

การใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแกรนิตในคอนกรีตกระตุ้นด้วยสารละลายต่างเสริมเส้นใยเหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USE OF GRANITE INDUSTRY WASTE IN ALKALI-ACTIVATED CONCRETE REINFORCED
WITH STEEL FIBERS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแกรนิตในคอนกรีต กระตุ้นด้วยสารละลายต่างเสริมเส้นใยเหล็ก |
| โดย | นายพลยุทธ ทองผาสุก |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร.กิม เหนือคลอง |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.กิม เหนือคลอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระชาติ ตั้งจิรัชภัทร)

พลยุทธ์ ทองผาสุก : การใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแกรนิตในคอนกรีตกระตุ้นด้วย
 สารละลายต่างเสริมเส้นใยเหล็ก. (USE OF GRANITE INDUSTRY WASTE IN ALKALI-
 ACTIVATED CONCRETE REINFORCED WITH STEEL FIBERS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.
 ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ภีม เหนือคลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเศษหินแกรนิตและเส้นใยเหล็กต่อสมบัติ
 เชิงกลของคอนกรีตที่กระตุ้นด้วยสารละลายต่างภายใต้อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง มวลรวมรี
 ไซเคิลจากเศษหินแกรนิตถูกนำมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0 และ 100 โดย
 น้ำหนัก และมีการเสริมกำลังของวัสดุด้วยเส้นใยเหล็กในปริมาณร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตร
 ของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าค่าการไหลแม้มีค่าลดลงเมื่อแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต
 เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง ค่ากำลังรับแรงอัดของ
 คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตและทรายธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอายุการบ่ม (7, 28 และ 90
 วัน) และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กส่งผลให้ค่ากำลังอัด กำลังรับแรงดัด และความเหนียวของวัสดุ
 มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็ก โดยกำลังอัด กำลังรับแรงดัด และความเหนียวมีค่าสูงที่สุดเมื่อ
 ใช้ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 โดยปริมาตรของคอนกรีต สำหรับการทดสอบหลังเผาไฟ 60 นาที
 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดคงค้างของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษหินแกรนิตมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต
 ที่ใช้ทรายธรรมชาติ ในขณะที่กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเศษหินแกรนิตมีค่ามากกว่า
 คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติ นอกจากนี้การเสริมเส้นใยยังช่วยเพิ่มกำลังอัดและกำลังดัดคงค้างหลัง
 เผาไฟของคอนกรีตได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370362121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Concrete, Steel fibers, Granite, Recycled aggregate

Phonlayuth Thongpasuk : USE OF GRANITE INDUSTRY WASTE IN ALKALI-ACTIVATED CONCRETE REINFORCED WITH STEEL FIBERS. Advisor: Assoc. Prof. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D. Co-advisor: Peem Nuaklong, Ph.D.

This research aims to investigate the effect of granite waste and steel fibers on mechanical properties of alkali-activated concrete at normal temperature and after exposed to elevated temperatures. Granite particles were used to replace natural sand at 0% and 100% by weight. Steel fibers were used reinforced alkali-activated concrete at 0%, 1%, and 2% by the volume of concrete. Tests showed that the slump flow value was reduced when replaced with granite waste, and an increase in steel fiber content resulted in a decrease in slump flow values. Compressive strength of alkali-activated concrete made with granite waste was similar to that of alkali-activated concrete made with natural sand for all curing ages (7, 28, and 90 days). In addition, compressive strength, flexural strength, and toughness increased with the increase in fiber volume fractions. The highest strength was observed when 2% fibers were used. After exposed to elevated temperature for 60 minutes, compressive strengths of alkali-activated concrete with granite waste and with sand was similar while flexural strength of alkali-activated concrete with granite waste were higher than those of natural sand. Furthermore, addition of steel fibers enhanced residual compressive and flexural strengths after elevated temperature.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนการศึกษาศึกษาวิศวกรรมโยธา 100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (RCU_D_64_005_21) ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, ดร.ภิม หน่อคลอง ที่ให้เกียรติมาช่วยในการปฏิบัติทดสอบและให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยและขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี

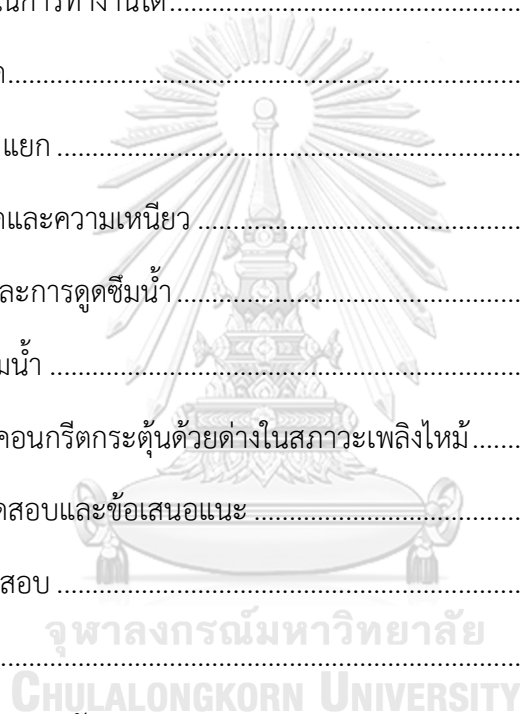
พลยุทธ์ ทองผาสุก



สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูปภาพ..... | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..... | 4 |
| 2.1 เถ้าลอย (Fly ash)..... | 4 |
| 2.2 คอนกรีตกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated concrete) และจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer). 5 | |
| 2.2.1 สมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการ สังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย..... | 7 |
| 2.2.2 สมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ภายใต้อุณหภูมิสูง | 8 |
| 2.3 มวลรวมจากหินแกรนิต | 10 |
| 2.4 เส้นใย | 19 |
| 2.4.1 สมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย..... | 20 |
| 2.4.2 สมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยภายใต้อุณหภูมิสูง..... | 26 |

| | |
|---|----|
| บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย..... | 30 |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย | 30 |
| 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีตกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง..... | 32 |
| 3.3 การทดสอบวัสดุ | 33 |
| 3.4 ขั้นตอนการเตรียมคอนกรีต..... | 34 |
| บทที่ 4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล | 35 |
| 4.1 ความสามารถในการทำงานได้..... | 35 |
| 4.2 กำลังรับแรงอัด..... | 36 |
| 4.3 กำลังรับแรงดึงแยก | 38 |
| 4.4 กำลังรับแรงดัดและความเหนียว | 40 |
| 4.5 ค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำ..... | 45 |
| 4.6 อัตราการดูดซึมน้ำ | 48 |
| 4.7 คุณสมบัติของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างในสภาวะเพลิงไหม้..... | 49 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ | 59 |
| 5.1 สรุปผลการทดสอบ | 59 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 60 |
| ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัสดุ..... | 61 |
| ภาคผนวก ข ผลการทดสอบของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 65 |
| ภาคผนวก ค รูปภาพประกอบงานวิจัย | 73 |
| บรรณานุกรม..... | 75 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 81 |



สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|-------------|---|----|
| ตารางที่ 1 | จำแนกประเภทแก้วลอยด้วยคุณสมบัติทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019)..... | 5 |
| ตารางที่ 2 | ค่าการสูญเสียกำลังของจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Abdulkareem et al., 2014).... | 9 |
| ตารางที่ 3 | ค่ากำลังอัดก่อนเผาไฟและกำลังค้ำหลังเผาไฟ (Sarker et al., 2014)..... | 10 |
| ตารางที่ 4 | คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย (Kesikidou & Stefanidou, 2019)..... | 20 |
| ตารางที่ 5 | สัดส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และปูนขาวมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (Kesikidou & Stefanidou, 2019)..... | 20 |
| ตารางที่ 6 | คุณสมบัติของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย (Liu et al., 2020) | 22 |
| ตารางที่ 7 | คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย (Nuaklong et al., 2020) | 24 |
| ตารางที่ 8 | ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในแต่ละสัดส่วนผสม (Nuaklong et al., 2020)..... | 25 |
| ตารางที่ 9 | คุณสมบัติกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ (Nuaklong et al., 2020) | 26 |
| ตารางที่ 10 | ค่ากำลังอัดและคามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของคอนกรีตตัวอย่าง (Chen et al., 2014) | 27 |
| ตารางที่ 11 | คุณสมบัติของมวลรวม | 30 |
| ตารางที่ 12 | คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก | 31 |
| ตารางที่ 13 | สัดส่วนผสมคอนกรีต (kg/m^3) | 32 |
| ตารางที่ 14 | รายละเอียดการทดสอบวัสดุ | 33 |
| ตารางที่ 15 | ค่าความเหนียวที่ระยะการแอนตัว L/600 และ L/150 | 45 |
| ตารางที่ 16 | กำลังอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60, และ 90 นาที..... | 50 |
| ตารางที่ 17 | แสดงค่าความเหนียวของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ระยะเวลาเผาไฟ 30 และ 60 นาที | 56 |
| ตารางที่ 18 | ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30, 60 และ 90 นาที..... | 58 |

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 19 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ | 61 |
| ตารางที่ 20 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติ..... | 61 |
| ตารางที่ 21 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ..... | 62 |
| ตารางที่ 22 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษหินแกรนิต..... | 62 |
| ตารางที่ 23 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเศษหินแกรนิต | 63 |
| ตารางที่ 24 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของเศษหินแกรนิต | 63 |
| ตารางที่ 25 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย | 64 |
| ตารางที่ 26 ข้อมูลการทดสอบค่าการไหลผ่านของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 65 |
| ตารางที่ 27 ข้อมูลการทดสอบการรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 65 |
| ตารางที่ 28 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 68 |
| ตารางที่ 29 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงดัดคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่อายุ 28 วัน | 69 |
| ตารางที่ 30 ข้อมูลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 70 |
| ตารางที่ 31 ข้อมูลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 71 |

สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอย (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561)..... | 4 |
| รูปที่ 2 องค์ประกอบของระบบวัสดุประสานที่กระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก (Amer et al., 2021) | 6 |
| รูปที่ 3 การจัดหมวดหมู่ของวัสดุผสมที่ถูกกระตุ้นด้วยอัลตราโซนิกเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติและแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตซีเมนต์ (Waldmann & Thapa, 2018) | 6 |
| รูปที่ 4 กระบวนการเกิดวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Shamsaei et al., 2021) | 7 |
| รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ (Abdulkareem et al., 2014)..... | 9 |
| รูปที่ 6 การสูญเสียมวลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Sarker et al., 2014)..... | 10 |
| รูปที่ 7 บ่อโคลนของกากจากการตัดหินแกรนิต (Bacarji et al., 2013)..... | 11 |
| รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและปริมาณการแทนที่ของเศษหินแกรนิต (Manasseh, 2010) | 11 |
| รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต (Manasseh, 2010)..... | 12 |
| รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีตต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28 และ 90 วัน (Vijayalakshmi & Sekar, 2013) | 12 |
| รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต ค่ากำลังดึงแยกและค่ากำลังดัด (Vijayalakshmi & Sekar, 2013) | 13 |
| รูปที่ 12 ค่ากำลังรับแรงอัดในแต่ละสัดส่วนการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตสำหรับสัดส่วนผสม 1:1:0:2 (Adigun & Eng, 2013) | 14 |
| รูปที่ 13 ค่ากำลังรับแรงอัดในแต่ละสัดส่วนการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตสำหรับสัดส่วนผสม 1:1.5:0:3 (Adigun & Eng, 2013) | 14 |
| รูปที่ 14 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (Singh et al., 2015)..... | 15 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 15 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (Singh et al., 2015)..... | 15 |
| รูปที่ 16 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (Singh et al., 2015)..... | 15 |
| รูปที่ 17 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (a) ที่อายุ 7 วัน (b) ที่อายุ 28 วัน (Khine, 2018)..... | 17 |
| รูปที่ 18 ค่ากำลังรับแรงดัดแยกของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (a) ที่อายุ 7 วัน (b) ที่อายุ 28 วัน (Khine, 2018)..... | 17 |
| รูปที่ 19 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (a) ที่อายุ 7 วัน (b) ที่อายุ 28 วัน (Khine, 2018)..... | 18 |
| รูปที่ 20 ค่าการไหลผ่านของคอนกรีตที่มีปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตปริมาณต่าง ๆ (Khine, 2018)..... | 18 |
| รูปที่ 21 ตัวอย่างของเส้นใยเหล็กและเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในคอนกรีต (Jongvivatsakul et al., 2013)..... | 20 |
| รูปที่ 22 ค่ากำลังรับแรงดัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และปูนขาวมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน (Kesikidou & Stefanidou, 2019)..... | 21 |
| รูปที่ 23 ค่าการไหลผ่านของ UHPGC ที่มีปริมาณสัดส่วนของเส้นใยเหล็ก 0%, 1%, 2%, และ 3% (Liu et al., 2020)..... | 22 |
| รูปที่ 24 ค่าการไหลผ่านของ UHPGC ที่ Aspect ratio ต่าง ๆ (Liu et al., 2020)..... | 23 |
| รูปที่ 25 ผลของค่ากำลังรับแรงอัด (a) และค่ากำลังรับแรงดัด (b) ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่าง ๆ (Liu et al., 2020)..... | 23 |
| รูปที่ 26 ผลของค่ากำลังรับแรงอัด (a) และค่ากำลังรับแรงดัด (b) ที่ความยาวเส้นใยเหล็กต่าง ๆ (Liu et al., 2020)..... | 23 |
| รูปที่ 27 ผลของค่ากำลังรับแรงอัด (a) และค่ากำลังรับแรงดัด (b) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเหล็กต่าง ๆ (Liu et al., 2020)..... | 24 |
| รูปที่ 28 ค่ากำลังรับแรงอัดของแต่ละสัดส่วนผสม (Nuaklong et al., 2020)..... | 25 |
| รูปที่ 29 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง (Chen et al., 2014)..... | 27 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 30 กำลังรับแรงอัดของ SFRC, SFRGC (Na-based) และ SFRGC (K-based) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 28 |
| รูปที่ 31 กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ SFRC, SFRGC (Na-based) และ SFRGC (K-based) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... | 29 |
| รูปที่ 32 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 (2018) | 31 |
| รูปที่ 33 เส้นใยเหล็ก | 32 |
| รูปที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิตามมาตรฐาน ISO 834 (1999) | 33 |
| รูปที่ 35 ค่าการไหลผ่านของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 35 |
| รูปที่ 36 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีสัดส่วนเส้นใยร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตรคอนกรีต | 37 |
| รูปที่ 37 ค่ากำลังรับแรงดึงแยกที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 0, 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต ที่อายุบ่ม 28 วัน..... | 39 |
| รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงแยกต่อกำลังรับแรงอัดที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน | 39 |
| รูปที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง..... | 40 |
| รูปที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรคอนกรีต | 41 |
| รูปที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต | 41 |
| รูปที่ 42 ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติและเสริมเส้นใยเหล็ก | 43 |
| รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง..... | 43 |
| รูปที่ 44 ร้อยละปริมาณความพรุนของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง..... | 46 |
| รูปที่ 45 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง..... | 46 |
| รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าความพรุนของคอนกรีต | 47 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและค่าความพรุณของคอนกรีต | 48 |
| รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดิ่งแยกและค่าความพรุณของคอนกรีต | 48 |
| รูปที่ 49 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่อายุ 28 วัน | 49 |
| รูปที่ 50 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาที | 51 |
| รูปที่ 51 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที | 51 |
| รูปที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของจีไอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตรคอนกรีตภายหลังการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาที..... | 53 |
| รูปที่ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตรคอนกรีตภายหลังการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที..... | 53 |
| รูปที่ 54 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที | 55 |
| รูปที่ 55 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาที | 55 |
| รูปที่ 56 ตัวอย่างคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60, และ 90 นาที | 57 |
| รูปที่ 57 ทฤษฎีธรรมชาติ..... | 73 |
| รูปที่ 58 เศษหินแกรนิต..... | 73 |
| รูปที่ 59 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | 74 |
| รูปที่ 60 คอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างทำการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที | 74 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเกิดจากการผสมกันของซีเมนต์ น้ำ และ มวลรวม ซึ่งมีปริมาณการใช้งานที่มาก กระบวนการผลิตซีเมนต์ไม่ได้ใช้เพียงแค่ปริมาณเชื้อเพลิงและวัตถุดิบมหาศาลแต่ยังสร้างมลภาวะสู่ชั้นบรรยากาศเป็นปริมาณมากอีกด้วย มีรายงานเกี่ยวกับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการผลิตซีเมนต์ว่าทุก ๆ 1 ตัน ของซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 1 ตัน และยังใช้ปริมาณเชื้อเพลิงกับวัตถุดิบปริมาณ 2.5 ตันต่อการผลิตซีเมนต์ 1 ตัน (Miranda et al., 2005; Xie & Ozbakkaloglu, 2015) เพื่อที่จะลดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการทำการวิจัยเกี่ยวกับสารยึดเกาะที่เป็นทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างคอนกรีต

คอนกรีตกระตุ้นด้วยด่างหรือ Alkali-activated concrete ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่ทดแทนการใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยเลือกใช้เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม เช่น แก๊สออกจากโรงงานไฟฟ้า ควบคู่กับการใช้สารกระตุ้นอัลคาไลน์ เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบันเนื่องจากคอนกรีตกระตุ้นด้วยด่างมีคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตที่ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

จีโอโพลิเมอร์ถูกจัดหมวดหมู่ให้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยอัลคาไลน์ จีโอโพลิเมอร์เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานที่ช่วยลดปัญหาทางมลภาวะได้ จีโอโพลิเมอร์ถูกเรียกว่าสารยึดเกาะอัลคาไลน์-อลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งเกิดขึ้นจากการกระตุ้นอัลคาไลน์ซิลิเกตจากวัสดุอลูมิเนียมซิลิเกต (Davidovits, 1991) โดยทั่วไปวัตถุดิบสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์คือ แก๊สลอย ผงถ่านหิน และดินเหนียว (Palomo et al., 1999) นอกจากนี้ยังใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นสารอัลคาไลน์ให้เกิดปฏิกิริยา หลังจากหล่อจีโอโพลิเมอร์สามารถบ่มในอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเพื่อเพิ่มกำลังและควบคุมความชื้นในระยะเวลาตั้งแต่หลายชั่วโมงไปจนกระทั่งหลายวัน (Nath & Sarker, 2015) เนื่องจากการบ่มที่อุณหภูมิสูงทำให้เป็นข้อจำกัดสำหรับการก่อสร้างในบางกรณีเช่น การใช้เป็นวัสดุสำเร็จในการก่อสร้าง ดังนั้นการพัฒนาเกี่ยวกับการบ่มที่อุณหภูมิปกติจึงมีความสำคัญสำหรับกระบวนการก่อสร้างบางกระบวนการที่มีข้อจำกัดและยังมีส่วนช่วยในการลดปัญหาด้านพลังงานและค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในกระบวนการบ่มที่อุณหภูมิสูงได้อีกด้วย

โดยทั่วไปสัดส่วนของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจะมีประมาณ 60% ถึง 75% ของ ปริมาตรคอนกรีต ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบสัดส่วนผสม คุณสมบัติของคอนกรีตในสัดส่วนผสม รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในสัดส่วนผสมต่าง ๆ (Kosmatka et al., 2002) ในปัจจุบันการใช้งานมวลรวม จากแหล่งวัสดุธรรมชาติเพื่อเป็นองค์ประกอบขนาดใหญ่ที่สุดของคอนกรีตมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามการ ใช้งานคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้น มีการคาดการณ์ว่าการทำงานของมวลรวมจากแหล่งวัสดุธรรมชาติจะ เพิ่มขึ้นถึง 48.3 พันล้านตัน (Silva et al., 2014) ซึ่งถือเป็นการบ่งชี้ว่าอุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็น สาเหตุใหญ่อันหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาการลดลงของแหล่งวัสดุธรรมชาติ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อปัญหา ทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่ใช้แล้วอย่างการนำมวลรวมมารีไซเคิลเพื่อ นำมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตจึงมีความสำคัญในการช่วยลดปัญหาดังกล่าว

มวลรวมหินแกรนิตที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่มี แนวโน้มที่จะใช้ในกระบวนการสร้างคอนกรีต มีรายงานเกี่ยวกับของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรม หินแกรนิตว่ามีปริมาณ 20% ถึง 25% จากปริมาณการผลิตทั้งหมด (Taji et al., 2019; Tchadjié et al., 2016) ซึ่งต้องมีการจัดการอย่างเหมาะสม ดังนั้นหากสามารถใช้ในการผลิตคอนกรีตโดยนำมาใช้ ในรูปแบบของมวลรวมละเอียดจะเป็นการช่วยลดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอีกทางหนึ่ง

คอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างมีปัญหาในการเปราะแตกในด้านการรับแรงดึงเช่นเดียวกันกับ คอนกรีตที่ใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ การเสริมกำลังคอนกรีตด้วยการเพิ่มเส้นใยเข้าไปจะช่วยเสริมความ แกร่งบริเวณระหว่างเนื้อซีเมนต์โดยป้องกันและช่วยควบคุมการเกิดร้าวและการกระจายตัวของรอย แตกร้าว (Nataraja et al., 1999; Soroushian et al., 1992) เส้นใยที่มีการใช้งานโดยทั่วไปได้แก่ เส้นใยเหล็ก เส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้ความปลอดภัยของการออกแบบ โครงสร้างในด้านการประสบอัคคีภัยถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา เพื่อพัฒนาและ ประกอบการใช้ออกแบบโครงสร้างสำหรับตลอดช่วงอายุการใช้งานคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีการ ผสมเส้นใยเหล็กและใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ

วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้คือพัฒนาคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้มวลรวมเศษหินแกรนิต รีไซเคิลและมีการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยเหล็ก โดยศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติ ทางกลและความทนทานของคอนกรีตดังกล่าว เช่น ปริมาณสัดส่วนเส้นใยหรือปริมาณสัดส่วนมวล รวมรีไซเคิล โดยประสิทธิภาพของคอนกรีตดังกล่าวจะเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียด เป็นทรายแม่น้ำ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณสัดส่วนการใช้เส้นใยเหล็กที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนไฟของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ใช้ถั่วลอยในการเตรียมคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง
- 1.3.2 ใช้ NaOH และ Na_2SiO_3 เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์
- 1.3.3 ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต
- 1.3.4 ใช้มวลรวมละเอียด 2 ชนิด คือ ทรายแม่น้ำและเศษหินแกรนิต
- 1.3.5 เศษหินแกรนิตใช้แทนที่ทรายแม่น้ำในสัดส่วน 0% และ 100% โดยน้ำหนัก
- 1.3.6 ใช้เส้นใยเหล็กในการเสริมกำลังคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง
- 1.3.7 ใช้เส้นใยเหล็กในสัดส่วน 0%, 1%, และ 2% โดยปริมาตรของคอนกรีต
- 1.3.8 ทำการบ่มคอนกรีตตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องจนถึงวันที่ทำการทดสอบ
- 1.3.9 ศึกษาคุณสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง ได้แก่
 - ค่าการไหลแผ่
 - ความสามารถในการทำงานได้ (Slump flow)
 - ความสามารถในการซึมซับน้ำ (Sorptivity)
 - กำลังอัด ที่อายุ 7, 28, และ 90 วัน
 - กำลังดัดและความเหนียว ที่อายุ 28 วัน
 - ความพรุนและการดูดซึมน้ำ ที่อายุ 28 วัน
 - อัตราการดูดซึมน้ำ ที่อายุ 28 วัน
 - กำลังอัดคงค้างหลังเผาไฟ ที่อายุ 28 วัน
 - กำลังดัดคงค้างและความเหนียว ที่อายุ 28 วัน
 - โพรงและอัตราการดูดซึมน้ำหลังเผาไฟ ที่อายุ 28 วัน
 - น้ำหนักที่หายไปหลังเผาไฟ ที่อายุ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการกองเก็บและฝังกลบเศษหินแกรนิต
- 1.4.2 สามารถผลิตวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่ช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

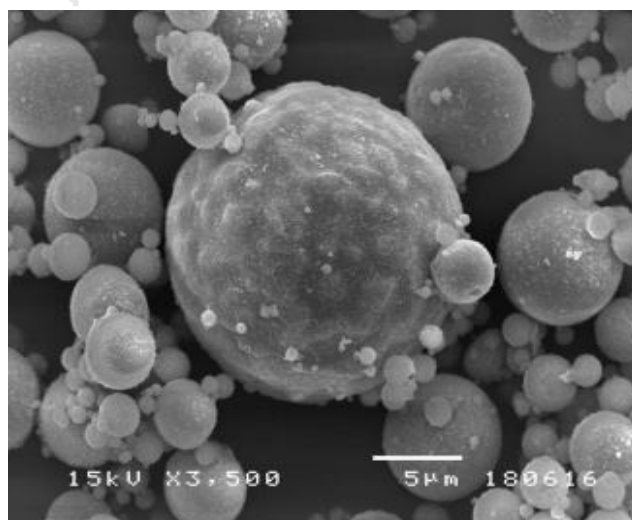
ทบทวนวรรณกรรม

2.1 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อใช้เป็นพลังงานความร้อนให้แก่หม้อน้ำสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจะตกลงยังก้นเตา ซึ่งจะถูกรวบรวมเรียกว่าเถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก ส่วนเถ้าที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะถูกพัดพาออกมาตามอากาศร้อนจึงถูกเรียกว่าเถ้าลอย ซึ่งในประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าถ่านหินที่สำคัญอยู่หลายแห่ง โดยโรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตสูงที่สุดในประเทศไทยคือ โรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ กฟผ. อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

โดยทั่วไปเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินจะมีลักษณะอยู่ในรูปอนุภาคผง มีรูปร่างทรงกลม และมีสีเทาถึงแดงในรูปที่ 1 มีทั้งที่เป็นแบบแข็งตัน (Solid) และกลวง (Hollow) เนื่องจากแหล่งที่มาของถ่านหินที่ใช้และเถ้าลอยส่งผลให้มีความหลากหลายทางด้านของโครงสร้างทางกายภาพ และโครงสร้างทางเคมี โดยถ่านหินที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามี 5 ประเภท ได้แก่ พีต (Peat), ลิกไนต์ (Lignite), ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous), บิทูมินัส (Bituminous) และ แอนทราไซต์ (Anthracite) ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM-C618 (2019) สามารถแบ่งเถ้าลอยออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เถ้าลอย Class C และเถ้าลอย Class F โดยมีการจำแนกจากคุณสมบัติทางเคมีที่มาตรฐานกำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอย (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561)

ตารางที่ 1 จำแนกประเภทเถ้าลอยด้วยคุณสมบัติทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019)

| Chemical composition | Class of fly ash | | |
|-------------------------------------|------------------|---------|---------|
| | Class N | Class F | Class C |
| Silica + Alumina + Ferrite, min (%) | 70.0 | 50.0 | 50.0 |
| CaO, max (%) | Report only* | ≤18.0 | >18.0 |
| SO ₃ , max (%) | 4.0 | 5.0 | 5.0 |
| Moisture content, max (%) | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Loss on ignition, max (%) | 10.0 | 6.0 | 6.0 |

* ใช้ค่าจากผลการทดสอบวัสดุที่ได้

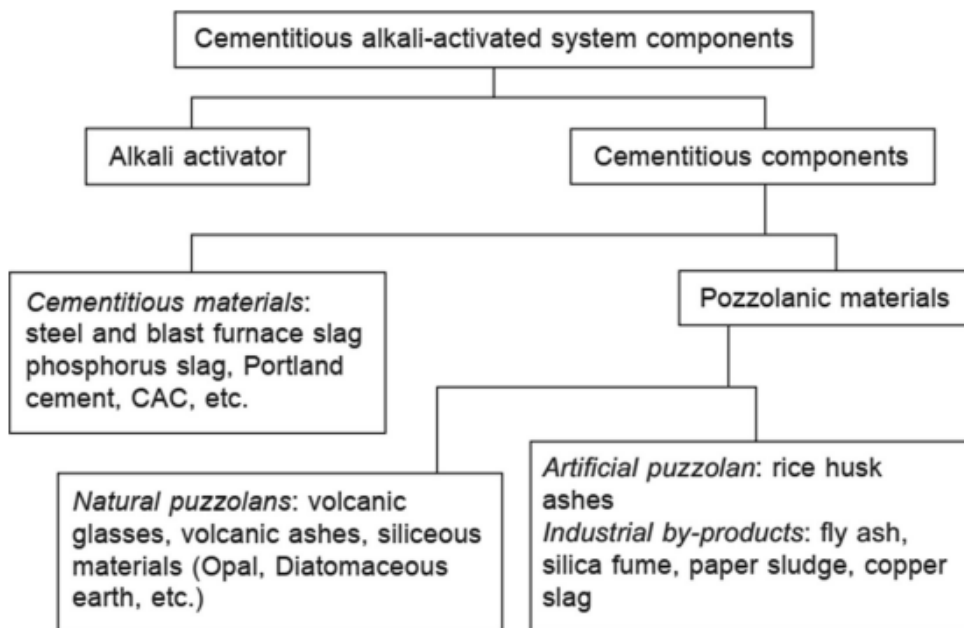
เถ้าลอยมีทั้งรูปแบบแข็งและแบบกลวง โดยส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 (2019) อยู่ใน Class C ลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลม มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 150 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบไปด้วยองค์ประกอบของแร่ต่าง ๆ เช่น ซิลิกา (SiO₂), อลูมินา (Al₂O₃), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เป็นต้น โดยอัตราส่วนของแร่ต่าง ๆ จะเปลี่ยนไปตามชนิดถ่านหินที่ใช้เผาและสภาพแวดล้อมขณะเผา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

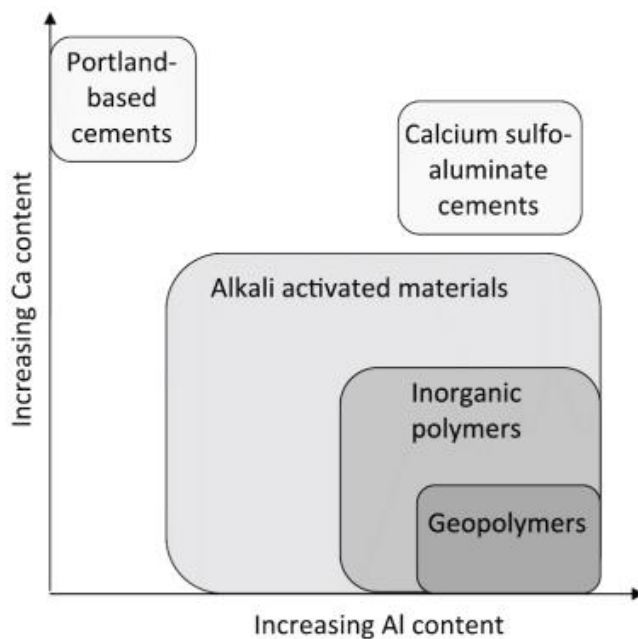
2.2 คอนกรีตกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated concrete) และจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

คอนกรีตกระตุ้นด้วยด่างนับเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้แทนคอนกรีตที่ผลิตจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยคอนกรีตกระตุ้นด้วยด่างไม่มีปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นส่วนผสมในการผลิตซึ่งมีส่วนช่วยในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณขยะอุตสาหกรรมเช่น เถ้าลอย โดยการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตกระตุ้นด้วยด่าง คอนกรีตกระตุ้นด้วยด่างประกอบด้วย แหล่งวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น เถ้าลอย ตัวกระตุ้นอัลคาไลน์ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยองค์ประกอบของกระบวนการเกิดวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบของระบบวัสดุประสานที่กระตุ้นด้วยอัลคาไลน์ (Amer et al., 2021)

จีโอโพลิเมอร์ถูกจัดหมวดหมู่ให้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างหรือ alkali-activated pozzolanic material โดยเป็นส่วนย่อยในวัสดุโพลิเมอร์อนินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยกระบวนการหลักคือการกระตุ้นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำด้วยสารละลายด่าง



รูปที่ 3 การจัดหมวดหมู่ของวัสดุผสมที่ถูกระตุ้นด้วยอัลคาไลน์เปรียบเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ปกติและแคลเซียมซิลิโพอะลูมิเนตซีเมนต์ (Waldmann & Thapa, 2018)

จีโอโพลิเมอร์ถูกค้นพบครั้งแรกในปีค.ศ. 1950 ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือใช้ผสมเถ้าลอยในการเทพื้นทางเดิน เป็นต้น จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากปูนขาวและปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างในรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous) เป็น 3 มิติ โดยเกิดจากการนำสารละลายต่างทำปฏิกิริยากับสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อใส่สารละลายต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปในเถ้าลอย ผสมกับสารเร่งประเภทอัลคาไลน์ซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถก่อตัวและรับแรงได้ โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า โพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งปฏิกิริยานี้ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ มีชื่อเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กระบวนการเกิดวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Shamsaei et al., 2021)

2.2.1 สมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

Rattanasak and Chindaprasirt (2009) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์เป็นส่วนผสม ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 และ 15 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 1.0 เมื่อใช้ความเข้มข้น 15 โมลาร์ อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อมีค่ามากกว่า 1.0

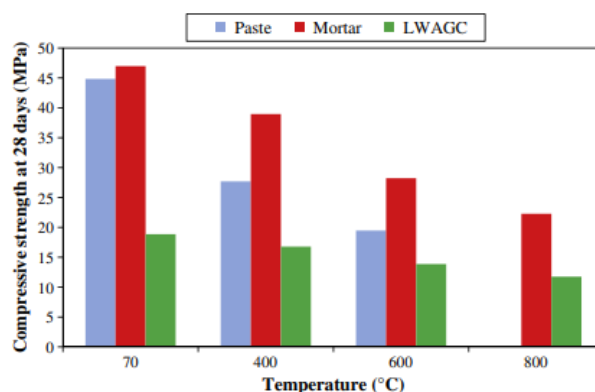
ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง และเมื่อใช้ความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อมีค่ามากกว่า 1.0 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าลดลงตามสัดส่วนของสารละลายเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบแต่ละสัดส่วนผสมแล้วพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 1.0 ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าสัดส่วนอื่น ๆ

Guo et al. (2010) ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอย Class C (อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C618) ผสมกับสารละลายโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) ในอัตราส่วน Na_2O ต่อ เถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 10 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 63.4 MPa โดยขึ้นตัวอย่างได้ถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส อีก 28 วัน ซึ่งกำลังรับแรงอัดที่ได้สูงสุดเกิดขึ้นจากการที่เถ้าลอยถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต

Somna et al. (2011) ศึกษาผลกระทบจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ผ่านการบดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.5 ไมโครเมตร) ทดสอบผสมโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 4.5 – 16.5 โมลาร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยบดมีกำลังที่มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยธรรมดาเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 4.5 โมลาร์ จนถึง 14.0 โมลาร์ พบว่ากำลังเพิ่มมากขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 20.0-23.0 MPa เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นระหว่าง 9.5-14.0 โมลาร์ นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 14.0 โมลาร์ ค่ากำลังของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะมีค่าลดลง

2.2.2 สมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ภายใต้อุณหภูมิสูง

Abdulkareem et al. (2014) ศึกษาผลกระทบของพฤติกรรมและคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตมวลเบา (LWAGC) ที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จากการทดสอบพบว่าหลังจากเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนกระทั่งถึง 400 และ 600 องศาเซลเซียส จะเกิดการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำส่งผลต่อให้กำลังมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 5 โดยค่าการสูญเสียของกำลังดังกล่าวแสดงค่าในตารางที่ 2 และเกิดการควบแน่นของซิลิเกตที่ไม่ทำปฏิกิริยาเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิไปจนกระทั่ง 800 องศาเซลเซียส โดยสามารถบอกรายละเอียดกว้างขนาดเล็กน้อยเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความแตกต่างเนื่องจากการขยายตัวของอุณหภูมิระหว่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับมวลรวมเบา

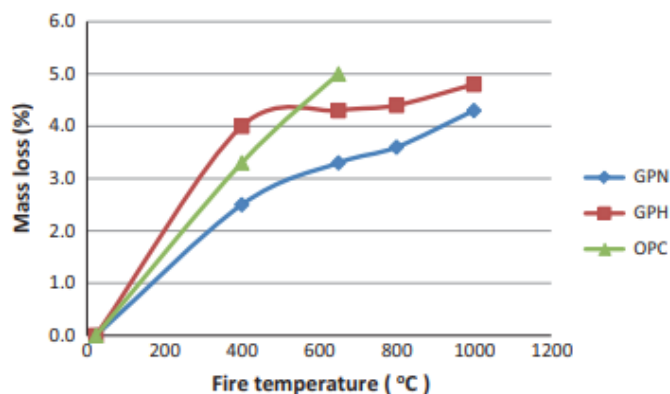


รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ (Abdulkareem et al., 2014)

ตารางที่ 2 ค่าการสูญเสียกำลังของจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Abdulkareem et al., 2014)

| Temperature (°C) | Strength loss (%) | | |
|------------------|-------------------|--------|-------|
| | Paste | Mortar | LWAGC |
| 400 | 37.8 | 16.7 | 13 |
| 600 | 56.5 | 38.6 | 26.7 |
| 800 | 100 | 52.3 | 39 |

Sarker, Kelly และ Yao (2014) ศึกษาผลกระทบจากการเผาไฟต่อลักษณะการแตกร้าว, การหลุดร่อน และพฤติกรรมของกำลังค้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (GPN และ GPH) GPN คือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงหลังเทเข้าแบบหล่อ และ GPH คือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากเทเข้าแบบหล่อแล้ว 3 วัน พบว่า GPN และ GPH มีความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิที่มากกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต (OPC) ที่อุณหภูมิ 800 และ 1000 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พบการหลุดร่อนเกิดขึ้นกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพบการหลุดร่อนเพียงเล็กน้อยบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบโดยมีการแสดงการสูญเสียของมวลดังรูปที่ 6 เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนกระทั่งถึง 400, 650, 800, และ 1000 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังค้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีค่าลดลง โดยที่ค่ากำลังค้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 6 การสูญเสียมวลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Sarker et al., 2014)

ตารางที่ 3 ค่ากำลังอัดก่อนเผาไฟและกำลังคงค้างหลังเผาไฟ (Sarker et al., 2014)

| Temp. (°C) | GPN | | GPH | | OPC | |
|------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| | Compressive strength (MPa) | Residual strength (%) | Compressive strength (MPa) | Residual strength (%) | Compressive strength (MPa) | Residual strength (%) |
| 23 | 39 | 100 | 58 | 100 | 42 | 100 |
| 400 | 42 | 107 | 54 | 93 | 38 | 90 |
| 560 | 32 | 83 | 34 | 59 | 22 | 51 |
| 800 | 11 | 27 | 17 | 29 | 9 | 21 |
| 1000 | 6 | 16 | 11 | 18 | 5 | 12 |

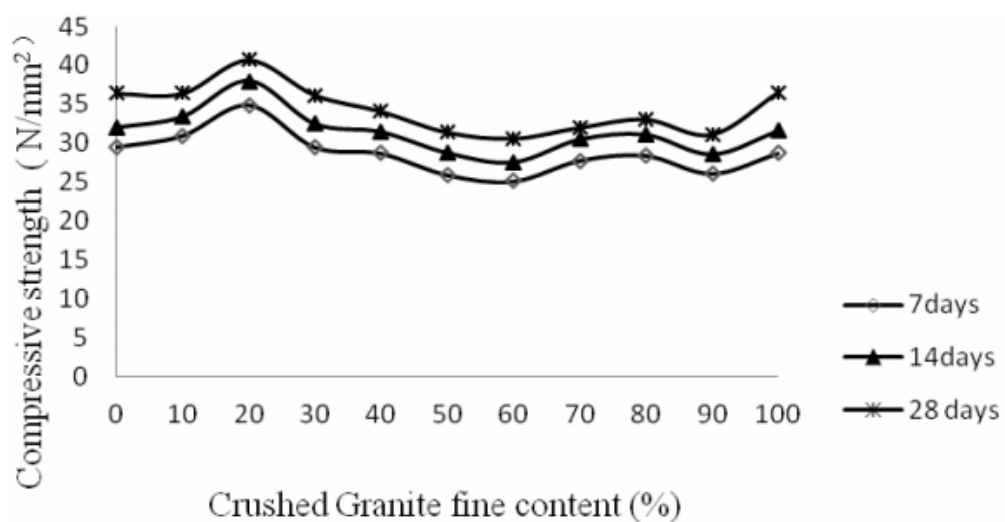
2.3 มวลรวมจากหินแกรนิต

หินแกรนิตมีลักษณะเนื้อหยาบ เป็นประเภทหินอัคนีแทรกซอนที่มีองค์ประกอบหลักเป็น ควอตซ์และเฟลด์สปาร์ มีสีตั้งแต่สีชมพูจนถึงสีเทาเข้มขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี โดยมวลรวมแกรนิตเป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหินที่เกิดขึ้นสำหรับการก่อสร้าง ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากในแต่ละวันซึ่งกองรวมเป็นบ่อโคลนดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเศษหินที่เกิดขึ้นเหล่านี้ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์มากนัก จึงเป็นภาระของผู้ประกอบการในการที่จะต้องกำจัดเศษหินเหล่านี้ ทำให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ ต้องการที่จะหาวิธีในการนำเศษหินเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุด



รูปที่ 7 บ่อโคลนของกากจากการตัดหินแกรนิต (Bacarji et al., 2013)

Manasseh (2010) ศึกษาผลของกำลังรับแรงดัดแยกและกำลังรับแรงอัดจากการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตโดยใช้อัตราส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 100% โดยเพิ่มการแทนที่ขึ้นทีละ 10% พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดแยกและกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงการเพิ่มขึ้นของการแทนที่จนถึงที่ปริมาณการแทนที่เท่ากับ 20% และหลังจากเพิ่มปริมาณการแทนที่มากกว่า 20% พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงในตัวอย่างทดสอบทุกช่วงอายุ 7, 14, และ 28 วัน โดยที่สัดส่วนการแทนที่ 100% ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดจะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ทรายธรรมชาติเป็นส่วนผสม 100% ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9



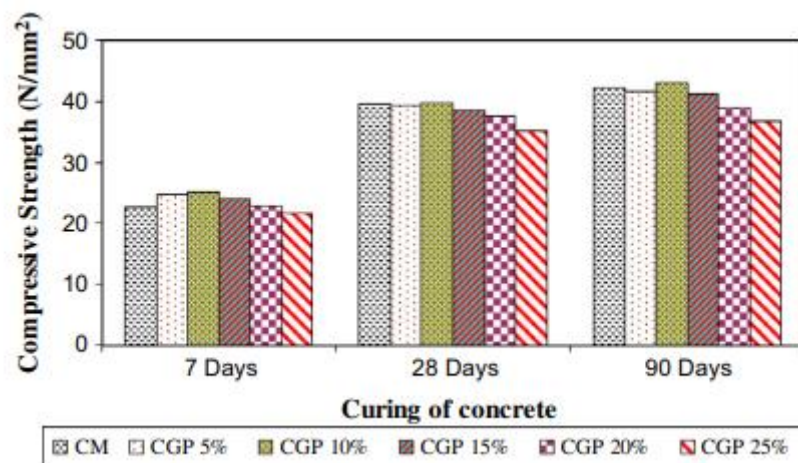
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและปริมาณการแทนที่ของเศษหินแกรนิต

(Manasseh, 2010)

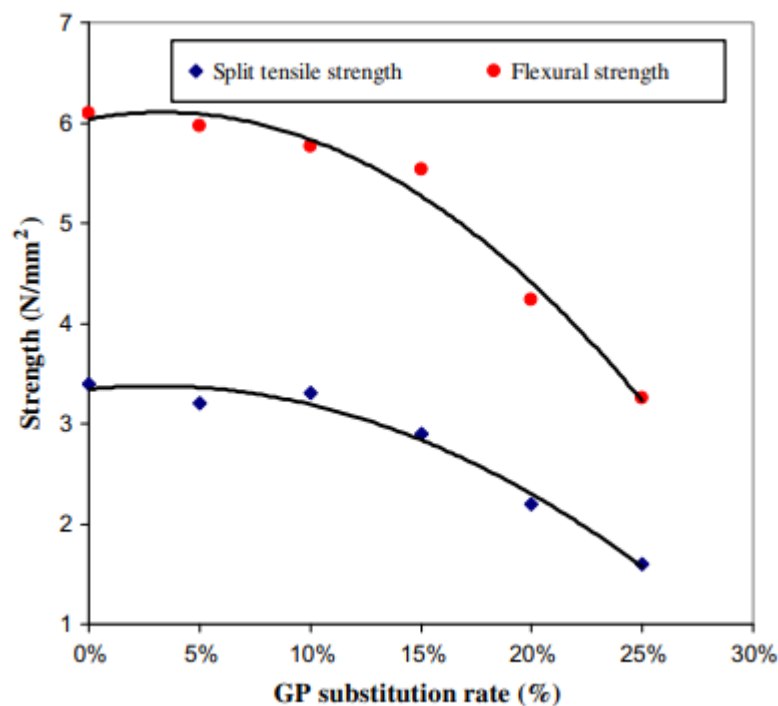


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต (Manasseh, 2010)

Vijayalakshmi et al. (2013) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยผงแกรนิตที่ 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, และ 25% จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ 15% ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และค่าความทนทานมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 10 และ รูปที่ 11

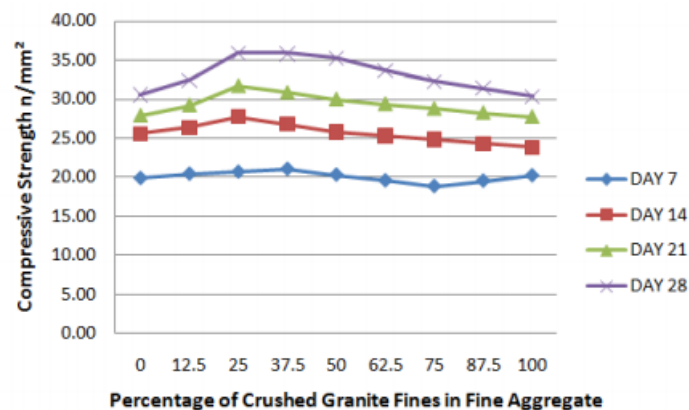


รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีตต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28 และ 90 วัน (Vijayalakshmi & Sekar, 2013)

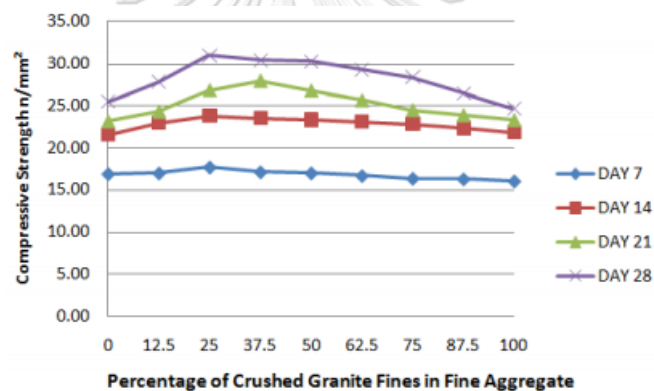


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต ค่ากำลังดึงแยกและค่ากำลังดัด (Vijayalakshmi & Sekar, 2013)

Adigun (2013) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ผงแกรนิตในการผสมแทนที่ทรายธรรมชาติ โดยใช้อัตราส่วนในการแทนที่ตั้งแต่ 0 จนถึง 100% โดยเพิ่มขึ้นช่วงละ 12.5% และแบ่งออกเป็น 2 ส่วนผสม โดยมีสัดส่วนผสมซีเมนต์ต่อทรายต่อเศษหินแกรนิตต่อหิน เท่ากับ 1:1:0:2 และ 1:1.5:0:3 ตามลำดับ พบว่าปริมาณการแทนที่ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในช่วง 25 ถึง 37.5% โดยถ้าหากเพิ่มปริมาณการแทนที่ขึ้นจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มจะลดลงทั้ง 2 ส่วนผสม สำหรับการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตที่ปริมาณ 100% ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ทรายธรรมชาติเป็นส่วนผสม 100% ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13

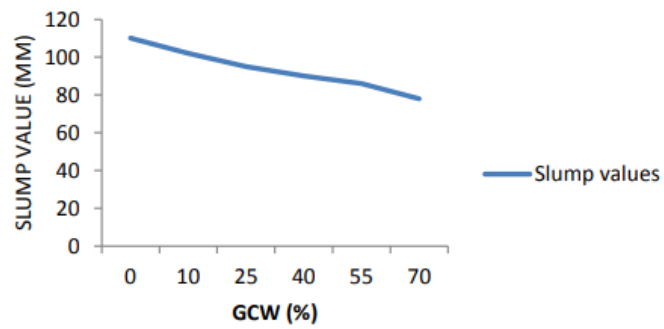


รูปที่ 12 ค่ากำลังรับแรงอัดในแต่ละสัดส่วนการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตสำหรับสัดส่วนผสม 1:1:0:2 (Adigun & Eng, 2013)

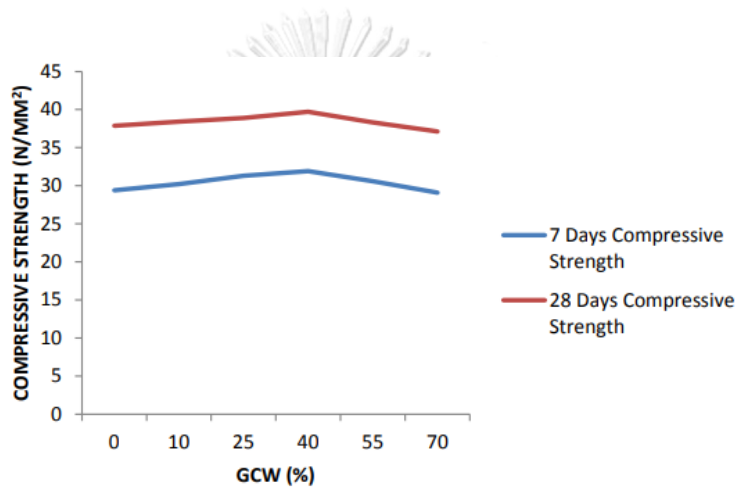


รูปที่ 13 ค่ากำลังรับแรงอัดในแต่ละสัดส่วนการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตสำหรับสัดส่วนผสม 1:1.5:0:3 (Adigun & Eng, 2013)

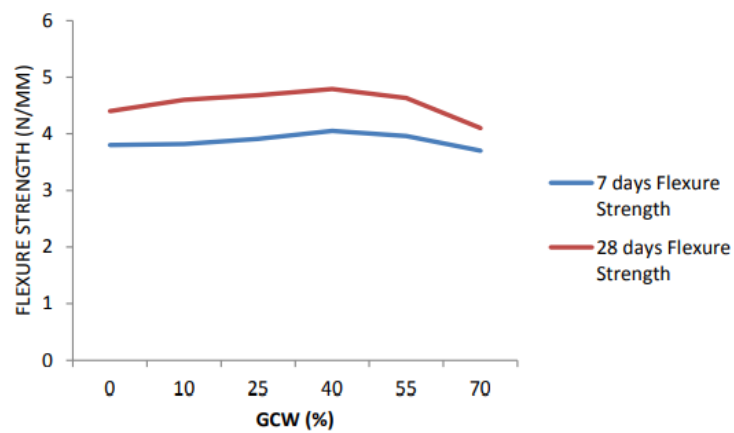
Singh et al. (2015) ศึกษาผลของการแทนที่ทรายด้วยเศษหินแกรนิตต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเศษหินแกรนิตในการผสมเนื่องจากปริมาณของเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 14 ค่ากำลังอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ปริมาณเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายเท่ากับ 40% และที่การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตเท่ากับ 70% จะให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติ 100% ดังแสดงในรูปที่ 15 ในส่วนของกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตในส่วนผสมจนถึงที่ 40% โดยจะมีค่าลดลงจนกระทั่งที่ 70% จะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติ 100% ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 14 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (Singh et al., 2015)



รูปที่ 15 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (Singh et al., 2015)

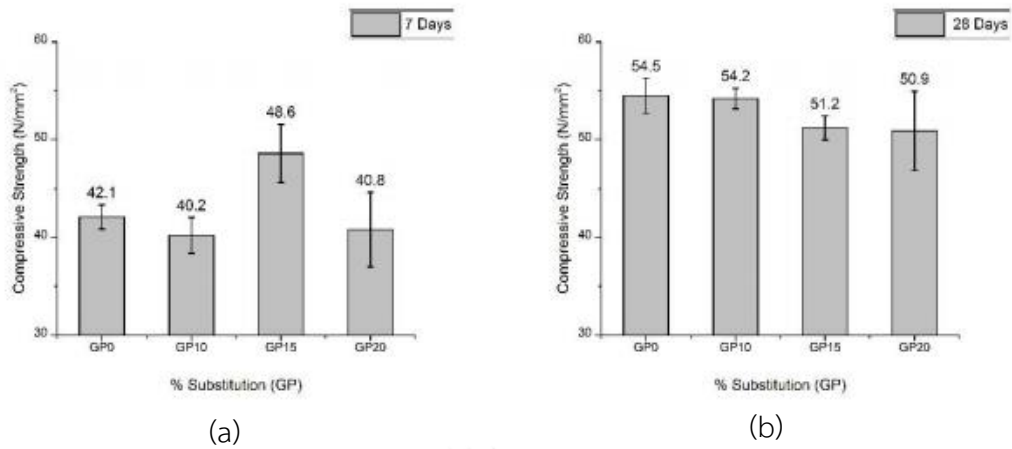


รูปที่ 16 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (Singh et al., 2015)

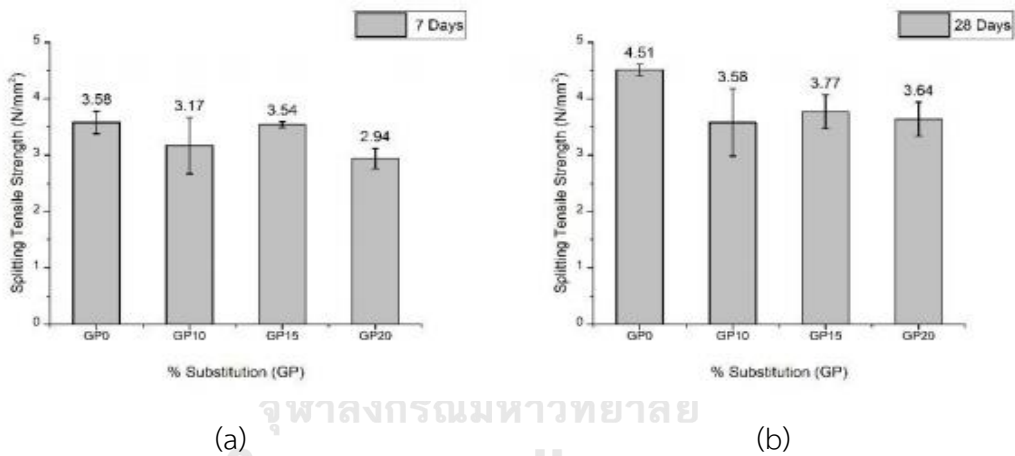
Chiranjeevi Reddy et al. (2015) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษหินแกรนิตที่ปริมาณ 2.5%, 5%, 7.5%, และ 10% ตามลำดับ โดยพบว่าที่ปริมาณการแทนที่ 7.5% มีการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดมากที่สุดและที่ปริมาณการแทนที่ 10% มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับหินทดสอบในชุดควบคุม

Arulkesavan et al. (2017) ศึกษาสมบัติเชิงกลของการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษหินแกรนิตบางส่วน โดยทำการแทนที่ในสัดส่วนร้อยละ 0, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงแยก และกำลังรับแรงดัด ได้กำลังดีที่สุดเมื่อมีปริมาณการแทนที่ของเศษหินแกรนิตที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 1.06 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงดึงแยกเพิ่มขึ้น 1.11 เปอร์เซ็นต์ และค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 1.14 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติ และพบว่าที่การแทนที่ในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงแยก และกำลังรับแรงดัดที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติ

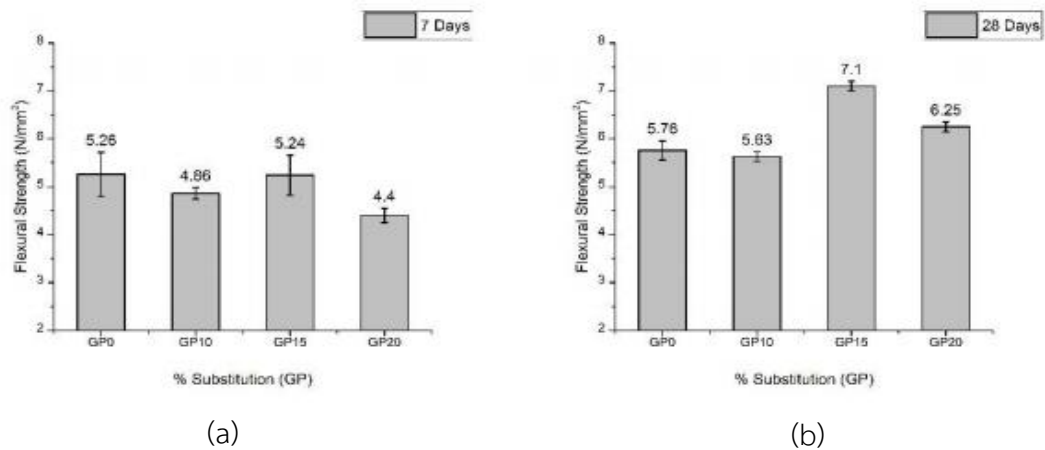
Khine (2018) ศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตในคอนกรีตกำลังสูง โดยทดสอบความสามารถในการทำงานได้ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก และกำลังรับแรงดัดของส่วนผสมที่มีปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตเท่ากับ 0%, 10%, 15%, และ 25% โดยพบว่าในด้านของกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตดังแสดงในรูปที่ 17 และรูปที่ 18 ตามลำดับ ส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต 15% มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นดังแสดงในรูปที่ 19 เนื่องจากผิวของเศษหินแกรนิตที่ใช้มีส่วนช่วยยึดระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่ความสามารถในการทำงานได้มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 20 เนื่องมาจากเศษหินแกรนิตมีลักษณะเป็นผิวขรุขระและรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมส่งผลให้เกิดการเสียดทานระหว่างมวลรวมทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง



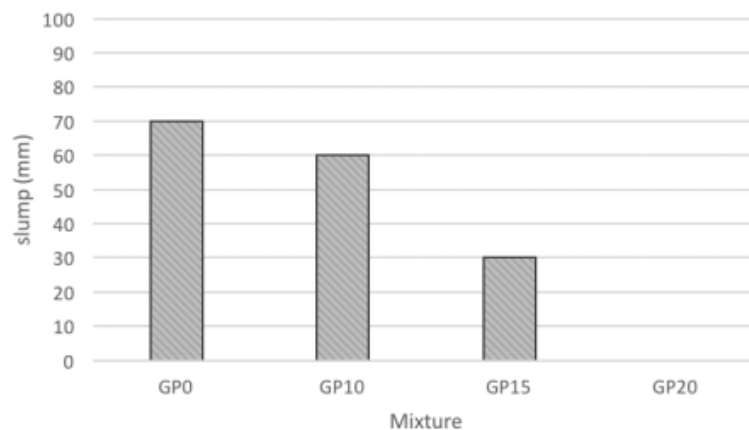
รูปที่ 17 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (a) ที่อายุ 7 วัน (b) ที่อายุ 28 วัน (Khine, 2018)



รูปที่ 18 ค่ากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (a) ที่อายุ 7 วัน (b) ที่อายุ 28 วัน (Khine, 2018)



รูปที่ 19 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตต่าง ๆ (a) ที่อายุ 7 วัน (b) ที่อายุ 28 วัน (Khine, 2018)



รูปที่ 20 ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตที่มีปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตปริมาณต่าง ๆ (Khine, 2018)

ปัทสนา วรวัฒน์นฤนาท (2562) ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของมวลรวมละเอียดรีไซเคิลจากเศษหินแกรนิตต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 25, และ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีสถานะความชื้นที่ถูกควบคุม 3 ลักษณะ ได้แก่ สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD), แห้งในอากาศ (AD), และอบแห้ง (OD) ผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการทำงานได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษหินแกรนิตที่ใส่แทนที่ ในส่วนกำลังรับแรงอัดมีกำลังเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตที่มากขึ้นสำหรับที่อายุ 7 วัน ส่วนกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของที่อายุ 28 วัน ระหว่างก่อนและหลังเผาไฟ 30 นาทีตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) พบว่ากำลังอัดคงค้างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิว

แห้ง (SSD) มีเปอร์เซ็นต์กำลังอัดคงค้างสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้ง (AD และ OD) เนื่องจากมวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งมีรูพรุนน้อยกว่าทำให้เกิดการแตกร้าวได้มากกว่า และเมื่อผ่านการเผาไฟ 60 นาที พบว่ามวลรวมทั้ง 3 ลักษณะมีกำลังอัดคงค้างที่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่ากำลังรับแรงดัดพบว่าการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตส่งผลเสียต่อการรับกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

กานต์ธิปก ฮามคำไพ (2563) ศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตรีไซเคิล ซึ่งใช้การแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 25, 50, และ 100 โดยน้ำหนัก และมีการใช้เส้นใยโพลีโพรไพลีน (PP) เพื่อพัฒนากำลังรับแรงดัดและความเหนียวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในปริมาณร้อยละ 0, 0.5, และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าค่าการไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเสริมเส้นใยโพลีโพรไพลีนในส่วนผสมทำให้ค่าการไหลแผ่มีค่าลดลงตามสัดส่วนเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น โดยเส้นใยที่ผสมลงไปไม่มีส่วนช่วยในการรับกำลังอัดแต่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังรับแรงดัดและความเหนียวเพิ่มมากขึ้น และในส่วนของความสามารถในการทนไฟของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพบว่าการใส่เส้นใยโพลีโพรไพลีนส่งผลเชิงลบทั้งในด้านน้ำหนักที่สูญเสียและกำลังรับแรงอัดคงค้าง

2.4 เส้นใย

เส้นใยถูกนำมาใช้งานเป็นวัสดุสำหรับการก่อสร้างมาอย่างยาวนาน คอนกรีตที่มีการผสมเส้นใยสามารถช่วยในการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับความเปราะและต้านทานการเกิดรอยร้าวได้เป็นอย่างดี (Bentur & Mindess, 2006) การใช้งานเส้นใยเพื่อเสริมกำลังของคอนกรีตสามารถช่วยป้องกันการเริ่มต้นเกิดหรือการขยายตัวของรอยร้าวได้

เส้นใยมีหลากหลายชนิด ชนิดที่ทำมาจากเหล็ก คาร์บอน แก้ว โพลีเมอร์ หรือวัสดุธรรมชาติก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน โดยจะมีลักษณะที่แตกต่างกันเช่น ขนาด รูปร่าง หรือความหนาของเส้นใย โดยลักษณะของเส้นใยจะมีได้ทั้งแบบเรียบ แบบผิวขรุขระ หรือแบบมีขอบบริเวณปลายดังแสดงในรูปที่ 21 ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความยาวอยู่ที่ 6 มิลลิเมตร ถึง 150 มิลลิเมตร และมีความหนาอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.005 มิลลิเมตร ถึง 0.75 มิลลิเมตร



(a) Steel

(b) Polyvinyl alcohol

(c) Polyethylene terephthalate

รูปที่ 21 ตัวอย่างของเส้นใยเหล็กและเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในคอนกรีต (Jongvivatsakul et al., 2013)

2.4.1 สมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใย

Kesikidou et al. (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบเกี่ยวกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และปูนขาวมอร์ตาร์จากการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนผสมโดยมีคุณสมบัติและสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5 พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เส้นใยที่ใช้เป็นส่วนผสมโดยเปรียบเทียบกันในแต่ละชนิดของเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 22

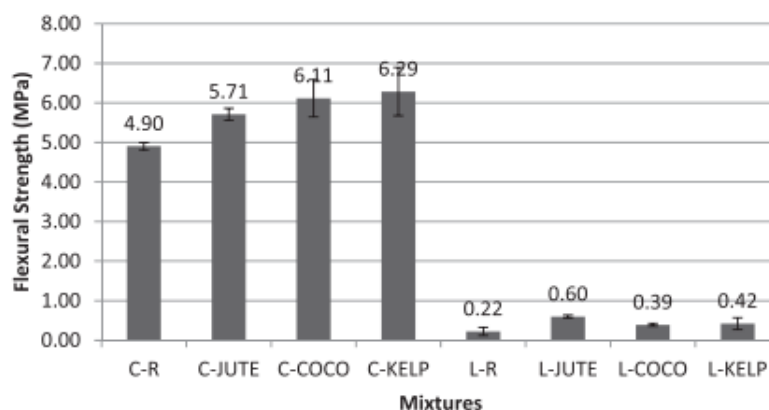
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย (Kesikidou & Stefanidou, 2019)

| Fiber Type | Cellulose (%) | Lignin (%) | Water absorption (%) | Water soluble content (%) | Width (average) (mm) |
|------------|---------------|------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| Jute | 72 | 13 | 84 | 6.0 | 0.08 |
| Coconut | 43 | 45 | 73 | 5.5 | 0.19 |
| Kelp | 61.8 | 29.8 | 80 | 18.0 | 3.26 |

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และปูนขาวมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (Kesikidou & Stefanidou, 2019)

| Mixture | Binder | Aggregates | Fibers (%) w/v | W/B |
|---------|--------|------------|----------------|------|
| C-R | 1 | 2.5 | - | 0.40 |
| C-JUTE | 1 | 2.5 | 1.5 | 0.44 |
| C-COCO | 1 | 2.5 | 1.5 | 0.42 |
| C-KELP | 1 | 2.5 | 1.5 | 0.42 |
| L-R | 1 | 2.5 | - | 0.70 |
| L-JUTE | 1 | 2.5 | 1.5 | 0.95 |

| Mixture | Binder | Aggregates | Fibers (%) w/v | W/B |
|---------|--------|------------|----------------|------|
| L-COCO | 1 | 2.5 | 1.5 | 0.74 |
| L-KELP | 1 | 2.5 | 1.5 | 0.85 |

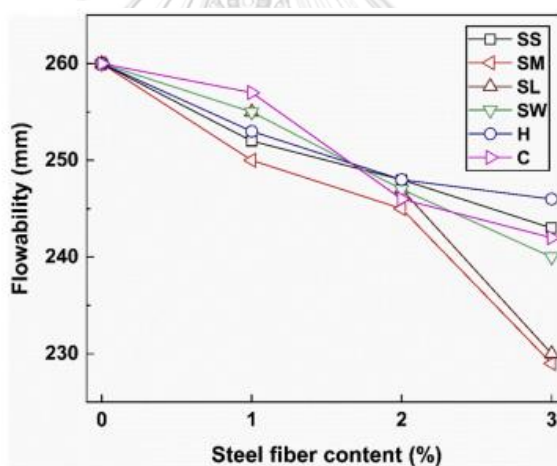


รูปที่ 22 ค่ากำลังรับแรงดัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และปูนขาวมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน
(Kesikidou & Stefanidou, 2019)

Liu et al. (2020) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง (UHPGC) ในด้านคุณสมบัติต่าง ๆ และผลลัพธ์ที่เกี่ยวกับความเปราะของจีโอโพลิเมอร์เมตริกที่ผสมด้วยเส้นใยเหล็กที่มีคุณสมบัติต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6 โดยพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยเหล็กจะทำให้ความสามารถในการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประสิทธิภาพสูงลดลงดังแสดงในรูปที่ 23 และรูปที่ 24 ในด้านของกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 25 สำหรับค่าความยาวของเส้นใยเหล็กที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความยาวของเส้นใยเหล็กที่ใช้เป็นส่วนผสม ส่วนกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มความยาวของเส้นใยเหล็กสำหรับการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 26 ในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเหล็ก พบว่าการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเหล็กส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 27

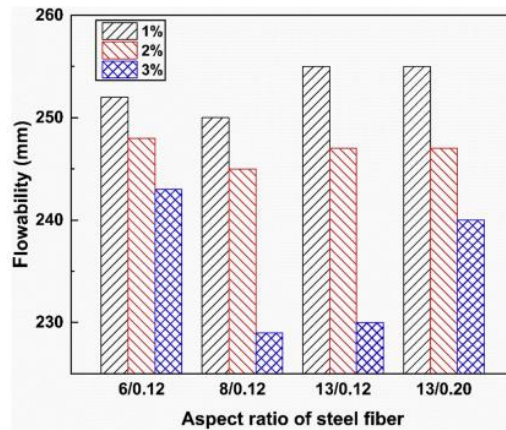
ตารางที่ 6 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย (Liu et al., 2020)

| Type | Shape | Density (kg/m ³) | Length, L (mm) | Diameter, D (mm) | Aspect ratio (L/D) | Tensile strength (MPa) | Ratio of deformation |
|------|------------|------------------------------|----------------|------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| SS | Straight | 7850 | 6 | 0.12 | 50 (6/0.12) | 2500 | 0 |
| SM | Straight | 7850 | 8 | 0.12 | 67 (8/0.12) | 2500 | 0 |
| SL | Straight | 7850 | 13 | 0.12 | 108 (13/0.12) | 2500 | 0 |
| SW | Straight | 7850 | 13 | 0.20 | 65 (13/0.2) | 2850 | 0 |
| H | Hooked-end | 7850 | 13 | 0.20 | 65 (13/0.2) | 2850 | 0.67 |
| C | Corrugated | 7850 | 13 | 0.20 | 65 (13/0.2) | 2850 | 1.33 |

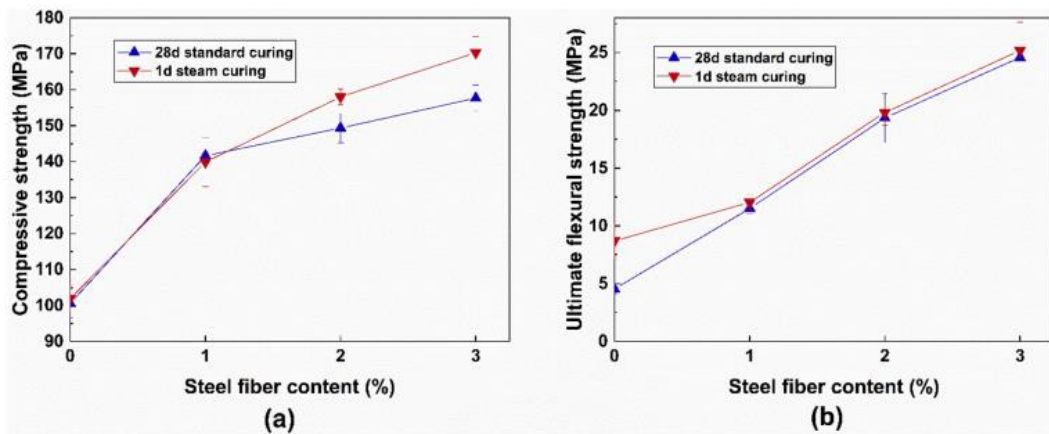


รูปที่ 23 ค่าการไหลแผ่ของ UHPGC ที่มีปริมาณสัดส่วนของเส้นใยเหล็ก 0%, 1%, 2%, และ 3%

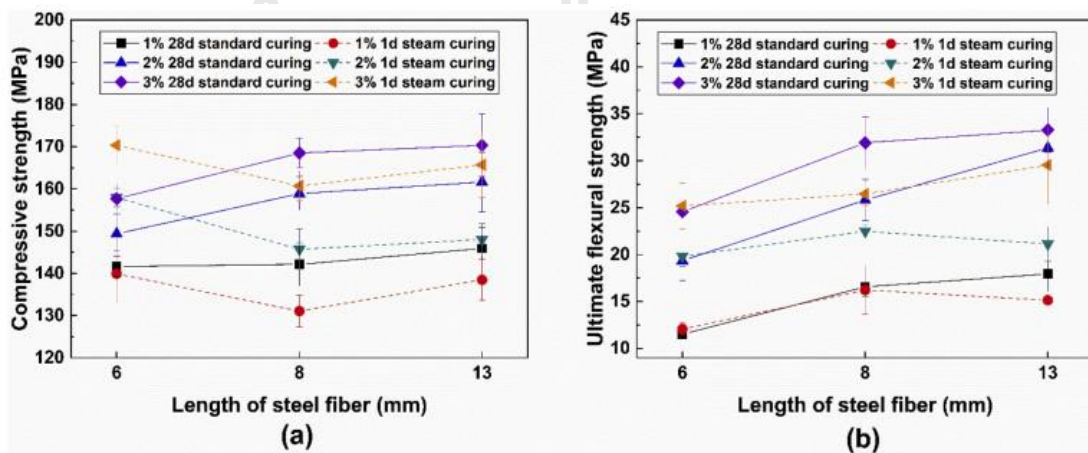
(Liu et al., 2020)



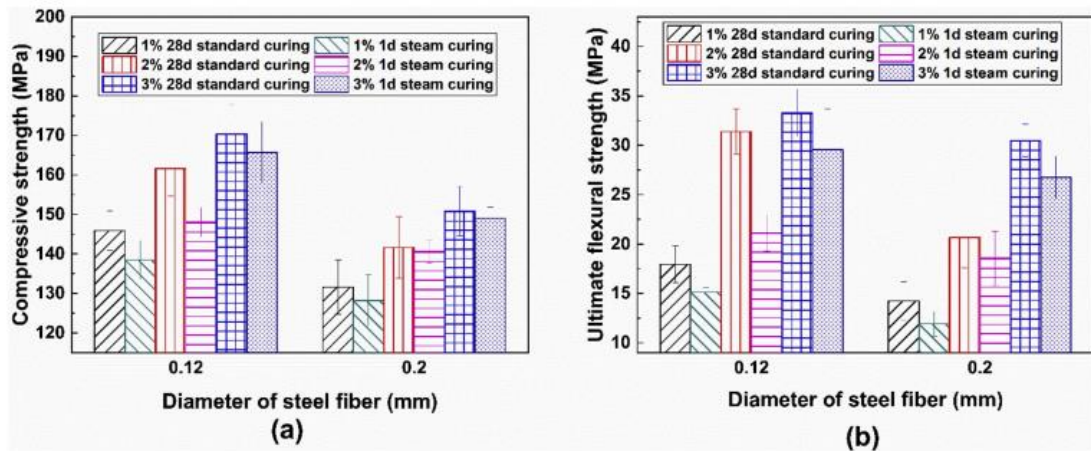
รูปที่ 24 ค่าการไหลแผ่ของ UHPGC ที่ Aspect ratio ต่าง ๆ (Liu et al., 2020)



รูปที่ 25 ผลของค่ากำลังรับแรงอัด (a) และค่ากำลังรับแรงดัด (b) ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่าง ๆ (Liu et al., 2020)



รูปที่ 26 ผลของค่ากำลังรับแรงอัด (a) และค่ากำลังรับแรงดัด (b) ที่ความยาวเส้นใยเหล็กต่าง ๆ (Liu et al., 2020)



รูปที่ 27 ผลของค่ากำลังรับแรงอัด (a) และค่ากำลังรับแรงดัด (b) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเหล็กต่าง ๆ (Liu et al., 2020)

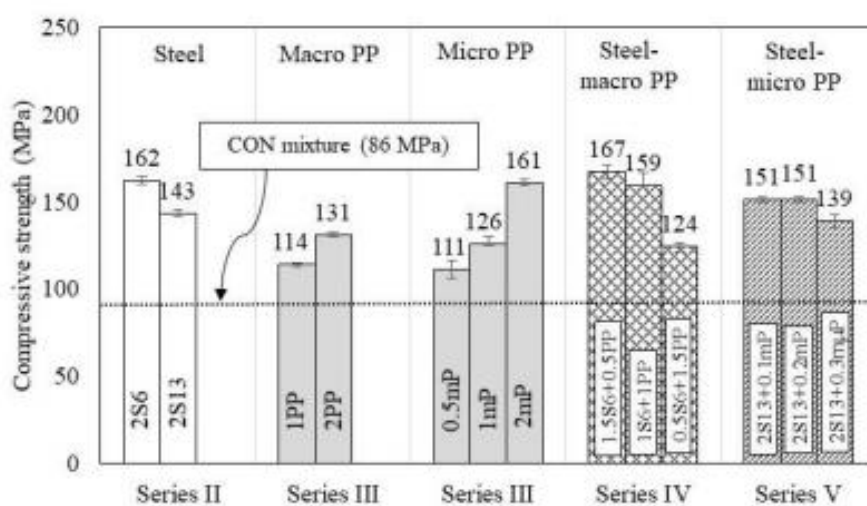
Nuaklong et al. (2020) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีการเสริมเส้นใย ได้แก่ เส้นใยเหล็กและเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 7 โดยมีการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดในส่วนของการใส่เส้นใยเหล็กในแต่ละสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 8 เพื่อให้ได้ค่ากำลังตามเกณฑ์ขั้นต่ำของคอนกรีตประสิทธิภาพสูง พบว่าเส้นใยเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 28 และตารางที่ 9 โดย σ_{cc} คือค่าความเค้นที่เริ่มมีการเกิดขึ้นของรอยแตก และ σ_{pc} คือค่าความเค้นสูงสุดที่คอนกรีตตัวอย่างรับได้

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย (Nuaklong et al., 2020)

| Properties | Steel fibres | | Polypropylene fibres | |
|------------------------------|--------------|------|----------------------|-------------|
| | S6 | S13 | PP | mP |
| Fibre length (l_f , mm) | 6 | 13 | 24 | 12 |
| Fibre diameter (d_f , mm) | 0.16 | 0.2 | 0.72 | 0.015-0.045 |
| Tensile strength (MPa) | 2750 | 2750 | 550 | 340 |
| Modulus of elasticity (GPa) | 200 | 200 | 8.2 | 3.5 |
| Specific gravity | 7.85 | 7.85 | 0.90-0.91 | 0.89-0.93 |
| Price of material (USD/kg) | 6.70 | 6.10 | 9.70 | 3.60 |

ตารางที่ 8 ปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในแต่ละสัดส่วนผสม (Nuaklong et al., 2020)

| Series | Mixture | Fibre content (% by volume of concrete) | | | |
|--------|-------------|---|-----|------|------|
| | | S6 | S13 | PP | mP |
| I | CON | - | - | - | - |
| II | 2S6 | 2% | - | - | - |
| | 2S13 | - | 2% | - | - |
| III | 1PP | - | - | 1% | - |
| | 2PP | - | - | 2% | - |
| | 0.5mP | - | - | - | 0.5% |
| | 1mP | - | - | - | 1% |
| | 2mP | - | - | - | 2% |
| IV | 1.5S6+0.5PP | 1.5% | - | 0.5% | - |
| | 1S6+1PP | 1% | - | 1% | - |
| | 0.5S6+1.5PP | 0.5% | - | 1.5% | - |
| V | 2S13+0.1mP | - | 2% | - | 0.1% |
| | 2S13+0.2mP | - | 2% | - | 0.2% |
| | 2S13+0.3mP | - | 2% | - | 0.3% |



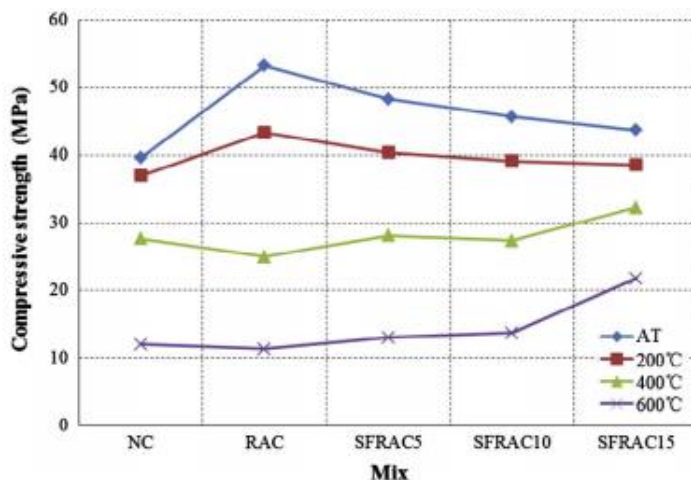
รูปที่ 28 ค่ากำลังรับแรงอัดของแต่ละสัดส่วนผสม (Nuaklong et al., 2020)

ตารางที่ 9 คุณสมบัติกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ (Nuaklong et al., 2020)

| Series | Mixture | Tension test results | | | UHPRFC |
|--------|-------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------|
| | | σ_{cc} (MPa) | σ_{pc} (MPa) | ϵ_{pc} (%) | |
| I | CON | 3.8 ± 0.1 | - | - | - |
| II | 2S6 | 8.3 ± 0.1 | 7.7 ± 0.2 | 0.32 | Yes |
| | 2S13 | 7.8 ± 1.0 | 6.9 ± 0.2 | 0.14 | - |
| III | 1PP | 4.1 ± 0.1 | 3.2 ± 0.1 | 0.32 | - |
| | 2PP | 4.5 ± 0.2 | 1.6 ± 0.1 | 0.37 | - |
| | 0.5mP | 5.8 ± 0.3 | 0.2 ± 0.1 | 0.59 | - |
| | 1mP | 6.0 ± 0.6 | 1.2 ± 0.2 | 0.63 | - |
| | 2mP | 4.2 ± 0.2 | 0.9 ± 0.3 | 0.63 | - |
| IV | 1.5S6+0.5PP | 8.2 ± 0.4 | 6.4 ± 0.4 | 0.43 | Yes |
| | 1S6+1PP | 6.6 ± 0.5 | 4.0 ± 0.4 | 0.42 | - |
| | 0.5S6+1.5PP | 6.9 ± 0.5 | 5.2 ± 0.2 | 0.91 | - |
| V | 2S13+0.1mP | 7.5 ± 0.1 | 8.1 ± 0.3 | 0.60 | Yes |
| | 2S13+0.2mP | 7.6 ± 0.1 | 8.6 ± 0.2 | 0.52 | Yes |
| | 2S13+0.3mP | 6.9 ± 0.2 | 7.4 ± 0.2 | 0.46 | - |

2.4.2 สมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยภายใต้อุณหภูมิสูง

Chen et al. (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กโดยใช้มวลรวมรีไซเคิลจากเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมหลังเผาไฟ มีการใช้ตัวอย่างคอนกรีตแบ่งเป็น NC คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมดา, RAC คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเป็นวัสดุรีไซเคิล และ SFRAC5, SFRAC10 และ SFRAC15 คือ คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมรีไซเคิลที่มีการผสมเส้นใยเหล็ก 5, 10, และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบจากการใช้สัดส่วนของเส้นใยและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าที่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียสมีการเกิดรอยแตกร้าวที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลงในชิ้นทดสอบที่มีปริมาณสัดส่วนของเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น และค่ากำลังอัดหลังเผาไฟมีค่าลดลงจากค่ากำลังอัดก่อนเผาไฟ โดยที่ 400 และ 600 องศาเซลเซียสมีการลดลงเฉลี่ยของกำลังอัดเหลือ 59% และ 31% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 29 และตารางที่ 10



รูปที่ 29 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง (Chen et al., 2014)

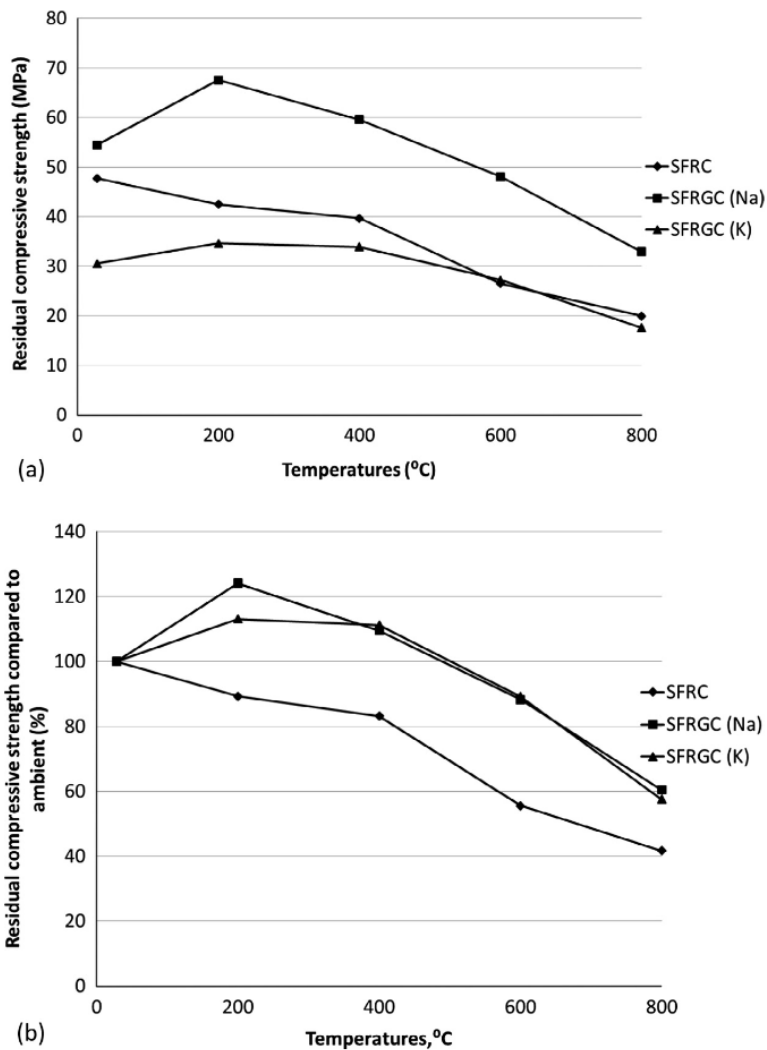
ตารางที่ 10 ค่ากำลังอัดและค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของคอนกรีตตัวอย่าง (Chen et al., 2014)

| Mix | Slump (mm) | Compressive strength (MPa) | | | | Young's modulus (GPa) | | | |
|---------|------------|----------------------------|--------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|---------|
| | | AT | 200 °C | 400 ° C | 600 ° C | AT | 200 ° C | 400 ° C | 600 ° C |
| NC | 198 | 39.57 | 36.99 | 27.66 | 11.98 | 23.80 | 17.65 | 5.90 | 0.57 |
| RAC | 187 | 53.27 | 43.34 | 25.00 | 11.33 | 27.23 | 19.07 | 5.37 | 0.74 |
| SFRAC5 | 154 | 48.30 | 40.41 | 28.08 | 13.05 | 26.80 | 19.43 | 5.49 | 0.93 |
| SFRAC10 | 151 | 45.67 | 39.12 | 27.33 | 13.73 | 24.13 | 16.86 | 5.00 | 0.84 |
| SFRAC15 | 110 | 43.69 | 38.56 | 32.27 | 21.81 | 20.89 | 16.46 | 6.21 | 2.06 |

หมายเหตุ AT คืออุณหภูมิประมาณ 25 °C

Shaikh, F. U. A., & Hosan, A. (2016) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (SFRGC) ที่มีตัวกระตุ้นอัลคาไลน์เป็นประเภทโซเดียม (Na-based) และโพแทสเซียม (K-based) หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, และ 800 องศาเซลเซียส โดย SFRGC ประเภท Na-based จะมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.5 และ 0.75 โดยปริมาตร และ SFRGC ประเภท K-based จะมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร สำหรับชุดควบคุมจะเป็นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (SFRC) โดยจะเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0.5 และ 0.75 โดยปริมาตร ผลการทดสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประเภท Na-based ให้ค่ากำลังอัดคงค้างและกำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประเภท K-based ในทุก ๆ อุณหภูมิที่ทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบร้อยละกำลังอัดคงค้างในแต่ละชุดทดสอบในแต่ละอุณหภูมิเทียบกับอุณหภูมิห้องพบว่าค่า

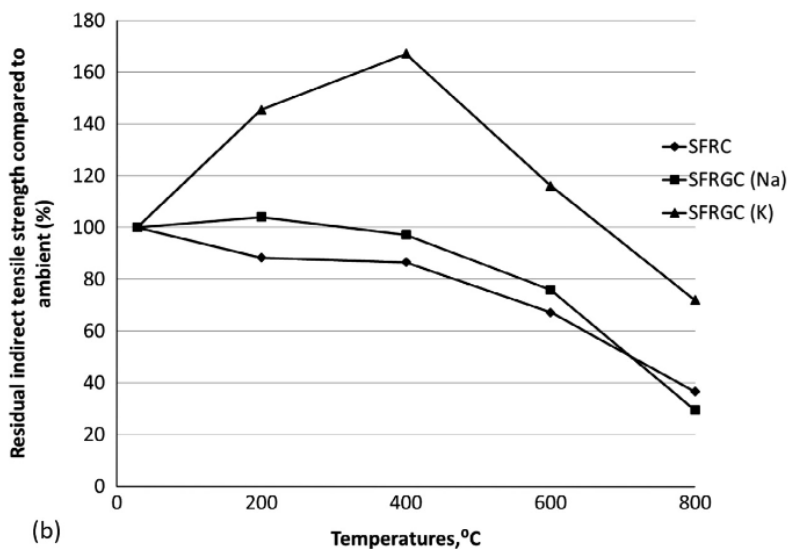
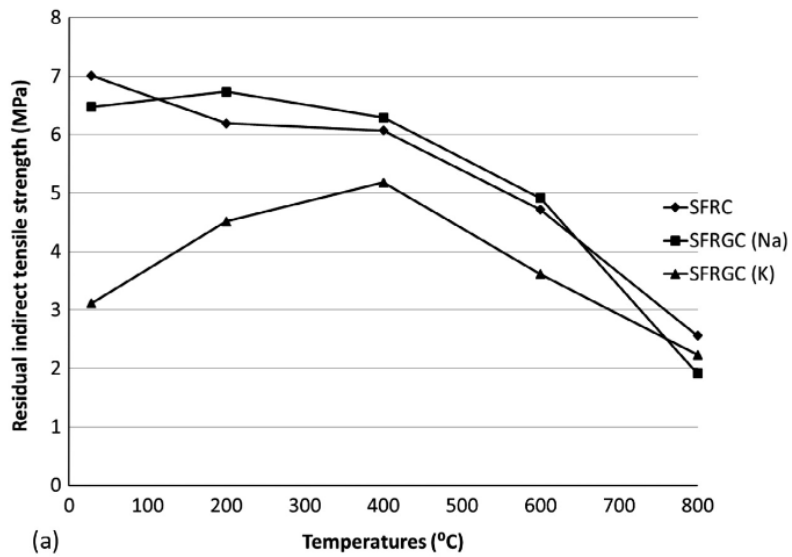
กำลังอัดคงค้างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประเภท Na-based และ K-based มีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 200 และ 400 องศาเซลเซียส และมีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงอัดคงค้างที่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิถึง 500 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 30



รูปที่ 30 กำลังรับแรงอัดของ SFRC, SFRGC (Na-based) และ SFRGC (K-based) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประเภท K-based เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมมีค่าเท่ากับ 160 เปอร์เซ็นต์ และค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมจะลดลงใกล้เคียงอุณหภูมิห้องเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิถึง 700 องศาเซลเซียส สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประเภท Na-based มี

ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมจะใกล้เคียงอุณหภูมิห้องเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 31



รูปที่ 31 กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ SFRC, SFRGC (Na-based) และ SFRGC (K-based) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

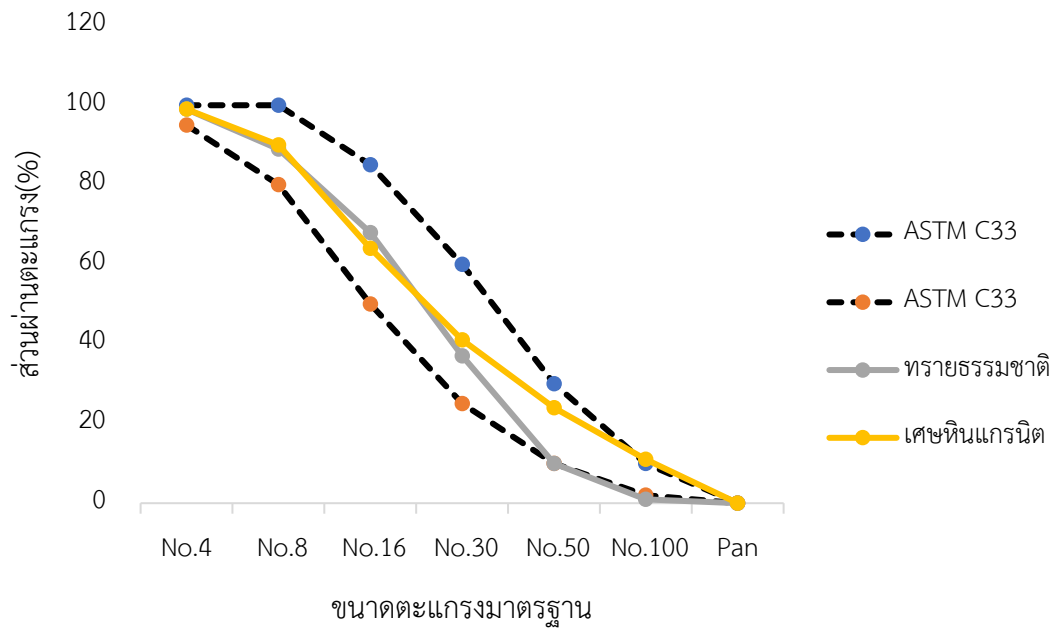
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เถ้าลอย สายละลายอัลคาไลน์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และเส้นใย ซึ่งมวลรวมละเอียดได้มีการใช้เศษหินแกรนิตมาใช้ทดแทนทรายธรรมชาติ โดยรายละเอียดส่วนผสมมีดังต่อไปนี้

1. เถ้าลอยแคลเซียมสูง (High calcium fly ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีดังนี้ $\text{SiO}_2 = 30.0\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.3\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 11.8\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.1\%$, $\text{CaO} = 20.7\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 1.7\%$, และ ค่า Loss of ignition (LOI) = 1.83%
2. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มีองค์ประกอบ Na_2O , H_2O และ SiO_2 เท่ากับ 14.5%, 55.3%, และ 30.0% ตามลำดับ
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีความเข้มข้น 10 โมลาร์
4. ทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอย และ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH มีค่าเท่ากับ 0.6 และ 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
5. มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำและเศษหินแกรนิตที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 (2018) ดังแสดงในรูปที่ 32 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 11
6. ใช้หินปูนที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.70 เป็นมวลรวมหยาบ
7. ใช้เส้นใยเหล็กดังแสดงในรูปที่ 33 เป็นส่วนผสมร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของมวลรวม

| คุณสมบัติ | หิน | ทรายแม่น้ำ | เศษหินแกรนิต |
|---|-------|------------|--------------|
| ค่าความถ่วงจำเพาะ | 2.70 | 2.61 | 2.64 |
| ค่าหน่วยน้ำหนักกอบแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร) | 1,621 | 1,639 | 1,703 |
| ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ) | 0.60 | 0.72 | 0.65 |
| ค่าโมดูลัสความละเอียด | - | 2.96 | 2.71 |



รูปที่ 32 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 (2018)

ตารางที่ 12 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก

| Properties | Steel fiber |
|------------------------------|-------------|
| Fiber length (l_f , mm) | 6 |
| Fiber diameter (d_f , mm) | 0.16 |
| Tensile strength (MPa) | 2750 |
| Modulus of elasticity (GPa) | 200 |
| Specific gravity | 7.85 |



รูปที่ 33 เส้นใยเหล็ก

3.2 ส่วนผสมของคอนกรีตกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง

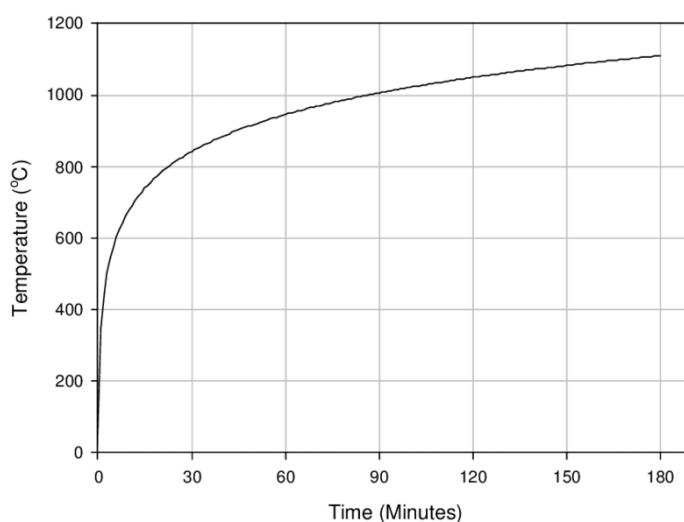
ในการทดสอบนี้ได้ออกแบบสัดส่วนผสมทั้งหมด 6 ส่วนผสมเพื่อตรวจสอบผลของเส้นใยเหล็กและการใช้เศษหินแกรนิตในการแทนที่ทรายแม่น้ำที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนไฟ โดยทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อแก้วลอย และ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH มีค่าเท่ากับ 0.6 และ 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 สัดส่วนผสมคอนกรีต (kg/m^3)

| ส่วนผสม | วัสดุ | สารละลายอัลคาไลน์มหาวิทยาลัยมหัศจรรย์ | | | | | เส้นใยเหล็ก (%โดยปริมาตร) |
|---------|--------|---------------------------------------|----------------|--------|------------|--------------|------------------------------|
| | ประสาน | โซเดียมไฮดรอกไซด์ | โซเดียมซิลิเกต | หินปูน | ทรายแม่น้ำ | เศษหินแกรนิต | |
| 0GP-0 | 450 | 135 | 135 | 1150 | 500 | - | 0% |
| 0GP-1 | 450 | 135 | 135 | 1150 | 500 | - | 1% |
| 0GP-2 | 450 | 135 | 135 | 1150 | 500 | - | 2% |
| 100GP-0 | 450 | 135 | 135 | 1150 | - | 500 | 0% |
| 100GP-1 | 450 | 135 | 135 | 1150 | - | 500 | 1% |
| 100GP-2 | 450 | 135 | 135 | 1150 | - | 500 | 2% |

3.3 การทดสอบวัสดุ

ในการทดสอบคุณสมบัติประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตขณะที่ยังไม่แข็งตัว และแข็งตัวแล้ว ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตขณะที่ยังไม่แข็งตัวจะทำการทดสอบทันที หลังจากผสมคอนกรีตเสร็จโดยใช้มาตรฐาน ASTM C1611 (2021) สำหรับคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะทำการทดสอบตามตารางที่ 14 โดยผลจากการทดสอบ Flexural test and toughness ตามมาตรฐาน ASTM C1609 (2019a) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ทดสอบกับระยะการแอ่นตัว ซึ่งสามารถใช้ในการหาค่าความเหนียว (toughness) ได้ต่อไป ในการทดสอบเผาไฟจะใช้มาตรฐาน ISO-834 (1999) ดังแสดงในรูปที่ 34 เพื่อหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ ทดสอบหลังเผาไฟที่เวลา 30, 60, และ 90 นาที



รูปที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิตามมาตรฐาน ISO 834 (1999)

ตารางที่ 14 รายละเอียดการทดสอบวัสดุ

| คุณสมบัติที่ทดสอบ | มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง | ลักษณะรูปร่างของชิ้นทดสอบ | อายุของชิ้นทดสอบ |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| ค่าการไหลแผ่ (Slump flow) | ASTM C1611 (2021) | - | - |
| ค่ากำลังอัด | ASTM C39 (2021) | ทรงกระบอก ϕ 10 ซม. x 20 ซม. | 7, 28, และ 90 วัน |
| ค่ากำลังดึงแยก | ASTM C496 (2017) | ทรงกระบอก ϕ 10 ซม. x 20 ซม. | 28 วัน |

| คุณสมบัติที่ทดสอบ | มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง | ลักษณะรูปร่างของชิ้นทดสอบ | อายุของชิ้นทดสอบ |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|------------------|
| ค่ากำลังดัดและความเหนียว | ASTM C1609 (2019a) | ปรีซึม 10 x 10 x 35 ลบ.ซม. | 28 วัน |
| ค่าความพรุน | ASTM C642 (2021) | ลูกบาศก์ 10 ลบ.ซม. | 28 วัน |
| ค่าการดูดซึมน้ำ | ASTM C642 (2021) | ลูกบาศก์ 10 ลบ.ซม. | 28 วัน |
| อัตราการดูดซึมน้ำ | ASTM C1585 (2020) | ลูกบาศก์ 10 ลบ.ซม. | 28 วัน |
| ค่ากำลังอัดคงค้าง | ASTM C39 (2021) | ทรงกระบอก ϕ 10 ซม. x 20 ซม. | 28 วัน |
| ค่ากำลังดัดและความเหนียวคงค้าง | ASTM C1609 (2019a) | ปรีซึม 10 x 10 x 35 ลบ.ซม. | 28 วัน |
| ค่าการสูญเสียของน้ำหนัก | | ทรงกระบอก ϕ 10 ซม. x 20 ซม. | 28 วัน |

3.4 ขั้นตอนการเตรียมคอนกรีต

ขั้นตอนในการเตรียมการแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 9 นาที โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสม NaOH และ แก้วลอยในโม้ผสม ผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 3 นาที

ขั้นตอนที่ 2 นำเส้นใยเหล็กและมวลรวมที่เตรียมไว้ใส่เข้าไปในโม้ผสม และทำการผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที

ขั้นตอนที่ 3 ใส่สารละลาย Na_2SiO_3 ลงไปในโม้ผสมและทำการผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที

หลังจากเสร็จสิ้น 3 ขั้นตอนดังกล่าวนำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแบบหล่อแล้วทำการกระทุ้งให้แน่น คอนกรีตชิ้นทดสอบจะห่อด้วยแผ่นพลาสติกและนำไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 25 ± 3 องศาเซลเซียส จนถึงวันที่ทำการทดสอบ

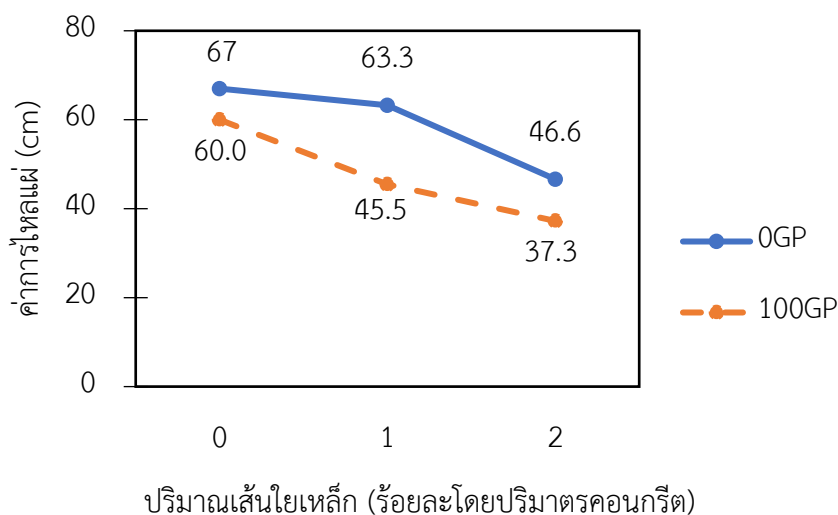
บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

คุณสมบัติของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ค่าการไหลแผ่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ความพรุน การดูดซึมน้ำ อัตราการดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อสภาวะเพลิงไหม้ ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ความสามารถในการทำงานได้

ผลการทดสอบค่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างโดยวัดค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสดอ้างอิงมาตรฐาน ASTM-C1611 (2021) ดังแสดงในรูปที่ 35 พบว่าเมื่อแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่สัดส่วนเส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตรคอนกรีตมีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 67 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อผสมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ค่าการไหลแผ่มีค่าเท่ากับ 63.3 และ 45.5 เซนติเมตร ตามลำดับ และส่วนผสมที่มีสัดส่วนเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ค่าการไหลแผ่มีค่าเท่ากับ 46.6 และ 37.3 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 35 ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

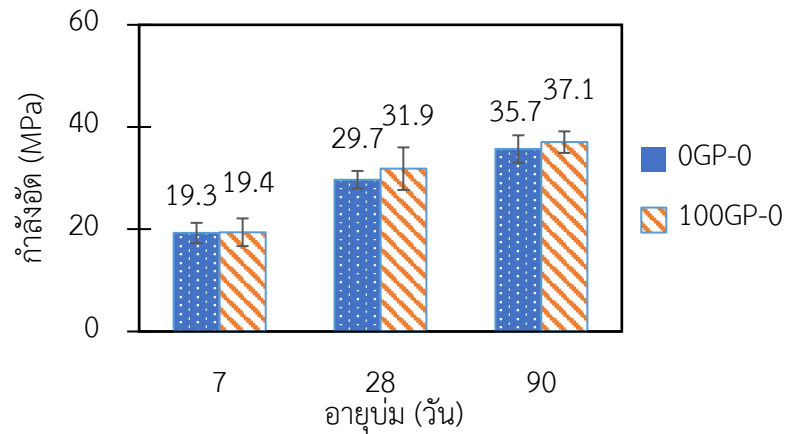
จากผลการทดสอบพบว่าค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ ซึ่งมีสาเหตุมาจากลักษณะความเป็นเหลี่ยมมุมของเศษหินแกรนิตที่ทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่

ใช้ทรายธรรมชาติเป็นส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh et al. (2015) ที่พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต

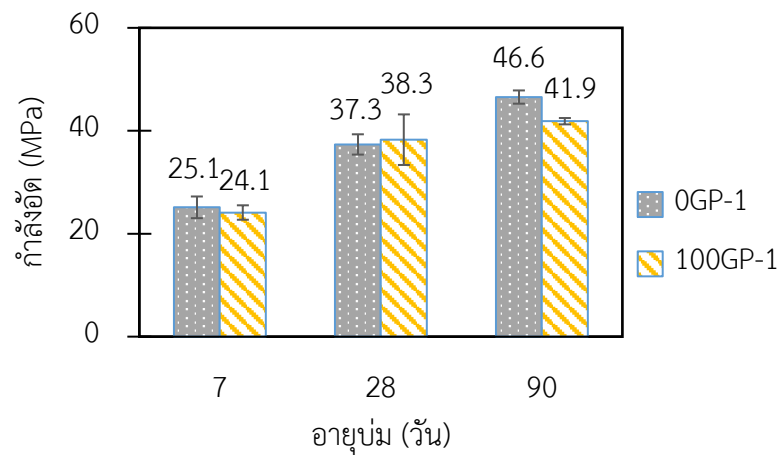
นอกจากนี้เมื่อทำการเสริมเส้นใยเหล็กในส่วนผสมพบว่าค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นทั้งในส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต โดยค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อมีส่วนผสมของเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้บริเวณผิวสัมผัสของตัวเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่มากขึ้นระหว่างบริเวณผิวของเส้นใยกับส่วนที่เป็นของเหลวในเนื้อคอนกรีต ทำให้ความหนืดของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้นจึงเป็นเหตุให้ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสดมีค่าลดลง (Liu et al., 2020)

4.2 กำลังรับแรงอัด

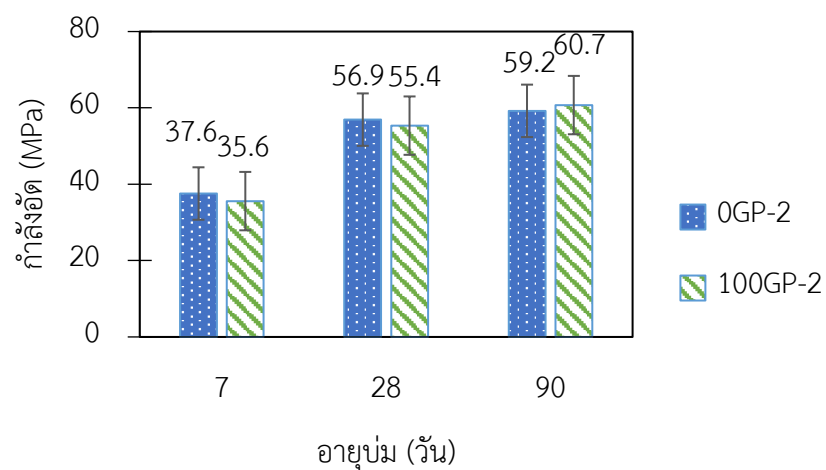
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 โดยปริมาตรของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7, 28, และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 36 (a) จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน สำหรับคอนกรีตที่มีสัดส่วนเส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตรคอนกรีต คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 19.3 และ 19.4 MPa ตามลำดับ คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน พบว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติมีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต โดยที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 29.7 และ 31.9 MPa ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 90 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 35.7 และ 37.1 MPa ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Adigun (2003) และ Manasseh (2010) ที่พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างการใส่ทรายธรรมชาติและการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Vijayalakshmi et al. (2013) ที่พบว่าที่อายุบ่ม 90 วัน สัดส่วนการแทนที่เศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้นมีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับสัดส่วนที่ใช้ทรายธรรมชาติ



(a) เส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตรคอนกรีต



(b) เส้นใยร้อยละ 1 โดยปริมาตรคอนกรีต



(c) เส้นใยร้อยละ 2 โดยปริมาตรคอนกรีต

รูปที่ 36 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีสัดส่วนเส้นใยร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตรคอนกรีต

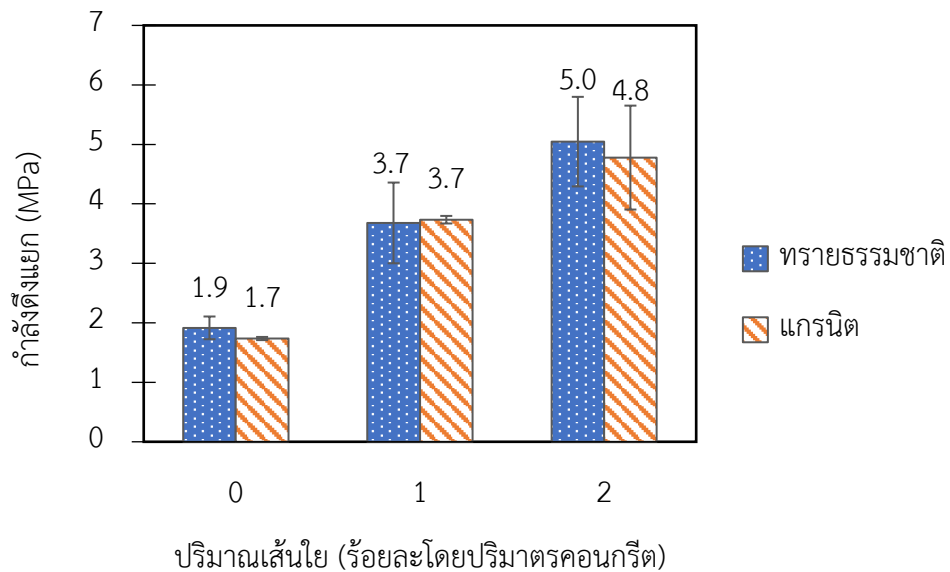
ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วันของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต แสดงในรูปที่ 36 (b) และ (c) พบว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตมีค่าใกล้เคียงกันในทุกอายุการบ่ม และเมื่อเปรียบเทียบในด้านปริมาณสัดส่วนเส้นใยที่เพิ่มขึ้นพบว่า ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่นที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 100GP-1 และ 100GP-2 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีเส้นใยเท่ากับ 20.1 และ 73.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งการเสริมเส้นใยเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยชะลอการเกิดรวมไปถึงการขยายตัวของรอยแตกร้าวทั้งที่มีขนาดเล็กและใหญ่ซึ่งจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น (Liu et al., 2020)

4.3 กำลังรับแรงดึงแยก

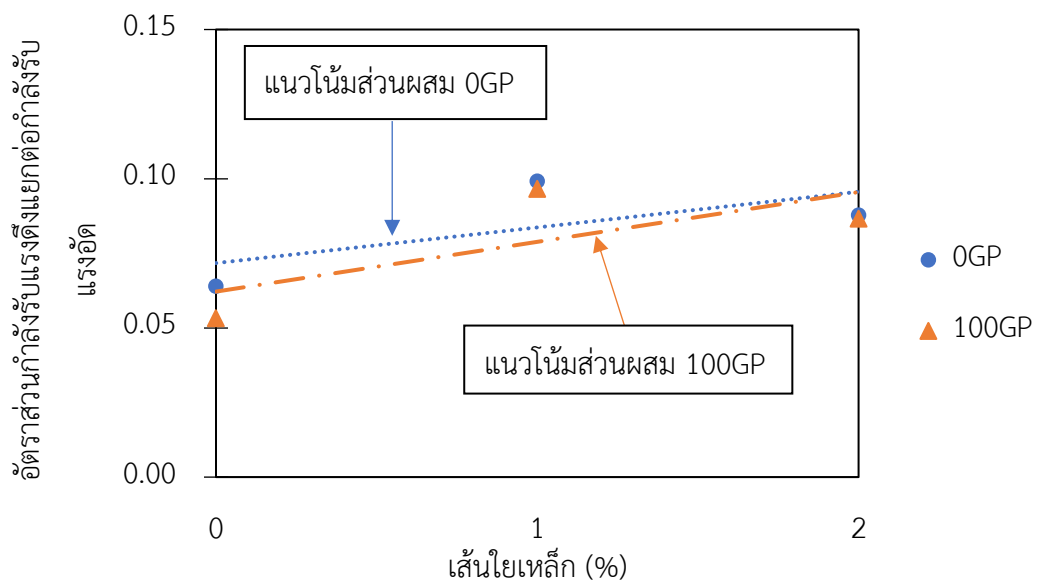
รูปที่ 37 แสดงถึงค่ากำลังรับแรงดึงแยกสำหรับคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีสัดส่วนเส้นใยเหล็กผสมร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าที่ปริมาณเส้นใยเหล็กต่าง ๆ คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต มีค่ากำลังรับแรงดึงแยกใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น ที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตมีค่าเท่ากับ 5.0 และ 4.8 MPa ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 163.2 และ 182.4 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตร และพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงแยกมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนผสมของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al. (2020) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเส้นใยเหล็กที่เป็นส่วนผสมส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงแยกมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและเนื้อคอนกรีต

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงแยกและค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 38 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงแยกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เส้นใย โดยจากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงแยกมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทั้งส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิต โดยส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่ากำลังรับแรงดึงแยกคิดเป็น 6.4% และ 5.3% ของกำลังรับแรงอัดตามลำดับ ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่ากำลังรับแรงดึง

แยกคิดเป็น 9.9% ละ 9.7% ของค่ากำลังรับแรงอัดตามลำดับ ส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่ากำลังรับแรงดึงแยกคิดเป็น 8.8% และ 8.7% ของค่ากำลังรับแรงอัดตามลำดับ จะเห็นว่าส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตรคอนกรีต ค่าอัตราส่วนของกำลังทั้งสองมีค่าต่ำเนื่องจากตัวคอนกรีตมีความเปราะที่ค่อนข้างมากและแก้ไขได้โดยการเพิ่มปริมาณเส้นใยในส่วนผสม



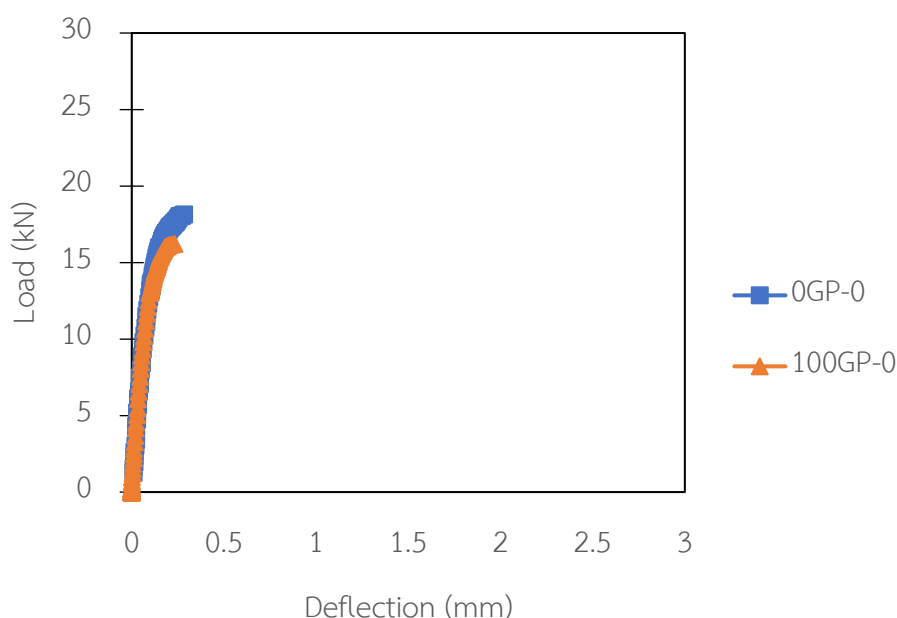
รูปที่ 37 ค่ากำลังรับแรงดึงแยกที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 0, 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต ที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงแยกต่อกำลังรับแรงอัดที่ปริมาณเส้นใยเหล็ก ร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

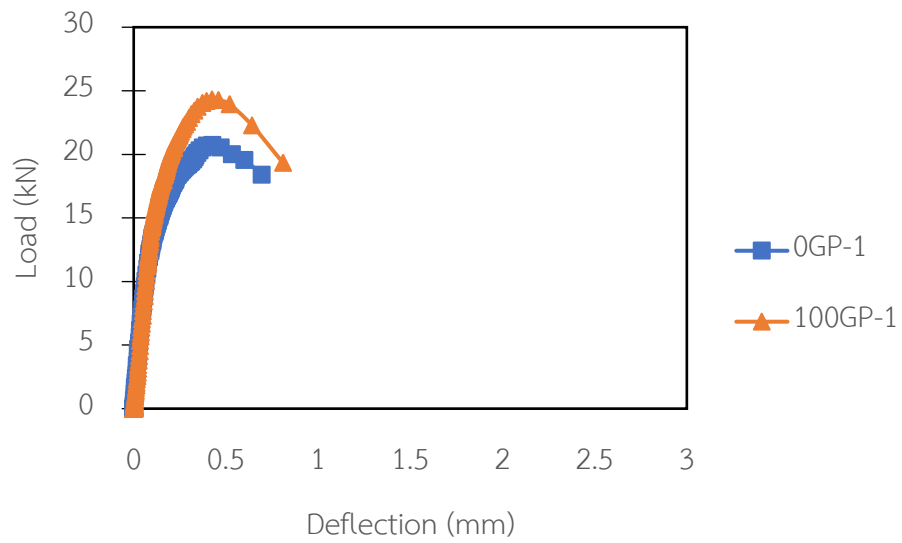
4.4 กำลังรับแรงดัดและความเหนียว

รูปที่ 39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ (Load) และระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางชิ้นทดสอบ (Deflection) ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่าพฤติกรรมภายใต้แรงดัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของแรงและระยะการแอ่นตัวเป็นเส้นตรง และเมื่อรับแรงกระทำจนถึงจุดที่เกิดการแตกร้าว การรับแรงของชิ้นทดสอบจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเกิดการวิบัติ

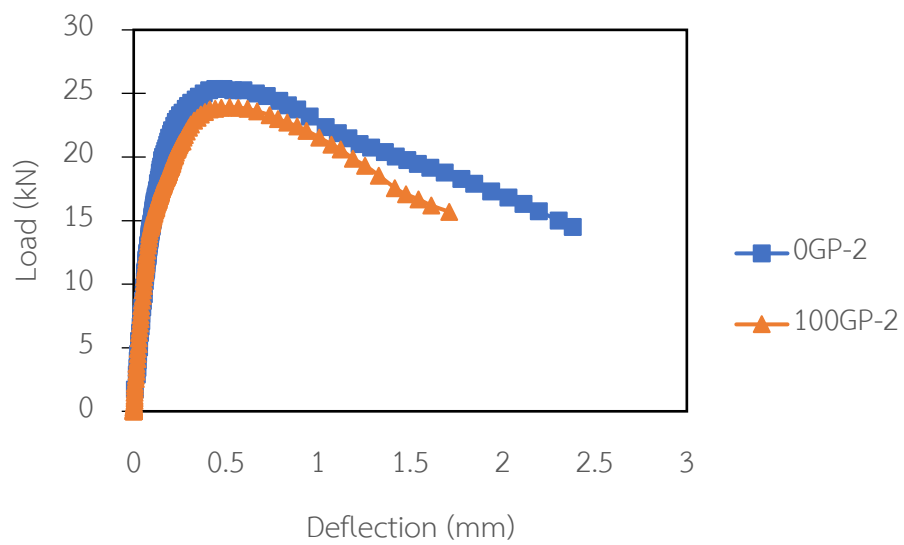


รูปที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กในส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พฤติกรรมภายใต้แรงดัดมีการเปลี่ยนแปลง โดยช่วงต้นของการเพิ่มแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบ อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำและระยะแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกันกับชิ้นทดสอบที่ไม่มีการผสมเส้นใยเหล็ก หลังจากเกิดรอยร้าวครั้งแรกความสามารถในการรับกำลังจะเพิ่มขึ้นด้วยความชันของกราฟที่น้อยลงจนถึงจุดที่รับแรงกระทำสูงสุด หลังจากนั้นจะการรับกำลังของชิ้นทดสอบจะเริ่มลดลงจนกระทั่งวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 40 และ 41



รูปที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีต
กระตุ้นด้วยต่างเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรคอนกรีต

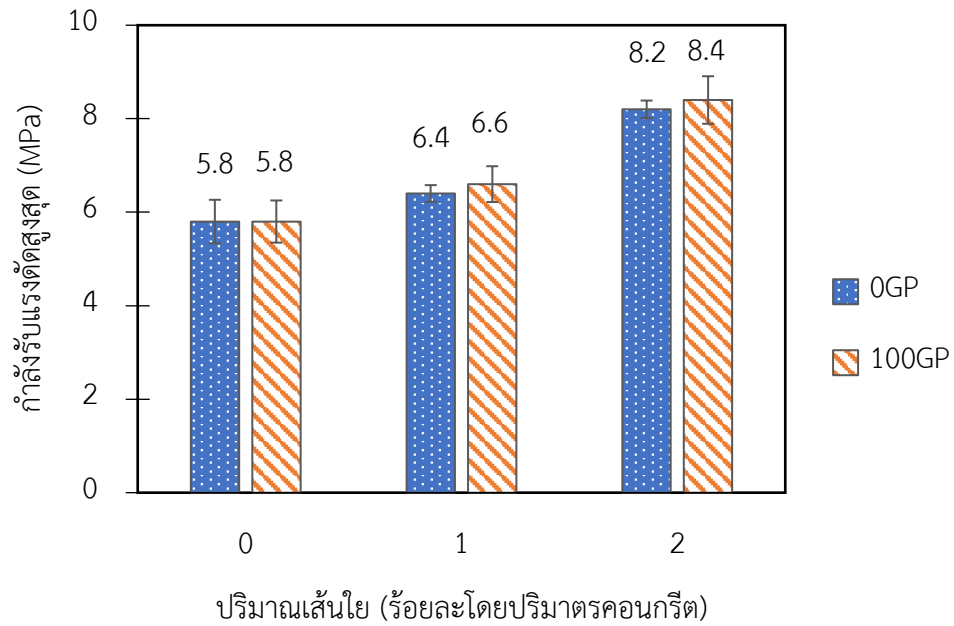


รูปที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีต
กระตุ้นด้วยต่างเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต

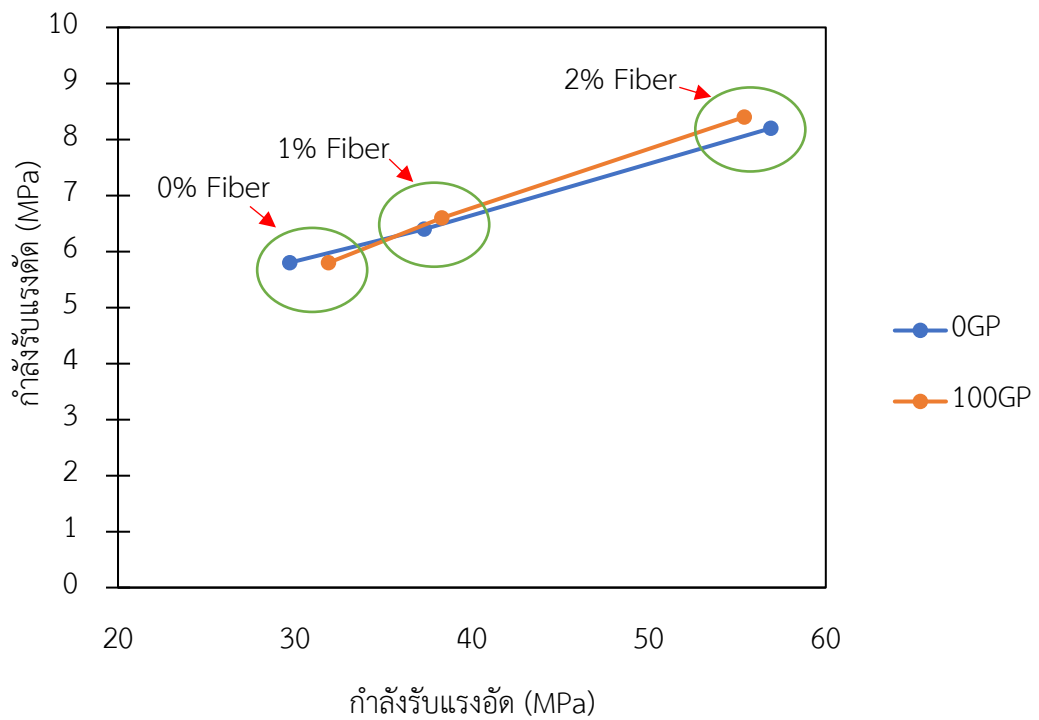
4.4.1 กำลังรับแรงดัดสูงสุด

กำลังรับแรงดัดสูงสุดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ ในร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C1609 (2019) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 42 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่ยังไม่มีการผสมเส้นใยเหล็ก มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเท่ากันที่ 5.8 MPa และเมื่อมีการผสมเส้นใยเหล็กในสัดส่วนร้อยละ 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าทั้ง 2 ส่วนผสมค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่มีสัดส่วนเส้นใยเหล็กผสมที่ร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีค่ากำลังดัดสูงสุดที่ 6.4 และ 6.6 MPa ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่มีสัดส่วนเส้นใยเหล็กผสมที่ร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีค่ากำลังดัดสูงสุดที่ 8.2 และ 8.4 MPa ตามลำดับ พบว่าเมื่อพิจารณาคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นทรายธรรมชาติกำลังรับแรงดัดสูงสุดเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กเท่ากับร้อยละ 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรโดยเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดัดกับส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเพิ่มขึ้น 10.3 และ 41.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นเศษหินแกรนิตที่มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเพิ่มขึ้น 13.8 และ 44.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รูปที่ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง จากการทดสอบพบว่าแนวโน้มของทั้งส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตมีค่ากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กโดยมีสาเหตุมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กและเนื้อคอนกรีตที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยเหล็กที่เป็นส่วนผสมรวมไปถึงเพิ่มพื้นที่การสัมผัสระหว่างเนื้อคอนกรีตกับเส้นใยเหล็กซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายแรงภายในตัวคอนกรีตได้ดีมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงดัดของตัวคอนกรีต (Liu et al., 2020)



รูปที่ 42 ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติและเสริมเส้นใยเหล็ก



รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

4.4.2 ค่าความเหนียว

จากการทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติโดยมีการเสริมเส้นใย สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความเหนียว (Toughness) โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C1609 (2019) โดยค่าความเหนียวคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอนตัวที่จุดกึ่งกลางคาน โดยใช้ตำแหน่งการแอนตัวที่ระยะ L/600 และ L/150

จากผลการทดสอบค่าความเหนียวที่ระยะการแอนตัว L/600 ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติก่อนถึงระยะการแอนตัว L/600 ตามมาตรฐาน สำหรับคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก และมีสัดส่วนการเสริมเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าค่าความเหนียวที่ระยะแอนตัว L/600 มีค่าเท่ากับ 7.70 และ 8.45 N-m ตามลำดับ และเกิดการวิบัติก่อนถึงระยะแอนตัว L/150 และสำหรับคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าค่าความเหนียวที่ระยะแอนตัว L/600 มีค่าเท่ากับ 11.04 และ 9.86 N-m ตามลำดับ ในส่วนของระยะแอนตัว L/150 ส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักมีค่าความเหนียวเท่ากับ 42.52 และ 34.02 N-m ตามลำดับ โดยค่าความเหนียวของทุกสัดส่วนผสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กโดยสัดส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตมีค่าความเหนียวที่มากกว่าส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าความเหนียวที่ระยะการแอ่นตัว L/600 และ L/150

| ส่วนผสม | ค่าความเหนียวที่ระยะการแอ่นตัว L/600 (N-m) | ค่าความเหนียวที่ระยะการแอ่นตัว L/150 (N-m) |
|---------|---|---|
| 0GP-0 | 3.80 ± 0.43* | - |
| 100GP-0 | 2.79 ± 0.02* | - |
| 0GP-1 | 7.7 ± 0.04 | 15.01 ± 0.46** |
| 100GP-1 | 8.45 ± 0.21 | 19.76 ± 0.85** |
| 0GP-2 | 11.04 ± 0.36 | 42.52 ± 0.82 |
| 100GP-2 | 9.86 ± 0.44 | 34.02 ± 1.12 |

*ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติก่อนถึงระยะการแอ่นตัว L/600

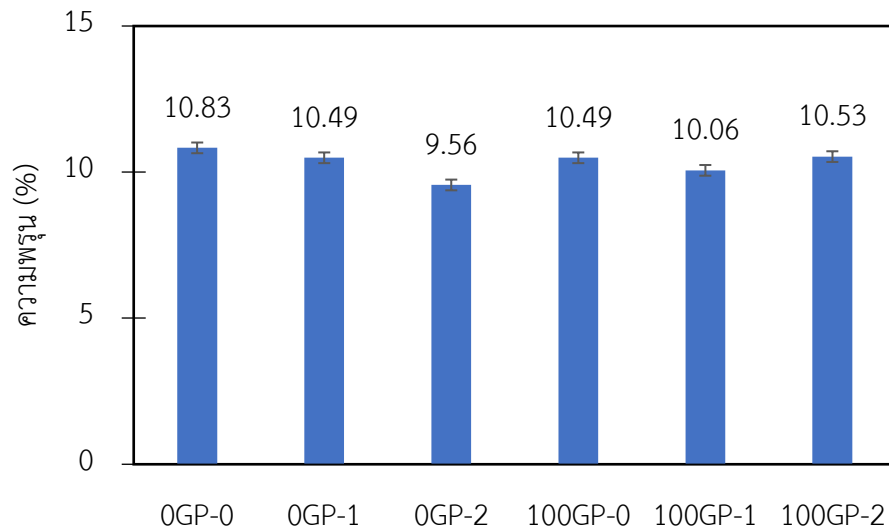
**ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติก่อนถึงระยะการแอ่นตัว L/150

ผลที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องกับจากงานวิจัยของ Liu et al. (2020) โดยพบว่าในช่วงที่เริ่มเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต เนื้อคอนกรีตและเส้นใยเหล็กจะทำการรับแรงกระทำ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กในส่วนผสมจะเป็นการเสริมความแข็งแกร่งให้กับคอนกรีต ส่งผลให้ค่าการดูดซับพลังงาน (energy absorption) หรือความเหนียวระหว่างช่วงที่มีการเกิดรอยแตกร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อมีการแตกออกของเนื้อคอนกรีตแรงกระทำจะถูกถ่ายโอนจากเส้นใยเหล็กเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้การเพิ่มปริมาณของเส้นใยเหล็กในส่วนผสมมีส่วนให้ค่าความเหนียวมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยจากตารางที่ 15 พบว่าค่าความเหนียวของส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 2 โดยปริมาตร มีค่ามากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ ที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กเป็นส่วนผสมน้อยกว่าทั้งหมด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

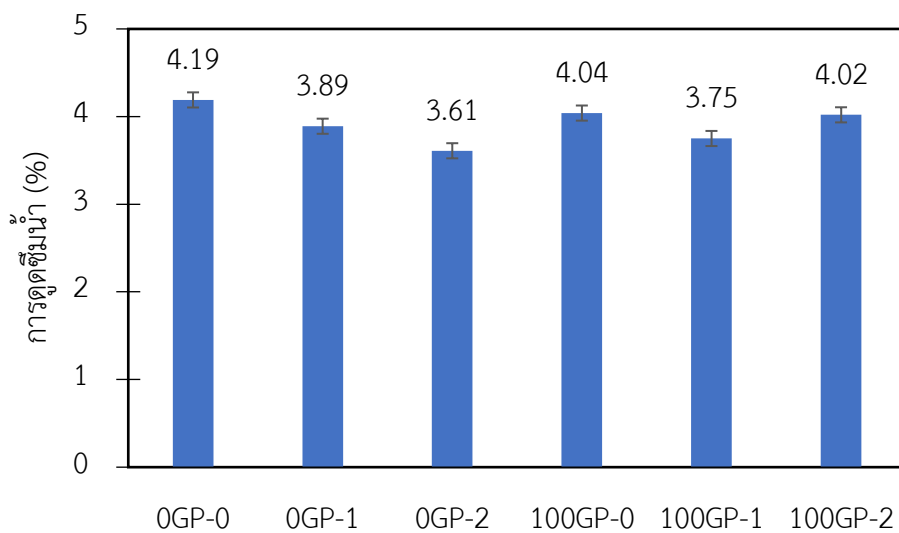
4.5 ค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำ

จากผลการทดสอบร้อยละปริมาณความพรุนของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต พบว่าค่าความพรุนในทุกสัดส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 44 โดยคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่าปริมาณความพรุนร้อยละ 10.83, 10.49, และ 9.56 ตามลำดับ และคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 100 โดยน้ำหนักที่มีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่าปริมาณความพรุนร้อยละ 10.49, 10.06, และ 10.53 ตามลำดับ



รูปที่ 44 ร้อยละปริมาณความพรุนของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

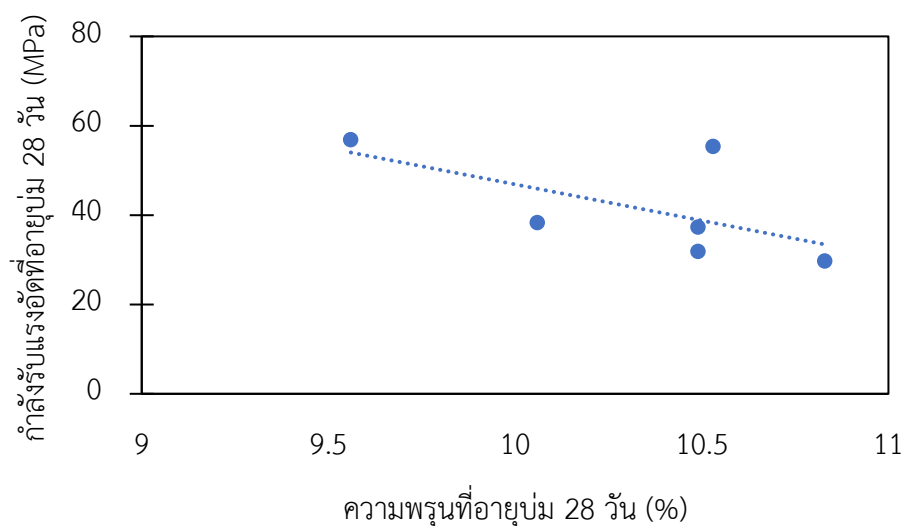
สำหรับการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพบว่าร้อยละการดูดซึมน้ำในทุกสัดส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน โดยคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 โดยน้ำหนักและมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 4.19, 3.89, และ 3.61 ตามลำดับ และคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และมีการเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 4.04, 3.75, และ 4.02 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 45



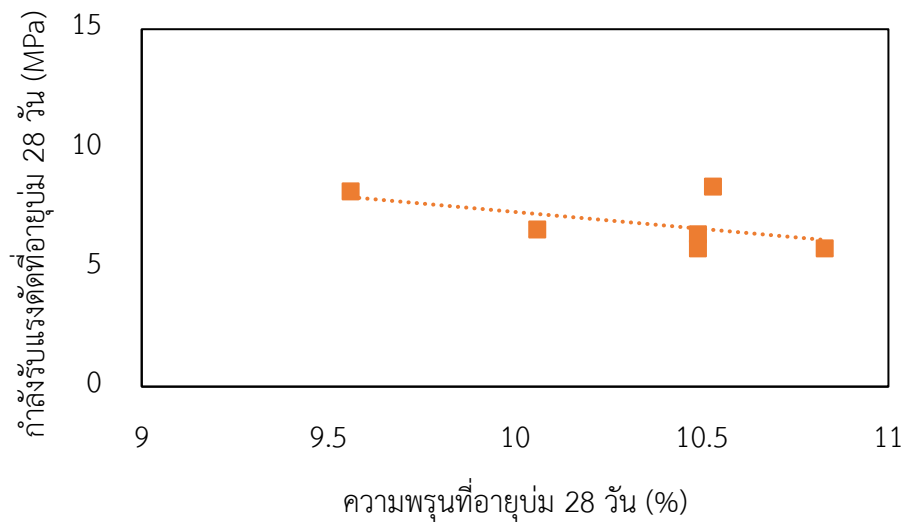
รูปที่ 45 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าความละเอียดของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่ใกล้เคียงกันไม่ส่งผลให้ร้อยละการดูดซึมน้ำและร้อยละปริมาณความพรุนของคอนกรีตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และการใช้เศษหินแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียดให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh et al. (2016) ซึ่งพบว่าค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนัก ทุกสัดส่วนได้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันโดยค่าสูงสุดพบที่การแทนที่ปริมาณร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก สาเหตุอาจเกิดจากลักษณะของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่มีลักษณะทางกายภาพที่สามารถอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กในส่วนผสมพบว่าร้อยละการดูดซึมน้ำและร้อยละปริมาณความพรุนของคอนกรีตแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

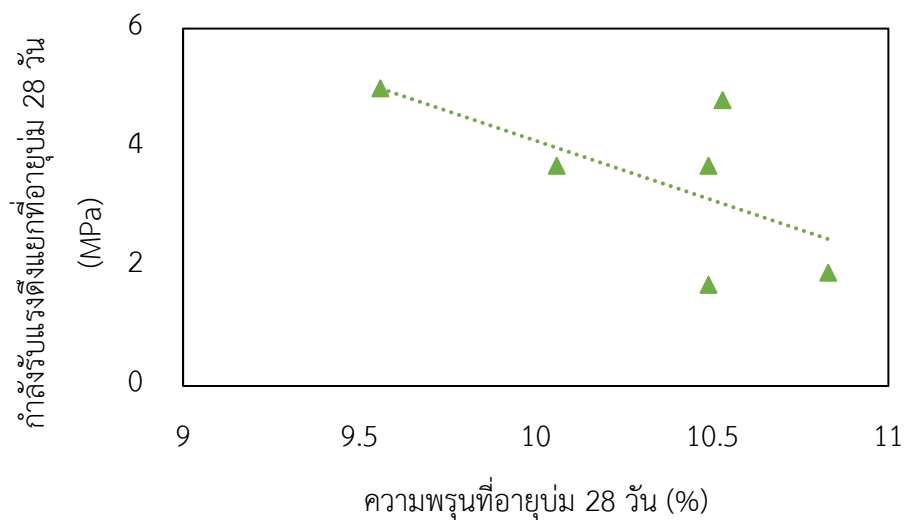
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, และกำลังรับแรงดึงแยกกับค่าความพรุนของคอนกรีต พบว่าเมื่อปริมาณความพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, และกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 46, 47, และ 48 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความพรุนของคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของชั้นคอนกรีตลดน้อยลง ทำให้คุณสมบัติในการรับกำลังของคอนกรีตมีค่าลดลง



รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าความพรุนของคอนกรีต



รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและค่าความพรุนของคอนกรีต

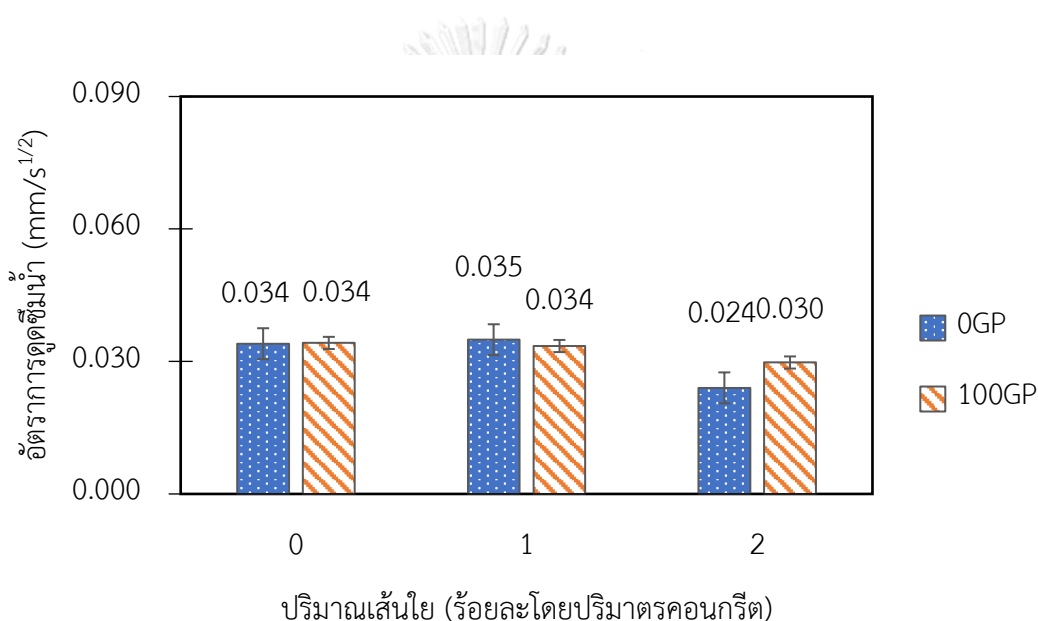


รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดแยกและค่าความพรุนของคอนกรีต

4.6 อัตราการดูดซึมน้ำ

รูปที่ 49 แสดงค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระดุนด้วยต่างที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งซึมผ่านรูพรุนภายในเนื้อคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและใช้เศษหินแกรนิตเป็นส่วนผสมโดยไม่ได้มีการเสริมเส้นใยเหล็ก มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากันอยู่ที่ $0.034 \text{ mm/s}^{1/2}$ สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและใช้เศษหินแกรนิตเป็นส่วนผสมโดยมีการเสริมเส้นใยเหล็กสัดส่วนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 0.035 และ $0.034 \text{ mm/s}^{1/2}$ ตามลำดับ และในส่วน

ของคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและใช้เศษหินแกรนิตเป็นส่วนผสมโดยมีการเสริมเส้นใยเหล็กสัดส่วนร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 0.024 และ 0.030 $\text{mm/s}^{1/2}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าอัตราการดูดซึมน้ำมีค่าใกล้เคียงกันในทุกสัดส่วนผสมอาจมีสาเหตุมาจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมละเอียดที่มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ใกล้เคียงกัน รวมไปถึงการเพิ่มเส้นใยเหล็กในส่วนผสม ผลการทดสอบส่วนผสมที่มีเส้นใยเหล็กปริมาณร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร พบว่าค่าอัตราการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 0 และ 1.0 โดยปริมาตร อาจมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติของเส้นใยเหล็กที่ช่วยป้องกันการซึมผ่านของน้ำ (Their & Özakça, 2018)



รูปที่ 49 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่อายุ 28 วัน

4.7 คุณสมบัติของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างในสถานะเพลิงไหม้

เนื่องจากความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสถานะเพลิงไหม้เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้การออกแบบโครงสร้างมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบและศึกษาความสามารถในการต้านทานสถานะเพลิงไหม้ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติและเสริมเส้นใยเหล็ก โดยทำการศึกษากำลังอัดคั่งค้าง ค่ากำลังตัดและความเหนียวคั่งค้าง ลักษณะการหลุดล่อน และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง โดยอ้างอิงมาตรฐาน ISO-834 (1999) ที่พิจารณาระยะเวลาเผาไฟที่ 0, 30, 60, และ 90 นาที

4.7.1 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 28 วัน หลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที ดังแสดงในตารางที่ 16 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงหลังจากเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที โดยเมื่อเผาเป็นระยะเวลา 30 นาที คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 (0GP-0) และ 100 (100GP-0) โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.6 และ 9.6 MPa ตามลำดับ และเมื่อเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาที คอนกรีตส่วนผสม 0GP-0 และ 100GP-0 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.2 และ 4.4 MPa ตามลำดับ สำหรับการทดสอบเผาไฟเป็นระยะเวลา 90 นาที คอนกรีตเกิดความเสียหายซึ่งไม่สามารถทำการทดสอบกำลังอัดได้ในทุกส่วนผสม

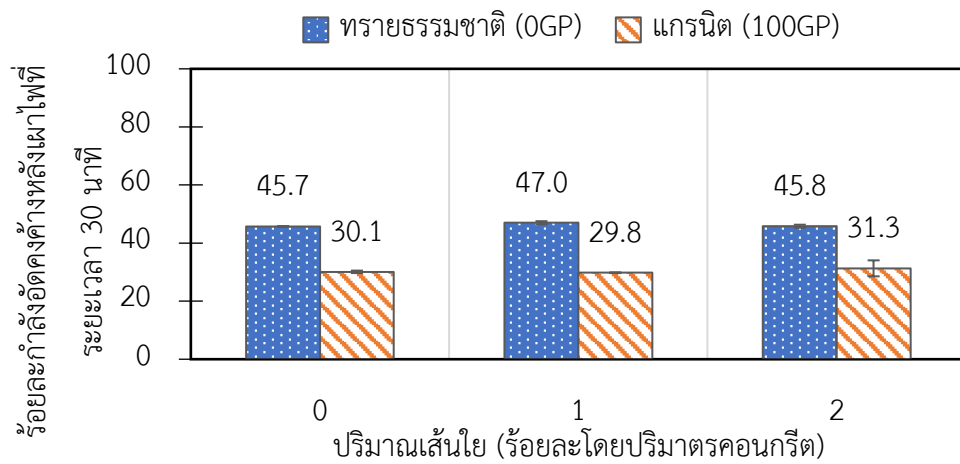
ในส่วนของผลจากปริมาณเส้นใยเหล็กที่ใส่ในแต่ละสัดส่วนผสมต่อกำลังอัดหลังเผาไฟของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง พบว่าค่ากำลังอัดหลังเผาไฟของส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ที่มีการใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผาไฟ 30 นาที มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.6, 17.5, และ 26.1 MPa ตามลำดับ

ตารางที่ 16 กำลังอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60, และ 90 นาที

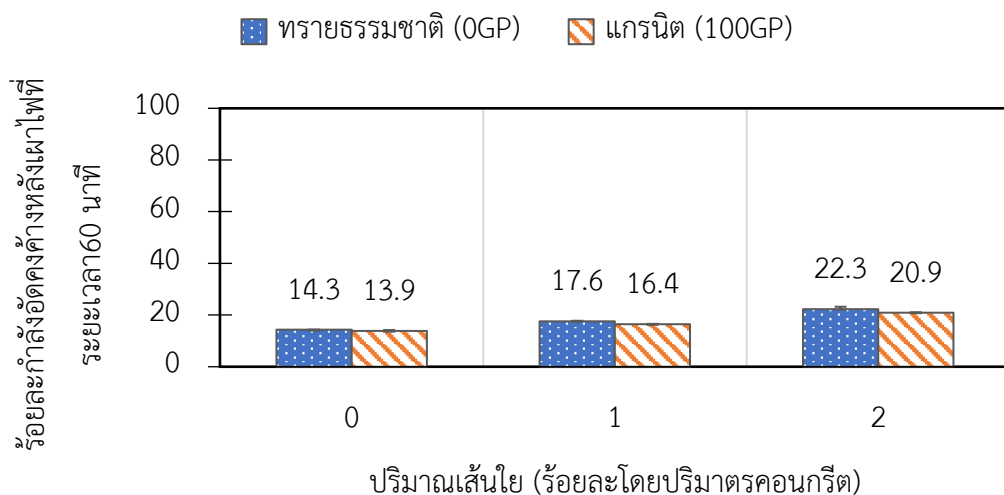
| ส่วนผสม | กำลังอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟ (MPa) | | | |
|---------|--|-------------|-------------|---------|
| | 0 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 90 นาที |
| 0GP-0 | 29.7 ± 1.7 | 13.6 ± 0.04 | 4.2 ± 0.06 | - |
| 100GP-0 | 31.9 ± 4.2 | 9.6 ± 0.42 | 4.4 ± 0.31 | - |
| 0GP-1 | 37.3 ± 1.3 | 17.5 ± 0.53 | 6.6 ± 0.18 | - |
| 100GP-1 | 38.3 ± 4.9 | 11.4 ± 0.12 | 6.3 ± 0.19 | - |
| 0GP-2 | 56.9 ± 4.3 | 26.1 ± 0.53 | 12.7 ± 0.91 | - |
| 100GP-2 | 55.4 ± 0.8 | 17.3 ± 2.75 | 11.6 ± 0.17 | - |

รูปที่ 50 และ 51 แสดงค่าร้อยละของกำลังอัดคงค้างของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ผ่านการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที โดยเปรียบเทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 (0GP-0) และ 100 (100GP-0) โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละกำลังอัดคงค้างหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาที เท่ากับ 45.7 และ

30.1 ตามลำดับ และที่ระยะเผาไฟ 60 นาที ส่วนผสม 0GP-0 และ 100GP-0 มีค่าร้อยละกำลังอัดคงค้างเท่ากับ 14.3 และ 13.9 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบที่ระยะเวลาเผาไฟ 30 นาที ค่าร้อยละกำลังอัดคงค้างของส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติมีค่าสูงกว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต ในขณะที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 นาที ค่าร้อยละกำลังอัดคงค้างของทั้งสองส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของควอตซ์ที่มีอยู่ในทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตจากรูปแบบ α -Trigonal เป็นรูปแบบ β -Hexagonal ที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาตรผลึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการแตกร้าวเกิดขึ้นภายในคอนกรีตและเมื่ออุณหภูมิลดลงผลึกจะเปลี่ยนรูปร่างย้อนกลับส่งผลให้การรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง (Hewlett & Liska, 2019)



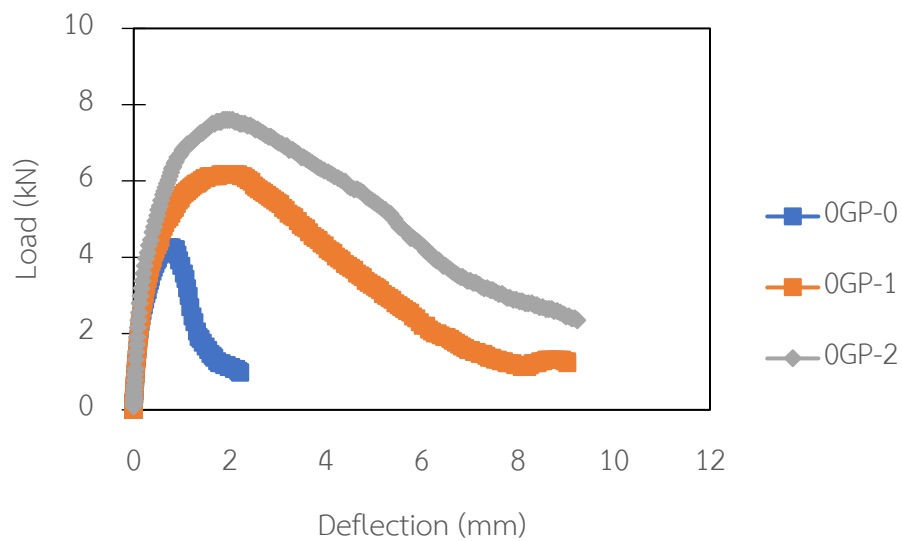
รูปที่ 50 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาที



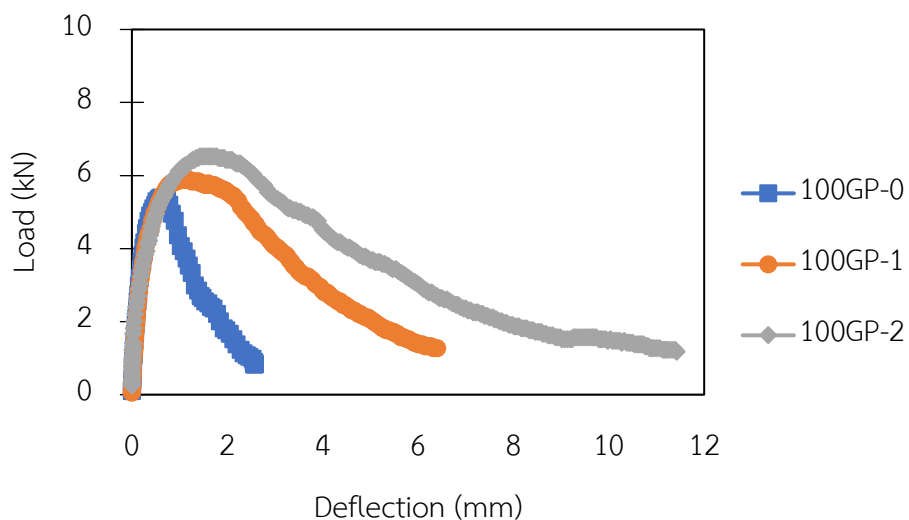
รูปที่ 51 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที

4.7.2 ค่ากำลังตัดและความเหนียวคงค้างของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

รูปที่ 52 และ 53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ (Load) และ ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางชิ้นทดสอบ (Deflection) ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่มีการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและมีการเสริมเส้นใยร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตรคอนกรีตภายหลังการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างทดสอบที่เผาไฟเป็นระยะเวลา 90 นาที เกิดการหลุดล่อนจนไม่สามารถที่จะทดสอบได้

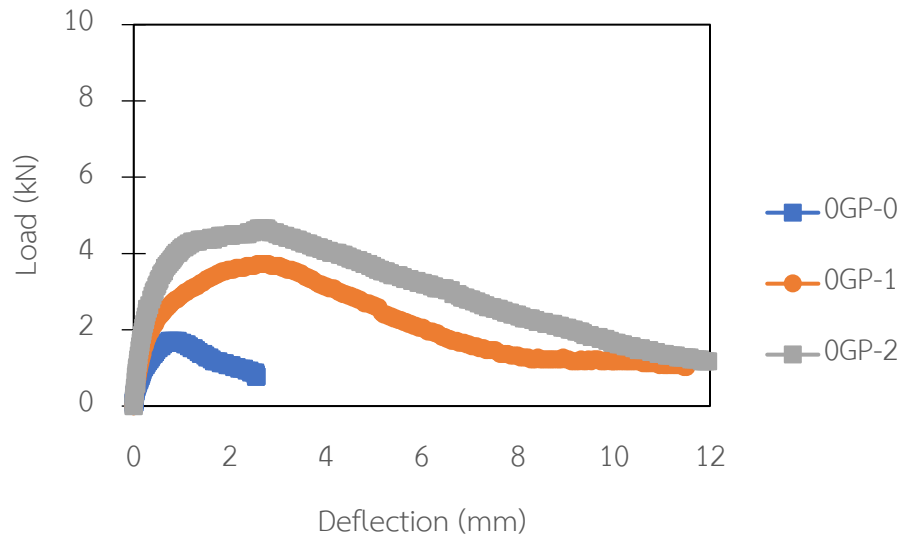


(a) คอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

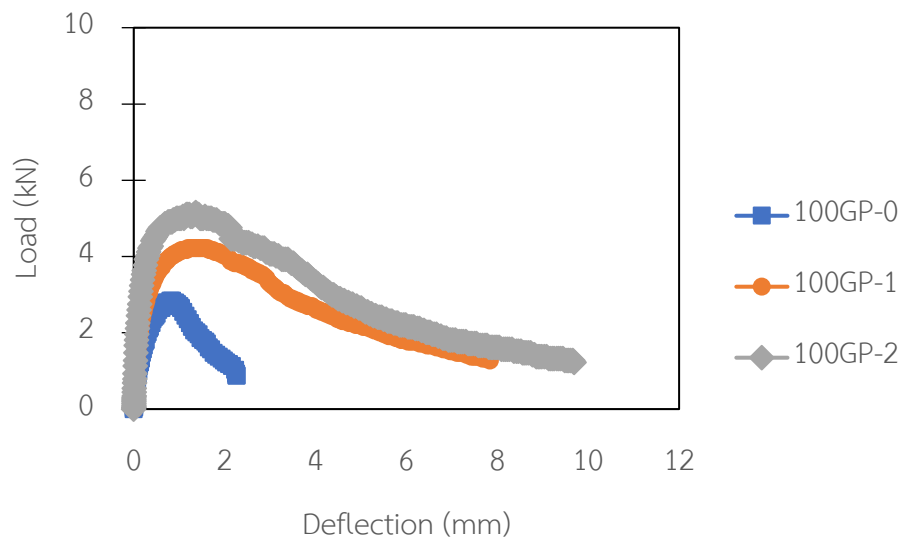


(b) คอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตรคอนกรีตภายหลังการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาที



(a) คอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

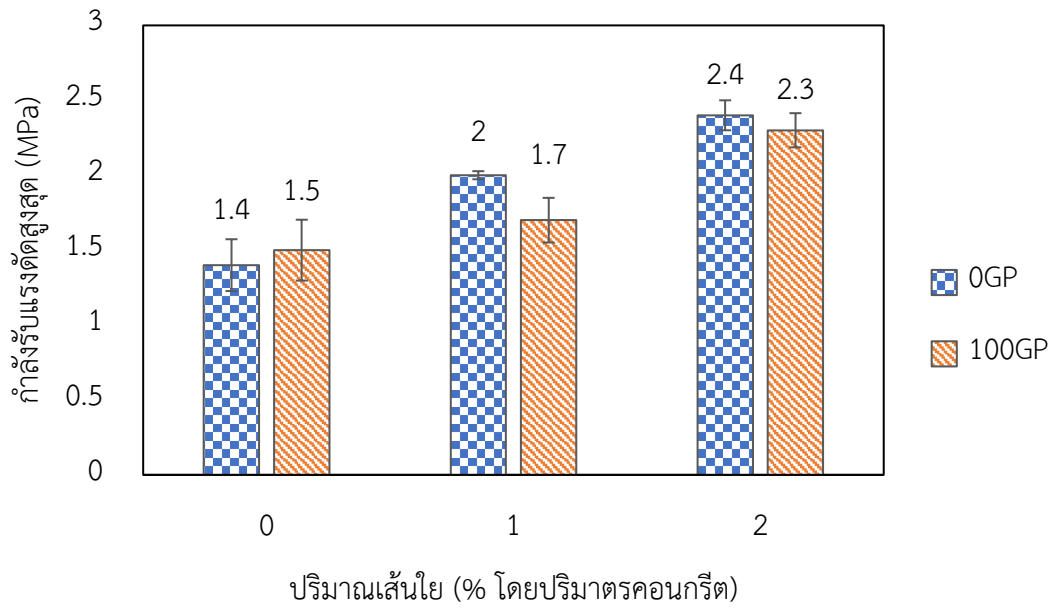


(b) คอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก

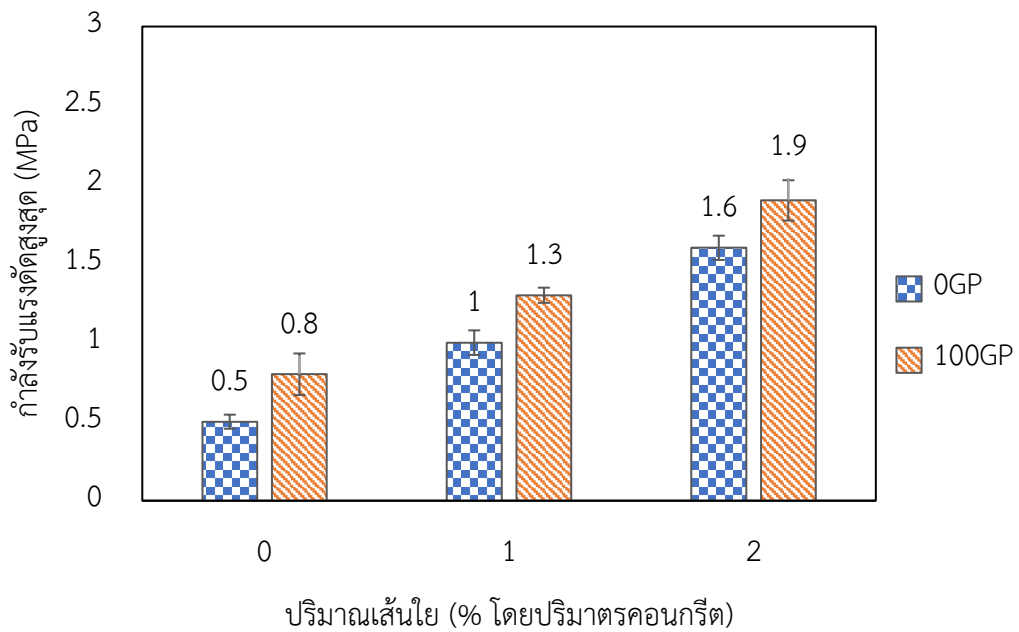
รูปที่ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างเสริมเส้นใยเหล็กร้อยละ 0, 1, และ 2 โดยปริมาตรคอนกรีตภายหลังการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที

จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถคำนวณค่ากำลังตัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยเหล็กในร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีตหลังเผาไฟได้ดังรูปที่ 54 และ 55 พบว่าที่หลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที ค่ากำลังรับแรงตัดของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 1.4 และ 1.5 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงตัดของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 2.0 และ 1.7 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงตัดของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 2.3 และ 2.4 MPa ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยที่เป็นสัดส่วนผสม

เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงตัดที่หลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาที ค่ากำลังรับแรงตัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยร้อยละ 0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 0.5 และ 0.8 MPa ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงตัดของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 1.0 และ 1.3 MPa ตามลำดับ และค่ากำลังรับแรงตัดของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังตัดเท่ากับ 1.9 และ 1.6 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการรับกำลังตัดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่ใส่เพิ่มขึ้นลักษณะเดียวกันกับค่ากำลังตัดที่หลังเผาไฟ 30 นาที และเมื่อเผาไฟเป็นระยะเวลา 90 นาที ตัวอย่างทดสอบเกิดการหลุดล่อนไม่สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบได้



รูปที่ 54 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที



รูปที่ 55 ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาที

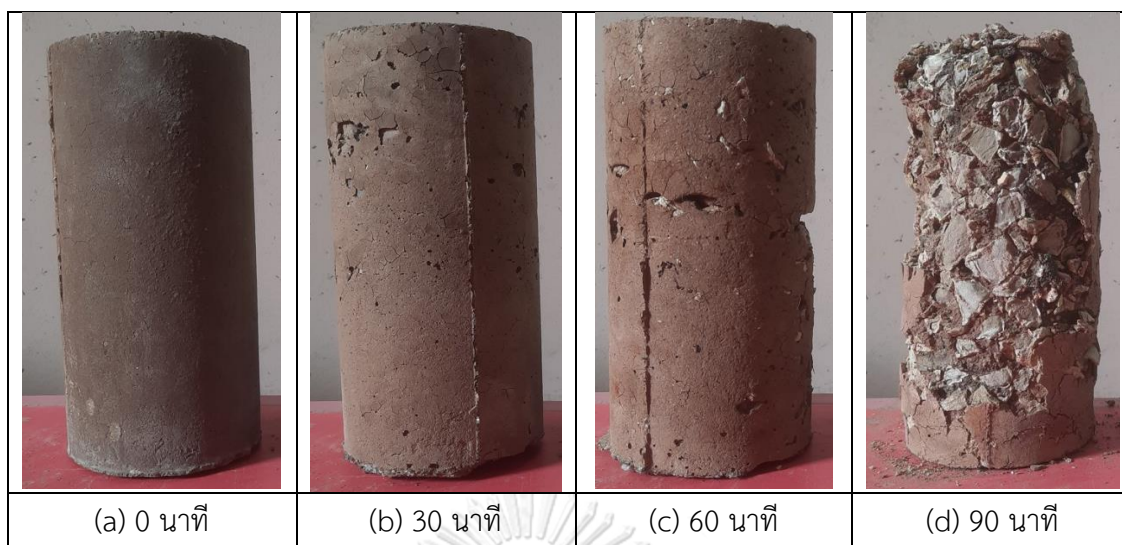
ตารางที่ 17 แสดงค่าความเหนียวหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที ที่ระยะ L/600 และ L/150 คำนวณตามมาตรฐาน ASTM C1609 (2019) จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดัดและค่าความเหนียวของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกที่ทำให้ปริมาตรผลึกของเศษหินแกรนิตและทรายธรรมชาติขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเจอความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 573 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีการแตกร้าว และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นการสลายตัวของเศษหินแกรนิตและทรายมีค่าเพิ่มมากขึ้น การรับแรงของคอนกรีตอัดส่วนจะอยู่ที่เส้นใยเหล็กมากขึ้นเนื่องจากเส้นใยเหล็กสามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงกว่าเศษหินแกรนิตและทรายธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที กำลังรับแรงดัดและความเหนียวจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเส้นใยเหล็กที่มากขึ้น

ตารางที่ 17 แสดงค่าความเหนียวของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ระยะเวลาเผาไฟ 30 และ 60 นาที

| ส่วนผสม | ค่าความเหนียวที่ระยะแอนตัว L/600 (N-m) | | ค่าความเหนียวที่ระยะแอนตัว L/150 (N-m) | |
|---------|--|-------------------|--|-------------------|
| | หลังเผาไฟ 30 นาที | หลังเผาไฟ 60 นาที | หลังเผาไฟ 30 นาที | หลังเผาไฟ 60 นาที |
| 0GP-0 | 1.38 ± 0.25 | 0.41 ± 0.03 | 5.32 ± 1.00 | 2.04 ± 0.24 |
| 100GP-0 | 1.92 ± 0.17 | 0.47 ± 0.11 | 7.22 ± 0.38 | 2.42 ± 0.68 |
| 0GP-1 | 1.45 ± 0.07 | 0.76 ± 0.09 | 10.06 ± 0.31 | 5.47 ± 0.45 |
| 100GP-1 | 1.80 ± 0.19 | 1.34 ± 0.05 | 10.32 ± 1.13 | 7.37 ± 0.24 |
| 0GP-2 | 1.84 ± 0.21 | 1.12 ± 0.01 | 12.10 ± 1.33 | 7.42 ± 0.05 |
| 100GP-2 | 2.19 ± 0.13 | 1.70 ± 0.14 | 13.44 ± 0.60 | 9.14 ± 0.70 |

4.7.3 ลักษณะการหลุดล่อนและค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

รูปที่ 56 แสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสีของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังผ่านการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60, และ 90 นาที ซึ่งจะพบว่าตัวอย่างคอนกรีตก่อนการทดสอบเผาไฟจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลและเมื่อทำการเผาไฟจนถึงอุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียส จะพบว่าสีของคอนกรีตจะมีลักษณะเป็นสีแดงเข้มขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่เป็นส่วนประกอบของเถ้าลอย (Temuujin et al., 2009)



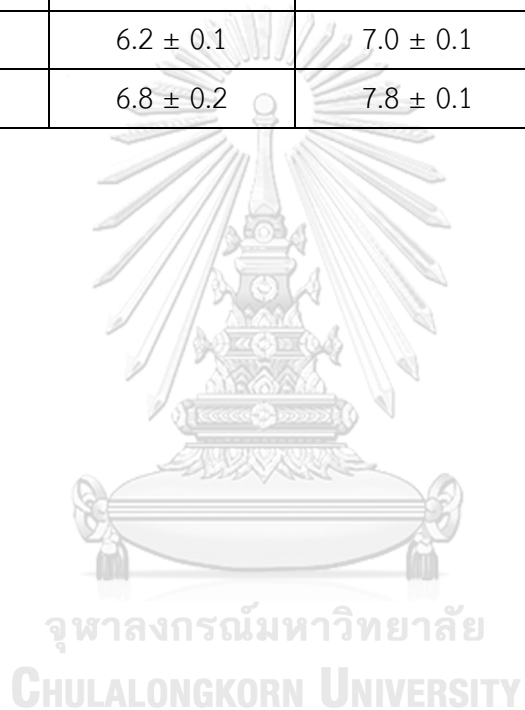
รูปที่ 56 ตัวอย่างคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60, และ 90 นาที

นอกจากนี้ลักษณะของรอยแตกร้าวที่สังเกตได้จากตัวอย่างคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟมีการหลุดลอกเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเผาไฟเพิ่มขึ้น โดยจะพบอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการทดสอบการเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที ซึ่งเกิดจากการขยายตัวของวัสดุขณะที่ทำการเผาและเมื่อลดอุณหภูมิลงจะทำให้เกิดการหดตัวที่ผิวคอนกรีตส่งผลให้เกิดรอยร้าว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Abdulkareem et al. (2014) สำหรับการหลุดลอกของตัวคอนกรีตจะเห็นได้ชัดที่สุดที่ระยะเวลาเผาไฟ 90 นาที ซึ่งเกิดขึ้นจากความดันไอน้ำภายในโพรงของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นและถูกกักเก็บไว้ภายในก่อให้เกิดความเค้นดึงที่มากกว่าความต้านทานของผิวคอนกรีต (Sarker et al., 2014)

สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างดังแสดงในตารางที่ 18 พบว่าคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีตเมื่อทำการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามในขณะที่การทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติโดยขึ้นตัวอย่างคอนกรีตมีการหลุดลอกของเนื้อคอนกรีตและแตกหักจนไม่สามารถคงรูปร่างเดิมของชิ้นตัวอย่างไว้ได้ดังแสดงในรูปที่ 56(d)

ตารางที่ 18 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30, 60 และ 90 นาที

| ส่วนผสม | ค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | | |
|---------|---|---------------|---------|
| | 30 นาที | 60 นาที | 90 นาที |
| 0GP-0 | 6.9 ± 0.2 | 7.9 ± 0.4 | - |
| 100GP-0 | 7.2 ± 0.3 | 7.7 ± 0.1 | - |
| 0GP-1 | 6.5 ± 0.1 | 7.3 ± 0.1 | - |
| 100GP-1 | 6.4 ± 0.2 | 7.5 ± 0.1 | - |
| 0GP-2 | 6.2 ± 0.1 | 7.0 ± 0.1 | - |
| 100GP-2 | 6.8 ± 0.2 | 7.8 ± 0.1 | - |



บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างรวมไปถึงศึกษาอิทธิพลของปริมาณสัดส่วนการใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณร้อยละ 0, 1.0, และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนไฟของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ ค่าความสามารถในการไหลแผ่, ค่ากำลังรับแรงอัด, ค่ากำลังดึงแยก, ค่ากำลังดัดและความเหนียว, ค่าความพรุณและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต, ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตและคุณสมบัติเชิงกลภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834 สรุปผลการทดสอบ มีดังนี้

1. การใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในสัดส่วนร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มีค่าความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตสดมีค่าลดลง และเมื่อใส่เส้นใยเหล็กในส่วนผสมพบว่าค่าความสามารถในการไหลแผ่มีแนวโน้มที่จะลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น
2. สำหรับส่วนผสมที่ไม่ได้มีการเพิ่มเส้นใยเหล็ก กำลังอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างที่อายุบ่ม 7, 28, และ 90 วัน มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติและส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต เมื่อทำการใส่เส้นใยเหล็กลงไปในส่วนผสมพบว่ามีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดทั้งในอายุบ่ม 7, 28, และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม
3. ค่ากำลังรับแรงดึงแยกในแต่ละสัดส่วนเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงแยกเพิ่มสูงขึ้น โดยในแต่ละส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยเท่ากัน จะมีค่ากำลังดึงแยกใกล้เคียงกันทั้งในส่วนผสมที่เป็นทรายธรรมชาติและส่วนผสมที่เป็นการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต
4. เส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างและสัดส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่และใช้ทรายธรรมชาติให้ค่ากำลังดัดสูงสุดรวมไปถึงค่าความเหนียวที่ระยะแอนตัวตามมาตรฐานใกล้เคียงกัน
5. ค่าความพรุณและการดูดซึมน้ำสำหรับการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติให้ผลที่ใกล้เคียงกัน รวมไปถึงปริมาณเส้นใยที่ใส่ในส่วนผสมไม่ได้ส่งผลให้ค่าความพรุณและการดูดซึมน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ
6. อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่างมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับการแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตและการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กในส่วนผสม

7. การเสริมเส้นใยเหล็กมีส่วนช่วยพัฒนากำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟรวมไปถึงช่วยพัฒนากำลังรับแรงดัดและความเหนียวหลังเผาไฟเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการใส่เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ ในด้านกำลังอัดที่ระยะเวลาเผาไฟ 30 นาที จะรับกำลังอัดคงค้างได้น้อยกว่าส่วนผสมที่เป็นทรายธรรมชาติ ส่วนที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 นาที พบว่าค่ากำลังอัดคงค้างมีค่าใกล้เคียงกัน และในส่วนของกำลังรับแรงดัดและความเหนียว ส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติให้ค่ากำลังดัดและความเหนียวที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่เป็นทรายธรรมชาติ
8. จากผลการทดสอบสมบัติทางกลและความทนทานต่อสภาวะเพลิงไหม้ของคอนกรีต กระตุ้นด้วยต่างพบว่าเศษหินแกรนิตที่เป็นเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และการเสริมคุณสมบัติวัสดุด้วยเส้นใยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยปริมาตรคอนกรีตจะส่งผลให้คอนกรีต กระตุ้นด้วยต่างมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นในการรับกำลังอัดหรือกำลังดัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่า การนำเศษหินแกรนิตมาใช้ทดแทนการใช้ทรายธรรมชาติ สำหรับการเป็นมวลรวมละเอียดสามารถทำได้ โดยคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับส่วนผสมที่ใช้มวลรวมละเอียด 2 ชนิด ดังกล่าว สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเพิ่มเส้นใยเหล็กควรคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของตัววัสดุสูงสุด จึงควรมีการศึกษาการใช้วัสดุมวลรวมจากวัสดุที่เป็นขยะอุตสาหกรรมต่าง ๆ และนำมาใช้ร่วมกับเส้นใยเหล็กในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 19 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ

| ตะแกรง ขนาด | น้ำหนัก ตะแกรง | น้ำหนัก ตะแกรง และทราย | น้ำหนัก ทรายที่ค้าง | น้ำหนัก ทรายค้าง ตะแกรง | น้ำหนัก ของทราย ค้างสะสม | ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง |
|--------------------|-------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| เบอร์ | กรัม | กรัม | กรัม | % | % | % |
| No.4 | 500 | 505 | 5 | 1 | 1 | 99 |
| No.8 | 480 | 530 | 50 | 10 | 11 | 89 |
| No.16 | 415 | 520 | 105 | 21 | 32 | 68 |
| No.30 | 390 | 545 | 155 | 31 | 63 | 37 |
| No.50 | 345 | 480 | 135 | 27 | 90 | 10 |
| No.100 | 335 | 380 | 45 | 9 | 99 | 1 |
| Pan | 370 | 375 | 5 | 1 | 100 | 0 |
| โมดูลัสความละเอียด | | | | | 2.96 | |

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติ

| รายการทดสอบ | ผลการทดสอบ |
|---|------------|
| น้ำหนักถังทรงกระบอก (kg) | 4.255 |
| น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่น้ำจนเต็ม (kg) | 10.03 |
| น้ำหนักน้ำ (kg) | 5.775 |
| ปริมาตรถังทรงกระบอก (m ³) | 0.00579 |
| น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่ทรายธรรมชาติแห้งกระทุ้งแน่น (kg) | 13.745 |
| น้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg) | 9.49 |
| หน่วยน้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m ³) | 1639.0 |

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ

| รายการทดสอบ | ผลการทดสอบ |
|--|------------|
| ปริมาตรขวดรูปชมพู่ (cm ³) | 500.00 |
| น้ำหนักขวดรูปชมพู่ (g) | 141.30 |
| น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (g) | 638.40 |
| น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำและทราย (g) | 939.40 |
| น้ำหนักทรายสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (g) | 500.20 |
| น้ำหนักทรายสภาวะอบแห้ง (g) | 496.60 |
| ความถ่วงจำเพาะของทรายสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง | 2.51 |
| การดูดซึมน้ำของทราย (%) | 0.72 |

ตารางที่ 22 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษหินแกรนิต

| ตะแกรง ขนาด | น้ำหนัก ตะแกรง | น้ำหนัก ตะแกรง และเศษ หินแกรนิต | น้ำหนัก เศษ หินแกรนิต ที่ค้าง | น้ำหนักเศษ หินแกรนิต ค้าง ตะแกรง | น้ำหนัก ของเศษ หินแกรนิต ค้างสะสม | ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง |
|--------------------|-------------------|--|--|---|--|-----------------------|
| เบอร์ | กรัม | กรัม | กรัม | % | % | % |
| No.4 | 500 | 505 | 5 | 1 | 1 | 99 |
| No.8 | 480 | 525 | 45 | 9 | 10 | 90 |
| No.16 | 420 | 550 | 130 | 26 | 36 | 64 |
| No.30 | 390 | 505 | 115 | 23 | 59 | 41 |
| No.50 | 345 | 430 | 85 | 17 | 76 | 24 |
| No.100 | 335 | 400 | 65 | 13 | 89 | 9 |
| Pan | 370 | 425 | 55 | 11 | 100 | 0 |
| โมดูลัสความละเอียด | | | | | 2.71 | |

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเศษหินแกรนิต

| รายการทดสอบ | ผลการทดสอบ |
|---|------------|
| น้ำหนักถังทรงกระบอก (kg) | 4.201 |
| น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่น้ำจนเต็ม (kg) | 9.958 |
| น้ำหนักน้ำ (kg) | 5.757 |
| ปริมาตรถังทรงกระบอก (m ³) | 0.00577 |
| น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่ทรายธรรมชาติแห้งกระทุ้งแน่น (kg) | 13.395 |
| น้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg) | 9.194 |
| หน่วยน้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m ³) | 1593.0 |

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของเศษหินแกรนิต

| รายการทดสอบ | ผลการทดสอบ |
|--|------------|
| ปริมาตรขวดรูปชมพู่ (cm ³) | 500.00 |
| น้ำหนักขวดรูปชมพู่ (g) | 157.50 |
| น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (g) | 657.18 |
| น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำและทราย (g) | 963.46 |
| น้ำหนักทรายสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (g) | 500.13 |
| น้ำหนักทรายสภาวะอบแห้ง (g) | 495.84 |
| ความถ่วงจำเพาะของทรายสภาวะอิมตัวผิวแห้ง | 2.58 |
| การดูดซึมน้ำของทราย (%) | 0.87 |

ตารางที่ 25 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

| รายการทดสอบ | ผลการทดสอบ |
|--------------------------------------|------------|
| ระดับน้ำมันก๊าดก่อนการทดสอบ (ml) | 1.0 |
| อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (°C) | 20.0 |
| น้ำหนักถาดและเถ้าลอยก่อนการทดสอบ (g) | 567.7 |
| น้ำหนักถาดและเถ้าลอยที่เหลือ (g) | 526.4 |
| น้ำหนักเถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบ (g) | 41.3 |
| ระดับน้ำมันก๊าดหลังการทดสอบ (g) | 0.5 |
| อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งที่ 2 (°C) | 21.0 |
| ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (ml) | 19.3 |
| ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย | 2.28 |

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

ตารางที่ 26 ข้อมูลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

| ข้อมูลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง | | | | |
|---|-----------------------------|------|------|------|
| ส่วนผสม | ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต (cm) | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0GP-0 | 65.0 | 68.0 | 67.0 | 68.0 |
| 100GP-0 | 63.0 | 58.0 | 59.0 | 60.0 |
| 0GP-1 | 65.0 | 62.0 | 64.0 | 62.0 |
| 100GP-1 | 45.5 | 46.0 | 45.5 | 45.0 |
| 0GP-2 | 45.0 | 46.0 | 47.0 | 48.5 |
| 100GP-2 | 38.0 | 37.0 | 36.0 | 38.0 |

ตารางที่ 27 ข้อมูลการทดสอบการรับแรงอัดของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

| ส่วนผสม | หมายเลขตัวอย่าง | อายุบ่ม (วัน) | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) | | | | ความสูง (mm) | แรงอัด (kN) |
|---------|-----------------|---------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------|-------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 0GP-0 | 1 | 7 | 99.8 | 99.9 | 99.6 | 99.8 | 200.2 | 145 |
| 0GP-0 | 2 | 7 | 100.5 | 101.4 | 102.7 | 101.5 | 203.4 | 162.1 |
| 0GP-0 | 3 | 7 | 101.0 | 101.0 | 102.4 | 101.5 | 201.5 | 98.2 |
| 0GP-0 | 1 | 28 | 101.1 | 102.3 | 102.0 | 101.8 | 201.4 | 255.2 |
| 0GP-0 | 2 | 28 | 100.0 | 100.5 | 100.0 | 100.2 | 201.2 | 220.7 |
| 0GP-0 | 3 | 28 | 99.0 | 100.0 | 99.0 | 99.3 | 202.1 | 186.1 |
| 0GP-0 | 1 | 90 | 101.0 | 100.8 | 101.0 | 100.9 | 202.0 | 237.9 |
| 0GP-0 | 2 | 90 | 98.7 | 98.5 | 98.6 | 98.6 | 202.5 | 307.1 |
| 0GP-0 | 3 | 90 | 99.5 | 99.5 | 99.6 | 99.5 | 199.5 | 242.7 |

| ส่วนผสม | หมายเลข | อายุบ่ม | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) | | | | ความสูง | แรงอัด |
|---------|---------|---------|----------------------------|-------|-------|-------|---------|--------|
| 100GP-0 | 1 | 7 | 102.0 | 100.7 | 101.1 | 101.3 | 200.9 | 122.4 |
| 100GP-0 | 2 | 7 | 98.0 | 101.0 | 98.3 | 99.1 | 201.6 | 132.0 |
| 100GP-0 | 3 | 7 | 102.4 | 102.4 | 100.3 | 101.7 | 200.5 | 210.8 |
| 100GP-0 | 1 | 28 | 101.6 | 100.2 | 101.8 | 101.2 | 200.8 | 160.2 |
| 100GP-0 | 2 | 28 | 101.6 | 100.7 | 100.5 | 100.9 | 202.5 | 299.1 |
| 100GP-0 | 3 | 28 | 101.0 | 100.2 | 101.4 | 100.9 | 203.2 | 210.4 |
| 100GP-0 | 1 | 90 | 99.5 | 99.0 | 99.6 | 99.4 | 202.0 | 288.1 |
| 100GP-0 | 2 | 90 | 100.0 | 100.2 | 100.0 | 100.1 | 201.5 | 352.3 |
| 100GP-0 | 3 | 90 | 98.0 | 99.0 | 99.2 | 98.7 | 199.0 | 282.9 |
| 0GP-1 | 1 | 7 | 100.8 | 101.1 | 101.0 | 101.0 | 201.5 | 160.1 |
| 0GP-1 | 2 | 7 | 100.6 | 101.2 | 101.4 | 101.1 | 201.3 | 201.6 |
| 0GP-1 | 3 | 7 | 101.3 | 100.6 | 100.7 | 100.9 | 200.6 | 134.6 |
| 0GP-1 | 1 | 28 | 100.0 | 100.0 | 100.2 | 100.1 | 200.2 | 293.7 |
| 0GP-1 | 2 | 28 | 101.4 | 101.2 | 103.0 | 101.9 | 200.1 | 262.2 |
| 0GP-1 | 3 | 28 | 100.0 | 101.8 | 101.6 | 101.1 | 199.9 | 267.3 |
| 0GP-1 | 1 | 90 | 99.0 | 99.7 | 99.0 | 99.2 | 200.0 | 370.3 |
| 0GP-1 | 2 | 90 | 99.5 | 99.0 | 99.0 | 99.2 | 201.5 | 395.0 |
| 0GP-1 | 3 | 90 | 99.0 | 99.2 | 99.2 | 99.1 | 202.6 | 313.7 |
| 100GP-1 | 1 | 7 | 99.8 | 102.1 | 100.0 | 100.6 | 200.2 | 144.5 |
| 100GP-1 | 2 | 7 | 100.2 | 100.4 | 100.1 | 100.2 | 200.6 | 190.3 |
| 100GP-1 | 3 | 7 | 100.1 | 100.2 | 100.1 | 100.1 | 200.1 | 165 |
| 100GP-1 | 1 | 28 | 100.0 | 100.0 | 101.6 | 100.5 | 199.5 | 327.1 |
| 100GP-1 | 2 | 28 | 100.0 | 100.7 | 101.0 | 100.6 | 200.6 | 280.7 |
| 100GP-1 | 3 | 28 | 102.2 | 100.5 | 102.0 | 101.6 | 203.6 | 248.0 |
| 100GP-1 | 1 | 90 | 99.6 | 99.0 | 99.7 | 99.4 | 201.0 | 319.2 |
| 100GP-1 | 2 | 90 | 100.0 | 100.1 | 100.1 | 100.1 | 198.5 | 335.2 |
| 100GP-1 | 3 | 90 | 100.5 | 100.6 | 100.2 | 100.4 | 201.5 | 317.1 |
| 0GP-2 | 1 | 7 | 102.2 | 102.0 | 101.0 | 101.7 | 203.5 | 215.5 |
| 0GP-2 | 2 | 7 | 101.0 | 100.2 | 100.9 | 100.7 | 200.1 | 299.2 |

| ส่วนผสม | หมายเลข | อายุบ่ม | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) | | | | ความสูง | แรงอัด |
|---------|---------|---------|----------------------------|-------|-------|-------|---------|--------|
| 0GP-2 | 3 | 7 | 100.9 | 100.9 | 100.8 | 100.9 | 199.9 | 196.4 |
| 0GP-2 | 1 | 28 | 100.6 | 100.7 | 100.8 | 100.7 | 201.6 | 326.2 |
| 0GP-2 | 2 | 28 | 102.0 | 101.4 | 101.2 | 101.5 | 201.7 | 458.1 |
| 0GP-2 | 3 | 28 | 100.7 | 102.0 | 100.0 | 100.9 | 203.6 | 458.0 |
| 0GP-2 | 1 | 90 | 99.6 | 99.0 | 99.0 | 99.2 | 201.0 | 490.3 |
| 0GP-2 | 2 | 90 | 99.0 | 99.2 | 99.5 | 99.2 | 200.0 | 420.3 |
| 0GP-2 | 3 | 90 | 99.6 | 99.7 | 100.0 | 99.8 | 198.0 | 468.2 |
| 100GP-2 | 1 | 7 | 101.2 | 101.2 | 101.3 | 101.2 | 200.8 | 292.7 |
| 100GP-2 | 2 | 7 | 100.9 | 101.4 | 101.0 | 101.1 | 201.0 | 279.3 |
| 100GP-2 | 3 | 7 | 101.5 | 101.9 | 101.5 | 101.6 | 202.0 | 115.7 |
| 100GP-2 | 1 | 28 | 100.5 | 100.0 | 100.5 | 100.3 | 200.2 | 428.0 |
| 100GP-2 | 2 | 28 | 100.4 | 100.7 | 99.8 | 100.3 | 201.0 | 452.6 |
| 100GP-2 | 3 | 28 | 101.6 | 104.0 | 103.0 | 102.9 | 203.3 | 454.1 |
| 100GP-2 | 1 | 90 | 99.5 | 99.6 | 99.5 | 99.5 | 201.6 | 491.7 |
| 100GP-2 | 2 | 90 | 99.8 | 99.5 | 100.0 | 99.8 | 200.0 | 494 |
| 100GP-2 | 3 | 90 | 97.0 | 96.5 | 97.0 | 96.8 | 201.5 | 411 |

ตารางที่ 28 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตกระชั้นด้วยต่าง

| ส่วนผสม | หมายเลข ตัวอย่าง | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) | | | | ความสูง (mm) | กำลังดึงแยก (kN) |
|---------|---------------------|----------------------------|-----|-----|-----|--------------|------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 0GP-0 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 60.1 |
| 0GP-0 | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 49.8 |
| 0GP-0 | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 70.6 |
| 100GP-0 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 56.2 |
| 100GP-0 | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 53.9 |
| 100GP-0 | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 53.5 |
| 0GP-1 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 140.2 |
| 0GP-1 | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 67.9 |
| 0GP-1 | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 91.0 |
| 100GP-1 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 121.2 |
| 100GP-1 | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 114.6 |
| 100GP-1 | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 116.1 |
| 0GP-2 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 167.9 |
| 0GP-2 | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 194.0 |
| 0GP-2 | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 113.7 |
| 100GP-2 | 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 55.3 |
| 100GP-2 | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 150.1 |
| 100GP-2 | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 20 | 108.9 |

ตารางที่ 29 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงดัดคอนกรีตกระตุ่นด้วยด้ายที่อายุ 28 วัน

| ส่วนผสม | หมายเลข ตัวอย่าง | ความยาวด้านของตัวอย่าง (mm) | | | แรงดัดสูงสุด (kN) |
|---------|---------------------|-----------------------------|-----|-----|----------------------|
| | | กว้าง | ลึก | ยาว | |
| 0GP-0 | 1 | 100 | 100 | 350 | 11.970 |
| 0GP-0 | 2 | 100 | 100 | 350 | 18.150 |
| 0GP-0 | 3 | 100 | 100 | 350 | 14.820 |
| 100GP-0 | 1 | 100 | 100 | 350 | 20.265 |
| 100GP-0 | 2 | 100 | 100 | 350 | 16.230 |
| 100GP-0 | 3 | 100 | 100 | 350 | 14.415 |
| 0GP-1 | 1 | 100 | 100 | 350 | 19.275 |
| 0GP-1 | 2 | 100 | 100 | 350 | 18.390 |
| 0GP-1 | 3 | 100 | 100 | 350 | 20.745 |
| 100GP-1 | 1 | 100 | 100 | 350 | 24.330 |
| 100GP-1 | 2 | 100 | 100 | 350 | 20.595 |
| 100GP-1 | 3 | 100 | 100 | 350 | 25.455 |
| 0GP-2 | 1 | 100 | 100 | 350 | 27.075 |
| 0GP-2 | 2 | 100 | 100 | 350 | 25.365 |
| 0GP-2 | 3 | 100 | 100 | 350 | 24.630 |
| 100GP-2 | 1 | 100 | 100 | 350 | 23.940 |
| 100GP-2 | 2 | 100 | 100 | 350 | 28.440 |
| 100GP-2 | 3 | 100 | 100 | 350 | 15.150 |

ตารางที่ 30 ข้อมูลการทดสอบความพรุนและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกระตุ้นด้วยต่าง

| ส่วนผสม | หมายเลข ตัวอย่าง | น้ำหนัก ก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลัง อบใน อากาศ (g) | น้ำหนักผิว แห้งหลังแช่ น้ำ (g) | น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน อากาศหลัง แช่น้ำและ ต้ม (g) | น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน น้ำหลังแช่ น้ำและต้ม (g) |
|---------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|---|--|
| 0GP-0 | 1 | 3805 | 3680 | 3825 | 3845 | 2252 |
| 0GP-0 | 2 | 4520 | 4370 | 4550 | 4575 | 2675 |
| 0GP-0 | 3 | 3565 | 3435 | 3590 | 3605 | 2108 |
| 100GP-0 | 1 | 4675 | 4535 | 4720 | 4745 | 2823 |
| 100GP-0 | 2 | 3205 | 3115 | 3230 | 3250 | 1928 |
| 100GP-0 | 3 | 3165 | 3075 | 3195 | 3210 | 1903 |
| 0GP-1 | 1 | 2810 | 2740 | 2825 | 2840 | 1710 |
| 0GP-1 | 2 | 4295 | 4175 | 4315 | 4335 | 2616 |
| 0GP-1 | 3 | 5230 | 5055 | 5250 | 5275 | 3182 |
| 100GP-1 | 1 | 3315 | 3220 | 3335 | 3350 | 1976 |
| 100GP-1 | 2 | 3910 | 3785 | 3930 | 3950 | 2325 |
| 100GP-1 | 3 | 5050 | 4860 | 5090 | 5110 | 3001 |
| 0GP-2 | 1 | 4020 | 3905 | 4060 | 4080 | 2428 |
| 0GP-2 | 2 | 2780 | 2705 | 2800 | 2815 | 1672 |
| 0GP-2 | 3 | 3675 | 3570 | 3705 | 3720 | 2215 |
| 100GP-2 | 1 | 3665 | 3540 | 3695 | 3725 | 2221 |
| 100GP-2 | 2 | 3025 | 2945 | 3050 | 3075 | 1840 |
| 100GP-2 | 3 | 3460 | 3345 | 3495 | 3515 | 2098 |

ตารางที่ 31 ข้อมูลการทดสอบอัตราการดูดซับน้ำของคอนกรีตกระตุ่นด้วยต่าง

| ส่วนผสม | หมายเลขตัวอย่าง | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | น้ำหนักแห้งน้ำ (g) | | | | | | | | | | | ความยาว (mm) | ความกว้าง (mm) | ความหนาแน่นของน้ำ (g/mm ³) |
|---------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|--------------|----------------|--|
| | | | | 1 | 5 | 10 | 20 | 30 | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | | | |
| 0GP-0 | 1 | 3620 | 3630 | 3665 | 3670 | 3680 | 3685 | 3695 | 3715 | 3725 | 3740 | 3745 | 3755 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-0 | 2 | 4310 | 4320 | 4345 | 4360 | 4370 | 4375 | 4390 | 4405 | 4420 | 4435 | 4440 | 4450 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-0 | 3 | 3375 | 3385 | 3435 | 3445 | 3455 | 3460 | 3480 | 3500 | 3515 | 3525 | 3535 | 3545 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 100GP-0 | 1 | 4475 | 4485 | 4510 | 4525 | 4535 | 4540 | 4555 | 4575 | 4590 | 4600 | 4610 | 4620 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 100GP-0 | 2 | 3055 | 3060 | 3090 | 3105 | 3115 | 3120 | 3130 | 3150 | 3165 | 3175 | 3185 | 3195 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 100GP-0 | 3 | 3015 | 3020 | 3050 | 3070 | 3075 | 3085 | 3095 | 3120 | 3135 | 3145 | 3160 | 3165 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-1 | 1 | 2680 | 2685 | 2710 | 2725 | 2730 | 2735 | 2745 | 2755 | 2765 | 2770 | 2780 | 2785 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-1 | 2 | 4115 | 4125 | 4145 | 4160 | 4165 | 4165 | 4175 | 4190 | 4195 | 4205 | 4210 | 4220 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-1 | 3 | 4995 | 5005 | 5035 | 5050 | 5055 | 5060 | 5070 | 5085 | 5095 | 5105 | 5110 | 5120 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 100GP-1 | 1 | 3160 | 3170 | 3195 | 3225 | 3235 | 3240 | 3255 | 3270 | 3280 | 3290 | 3300 | 3310 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 100GP-1 | 2 | 3725 | 3735 | 3755 | 3780 | 3790 | 3795 | 3810 | 3825 | 3840 | 3850 | 3860 | 3870 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 100GP-1 | 3 | 4800 | 4810 | 4840 | 4870 | 4875 | 4885 | 4900 | 4915 | 4930 | 4940 | 4950 | 4960 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-2 | 1 | 3845 | 3855 | 3870 | 3895 | 3900 | 3910 | 3920 | 3935 | 3945 | 3960 | 3975 | 3985 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-2 | 2 | 2645 | 2650 | 2675 | 2705 | 2710 | 2720 | 2735 | 2750 | 2760 | 2770 | 2780 | 2790 | 150 | 150 | 0.001 | |
| 0GP-2 | 3 | 3510 | 3515 | 3540 | 3565 | 3570 | 3580 | 3590 | 3605 | 3615 | 3625 | 3635 | 3645 | 150 | 150 | 0.001 | |

| ส่วนผสม | หมายเลขตัวอย่าง | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | น้ำหนักหลังแช่น้ำ (g) | | | | | | | | | | ความยาว (mm) | ความกว้าง (mm) | ความหนาแน่นของน้ำ (g/mm ³) | |
|---------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------------|--|----------|
| | | | | 1 นาที | 5 นาที | 10 นาที | 20 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 120 นาที | 180 นาที | 240 นาที | 300 นาที | | | | 360 นาที |
| 100GP-2 | 1 | 3480 | 3490 | 3510 | 3525 | 3535 | 3545 | 3550 | 3560 | 3575 | 3585 | 3595 | 3605 | 3615 | 150 | 150 | 0.001 |
| 100GP-2 | 2 | 2885 | 2895 | 2910 | 2920 | 2930 | 2935 | 2940 | 2950 | 2960 | 2975 | 2980 | 2990 | 2995 | 150 | 150 | 0.001 |
| 100GP-2 | 3 | 3285 | 3295 | 3315 | 3330 | 3345 | 3355 | 3360 | 3370 | 3390 | 3400 | 3410 | 3420 | 3430 | 150 | 150 | 0.001 |



ภาคผนวก ค
รูปภาพประกอบงานวิจัย



รูปที่ 57 ทรายธรรมชาติ



รูปที่ 58 เศษหินแกรนิต



รูปที่ 59 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตกระตุ่นด้วยด่าง



รูปที่ 60 คอนกรีตกระตุ่นด้วยด่างทำการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที

บรรณานุกรม

- Abdulkareem, O. A., Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Nizar, I. K., & Ala'eddin, A. S. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 377-387.
- Adigun, E. M. A., & Eng, B. (2013). Cost effectiveness of replacing sand with crushed granite fine (CGF) in the mixed design of concrete. *IOSR J. Mech. Civ. Eng.(IOSR JMCE)*, 10(1), P01-P06.
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M., Rashad, A., & Khalaf, M. A. (2021). A review on alkali-activated slag concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1475-1499.
- Arulkesavan, S., Jothi, M., Satheeshkumar, M., Tamilselvi, V., & Usha, K. (2017). Experimental investigation on concrete with partial replacement of fine aggregate by granite powder. *Int Res J Eng Technol (IRJET)*, 4(3), 1623-1627.
- ASTM. (2017). American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C496
- ASTM. (2018). American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33/C33M
- ASTM. (2019). American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618
- ASTM. (2019a). American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM C1609/C1609M
- ASTM. (2020). American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes. ASTM C1585
- ASTM. (2021a). American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM C642
- ASTM. (2021b). American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for

Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM C1611/C1611M

- Bacarji, E., Toledo Filho, R., Koenders, E., Figueiredo, E., & Lopes, J. (2013). Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building Materials*, *45*, 1-10.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*: Crc Press.
- Chen, G. M., He, Y. H., Yang, H., Chen, J., & Guo, Y. (2014). Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, *71*, 1-15.
- Chiranjeevi Reddy, K., Yaswanth Kumar, Y., & Poornima, P. (2015). Experimental study on concrete with waste granite powder as an admixture. *Int. J. Eng. Res. Appl*, *5*, 87-93.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *Journal of thermal analysis*, *37*(8), 1633-1656. doi:10.1007/BF01912193
- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, *32*(2), 142-147.
- Hewlett, P., & Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*: Butterworth-Heinemann.
- ISO-834. (1999). British Standard Institute. In Part 1. Elements of Building Construction: General Requirements for Fire Resistance Testing
- Jongvivatsakul, P., Matsumoto, K., & Niwa, J. (2013). Shear Capacity of Fiber Reinforced Concrete Beams With Various Types and Combinations of Fibers. *Journal of JSCE*, *1*(1), 228-241.
- Kesikidou, F., & Stefanidou, M. (2019). Natural fiber-reinforced mortars. *Journal of Building Engineering*, *25*, 100786.
- Khine, M. T. (2018). THE INFLUENCES OF GRANITE PARTICLE AS A MIXING MATERIAL OF HIGH-STRENGTH CONCRETE. [Thesis for Degree of Master of Engineering]. *Department of Civil Engineering Graduate School Chulalongkorn University Thailand*.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). *Design and control of concrete mixtures* (Vol. 5420): Portland Cement Association Skokie, IL.

- Liu, Y., Zhang, Z., Shi, C., Zhu, D., Li, N., & Deng, Y. (2020). Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPC): Influence of steel fiber on mechanical properties. *Cement and Concrete Composites*, 112, 103670. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103670>
- Manasseh, J. (2010). Use of crushed granite fine as replacement to river sand in concrete production. *Leonardo electronics journal of practice and technologies*, 17, 85-96.
- Miranda, J. M., Fernández-Jiménez, A., González, J. A., & Palomo, A. (2005). Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1210-1217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.030>
- Nataraja, M., Dhang, N., & Gupta, A. (1999). Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6), 383-390.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement and Concrete Composites*, 55, 205-214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.08.008>
- Nuaklong, P., Chittanurak, J., Jongvivatsakul, P., Pansuk, W., Lenwari, A., & Likitlersuang, S. (2020). Effect of hybrid polypropylene-steel fibres on strength characteristics of UHPFRC. *Advances in concrete construction*, 10(1), 1-11.
- Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329.
- Sarker, P. K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014). Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials & Design*, 63, 584-592.
- Shaikh, F. U. A., & Hosan, A. (2016). Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer concretes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 114, 15-28.
- Shamsaei, E., Bolt, O., Basquiroto de Souza, F., Benhelal, E., Sagoe-Crentsil, K., & Sanjayan, J. (2021). Pathways to Commercialisation for Brown Coal Fly Ash-Based Geopolymer Concrete in Australia. *Sustainability*, 13(8), 4350. Retrieved

from <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/8/4350>

- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, *65*, 201-217.
- Singh, S., Nagar, R., Agrawal, V., Rana, A., & Tiwari, A. (2015). *Utilization of granite cutting waste in concrete as partial replacement of sand*. Paper presented at the Conference paper: UKIERI Concrete Congress–Concrete Research Driving Profit and Sustainability, Jalandhar, India.
- Singh, S., Nagar, R., Agrawal, V., Rana, A., & Tiwari, A. (2016). Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*, *116*, 223-235.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, *90*(6), 2118-2124.
- Soroushian, P., Khan, A., & Hsu, J.-W. (1992). Mechanical properties of concrete materials reinforced with polypropylene or polyethylene fibers. *Materials Journal*, *89*(6), 535-540.
- Taji, I., Ghorbani, S., De Brito, J., Tam, V. W., Sharifi, S., Davoodi, A., & Tavakkolizadeh, M. (2019). Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust. *Journal of Cleaner Production*, *210*, 837-846.
- Tchadjé, L., Djobo, J., Ranjbar, N., Tchakouté, H., Kenne, B., Elimbi, A., & Njopwouo, D. (2016). Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. *Ceramics International*, *42*(2), 3046-3055.
- Temuujin, J., Williams, R., & Van Riessen, A. v. (2009). Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. *Journal of materials processing technology*, *209*(12-13), 5276-5280.
- Their, J. M., & Özakça, M. (2018). Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber. *Construction and Building Materials*, *180*, 12-22.
- Vijayalakshmi, M., & Sekar, A. (2013). Strength and durability properties of concrete

- made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, 46, 1-7.
- Waldmann, D., & Thapa, V. B. (2018). A short review on alkali-activated binders and geopolymer binders. *Vielfalt im Massivbau-Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr. Ing. Jürgen Schnell*, 576-591.
- Xie, T., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceramics International*, 41(4), 5945-5958. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.031>
- กระทรวงอุตสาหกรรม, ก. (2561). เทคโนโลยีรีไซเคิลเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า (Fly ash) ด้วยการผลิตเป็นโลหะโฟม. (ม.ป.ท.).
- กานต์ธิปก ฮามคำไพ. (2563). สมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2544). เถ้าลอยลิกไนต์ในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม. (ม.ป.ท.).
- ปภัสรา วรวัฒน์นฤนาท. (2562). ผลกระทบของปริมาตรแทนที่และสถานะความชื้นของเศษหินแกรนิตต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | พลยุทธ ทองผาสุก |
| วัน เดือน ปี เกิด | 20 พฤศจิกายน 2539 |
| สถานที่เกิด | กรุงเทพมหานคร |
| วุฒิการศึกษา | ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY