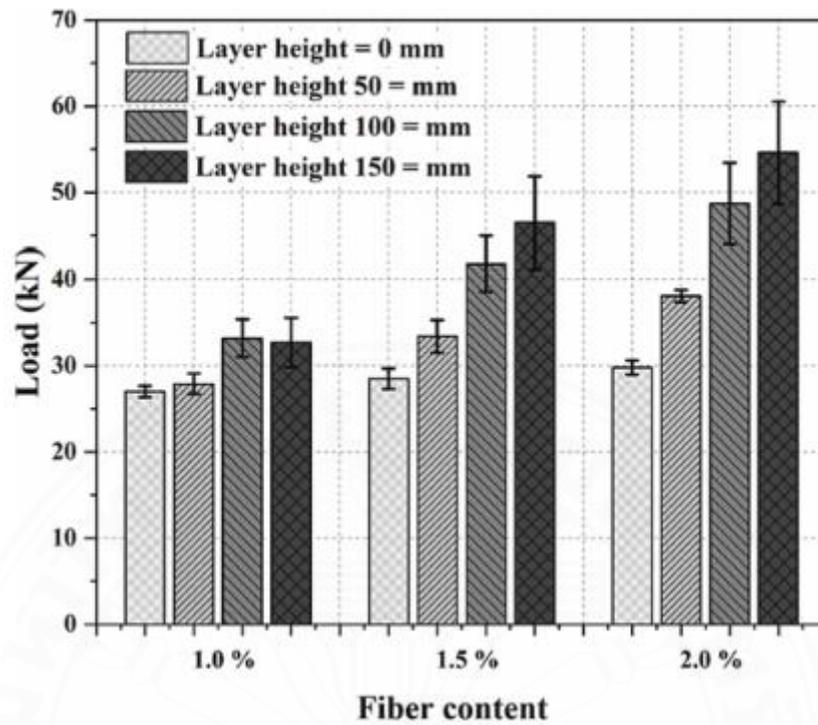


ภาพที่ 2.20 การแปรรูปด้วยกระบวนการทางกลของใบก้างहनลมเป็นเส้นใยขนาดใหญ่
(Fu et al., 2021)

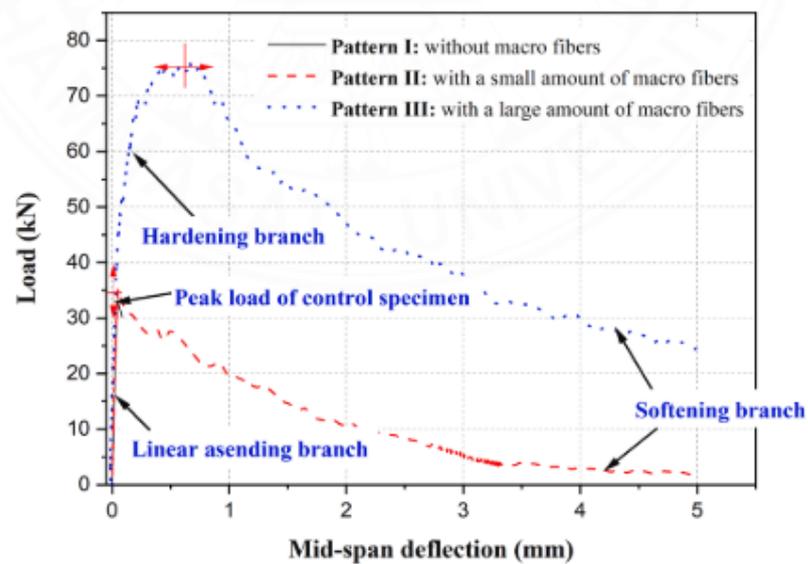


ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว (Fu et al., 2021)

(Yuan et al., 2022) พบว่ากำลังรับแรงดัดของคานแบบชั้นดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย สำหรับคานที่มีความสูงของชั้นล่าง 100 มิลลิเมตร การเพิ่มปริมาณเส้นใยจาก 1% เป็น 1.5% และ 2% ทำให้ค่า peak load เพิ่มขึ้น 25.9% และ 46.7% แสดงดังภาพที่ 2.22 และค่าความเหนียว (T150) เพิ่มขึ้นจาก 33.1 J เป็น 55.6 J และ 67.7 J ประสิทธิภาพของเส้นใย (Fiber efficiency) ซึ่งบ่งชี้ถึงการใช้ประโยชน์ของเส้นใยขนาดใหญ่ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของชั้นล่างลดลงและปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น การใช้คานแบบชั้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เส้นใยขนาดใหญ่ในคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานทดสอบ MFRC 1.5-100 ซึ่งมีปริมาณเส้นใยเท่ากับ MFRC 1.0-150 แต่มีค่า peak load และค่าความเหนียวดัด (flexural toughness) สูงกว่าคานแบบ monolithic ถึง 27.8% และ 68.0% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2.23



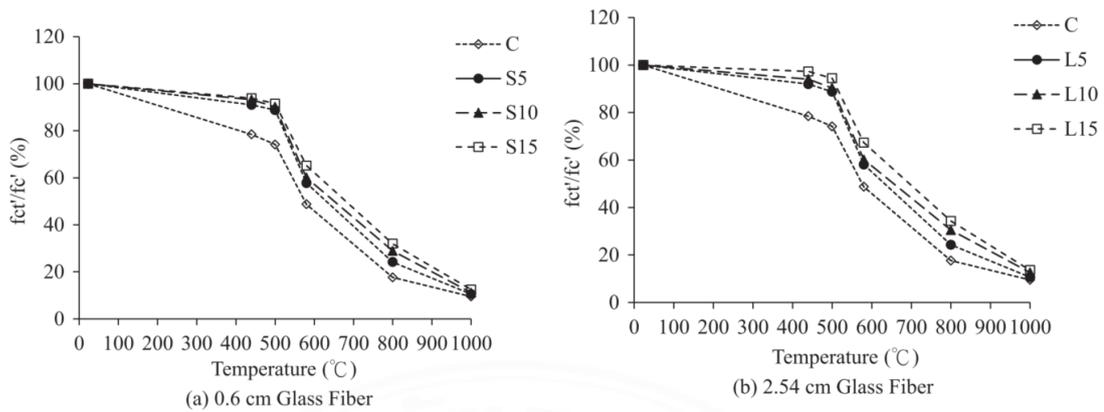
ภาพที่ 2.22 แรงกระทำสูงสุดที่กระทำกับคานตัวอย่าง (Yuan et al., 2022)



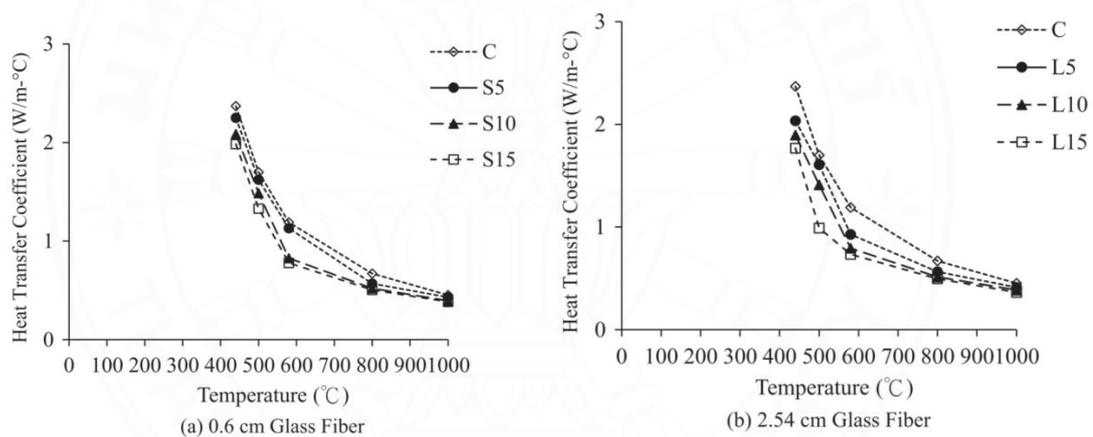
ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว (Yuan et al., 2022)

2.3.4 คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง

(W. C. Wang et al., 2020) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิสูงต่อความแข็งแรงและการนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว ศึกษาผลของอุณหภูมิสูง (440°C, 500°C, 580°C, 800°C และ 1000°C) ต่อกำลังรับแรงอัดและการนำความร้อนของคอนกรีต ภาพที่ 12.24 แสดงผลของอุณหภูมิสูงต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมใยแก้ว การเสริมเส้นใยแก้วสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดที่เหลืออยู่ของคอนกรีตภายใต้ผลกระทบของไฟ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมอยู่ที่ 500°C, 580°C, 800°C และ 1000°C ความสามารถในการรับกำลังอัดที่เหลืออยู่ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วขนาด 0.60 เซนติเมตร ในปริมาณ 0.5–1.5% เพิ่มขึ้น 14.6–17.4%, 9.0–16.5%, 6.2–24.3% และ 1.0–3.0% ตามลำดับ ความสามารถในการรับกำลังอัดที่เหลืออยู่ของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วขนาด 2.54 เซนติเมตรในปริมาณ 0.5–1.5% เพิ่มขึ้น 14.6–20.3%, 9.4–18.6%, 6.4–26.7% และ 1.1–4.1% ตามลำดับ ความสามารถในการรับกำลังอัดที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเสริมเส้นใยแก้วและเพิ่มขึ้นตามความยาวของใยแก้ว สัดส่วนของกำลังอัดที่เหลืออยู่ของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วยาว 2.54 เซนติเมตร ภายใต้อุณหภูมิสูงต่าง ๆ สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้วสั้น 0.6 เซนติเมตร สาเหตุอาจเป็นเพราะคอนกรีตเริ่มเกิดรอยร้าวภายใต้อุณหภูมิสูง และเส้นใยแก้วยาวมีความสามารถในการหยุดการเกิดหรือการกระจายของรอยร้าวได้ดีกว่าใยแก้วสั้น ภาพที่ 12.25 แสดงผลของอุณหภูมิสูงต่อการนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว เมื่อคอนกรีตผสมกับเส้นใยแก้ว ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างอ้างอิง และค่าการลดลงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้นและความยาวของเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้น ผลของอุณหภูมิสูงต่าง ๆ ต่อการนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วสอดคล้องกับกลุ่มตัวอย่างอ้างอิง เมื่ออุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400°C -500°C น้ำที่ถูกจับยึดอยู่ใน C-S-H ส่วนใหญ่จะสูญเสียไป และผลของการลดการนำความร้อนจะมีผลมากที่สุด เมื่ออุณหภูมิอยู่ระหว่าง 500°C -580°C Ca(OH)₂ จะถูกสลายตัว และผลของการลดการนำความร้อนจะมีผลรองลงมา



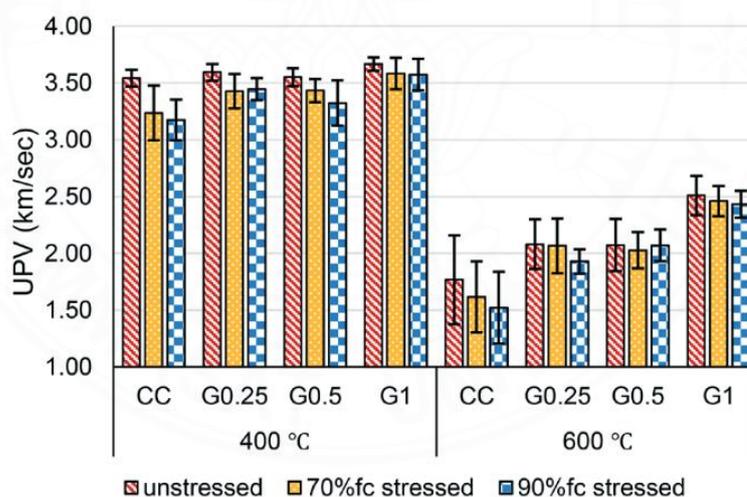
ภาพที่ 2.24 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วในอุณหภูมิต่างๆ
(W. C. Wang et al., 2020)



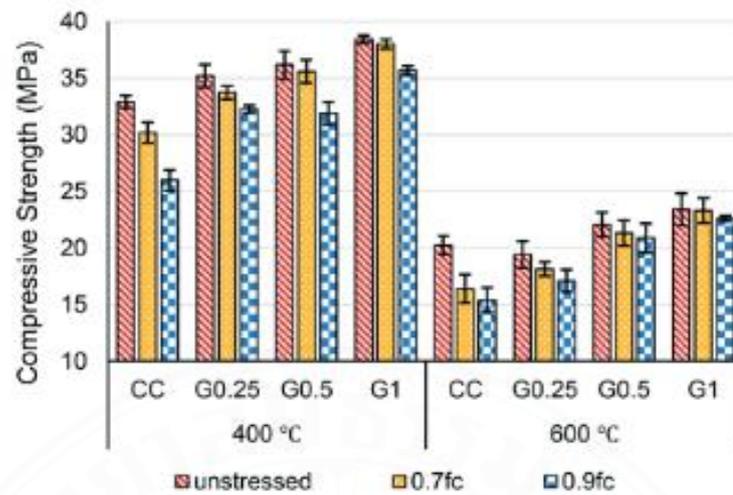
ภาพที่ 2.25 การนำความร้อนของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง
(W. C. Wang et al., 2020)

(Yildirim & Özhan, 2023) ศึกษาความทนทานคงเหลือของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ได้รับความเสียหายจากการรับกำลังอัด โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่างตัวอย่างคอนกรีตปกติและตัวอย่างที่เสริมเส้นใยแก้ว พร้อมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติที่เกิดขึ้นหลังจากการรับแรงอัด โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 สำหรับตัวอย่างทั้งหมด ค่าการยุบตัวถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 10–15 เซนติเมตรใช้เส้นใยแก้ว AR (alkali-resistant glass fiber) ในปริมาณ 0.25%, 0.5%, และ 1% โดยปริมาตรของคอนกรีต โดยตั้งชื่อชิ้นงานเป็น G0.25, G0.50 และ G1 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตควบคุมไม่มีการเติมใยแก้วใดๆ

ตัวอย่างคอนกรีต ถูกนำไปสัมผัสกับอุณหภูมิ 400°C และ 600°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10°C/นาที ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (UPV) ของตัวอย่างอายุ 28 วันถูก วัดหลังจากได้รับความร้อนที่ 400°C และ 600°C ผลการทดลองแสดงว่าค่าความเร็วคลื่นลดลงเมื่อ ระดับความเครียดเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง G1 มีค่า UPV สูงสุดในทุกระดับอุณหภูมิ ขณะที่ตัวอย่างควบคุม มี ค่าต่ำสุด แสดงดังภาพที่ 2.26 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นใยแก้ว ค่า UPV เพิ่มขึ้น ชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติ ป้องกันการแตกร้าวของเส้นใยแก้ว ตัวอย่างที่มี G1 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในทุกระดับ ความเครียดและทุกระดับอุณหภูมิ ที่ 400°C ตัวอย่าง G1 มีค่ากำลังรับแรงอัด 35.66 MPa ซึ่งสูงกว่า ตัวอย่างควบคุม ที่มีค่า 25.97 MPa เพิ่มขึ้น 37.31% ที่ 600°C ตัวอย่าง G1 ที่รับโหลด 0.9fc มีค่า กำลังรับแรงอัด 22.6 MPa ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 46% พบว่าอัตราส่วนเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้น ช่วยลดการสูญเสียกำลังรับแรงอัดเนื่องจากอุณหภูมิสูง แสดงดังภาพที่ 2.27 เส้นใยแก้วช่วยลดความ เสี่ยงหายจากความร้อนโดยป้องกันความเครียดที่เกิดจากอุณหภูมิช่วยรักษาความสมบูรณ์ของ โครงสร้างคอนกรีต และลดการซึมลึกของความชื้นเข้าสู่โครงสร้างภายใน การเพิ่มอัตราส่วนเส้นใย แก้วทำให้คอนกรีตสามารถรักษากำลังรับแรงอัดได้ดียิ่งขึ้น แม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง



ภาพที่ 2.26 ผลการทดสอบ UPV ของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับการทดสอบภายใต้ความร้อนที่ 400 °C และ 600 °C (Yıldırım & Özhan, 2023)



ภาพที่ 2.27 ความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับการทดสอบภายใต้ความร้อนที่ 400 °C และ 600 °C (Yildirim & Özhan, 2023)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใส่เส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer Waste, GFRPW) ที่ความยาวและปริมาณที่แตกต่างกัน เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยเส้นใย GFRPW พร้อมทั้งรายละเอียดในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเพื่อใช้ประกอบการอภิปรายผลการทดสอบของคอนกรีตเสริมด้วยเส้นใย GFRPW โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดและอัตราส่วนที่แตกต่างกันของการใช้เส้นใย GFRPW ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและความทนไฟของคอนกรีต เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการใช้เส้นใย GFRPW ที่ขนาดและอัตราส่วนต่างกันในของคอนกรีตที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594 - 2556 และตามมาตรฐาน ASTM C1157 TYPE GU (American Society for Testing and Materials, 2008) สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป และงานคอนกรีตโครงสร้าง โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) อยู่ในช่วงประมาณ 3.05 และตารางที่ 3.1 จะแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซีเมนต์ไฮดรอลิก (TPI Polene, 2024)

| คุณสมบัติทางฟิสิกส์ | ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก |
|---|--------------------|
| การขยายตัวโดยวิธีอโตคลฟ (Autoclave expansion) ร้อยละ | 0.05 |
| ระยะเวลาก่อตัว (นาที) | |
| การก่อตัวระยะต้น | 90 |
| การก่อตัวระยะปลาย | 190 |
| ความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) (เมกะปาสคาล) | |
| อายุการบ่ม 3 วัน | 24 |
| อายุการบ่ม 7 วัน | 32 |
| อายุการบ่ม 28 วัน | 42 |
| การขยายตัวของแท่งทดสอบมอร์ต้า ร้อยละ | 0.003 |

3.1.2 มวลรวม (Aggregate)

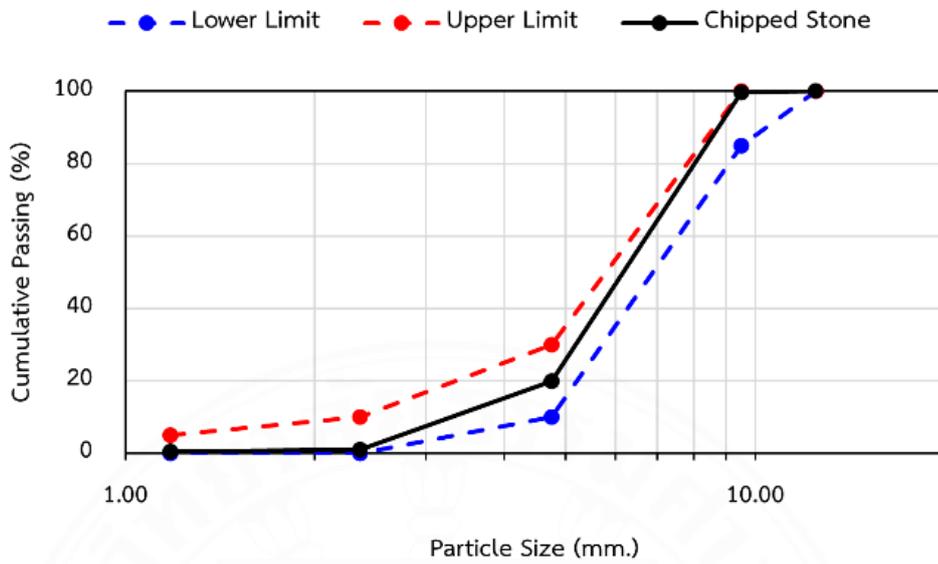
มวลรวมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) และ มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.2.1 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

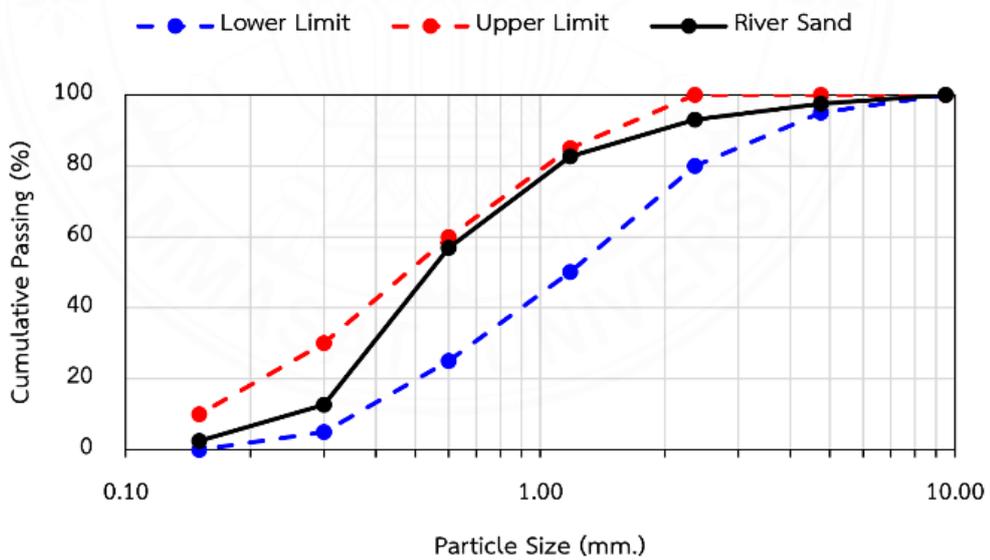
ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สูงสุด 9.5 มิลลิเมตร มวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.65 ที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เนื่องจากมวลรวมหยาบมีขนาดเล็กจึงทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานได้ดี ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้มวลหยาบขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร ที่ทำความสะอาดให้มีสิ่งเจือปนน้อยที่สุดมาใช้งานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 3.1

3.1.2.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

มวลรวมละเอียดที่เลือกใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้จะเลือกใช้เป็นทรายแม่น้ำ (River Sand) คละขนาด Gradation Curves ของมวลรวมละเอียด แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยก่อนที่จะนำทรายแม่น้ำมาใช้ในการผสมคอนกรีตอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.64



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิ Gradation Curves ของมวลรวมหยาบ



ภาพที่ 3.2 แผนภูมิ Gradation Curves ของมวลรวมละเอียด

3.1.3 สารผสมเพิ่ม (Admixture)

สารลดปริมาณน้ำพิเศษ (Superolasticizer) เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งาน (Workability) ของคอนกรีต และสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้น โดยเลือกใช้สารลดปริมาณน้ำที่อยู่ในประเภท Type F (Water Reducing, High Range Admixture) ชนิด Naphthalene Formaldehyde Sulfonate โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494-92 (ASTM C494, 2013) โดยแสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 สารลดน้ำที่ใช้ในงานวิจัย (Sika Indonesia, 2024)

3.1.4 เส้นใยของเสียจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer Waste, GFRPW)

งานวิจัยครั้งนี้จะใส่วัสดุผสมเพิ่ม 1 ชนิดลงไปคอนกรีต คือ เส้นใยของเสียจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer Waste, GFRPW) ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้วัสดุผสมเพิ่มเป็นเส้นใยสังเคราะห์จากสารเคมี (Chemical Synthetic Fiber) โดยเลือกใช้เป็นเส้นใย GFRPW ที่ผ่านการแปรสภาพแสดงดังภาพที่ 3.2 ให้มีลักษณะเหมาะสมสำหรับใส่ผสมในคอนกรีตทั้งในเรื่องของความหนา ความยาว โดยขั้นตอนในการเตรียมเส้นใย GFRPW มีดังนี้

- (1) เลือกใช้ GFRPW แบบแท่งหรือท่อนสั้นมาใช้ในการแปรสภาพ
- (2) นำ GFRPW ที่ได้มาวัดขนาดและทำสัญลักษณ์
- (3) นำ GFRPW ที่เตรียมไว้จากข้อ 2.) มาตัดเป็นชิ้นตามขนาดที่วัดไว้
- (4) นำ GFRPW ที่ตัดเตรียมเอาไว้จากขั้นตอนที่ 3.) มาทุบให้แยกตัว
- (5) นำ GFRPW ที่ตัดเตรียมเอาไว้จากขั้นตอนที่ 4.) มาแยกออกให้เป็นเส้นๆ



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนในการเตรียมเส้นใย GFRPW

3.1.5 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตทั่วไปโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C192 สำหรับตัวอย่างการทดสอบทั้งหมด โดยจะออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ ซีเมนต์ (Cement, C) มวลรวมละเอียด (Sand, S) มวลรวมหยาบ (CA) น้ำ (W) สารผสมเพิ่ม (Superplasticizer, SP) และเส้นใย GFRPW ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกันได้แก่ 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% 4.0% 6.0% และ 8.0% ต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ W/C เท่ากับ 0.32 โดยจะแสดงในตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเส้นใย GFRPW

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีต kg/m^3

| ส่วนประกอบ | ส่วนผสม | | | | | | | |
|---------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| | CC | GFRPW 0.5 | GFRPW 1.0 | GFRPW 1.5 | GFRPW 2.0 | GFRPW 4.0 | GFRPW 6.0 | GFRPW 8.0 |
| ซีเมนต์ | 462.5 | | | | | | | |
| น้ำ | 148 | | | | | | | |
| อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ | 0.32 | | | | | | | |
| มวลรวมละเอียด | 722.5 | | | | | | | |
| มวลรวมหยาบ | 1150.0 | | | | | | | |
| สารลดน้ำพิเศษ | 13.87 | | | | | | | |
| อัตราส่วนปริมาตรของ GFRPW | 0 | 2.31 | 4.63 | 6.94 | 9.25 | 18.50 | 27.75 | 37 |

3.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว (Hardened) ที่มีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

ทดสอบความสามารถในงานใช้งาน (Workability) ของคอนกรีต จะใช้วิธีทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 (ASTM, 2003) เพื่อคุณลักษณะการยุบตัวของคอนกรีตว่ามีความสามารถในการใช้งาน (Workability) หรือไม่ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ดังนี้

- 1.) เตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump Test) ได้แก่ กรวยสแตนเลส (Slump Cone) ถาดเหล็ก เหล็กกระทุ้งคอนกรีต เกรียงสามเหลี่ยม และ ตลับเมตร
- 2.) ผสมคอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบโดยทำการผสมตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.1.7
- 3.) นำคอนกรีตที่ผสมเสร็จมาเทลงในกรวยสแตนเลส (Slump Cone) แบ่งเทเป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน โดยในแต่ละชั้นให้ทำการตักกระทุ้งคอนกรีตด้วยเหล็กกระทุ้งคอนกรีต 25 ครั้ง/ชั้น และระหว่างที่ตักกระทุ้งคอนกรีตให้ใช้เท้าเหยียบหูทั้ง 2 ข้างของกรวยสแตนเลส (Slump Cone) จนกว่าคอนกรีตจะเต็ม
- 4.) เมื่อเทคอนกรีตจนเต็มให้นำเกรียงมาปาดให้เรียบร้อย หลังจากนั้นดึงกรวยสแตนเลส (Slump Cone) ขึ้นในแนวตั้ง
- 5.) นำกรวยสแตนเลส (Slump Cone) ไปวางไว้ด้านข้างแล้วนำไม้กระทุ้งวางด้านบนกรวยสแตนเลส (Slump Cone) แล้ววัดค่าการยุบตัว
- 6.) จดบันทึกค่าการยุบตัว

3.2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว (Hardened)

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened) จะเป็นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของคอนกรีต ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) การทดสอบกำลังรับ

แรงดัด (Flexural Tensile Strength) การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตกำลังสูง (Unit Weight) การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water Absorption) การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (Compressive Strength of Concrete After Exposure to high temperature) โดยมีวิธีและขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

3.2.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงอัด (Compression Test) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C39 (Committee, 2021) ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) แสดงดังรูปที่ 3.5 มีวิธีในการทดสอบดังนี้

- 1.) ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้งและจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร นำมาวางในลักษณะตั้งบนเครื่องทดสอบ (UTM)
- 3.) จัดก้อนตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางเครื่องทดสอบ
- 4.) กำหนด Displacement Rate เป็น 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในการทดสอบ
- 5.) กดเริ่มทดสอบและบันทึกค่าการทดสอบ



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Test)

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Equation For Compression Strength) หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm²) แสดงดังสมการที่ 3.1

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

σ_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต Compressive Strength

P = น้ำหนักกดประลัย (กิโลกรัม)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (ตารางเซนติเมตร)

3.2.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM C496 (Astm, 2004) ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) แสดงดังรูปที่ 3.6 มีวิธีในการทดสอบดังนี้

- 1.) ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้งและจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร มาใส่ชุดทดสอบ (Splitting Tensile Test)
- 3.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 2.) นำมาวางในบนเครื่องทดสอบ (UTM)
- 4.) จัดก้อนตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางเครื่องทดสอบ
- 5.) กำหนด Displacement Rate เป็น 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในการทดสอบ
- 6.) กดเริ่มทดสอบและบันทึกค่าการทดสอบ



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test)

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm²) แสดงดังสมการที่ 3.2

$$T_s = \frac{2P}{\pi dL} \quad (3.2)$$

T_s = กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก Splitting Strength

P = น้ำหนักกดประลัย (กิโลกรัม)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก (เซนติเมตร)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก (เซนติเมตร)

3.2.2.3 กำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test) ของคานคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C78 (Test et al., 2010) ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) แสดงดังรูปที่ 3.7 มีวิธีในการทดสอบดังนี้

- 1.) ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้งและจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด $10 \times 10 \times 35$ เซนติเมตร มาวัดจุดวางฐานรองรับทั้ง 2 ข้าง (Support) โดยวัดออกจากขอบของคานคอนกรีตเข้าไป 2.5 เซนติเมตร เป็นจุดวางฐานรองรับ (Support)
- 3.) นำก้อนตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด $10 \times 10 \times 35$ เซนติเมตร มาวัดจุดใส่แรงต้านบน โดยวัดจากฐานรองรับ (Support) เข้ามาเป็นระยะ 1 ใน 3 ของความยาวของฐานรองรับถึงฐานรองรับ (Support to Support)
- 4.) เตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test) โดยปรับระดับฐานรองรับทั้ง 2 ข้าง (Support) ให้พอดีกับจุดวางฐานรองรับของคอนกรีต
- 5.) นำก้อนตัวอย่างคานคอนกรีตที่และชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด Flexural Tensile Test) มาวางบนเครื่องทดสอบ (UTM)
- 6.) กำหนด Displacement Rate เป็น 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในการทดสอบ
- 7.) กดเริ่มทดสอบและจดบันทึกค่าการทดสอบ



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างการทดสอบการดัด

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test) หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm²) แสดงดังสมการที่ 3.3

$$T_f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.3)$$

T_f = ค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) หรือโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus Of Rupture)

P = น้ำหนักกดประลัย (กิโลกรัม)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างคานคอนกรีต (เซนติเมตร)

b = ความกว้างของก้อนตัวอย่างคานคอนกรีต (เซนติเมตร)

d = ความลึกของก้อนตัวอย่างคานคอนกรีต (เซนติเมตร)

3.2.2.4 การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight)

เตรียมแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร โดยต้องทาน้ำมันไว้ในแบบเสมอก่อนที่จะเทคอนกรีตทุกครั้ง

- 1.) ผสมคอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบ
- 2.) นำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มอากาศเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปชั่งน้ำหนัก และหาปริมาตรของคอนกรีตเพื่อคำนวณหาหน่วยน้ำหนัก

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³) แสดงดังสมการที่ 3.4

$$\gamma = \frac{W}{AL} \quad (3.4)$$

γ = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight)

W = น้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (กิโลกรัม)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (ตารางเมตร)

3.2.2.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water Absorption)

- 1.) เตรียมแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร โดยต้องทาน้ำมันไว้ในแบบเสมอก่อนที่จะเทคอนกรีตทุกครั้ง
- 2.) ผสมคอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบโดยทำการผสมตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.1.7
- 3.) เทคอนกรีตลงแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร และบ่มภายในแบบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4.) ถอดแบบหล่อคอนกรีตออกก็จะได้ตัวอย่างคอนกรีตที่ต้องการ
- 5.) นำตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศเป็นเวลา 28 วัน ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง และไปชั่งน้ำหนัก
- 6.) หลังจากอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว นำไปแช่น้ำต่ออีกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 7.) ในขั้นตอนนี้นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำมาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่า การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C624 (642, 1997) แสดงดังสมการที่ 3.5

$$\text{Water Absorbtion (\%)} = \left(\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Water Absorbtion (%) = การดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)

W_{sat} = น้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (กรัม)

W_{dry} = น้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (กรัม)

3.2.2.6 การทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)

การทดสอบการทนไฟของคอนกรีต โดยใช้เตาเผาไฟฟ้าที่สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 1,100 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพ 3.8 จะประกอบด้วยเตาเผา และกล่องควบคุมความร้อนของเตาเผา) โดยทดสอบน้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตหลังสัมผัสความร้อน (Weight Reduction Ratio, WRR) ซึ่งมีวิธีในการทดสอบดังนี้

- 1.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีอายุ 28 วัน ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้งและจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 °C/min ก่อนนำมาสัมผัสอุณหภูมิสูงในขั้นตอนต่อไป
- 3.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตในขั้นตอนที่ 2 มาใส่ในเตาเผา โดยเว้นระยะห่างช่องว่างระหว่างคอนกรีต 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
- 4.) เริ่มทดสอบตัวอย่างโดยนำมาสัมผัสอุณหภูมิ 300 600 และ 900 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 °C/min แสดงดังภาพที่ 3.9
- 5.) นำตัวอย่างออกจากเตาเผาและบันทึกค่าน้ำหนักหลังสัมผัสอุณหภูมิ



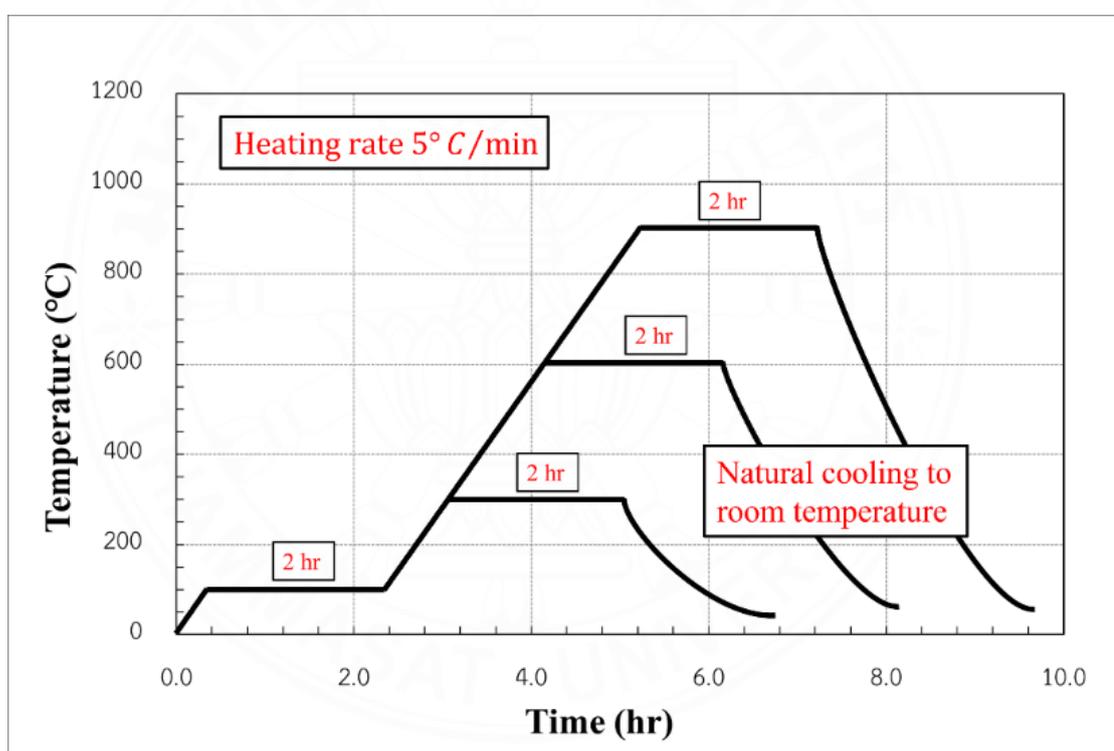
ภาพที่ 3.8 เตาเผาไฟฟ้า

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าการหลุดล่อนของคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง หรือน้ำหนักที่หายไปของหลังสัมผัสความร้อน (Weight Reduction Ratio, WRR) คือ เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไป (เปอร์เซ็นต์) แสดงดังสมการที่ 3.6

$$WRR = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 \quad (3.6)$$

W_0 = น้ำหนักก่อนสัมผัสความร้อน (กรัม)

W = น้ำหนักหลังสัมผัสความร้อน (กรัม)



ภาพที่ 3.9 วิธีการเผาตัวอย่างคอนกรีตผสมเสริมด้วย GFRPW

3.2.2.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (The Compressive Strength of Concrete After Exposure to high temperature)

หลังการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตหลังสัมผัสความร้อน อุณหภูมิ 300, 600, และ 900 องศาเซลเซียส ในแต่ละสัดส่วนผสม โดยนำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบกำลังรับแรงอัดซึ่งขั้นตอนในการทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นไปตามหัวข้อ 3.2.2.1

3.2.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีต (Chemical Composition for Concrete)

3.2.3.1 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย GFRPW โดยจะทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย GFRPW ก่อนและหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง มีการศึกษาและวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

- 1.) ศึกษาพื้นผิวของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย GFRPW และพันธะของเส้นใย GFRPW ที่เสริมกำลังภายในคอนกรีตรวมถึงหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง
- 2.) ศึกษาการแทนที่ของเส้นใย GFRPW ภายในคอนกรีต และความพรุนของคอนกรีต (Porous Concrete)

3.3 สรุปการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเส้นใย GFRPW

ในหัวข้อนี้จะเป็นการสรุปวิธีการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ความทนไฟ และการทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยสรุปวิธีการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางสรุปวิธีการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

| คุณสมบัติ | วิธีการทดสอบ | มาตรฐาน | ลักษณะตัวอย่าง | อายุของตัวอย่าง |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------------|-----------------|
| ความสามารถในการใช้งาน | Slump Test | ASTM C143 | - | - |
| กำลังรับแรงอัด | Compression Test | ASTM C39 | Cylinder | 28 วัน |
| กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก | Splitting Tensile Test | ASTM C496 | Cylinder | 28 วัน |
| หน่วยน้ำหนัก | วัดขนาดก้อนตัวอย่างและชั่งน้ำหนัก | - | Cylinder | 28 วัน |
| การดูดซึมน้ำ | หาน้ำหนัก W_{sat} และ W_{dry} | ASTM C642 | Cylinder | 28 วัน |
| กำลังรับแรงดัด | Flexural Tensile Test | ASTM C78 | Beam | 28 วัน |
| กำลังรับแรงอัดหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง | Compression Test | ASTM C39 | Cylinder | 28 วัน |
| การทดสอบโครงสร้างจุลภาค | SEM | - | Piece | 28 วัน |

บทที่ 4

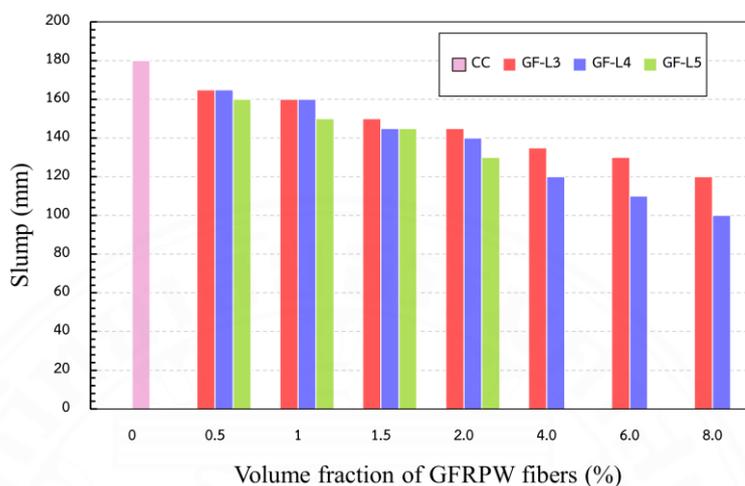
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ผ่านการแปรสภาพ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เริ่มต้นตั้งแต่การเตรียมเส้นใย GFRPW โดยทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงดึงของเส้นใย อีกทั้งคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ได้แก่ ค่าการยุบตัว, หน่วยงานน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก, กำลังรับแรงตัด, ความต้านทานอุณหภูมิสูงของคอนกรีตกำลังสูง รวมไปถึงโครงสร้างจุลภาค โดยรายละเอียดผลการทดสอบมีดังนี้

4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการใช้งานได้ของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Workability of Concrete reinforce with GFRPW)

ความสามารถในการใช้งาน (Workability) จะทดสอบด้วยการหาค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ผ่านการแปรสภาพ ความยาว 3 เซนติเมตร, 4 เซนติเมตร, และ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ไม่ใส่เส้นใย GFRPW (CC 0%) มีค่าเท่ากับ 180 มิลลิเมตร คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 3 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 165, 160, 150, 145, 135, 130, และ 120 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าการยุบตัวเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW ลดลงเท่ากับ 8.33%, 11.11%, 16.67%, 19.44%, 25.00%, 27.78%, และ 33.33% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 4 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 165, 160, 145, 140, 120, 110, และ 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าการยุบตัวเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW ลดลงเท่ากับ 8.33%, 11.11%, 19.44%, 22.22%, 33.33%, 38.89%, และ 44.44% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 5 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 160, 150, 145, และ 130 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าการยุบตัวเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW ลดลงเท่ากับ 11.11%, 16.67%, 19.44%, และ 27.78% ตามลำดับ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย และเมื่อความยาวเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 3 เซนติเมตร เป็น 5 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4.1 ทั้งนี้คาดว่าเป็ผลที่มาจากเส้นใยที่กระจายตัวอยู่ในคอนกรีตไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคซีเมนต์และมวลรวม ส่งผลให้ความสามารถในการใช้งานลดลง (Fu et al., 2021; X. Wang et al., 2019) สอดคล้องกับ (Lam & bin Mohamad Yatim, 2015) เมื่อความยาวของเส้นใยมากเกินไป

อาจส่งผลให้การผสมคอนกรีตมีความยุ่งยากมากขึ้นเนื่องจากเส้นใยอาจเกิดการพันกันหรือสะสมเป็นกลุ่ม ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างคอนกรีต



ภาพที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนปริมาณเส้นใย GFRPW ต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต

4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Mechanical Properties of Concrete with GFRPW)

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW โดยเส้นใยที่เลือกใช้คือเส้นใย GFRPW มาใช้ศึกษาต่อในงานวิจัยนี้ โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ความสามารถในการใช้งาน (Workability) หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) คุณสมบัติในการต้านทานเพลิงไหม้ (Fire Resistance) โดยมีผลการทดสอบดังนี้

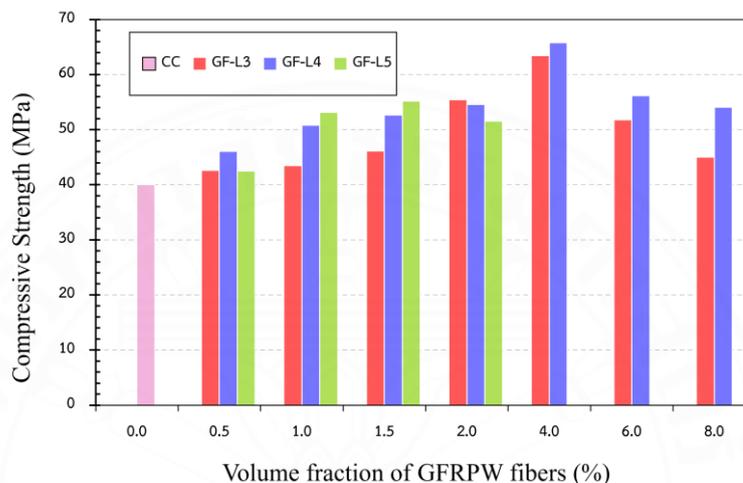
4.2.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (The Compressive Strength of Concrete reinforce with GFRPW)

4.2.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนผสมเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ความยาว 3 เซนติเมตร, 4 เซนติเมตร, และ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ใส่เส้นใย GFRPW (CC 0%) มีค่าเท่ากับ 40.01 MPa คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 3 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 42.60 MPa, 43.45 MPa, 46.12 MPa, 55.42 MPa, 63.46 MPa, 51.80 MPa, และ 45.02 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.47%, 8.61%, 15.29%, 38.53%, 58.63%, 29.48%, และ 12.54% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 4 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 46.07 MPa, 50.79 MPa, 52.64 MPa, 54.57 MPa, 65.81 MPa, 56.16 MPa, และ 54.09 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 15.15%, 26.96%, 31.59%, 36.41%, 64.50%, 40.38% และ 35.21% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, และ 2.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 42.46 MPa, 53.15 MPa, 55.21 MPa, และ 51.57 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.14%, 32.86%, 38.01%, และ 28.91% ตามลำดับ โดยผลการทดสอบจะแสดงดัง ภาพที่ 4.2

ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW ที่มีอายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างอ้างอิง (CC 0%) มีกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับ (X. Wang et al., 2019, Yildirim & Özhan, 2023) เมื่อเติมเส้นใยผสมคอนกรีต ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่พบว่าในความยาว 5 เซนติเมตร การใส่เส้นใย GFRPW ที่ 2.0% พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าการใส่เส้นใย GFRPW ที่ 1.5% ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด การใส่เส้นใย GFRPW ความยาว 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร ที่ 4.0% มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สูงกว่าการใส่เส้นใย GFRPW ที่ความยาว 5 เซนติเมตร แสดงว่าการใส่เส้นใย GFRPW ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นแต่ขึ้นอยู่กับความยาวและปริมาณที่เหมาะสม จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใส่เส้นใย GFRPW ที่ความยาว 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร สามารถพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดีกว่า การใส่เส้นใย GFRPW ความยาว 5 เซนติเมตร เนื่องจากเมื่อใส่เส้นใย GFRPW ที่มีความยาวที่มากเกินไปจะทำให้ความสามารถในการรับกำลังอัดลดลง ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลที่มาจาก การเติมเส้นใยในคอนกรีต

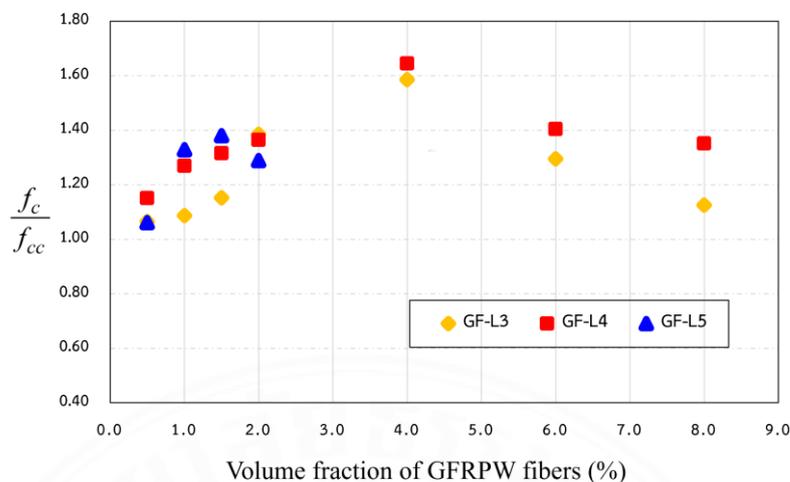
โดยเฉพาะในปริมาณที่มาก อาจทำให้การกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือโพรง (voids) ระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีต ซึ่งลดประสิทธิภาพการถ่ายแรงระหว่างเมทริกซ์คอนกรีตและเส้นใย การใช้เส้นใยที่มีสัดส่วนสูงสามารถก่อให้เกิดปัญหา balling effect หรือการจับตัวเป็นกลุ่มของเส้นใย ซึ่งทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดลดลง (X. Wang et al., 2019)



ภาพที่ 4.2 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน

4.2.1.2 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงอัด

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความยาวเส้นใยต่อกำลังรับแรงอัด โดยพบว่าที่ปริมาณการใส่เส้นใย GFRPW ที่เท่ากันของทั้งสามความยาวคือ 3 เซนติเมตร, 4 เซนติเมตร, และ 5 เซนติเมตร ที่อยู่ในช่วง 0% - 1.5% ของปริมาณซีเมนต์ พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความยาวที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงการใส่เส้นใย GFRPW ที่อยู่ในช่วง 2% ของปริมาณซีเมนต์ พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของตัวอย่างที่ใส่เส้นใย GFRPW ที่ความยาว 5 เซนติเมตรนั้นแตกต่างจากตัวอย่างที่ใส่เส้นใย GFRPW ที่ความยาว 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร คือความสามารถในการรับกำลังอัดแปรผกผันกับความยาวที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ใส่เส้นใย GFRPW ที่ความยาว 5 เซนติเมตร มีความสามารถในการรับกำลังอัดที่ต่ำกว่า ตัวอย่างที่ใส่เส้นใย GFRPW ที่ความยาว 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร (W. C. Wang et al., 2020)



ภาพที่ 4.3 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงอัด

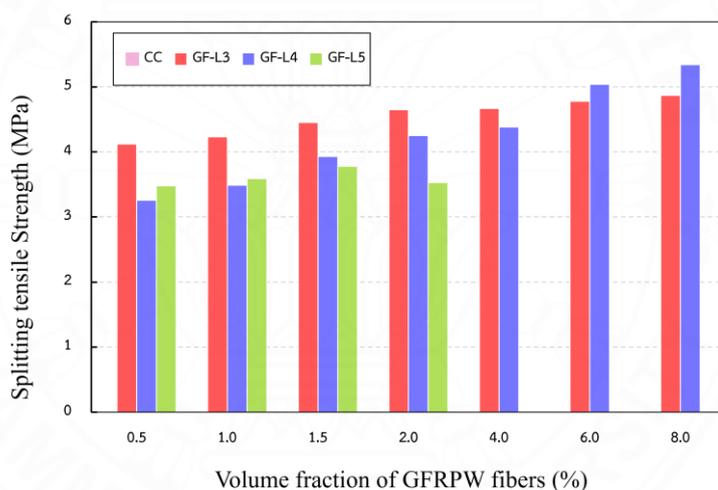
4.2.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (The Splitting Tensile Strength of Concrete reinforce with GFRPW)

4.2.2.1 ผลกระทบของปริมาณเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ความยาว 3 เซนติเมตร, 4 เซนติเมตร, และ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ไม่ใส่เส้นใย GFRPW (CC 0%) มีค่าเท่ากับ 3.46 MPa คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 3 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 4.12 MPa, 4.23 MPa, 4.45 MPa, 4.65 MPa, 4.67 MPa, 4.78 MPa, และ 4.87 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 19.08%, 22.25%, 28.61%, 34.39%, 34.97%, 38.15% และ 40.75% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 4 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 3.26 MPa, 3.49 MPa, 3.93 MPa, 4.25 MPa, 4.38 MPa, 5.04 MPa, และ 5.34 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ -5.76%, 0.87%, 13.58%, 22.83%, 26.59%, 45.66% และ 54.34% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%,

0.5%, 1.0%, 1.5%, และ 2.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 3.48 MPa, 3.59 MPa, 3.78 MPa, และ 3.53 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.58%, 3.76%, 9.25%, และ 2.02% ตามลำดับ โดยผลการทดสอบจะแสดงดัง ภาพที่ 4.4

ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW ที่มีอายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างอ้างอิง (CC 0%) มีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงว่าการใส่เส้นใย GFRPW ทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลที่มาจาก การเติมเส้นใยในคอนกรีต โดยเฉพาะในปริมาณที่มาก สอดคล้องกับ (Fu et al., 2021, X. Wang et al., 2019) การเติมเส้นใยในคอนกรีตทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้น

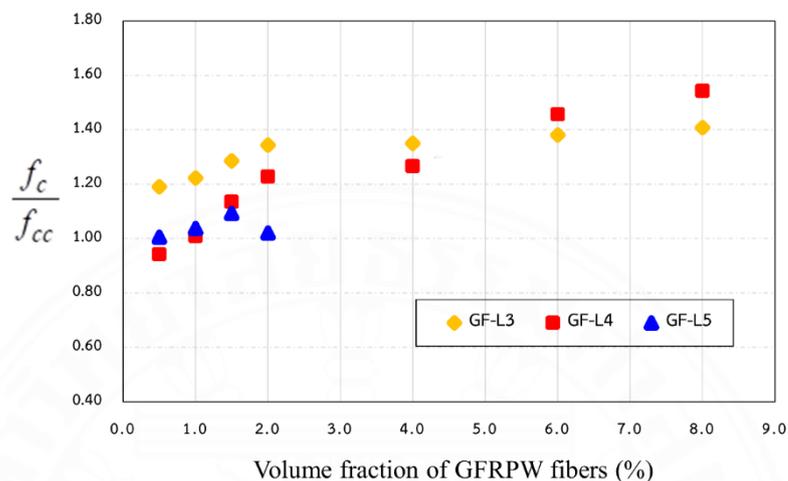


ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน

4.2.2.2 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

จากภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความยาวเส้นใยต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก โดยพบว่าที่ปริมาณการใส่เส้นใย GFRPW ที่เท่ากันของทั้งสามความยาวคือ 3 เซนติเมตร, 4 เซนติเมตร, และ 5 เซนติเมตร ความสามารถในการรับแรงดึงแบบผ่าซีกแปรผันผกกับ ความยาว ค่ากำลังรับแรงดึงจะลดลงเมื่อความยาวเพิ่มขึ้น การลดลงนี้เกิดการใช้เส้นใยที่มีความยาวมากสามารถก่อให้เกิดปัญหา balling effect หรือการจับตัวเป็นกลุ่มของเส้นใย ซึ่งทำให้เกิดความไม่

สม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต เส้นใยที่มีความยาวหรือปริมาณสูงอาจเพิ่มการพันกันของเส้นใย (fiber entanglement) ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลง (X. Wang et al., 2019)



ภาพที่ 4.5 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

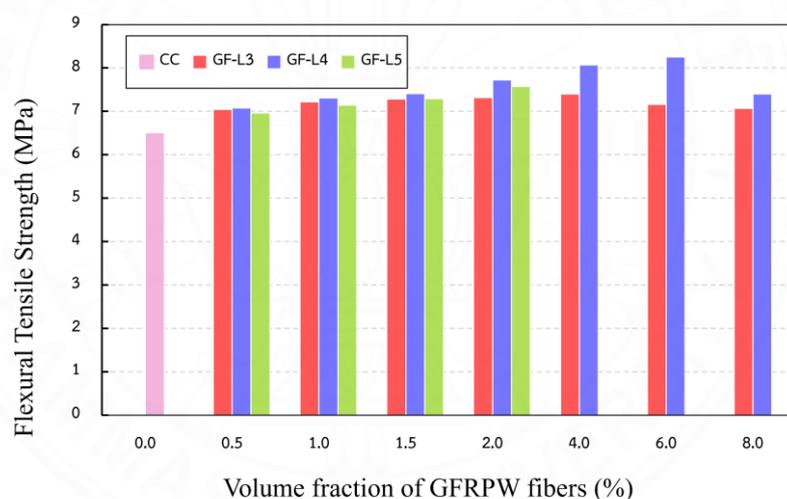
4.2.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (The Flexural Strength of Concrete reinforce with GFRPW)

4.2.3.1 ผลกระทบของปริมาณเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ความยาว 3 เซนติเมตร, 4 เซนติเมตร, และ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ไม่ใส่เส้นใย GFRPW (CC 0%) มีค่าเท่ากับ 6.51 MPa คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 3 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 7.04 MPa, 7.22 MPa, 7.28 MPa, 7.32 MPa, 7.40 MPa, 7.16 MPa, และ 7.07 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 8.14%, 10.91%, 11.83%, 12.44%, 13.67%, 9.98% และ 8.60% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 4 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 7.08 MPa, 7.31 MPa, 7.41 MPa, 7.72 MPa, 8.07 MPa, 8.25 MPa, และ 7.4 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเมื่อ

เทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 8.76%, 12.29%, 13.82%, 18.59%, 23.96%, 26.73% และ 13.67% ตามลำดับ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, และ 2.0% ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 6.96 MPa, 7.14 MPa, 7.29 MPa, และ 7.57 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตไม่ใส่เส้นใย GFRPW เพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.91%, 9.68%, 11.98%, และ 16.28% ตามลำดับ โดยผลการทดสอบจะแสดงดัง ภาพที่ 4.6

ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW ที่มีอายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างอ้างอิง (CC 0%) มีกำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงว่าการใส่เส้นใย GFRPW ทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลที่มาจาก การเติมเส้นใยในคอนกรีต โดยเฉพาะในปริมาณที่มาก สอดคล้องกับ (Fu et al., 2021, W. C. Wang et al., 2020) เมื่อเติมเส้นใยในคอนกรีต ความสามารถในการรับกำลังดัดเพิ่มขึ้น

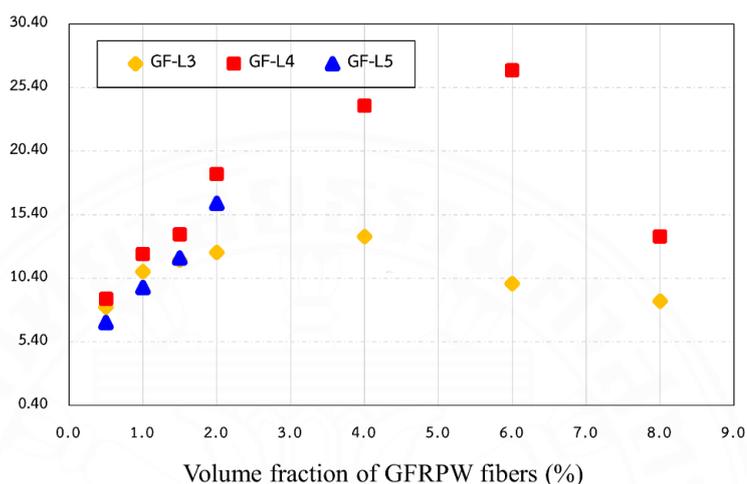


ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน

4.2.3.2 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดัด

จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความยาวเส้นใยต่อกำลังรับแรงดัด โดยพบว่าที่ปริมาณการใส่เส้นใย GFRPW ที่เท่ากันของทั้งสามความยาวคือ 3 เซนติเมตร, 4 เซนติเมตร, และ 5 เซนติเมตร ความสามารถในการรับแรงดัดแปรผันผกกับความยาว ค่ากำลังรับแรงดัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวเพิ่มขึ้น การลดลงนี้เกิดการใช้เส้นใยที่มีความยาวมากสามารถก่อให้เกิด

ปัญหา balling effect หรือการจับตัวเป็นกลุ่มของเส้นใย ซึ่งทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต เส้นใยที่มีความยาวหรือปริมาณสูงอาจเพิ่มการพันกันของเส้นใย (fiber entanglement) ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลง (X. Wang et al., 2019)



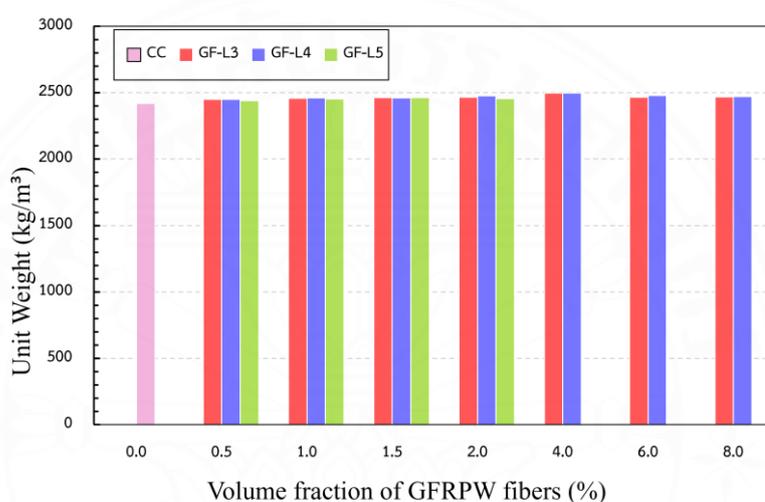
ภาพที่ 4.7 ผลกระทบของความยาวเส้นใย GFRPW ต่อกำลังรับแรงดัด

4.2.4 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Unit Weight of Concrete reinforce with GFRPW)

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFEPW ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% โดยน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยผลการทดสอบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตอ้างอิง (CC 0%) มีค่าเท่ากับ 2420.85 kg/m³ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 3 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0.5% - 8.0% มีค่าอยู่ระหว่าง 2450.40 kg/m³ - 2498.77 kg/m³ ค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 4 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0.5% - 8.0% มีค่าอยู่ระหว่าง 2451.80 kg/m³ - 2499.33 kg/m³ คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวเส้นใยเท่ากับ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0.5% - 2.0% มีค่าอยู่ระหว่าง 2440.40 kg/m³ - 2465.18 kg/m³ โดยผลการทดสอบจะแสดงดังภาพที่ 4.8

ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่เสริมด้วยเส้นใย GFRPW มีแนวโน้มเพิ่มค่าหน่วยน้ำหนักเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใย โดยเฉพาะในช่วงอัตราส่วนระหว่าง 0.5-4.0% ซึ่งค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นใยเกิน 4.0% (เช่น 6.0% และ 8.0%) ค่าหน่วย

น้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย หรือเพิ่มขึ้นไม่มากเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 4.0% โดยเฉพาะในกลุ่ม GF-L3 และ GF-L4 แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยในปริมาณที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดช่องว่าง (voids) หรือการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ ซึ่งตรงกับข้อเสนอแนะจากงานวิจัยของ Fu et al. (2021) และ Wang et al. (2019) ที่ระบุว่าการใช้เส้นใยเกินปริมาณที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดปัญหาการรวมกลุ่มของเส้นใย (fiber balling) ทำให้โครงสร้างภายในของคอนกรีตไม่หนาแน่นสม่ำเสมอ ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลง



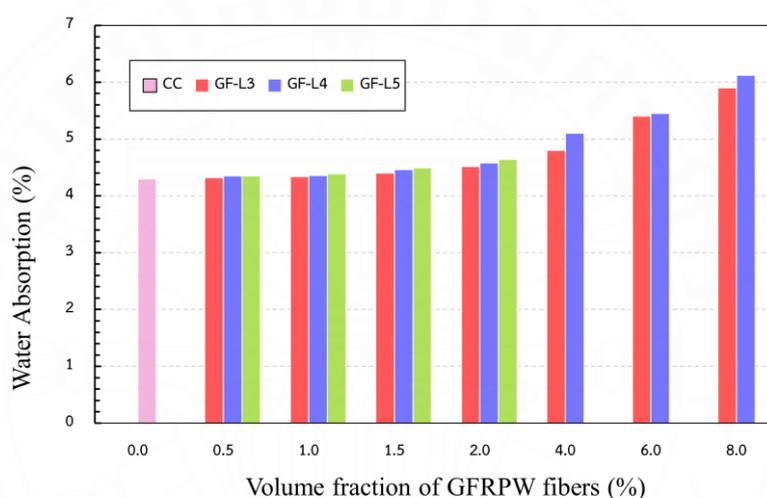
ภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน

4.2.5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Water Absorption of Concrete reinforce with GFRPW)

ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ในอัตราส่วนผสมเส้นใย 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 4.0%, 6.0%, และ 8.0% โดยน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยผลการทดสอบพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตอ้างอิง (CC 0%) มีค่าเท่ากับ 4.3% คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่มีความยาวเส้นใย 3 เซนติเมตร มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจาก 4.32% ที่อัตราส่วนเส้นใย 0.5% และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นถึง 5.90% ที่อัตราส่วน 8.0% สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่มีความยาวเส้นใย 4 เซนติเมตร ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 4.35–6.12% โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 8.0% คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่มีความยาวเส้นใยเท่ากับ 5 เซนติเมตร ในอัตราส่วน

ผสมเส้นใย 0.5% - 2.0% มีแนวโน้มคล้ายกัน โดยมีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดอยู่ที่ 4.64% ที่อัตราส่วน 2.0% โดยผลการทดสอบจะแสดงดัง ภาพที่ 4.9

ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใย GFRPW มีแนวโน้มการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากช่องว่างที่เกิดจากการกระจายตัวของเส้นใยในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้เกิดรูพรุนมากขึ้น (porosity) ความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการดูดซึมน้ำอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีของเส้นใยยาว 4 เซนติเมตร และอัตราส่วนเส้นใยสูง ค่าการดูดซึมน้ำสูงถึง 6.12% ซึ่งสูงกว่าค่าของคอนกรีตปกติถึงประมาณ 42%



ภาพที่ 4.9 การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ความยาวและปริมาณการใส่ที่แตกต่างกัน

4.2.6 ผลการทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)

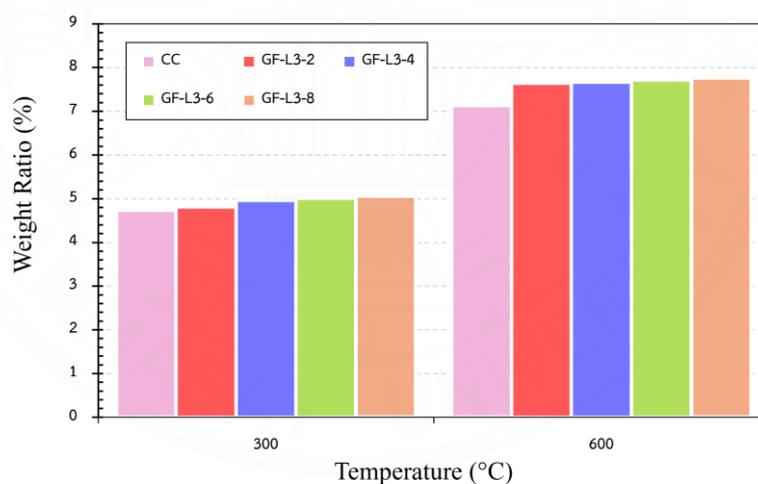
ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่อุณหภูมิ 300°C และ 600°C แสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าคอนกรีตผสมเส้นใย GFRPW มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติ (CC) อย่างชัดเจน โดยที่คอนกรีตอ้างอิง (CC) มีการสูญเสียน้ำหนักคิดเป็น 4.73% ที่อุณหภูมิ 300°C และ 7.14% ที่อุณหภูมิ 600°C

ที่อุณหภูมิ 300°C คอนกรีตปกติ (CC) สูญเสียน้ำหนักเฉลี่ย 4.73% ในขณะที่คอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW ความยาว 3 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมเส้นใย 2%, 4%, 6% และ 8% มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 4.81%, 4.96%, 5.01% และ 5.06% ตามลำดับ โดยพบว่า

อัตราการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เติม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของเรซินในเส้นใย GFRPW ที่เริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 250°C โดยประมาณ (Fu et al., 2021)

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600°C ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักก็เพิ่มสูงขึ้นตาม โดยคอนกรีตปกติมีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 7.14% ในขณะที่คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ระดับ 2%, 4%, 6% และ 8% มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 7.64%, 7.67%, 7.72% และ 7.77% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติประมาณ 0.5–0.6% ที่อุณหภูมิ 600°C

การใส่เส้นใย GFRPW ทำให้คอนกรีตมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 600°C ซึ่งเป็นช่วงที่เรซินในเส้นใยเริ่มสลายตัวอย่างสมบูรณ์ และเกิดการเผาไหม้ของวัสดุพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณเส้นใย GFRPW ยังส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงเล็ก ๆ มากขึ้นหลังการเผาไหม้ เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยที่ไหม้หายไป เหลือไว้เพียงโครงสร้างเปลือกของแก้ว ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเส้นใยที่ผสม (Fu et al., 2021; Hager et al., 2014)



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW หลังสัมผัสอุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส

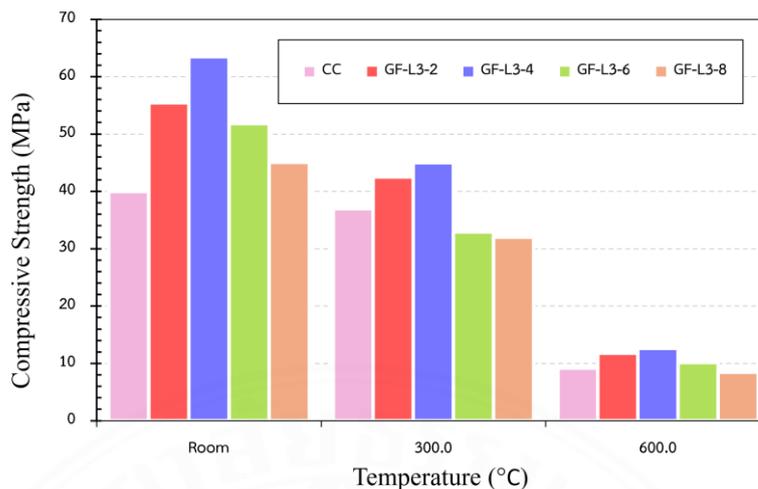
4.2.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่ผ่านการเผาไฟที่อุณหภูมิ 300°C และ 600°C เทียบกับคอนกรีตปกติ (CC) แสดงดังภาพที่ 4.11 พบว่าที่อุณหภูมิห้อง (Room Temp) คอนกรีตปกติ (CC) มีกำลังอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 40.01 MPa คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติทุกกรณี โดยเฉพาะที่อัตราส่วนเส้นใย 4% (GF-L3-4) ซึ่งมีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 63.46 MPa เพิ่มขึ้น 58.53% จากคอนกรีตปกติ แสดงให้เห็นว่า การเสริมเส้นใย GFRPW ในคอนกรีตช่วยเพิ่มกำลังอัดได้อย่างชัดเจนในสภาวะปกติ

หลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C กำลังอัดของคอนกรีตทุกกลุ่มลดลงจากสภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียน้ำในเนื้อคอนกรีตและความเสียหายต่อโครงสร้างทางจุลภาค คอนกรีตอ้างอิง ลดลงเหลือ 37.01 MPa ลดลง 7.5% ขณะที่คอนกรีต GF-L3-4 ลดลงเหลือ 45.00 MPa ลดลง 29.1% จากสภาวะเดิม แต่ยังคงสูงกว่าคอนกรีตอ้างอิง ที่อุณหภูมิเดียวกันถึง 21.6% แสดงว่า เส้นใย GFRPW ยังสามารถช่วยรักษากำลังอัดบางส่วนไว้ได้แม้ภายหลังเผาไฟ

หลังเผาที่อุณหภูมิ 600°C ค่ากำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนทุกกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของวัสดุในคอนกรีตและเส้นใย คอนกรีตอ้างอิง ลดลงเหลือเพียง 9.20 MPa ลดลง 77.0% ขณะที่ GF-L3-4 ยังคงมีกำลังอัด 12.60 MPa ลดลง 80.1% จากสภาวะเดิม แต่ยังคงสูงกว่าคอนกรีตอ้างอิง 36.9% อย่างไรก็ตาม บางกลุ่มเช่น GF-L3-6 และ GF-L3-8 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตอ้างอิง ที่อุณหภูมิ 600°C เล็กน้อย

เมื่อปริมาณเส้นใยสูงเกินไป อาจเกิดผลลบจากช่องว่างที่เกิดหลังเส้นใยไหม้ เมื่อเผาไฟที่อุณหภูมิสูง เส้นใยจะเริ่มสลายตัว ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง แต่ยังคงพบว่าในบางระดับเส้นใย เช่น 2-4% คอนกรีตยังสามารถรักษากำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป คาดว่าการเสริมเส้นใยช่วยลดการแตกร้าวสะสมภายในและเพิ่มความเหนียวของเนื้อคอนกรีต ทำให้ทนต่อความเสียหายจากความร้อนได้ดีขึ้นในระดับหนึ่ง (Fu et al., 2021; Hager et al., 2014)



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส

4.3 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW (Microstructure of Concrete Reinforced with GFRPW)

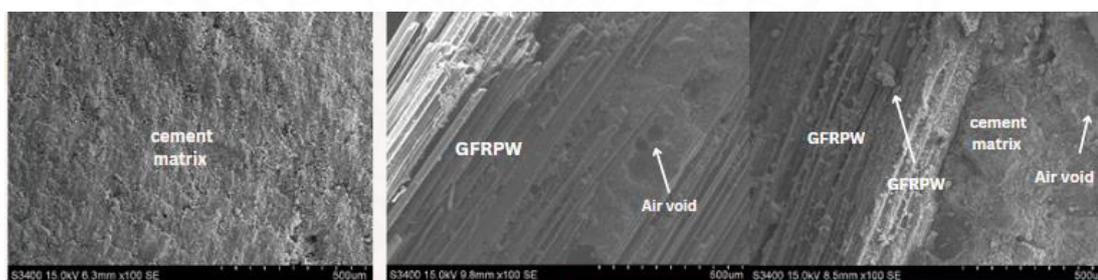
ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยของเสียจากวัสดุ GFRPW โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ได้รับการเสริมแรงด้วยเส้นใยดังกล่าว

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW พบว่าการเติมเส้นใย GFRPW มีส่วนช่วยในการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพทางกลของคอนกรีต โดยเฉพาะในด้านความต้านทานแรงดึง แรงดัด และการต้านทานต่อการแตกร้าว เส้นใย GFRPW ช่วยเพิ่มการยึดเกาะภายในคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความเหนียวแน่นมากขึ้น

จากการสังเกตด้วยกล้อง SEM แสดงดังภาพที่ 4.12 พบว่าเส้นใย GFRPW สามารถยึดเกาะกับซีเมนต์เมทริกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีร่องรอยของการฝังตัวของเส้นใยในเนื้อซีเมนต์เมทริกซ์อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของเส้นใย GFRPW ในการเสริมสร้างการเชื่อมประสานระหว่างโครงสร้างภายในของคอนกรีต ช่วยลดปัญหาการแยกตัวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ และเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อการแตกร้าวและการกระจายรอยร้าว

จากภาพที่ 4.13 จาก SEM ของตัวอย่างคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง โดยจากภาพ ก) คอนกรีตอ้างอิงที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระและความพรุนสูง สะท้อนถึงการสูญเสียความชื้นและการสลายตัวของสารประกอบไฮเดรตจากความร้อนสูง พบการแตกร้าวอย่างชัดเจนบนผิวคอนกรีต ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันภายในและการขยายตัวที่เกิดขึ้นขณะได้รับความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมเปราะและลดความสามารถในการรับแรง ภาพ ข) คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงเส้นใย GFRPW ที่ยังคงสภาพดี มีการฝังตัวอยู่ในซีเมนต์เมทริกซ์อย่างแน่นหนา มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเนื้อคอนกรีตที่ดี ไม่มีรอยแยกหรือโพรงอากาศขนาดใหญ่บริเวณรอบเส้นใย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการถ่ายแรงและช่วยจำกัดการแพร่กระจายของรอยร้าว ภาพ ค) คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW ที่เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แสดงโครงสร้างของเส้นใย GFRPW ที่คงรูปได้ดีแม้ผ่านความร้อนสูง แสดงถึงความทนทานต่ออุณหภูมิของวัสดุ มีลักษณะการยึดเกาะกับซีเมนต์เมทริกซ์อย่างแน่นหนาเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าเนื้อคอนกรีตโดยรอบจะมีรอยแตกร้าวจากความร้อน เส้นใยก็ยังช่วยจำกัดการขยายของรอยร้าวเหล่านั้น

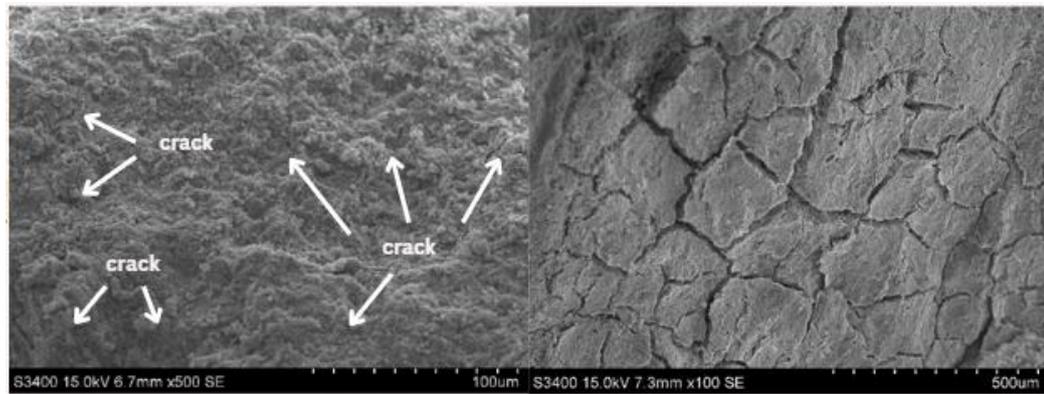
ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการนำของเสียจากวัสดุ GFRP มาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในคอนกรีต ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณขยะจากอุตสาหกรรมวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย แต่ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา



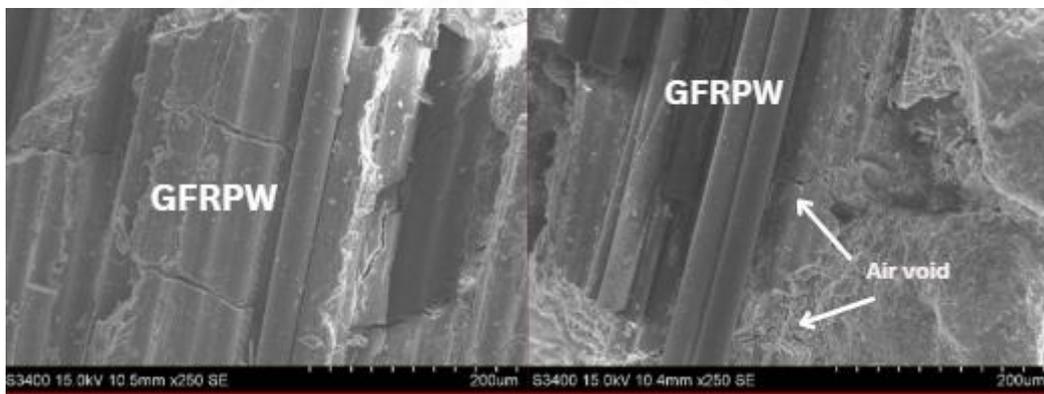
ก)

ข)

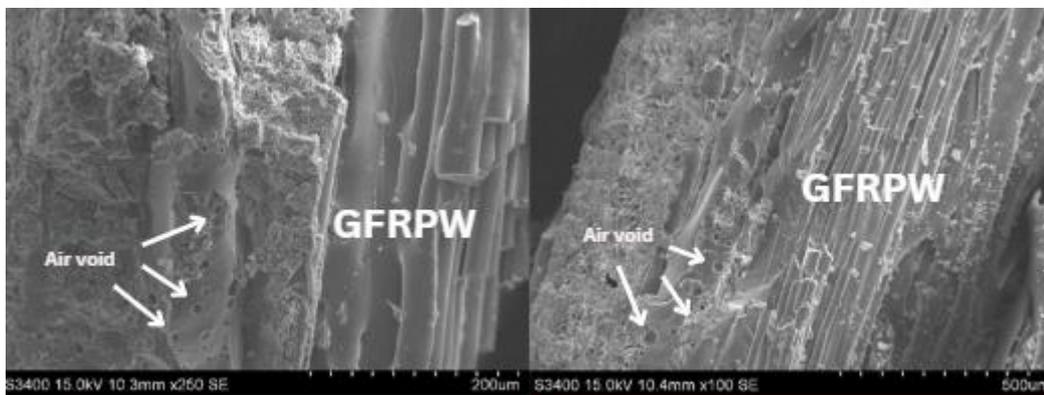
ภาพที่ 4.12 SEM ของตัวอย่างคอนกรีต ก) คอนกรีตอ้างอิง ข) คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW



ก)



ข)



ค)

- ภาพที่ 4.13 SEM ของตัวอย่างคอนกรีต ก) คอนกรีตอ้างอิงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 ข) คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
 ค) คอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการทนทานต่ออุณหภูมิสูงของคอนกรีตที่ใส่เส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (GFRPW) โดยขนาดของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วที่ศึกษา 3 ขนาด คือ 3 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร อัตราส่วนของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วที่ผสมเพิ่มเป็นร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, และ 8.0 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ คุณสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ ตัวอย่างเช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงดัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ขนาดรูพรong ความสามารถในการต้านทานอุณหภูมิสูง และการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างคอนกรีตที่ใส่เส้นใยของเสี้ยจากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว จากงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW มีค่าการยุบตัวลดลงตามปริมาตรของการใส่เส้นใยที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างอ้างอิง พบว่ากลุ่มตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใย GFRPW มีหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างอ้างอิง

5.1.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยความยาว 4 เซนติเมตร ที่ 4.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและมากกว่ากลุ่มคอนกรีตอ้างอิง 64.50%

5.1.4 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยความยาว 4 เซนติเมตร ที่ 6.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงสุดและมากกว่ากลุ่มคอนกรีตอ้างอิง 54.34%

5.1.5 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW พบว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW ความยาว 4 เซนติเมตร ที่ 8.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดและมากกว่ากลุ่มคอนกรีตอ้างอิง 26.73 %

5.1.6 คุณสมบัติการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเติมเส้นใย GFRPW ในปริมาณที่มากขึ้น

5.1.7 ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง 300, 600, 900 องศาเซลเซียส น้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW ลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากความชื้นในรูปพอรุนจะเริ่มระเหยออกไป คอนกรีตเสริมเส้นใยสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติประมาณ 0.5–0.6% ที่อุณหภูมิ 600°C

5.1.8 อุณหภูมิที่สูงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW มีค่าลดลง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เสริมเส้นใย GFRPW ที่ 4.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด หลังจากอุณหภูมิ 300-600 องศาเซลเซียส พบว่าเรซินที่เคลือบผิวเส้นใย GFRPW ได้สลายตัวเนื่องจากความร้อน แต่เส้นใยยังคงอยู่

5.1.9 ในสภาวะที่มีความร้อนสูง เส้นใย GFRPW ยังคงรักษารูปร่างและสมบัติเชิงกลได้ดี และช่วยป้องกันการแตกร้าวที่เกิดจากการขยายตัวของวัสดุ การเปรียบเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงพบว่า เส้นใย GFRPW ช่วยลดความเสียหายจากความร้อนและรักษาโครงสร้างจุลภาคให้มีความต่อเนื่องมากขึ้น



รายการอ้างอิง

- 642, A. C. (1997). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete C642-97. *ASTM International, March*, 1–3.
- Ahmed, A. A. M., & Jia, Y. (2019). Effect of using hybrid polypropylene and glass fibre on the mechanical properties and permeability of concrete. *Materials*, *12*(22). <https://doi.org/10.3390/ma12223786>
- American Society for Testing and Materials. (19 C.E.). ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM International*, *04*(571), 1–5.
- American Society for Testing and Materials. (2008). Astm C1157. *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, 3–7.
- Asokan, P., Osmani, M., & Price, A. D. F. (2009). Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. *Journal of Cleaner Production*, *17*(9), 821–829. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.12.004>
- Astm, C. (2004). 496/C 496M. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*,” *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM, C. (2003). 143/C 143M-03,“. *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*”, *Manual Book of ASTM Standards*, *4*.
- ASTM C494. (2013). Standard specification for chemical admixtures for concrete. In *Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 04). ASTM International.
- Bank, L. C. (2007). Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials. *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, 1–551. <https://doi.org/10.1002/9780470121429>
- Committee, C. (2021). Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*. ASTM international.

- Conroy, A., Halliwell, S., & Reynolds, T. (2004). Composite Recycling In The Construction Industry. *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction: ACIC 2004*, 37(8), 335–342. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-736-5.50037-6>
- Correia, J. R., Almeida, N. M., & Figueira, J. R. (2011). Recycling of FRP composites: Reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 19(15), 1745–1753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.018>
- Fu, B., Lin, L. B., Zhou, X., You, X. M., & Deng, D. Y. (2024). Effect of incorporating recycled macro fibres on the properties of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete. *Journal of Building Engineering*, 83(January), 108460. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108460>
- Fu, B., Liu, K. C., Chen, J. F., & Teng, J. G. (2021). Concrete reinforced with macro fibres recycled from waste GFRP. *Construction and Building Materials*, 310, 125063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125063>
- Gilbert, R. I., & Bernard, E. S. (2018). Post-cracking ductility of fibre reinforced concrete linings in combined bending and compression. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 76(March), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.02.010>
- Kene, K. S. (2012). Experimental Study on Behavior of Steel and Glass Fiber Reinforced Concrete Composites. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2(4), 125–130. <https://doi.org/10.9756/bijiems.1617>
- Lam, T. F., & bin Mohamad Yatim, J. (2015). Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete with different fiber content and fiber length. *Journal of Asian Concrete Federation*, 1(1), 11–21.
- Löber, P., & Holschemacher, K. (2014). Structural Glass Fiber Reinforced Concrete for Slabs on Ground. *World Journal of Engineering and Technology*, 2(03), 48.
- Masuelli, M. A. (2013). Introduction of fibre-reinforced polymers– polymers and composites: concepts, properties and processes. In *Fiber reinforced polymers-the technology applied for concrete repair*. IntechOpen.

- Pickering, S. J. (2004). Recycling Technologies For Thermoset Composite Materials. *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction: ACIC 2004*, 37(8), 392–399. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-736-5.50044-3>
- Scheirs, J. (1998). Polymer recycling: science, technology and applications. (*No Title*).
- Test, C. C., Drilled, T., & Concrete, C. (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) 1. *Hand The, C78-02(C)*, 1–4.
- Ummah, M. S. (2019). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析 Title. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SYSTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Vairagade, V. S., & Kene, K. S. (2013). Strength of normal concrete usrsing metallic and synthetic fi-be. *Procedia Engineering*, 51, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.020>
- Wang, W. C., Wang, H. Y., Chang, K. H., & Wang, S. Y. (2020). Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118387>
- Wang, X., He, J., Mosallam, A. S., Li, C., & Xin, H. (2019). The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019(1), 7520549.
- Yıldırım, M., & Özhan, H. B. (2023). Residual Durability Performance of Glass Fiber Reinforced Concrete Damaged by Compressive Stress Loads. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 392–401. <https://doi.org/10.3311/PPci.21387>

- Yuan, H., Fu, X. H., Fan, Y. C., Fu, B., & Zou, Q. Q. (2022). Flexural performance of layered macro fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 357(June). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129314>
- Zhou, Y., Weng, Y., Li, L., Hu, B., Huang, X., & Zhu, Z. (2022). Recycled GFRP Aggregate Concrete Considering Aggregate Grading: Compressive Behavior and Stress–Strain Modeling. *Polymers*, 14(3), 581. <https://doi.org/10.3390/polym14030581>



ประวัติผู้เขียน

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อ | นางสาวชรินทร์ เอี่ยมละออ |
| วุฒิการศึกษา | ปีการศึกษา 2566: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| ทุนการศึกษา | 2567: ทุนสนับสนุนการวิจัย |
| ผลงานทางวิชาการ | ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 เรื่อง "สมบัติทางกลของคอนกรีตผสมด้วยของเสียพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว" |

