

สมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Properties of fiber-reinforced geopolymer concrete made from recycled aggregate.



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 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล
โดย	นายกานต์ธิปก ฮามคำไพ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.กิม เหนือองคทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.กิม เหนือองคทอง)

----- กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ)

กานต์ธิปก ฮามคำไพ : สมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล. (Properties of fiber-reinforced geopolymer concrete made from recycled aggregate.) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พิชชา จงวิวัฒน์สกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ภิม เหนือคลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตจากโรงโม่หินที่นำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเศษหินแกรนิตจะถูกใช้แทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เส้นใยพอลิโพรไพลีน (PP) จะถูกใช้เพื่อพัฒนากำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคอนกรีต โดยเส้นใยจะถูกเพิ่มลงในคอนกรีตในปริมาณร้อยละ 0, 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเศษแกรนิตสามารถที่จะนำมาใช้แทนที่ทรายธรรมชาติได้ ค่าการไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เศษแกรนิต ในทางตรงกันข้ามกับกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นใยพอลิโพรไพลีนถูกเพิ่มลงในส่วนผสมและค่าความเหนียวของคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 เหมาะสมในการปรับปรุงความเหนียวของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามกำลังหลังเผาไฟจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญในคอนกรีตที่เสริมเส้นใยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6170114121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Geopolymer, Concrete, Polypropylene fibers, Granite, Recycled aggregate

Kantipok Hamcumpai : Properties of fiber-reinforced geopolymer concrete made from recycled aggregate.. Advisor: Asst. Prof. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D. Co-advisor: Peem Nuaklong, Ph.D.

This research aims to develop environmentally-friendly concrete materials by preparing the geopolymer concrete containing fine recycled granite waste aggregate from the stone quarry. The granite waste was used to replace natural sand at dosage levels of 0%, 25%, 50%, and 100% by weight. Polypropylene (PP) fibers were used to improve flexural strength and toughness of concrete. The fibers were used by adding to the concretes at 0, 0.5 and 1.0% by volume of concrete. The results showed that the granite waste can be used as fine aggregate. Slump flow and compressive strength at the age of 7 days were improved by incorporating the granite waste. Unlike the compressive strength, the flexural strength was increased when the PP fibers were added, and improvements in concrete's toughness were observed. The optimum content of the PP fiber for improving the toughness was found to be 1.0%. However, significant post-fire strength decreases of fiber-added concretes compared to concretes made without fiber were observed.

Field of Study: Civil Engineering

Academic Year: 2020

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด เทพศิลาอุตสาหกรรม ที่สนับสนุนวัสดุ (เศษหินแกรนิต) ที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, ดร.กิม เหนือคลอง, คุณอดิสร ชวนปี, คุณสมพงษ์ ขำแจ้ง ที่ให้เกียรติมาช่วยในการปฏิบัติทดสอบและให้คำปรึกษาในงานวิจัยและขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนมาโดยตลอด

กานต์ธิปก ฮามคำไพ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ณ	ณ
สารบัญรูป.....ญ	ญ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 หลักการและเหตุผล..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 3	3
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย..... 3	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..... 5	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 5	5
2.1.1 เถ้าลอย (Fly ash)..... 5	5
2.1.2 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)..... 7	7
2.1.3 มวลรวม (Aggregate) 9	9
2.1.4 เส้นใยเสริมคอนกรีต..... 15	15
2.1.5 การหลุดล่อนของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ 17	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 20	20
2.2.1 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)..... 20	20
2.2.2 เส้นใยโพลีโพรไพลีน (Polypropylene fiber)..... 24	24

2.2.3 เศษหินแกรนิตและหินปูน.....	40
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	52
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	52
3.2 สัดส่วนผสมและวิธีการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	54
3.3 รายละเอียดการทดสอบ.....	55
3.4 การวิเคราะห์ผล	59
บทที่ 4	60
ผลการทดสอบและการอภิปราย	60
4.1 ความสามารถในการทำงานได้.....	60
4.2 กำลังรับแรงอัด.....	62
4.3 กำลังรับแรงดัด.....	65
4.3.1 พฤติกรรมรับแรงดัด	65
4.3.2 กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวครั้งแรก (First-cracking strength, f_{cc})	68
4.3.3 กำลังรับแรงดัดหลังจากการแตกร้าว (Post-cracking strength, f_{pc})	70
4.3.4 ค่าความเหนียว	73
4.3.5 ลักษณะการวิบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับกำลังดัด	75
4.4 โพรงและการดูดซึมน้ำ	77
4.5 ความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้	79
4.5.1 ความเสียหายของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ	79
4.5.2 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ.....	82
4.5.3 กำลังแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ	85
บทที่ 5	88
สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	89

ภาคผนวก ก	90
ผลการทดสอบวัสดุ	90
ภาคผนวก ข	95
ผลการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	95
ภาคผนวก ค	111
รูปภาพประกอบงานวิจัย	111
บรรณานุกรม	115
ประวัติผู้เขียน	122



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	จำแนกมาตรฐานประเภทเถ้าลอยด้วยคุณสมบัติทางเคมีตาม ASTM-C618 (2005).....	5
ตารางที่ 2	ค่ากำลังทดสอบ Crushing strength ของหินประเภทต่างๆ (Neville, 2011).....	10
ตารางที่ 3	ค่าการสึกกร่อนของหินประเภทต่าง ๆ (Neville, 2011).....	11
ตารางที่ 4	แสดงค่า Apparent specific gravity ของมวลรวมชนิดต่าง ๆ (Neville, 2011).....	13
ตารางที่ 5	ประเภทและคุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใย (Pakravan, Latifi, & Jamshidi, 2017).....	16
ตารางที่ 6	รายละเอียดและลักษณะของการหลุดล่อนประเภทต่างๆ (ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 2556)	19
ตารางที่ 7	คุณสมบัติทางกายภาพเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Song et al., 2005).....	26
ตารางที่ 8	ผลการทดลองความสามารถในการรับกำลังอัด กำลังดึงแยก โมดูลัสการแตกร้าวและค่าการยุบตัว ระหว่างคอนกรีตที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนและคอนกรีตปกติ (Song et al., 2005)	27
ตารางที่ 9	คุณสมบัติและลักษณะของเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Banthia & Gupta, 2006)	27
ตารางที่ 10	ผลการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าว (Banthia & Gupta, 2006)	28
ตารางที่ 11	คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย (ภัทรชัย พงษ์โสภา, 2559).....	29
ตารางที่ 12	ค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ภัทรชัย พงษ์โสภา, 2559)	30
ตารางที่ 13	ความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Patil & Patil, 2015).....	31
ตารางที่ 14	ความสามารถในการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Patil & Patil, 2015).....	32
ตารางที่ 15	ความสามารถในการรับกำลังดึงแยกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Patil & Patil, 2015).....	32
ตารางที่ 16	กำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Z.-h. Zhang et al., 2009)	36
ตารางที่ 17	ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม (Vijayalakshmi & Sekar, 2013)	42
ตารางที่ 18	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Ghannam et al., 2016).....	44
ตารางที่ 19	ผลการทดสอบกำลังดัดคานคอนกรีต (Ghannam et al., 2016).....	45
ตารางที่ 20	ผลการทดสอบกำลังดึงแยกของคอนกรีต (Ghannam et al., 2016).....	46

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด (Jain et al., 2019).....	50
ตารางที่ 22 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบ	52
ตารางที่ 23 คุณสมบัติของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิต.....	53
ตารางที่ 24 คุณสมบัติของเส้นใยพอลิโพรไพลีน	53
ตารางที่ 25 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ	55
ตารางที่ 26 มาตรฐานการทดสอบและขนาดตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย	56
ตารางที่ 27 กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวครั้งแรก (First-cracking strength) และกำลังรับแรงดัด หลังจากการแตกร้าว (Post-cracking strength)	72
ตารางที่ 28 ผลการคำนวณค่าความเหนียวที่ระยะการแอ่นตัวที่ L/600 และ L/150	73
ตารางที่ 29 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 นาที.....	86
ตารางที่ 30 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ.....	90
ตารางที่ 31 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติ	90
ตารางที่ 32 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ.....	91
ตารางที่ 33 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษหินแกรนิต.....	91
ตารางที่ 34 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเศษหินแกรนิต	92
ตารางที่ 35 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของเศษหินแกรนิต.....	92
ตารางที่ 36 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก	93
ตารางที่ 37 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก	94
ตารางที่ 38 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของแก้วลอย	94
ตารางที่ 39 ข้อมูลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	95
ตารางที่ 40 ข้อมูลการทดสอบการรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	96
ตารางที่ 41 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงดัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน	100

ตารางที่ 42 ข้อมูลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 102

ตารางที่ 43 ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักที่หายไปหลังเผาไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต..... 104

ตารางที่ 44 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงอัดคงค้างหลังเผาไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต..... 108



สารบัญรูป

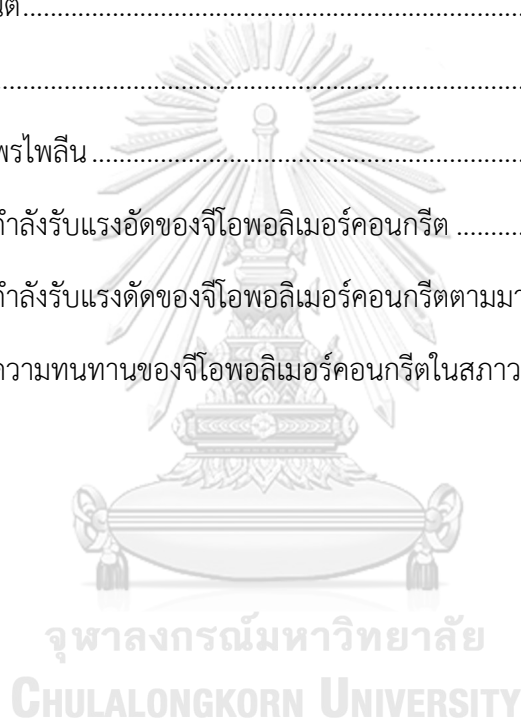
หน้า

รูปที่ 1 ลักษณะขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจากเครื่อง Scanning Electron Microscope	6
รูปที่ 2 โครงสร้างสามเหลี่ยมของจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1994)	8
รูปที่ 3 กระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าถ่านหิน (Zhuang et al., 2016).....	9
รูปที่ 4 ระดับความชื้นในมวลรวม (Neville, 2011).....	14
รูปที่ 5 การเชื่อมรอยแตกร้าวของคอนกรีตโดยเส้นใย (Huang et al., 2015).....	16
รูปที่ 6 กลไกการหลุดล่อนของคอนกรีตที่เกิดจากความดันไอ	17
รูปที่ 7 ลักษณะการหลุดล่อนของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ (Jansson, 2013).....	18
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Water glass) และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Rattanasak & Chindapasirt, 2009).....	21
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่ากำลังรับแรงอัด (Wongsa et al., 2016).....	23
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่ากำลังรับแรงดึงแยก (Wongsa et al., 2016)	23
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่าการยุบตัว (Wongsa et al., 2016).....	24
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใย	25
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Sukontasukkul, 2004)	25
รูปที่ 14 ค่าความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Sukontasukkul, 2004)	26
รูปที่ 15 รอยแตกร้าวที่ถูกเชื่อมด้วยเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Kakooei et al., 2012).....	28
รูปที่ 16 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ภัทรชัย พงษ์โสภา, 2559).....	29

รูปที่ 17 ความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ธรรมดาและจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Sukontasukkul et al., 2018).....	33
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว	34
รูปที่ 19 ค่าความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์ธรรมดาและจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....	34
รูปที่ 20 ลักษณะของเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายในคอนกรีตก่อนการเผาไหม้ (Han et al., 2005)....	37
รูปที่ 21 ลักษณะของเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายในคอนกรีตหลังการเผาไหม้ (Han et al., 2005)....	37
รูปที่ 22 โครงสร้างระดับจุลภาคภายในเนื้อคอนกรีต UHPC เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน	39
รูปที่ 23 ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาและแทนที่ทรายด้วยเศษหินปูนร้อยละ 25, 50 และ 75 (Omar et al., 2012).....	40
รูปที่ 24 ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยเศษหินแกรนิต ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 (Vijayalakshmi & Sekar, 2013).....	42
รูปที่ 25 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม (Vijayalakshmi & Sekar, 2013)	43
รูปที่ 26 กำลังอัดของคอนกรีตอายุ 7 วัน และ 28 วัน (Ghannam et al., 2016).....	44
รูปที่ 27 ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบกำลังดัด (Ghannam et al., 2016).....	45
รูปที่ 28 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิต (Singh et al., 2016).....	47
รูปที่ 29 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและปริมาณการเติมเศษหินแกรนิต	47
รูปที่ 30 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวและปริมาณการเติมเศษหินแกรนิต	48
รูปที่ 31 กำลังรับแรงอัดกับปริมาณการแทนที่เศษหินแกรนิต (Jain et al., 2019)	50
รูปที่ 32 กำลังรับแรงดัดกับปริมาณการแทนที่เศษหินแกรนิต (Jain et al., 2019)	51
รูปที่ 33 เส้นใยพอลิโพรไพลีน	53
รูปที่ 34 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่	54
รูปที่ 35 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1609	57
รูปที่ 36 คานตัวอย่างที่ถูกกดในลักษณะ Third point loading และการติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน	57

รูปที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานตามมาตรฐาน ASTM-C1609 (2010).....	58
รูปที่ 38 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล .60	
รูปที่ 39 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	62
รูปที่ 40 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน	63
รูปที่ 41 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน	64
รูปที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน.....	65
รูปที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน.....	66
รูปที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน.....	67
รูปที่ 45 f_{cc} ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ.....	68
รูปที่ 46 ร้อยละของแรงกระทำที่ตกลงจาก First-cracking load.....	70
รูปที่ 47 f_{pc} ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติและเสริมเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน.....	71
รูปที่ 48 ค่าความเหนียวที่ระยะการแอ่นตัวที่ L/600.....	74
รูปที่ 49 ค่าความเหนียวที่ระยะการแอ่นตัวที่ L/150.....	74
รูปที่ 50 ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต	75
รูปที่ 51 ลักษณะการแตกร้าวแบบรอยร้าวหยุดเคลื่อนที่ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใย	76
รูปที่ 52 ลักษณะการเสียรูปของเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายใต้การรับกำลังดัด	76
รูปที่ 53 ร้อยละปริมาณโพรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	77
รูปที่ 54 ร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	78
รูปที่ 55 อุณหภูมิทดสอบสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834	79
รูปที่ 56 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที	80
รูปที่ 57 ผิวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังจากการทดสอบเผาไฟ.....	81
รูปที่ 58 โพรงภายในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เกิดจากการหลอมละลายของเส้นใยพอลิโพรไพลีน....	82

รูปที่ 59 ร้อยละน้ำหนักรั่วที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 30 นาที.....	83
รูปที่ 60 ร้อยละน้ำหนักรั่วที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 60 นาที.....	84
รูปที่ 61 ร้อยละน้ำหนักรั่วที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 90 นาที.....	84
รูปที่ 62 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 30 นาที.....	87
รูปที่ 63 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 60 นาที.....	87
รูปที่ 64 ทฤษฎีธรรมชาติ.....	111
รูปที่ 65 เศษหินแกรนิต.....	111
รูปที่ 66 ถ้ำลอย.....	111
รูปที่ 67 เส้นใยพอลิโพรไพลีน.....	112
รูปที่ 68 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต.....	112
รูปที่ 69 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1609.....	113
รูปที่ 70 การทดสอบความทนทานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้.....	113



บทที่ 1 บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม โดยประเทศที่มีความเติบโตและมั่นคงทางเศรษฐกิจ จะแสดงในรูปของโครงสร้างพื้นฐานสาธารณูปโภคเป็นสำคัญ งานด้านวิศวกรรมโยธาถือเป็นงานหลักในการขับเคลื่อน ดังนั้นแล้วงานวิจัยและนวัตกรรมด้านวัสดุจะส่งผลในการส่งเสริมการเติบโตแบบก้าวกระโดดของประเทศ ดังนั้นประเทศที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีจึงเน้นในงานวิจัยและนวัตกรรมเป็นอย่างมาก เช่นเดียวกันการวิจัยด้านวัสดุทดแทน วัสดุรีไซเคิล เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมพร้อมทั้งพัฒนาวัสดุงานก่อสร้างชนิดใหม่ ๆ จึงมีบทบาทความสำคัญอย่างมาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับการคิดค้นและนิยมใช้งานมาอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาที่ยาวนานตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีความสะดวกและง่ายต่อการทำงานและยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี โดยไม่ว่าจะเป็นงานคอนกรีตขนาดเล็กจนถึงงานคอนกรีตขนาดใหญ่ ทั้งในปัจจุบันยังมีการทดลองและวิจัย เพื่อศึกษาในการพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาอย่างต่อเนื่อง การที่จะผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาได้นั้นจะต้องเกิดจากกระบวนการเผาวัตถุดิบที่มีซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก โดยจะต้องนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,400–1,600 องศาเซลเซียส และจากนั้นนำมาบดให้ละเอียด ในขณะเดียวกันขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการระเบิดวัสดุซึ่งได้แก่ หิน วิธีการลำเลียง ขบวนการเผาไหม้ ตลอดจนขบวนการบดส่วนผสมให้ละเอียด ผลกระทบจากกระบวนการผลิตดังกล่าวนี้ จะต้องมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในช่วงปี ค.ศ.1990 จากการศึกษาของ Davidovits (1994) พบว่าอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จนทำให้เกิดการปนเปื้อนของก๊าซดังกล่าว มีปริมาณสูงถึง 350 ppm จากการผลิตปูนซีเมนต์ 1,800 ล้านตัน ดังนั้น เพื่อที่จะสามารถลดผลกระทบดังกล่าว แนวทางหนึ่งที่สามารถกระทำได้ ก็คือ การนำวัสดุทดแทนมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งวัสดุทดแทนดังกล่าวอาจได้จาก ถ้ำลอย ถ้ำกลบ หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ซึ่งโดยรวมวัสดุทดแทนดังกล่าวนี้เรียกว่า วัสดุปอซโซลาน โดยนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือเพื่อใช้ทดแทน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล เพื่อสามารถที่จะทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในส่วนผสมที่เหมาะสม

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุเชื่อมประสานเดิมที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำได้ (Nuaklong, Sata, & Chindaprasirt, 2016) วัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้มาจากการสังเคราะห์วัสดุพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินา อาทิเช่น แก้วลอย แก้วกลบ หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น โดยขบวนการสังเคราะห์จะเป็นการนำวัสดุพอลิเมอร์ดังกล่าวข้างต้น มาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่าง อันได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำมาผ่านขบวนการทางความร้อนเพื่อให้เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะได้อวสุใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป จากงานวิจัยของ Guo, Shi, and Dick (2010) พบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอย Class C (แบ่งตามมาตรฐาน ASTM C618) เมื่อนำมาทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งบ่มที่อุณหภูมิสูง 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มต่อที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 28 วัน พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดเท่ากับ 63.4 MPa ซึ่งถือได้ว่ามีกำลังอัดที่ดีเช่นเดียวกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์ นอกจากนี้การใช้แก้วลอยในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์เพื่อทดแทนวัสดุประสานที่ได้จากปูนซีเมนต์และน้ำจะสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสามารถประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ได้

ในปัจจุบันการผลิตมวลรวมหยาบจากวัสดุหินแกรนิตของโรงโม่หินที่ใช้เป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตในอุตสาหกรรมก่อสร้างทำให้เกิดกากวัสดุหินเหลือทิ้งซึ่งจะมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตต่อไปได้ นอกจากนั้นแล้วยังมีปริมาณกากหินฝุ่นตกค้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง การพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้วัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ร่วมกับการนำกากวัสดุหินฝุ่นเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์โดยนำมาเป็นส่วนผสมทดแทนทรายธรรมชาติ ถือว่าเป็นการผลิตวัสดุก่อสร้างที่สามารถกำจัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในอุตสาหกรรมโม่หินซึ่งมีกากหินฝุ่นเป็นวัสดุเหลือทิ้ง และอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าที่มีแก้วลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน

คุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดี แต่ความสามารถในการรับกำลังดึงและกำลังดัดต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์โดยการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนลงในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนจะสามารถเพิ่มความสามารถในการรับกำลังดึง

และกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ ทั้งยังเพิ่มคุณสมบัติด้านความเหนียวให้สูงขึ้น (Song, Hwang, & Sheu, 2005; Nazari, Maghsoudpour, & Sanjayan, 2015)

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ความทนทานและความสามารถในการทำงานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่ และผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถที่จะนำมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่กับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมทรายธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้และคุณสมบัติในด้านความสามารถในการรับกำลังอัด กำลังตัด โพรงและการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของเส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อคุณสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต
- 1.2.3 เพื่อหาอัตราส่วนของปริมาณทรายแกรนิตและเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เหมาะสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium fly ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง
- 1.3.2 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย
- 1.3.3 ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (คุณภาพมาตรฐานทางการค้า) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีซึ่งประกอบไปด้วย Na_2O , H_2O และ SiO_2 เท่ากับ 14.5%, 55.3% และ 30.0% ตามลำดับ
- 1.3.4 อัตราส่วนโดยมวลระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkali activator) กับเถ้าลอย (Fly ash) มีค่าเท่ากับ 0.6 และอัตราส่วนโดยมวลระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าคงที่เท่ากับ 1.0

- 1.3.5 อัตราส่วนระหว่างการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในอัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 0, 25, 50 และ 100
- 1.3.6 เพิ่มเส้นใยพอลิโพรไพลีนผสมลงไปในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ในปริมาณร้อยละ 0, 0.5 และ 1 โดยปริมาตรของคอนกรีต
- 1.3.7 ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกบ่มในอุณหภูมิห้องและคลุมด้วยพลาสติกจนกระทั่งถึงวันที่จะทดสอบ
- 1.3.8 ทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกขนาดหน้าตัด 10 cm สูง 20 cm โดยบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน 28 วัน และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM-C39 (2018)
- 1.3.9 ทดสอบความต้านทานของคอนกรีตภายใต้สภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดหน้าตัด 10 cm สูง 20 cm และบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน
- 1.3.10 ทดสอบหาค่ากำลังดัดของตัวอย่างคานขนาด 10x10x35 cm ตามมาตรฐาน ASTM-C1609 (2010) โดยบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน
- 1.3.11 ทดสอบการไหลแผ่ตัวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM-C1611 (2005)
- 1.3.12 ทดสอบหาปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำโดยใช้ตัวอย่างขนาด 10x10x10 cm ตามมาตรฐาน ASTM-C642 (2013)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ทรายจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในงานจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต
- 1.4.2 เพื่อเสริมความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีน
- 1.4.3 สามารถหาปริมาณการใช้ทรายแกรนิตและเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดตามความเหมาะสมของการใช้งาน

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หลังจากการเผาไหม้ของถ่านหินแล้ว เถ้าที่มีขนาดใหญ่จะตกลงสู่ก้นเตา ซึ่งจะถูกระบุว่าเถ้าก้นเตา ส่วนเถ้าที่มีขนาดระหว่าง 1 ถึง 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนซึ่งจะถูกระบุว่าเถ้าลอย ในประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าถ่านหินที่สำคัญอยู่หลายแห่ง แต่โรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่คือโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินที่สำคัญของประเทศไทย

โดยทั่วไปเถ้าลอยมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งได้มาหลังจากถ่านหินถูกเผาและหลอมละลาย ณ อุณหภูมิสูง เถ้าลอยส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลม ผิวไม่เรียบและมีรูเล็ก ๆ ดังรูปที่ 1 เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่สูง ถ่านหินที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นมี 4 ประเภท ได้แก่ แอนทราไซต์ (Antracite), บิทูมินัส (Bituminous), ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินที่มีคุณภาพดี เหมาะที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จำเป็นจะต้องมีความชื้นต่ำและให้ค่าความร้อนสูง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีอยู่ในถ่านหินทั้ง 4 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM-C618 (2005) สามารถแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ เถ้าลอย Class C และ Class F ซึ่งแบ่งตามคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

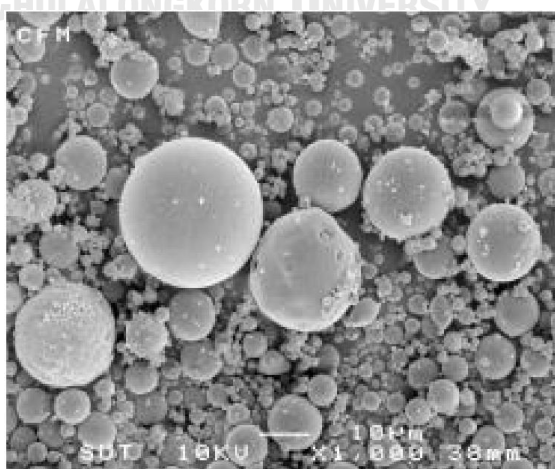
ตารางที่ 1 จำแนกมาตรฐานประเภทเถ้าลอยด้วยคุณสมบัติทางเคมีตาม ASTM-C618 (2005)

Chemical composition	Class of fly ash	
	Class C	Class F
Silica + Alumina + Ferrite, min (%)	50	70
SO ₃ , max (%)	5	5
Loss on ignition (LOI), max (%)	6	6
Na ₂ O (Alkali), max (%)	1.5	1.5
Moisture content, max (%)	3.0	3.0

เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคละเอียดเป็นผงรูปทรงกลมทั้งแบบแข็งหรือแบบกลวงและส่วนใหญ่เป็นแก้ว (อสัณฐาน) เถ้าลอยถ่านหินบิซมิเนสโดยทั่วไปคล้ายกับตะกอน (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร หรือตะแกรงหมายเลข 200) ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมักจะอยู่ในช่วง 2.1 ถึง 3.0 ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะอาจแตกต่างกันจาก 170 ถึง 1,000 ตร.เมตร/กิโลกรัม สีของเถ้าลอยสามารถเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีดำ ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเถ้าลอย

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบไปด้วยองค์ประกอบของแร่ต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกา ออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าที่ต่างกันในช่วงปริมาณตามแหล่งผลิตและชนิดของถ่านหิน สำหรับข้อกำหนดทางด้านเคมี ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กำหนดไม่ให้เกิดร้อยละ 5 เนื่องจากปริมาณซัลเฟตในเถ้าลอยมีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด เวลาในการก่อตัวและยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวด้วย

จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนไม่เกิน 35 % โดยน้ำหนัก จะมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้าในช่วงต้น เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่หายไปด้วยการแทนที่ของเถ้าลอย ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำลง อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังอัดในระยะยาวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เปลี่ยนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โดยสัดส่วนปริมาณเถ้าลอยที่นิยมใช้ในการแทนปูนซีเมนต์ในปัจจุบันจะอยู่ที่ปริมาณ 10-35%



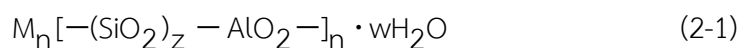
รูปที่ 1 ลักษณะขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจากเครื่อง Scanning Electron Microscope

(ทิวากร ศรีจำปา, 2556)

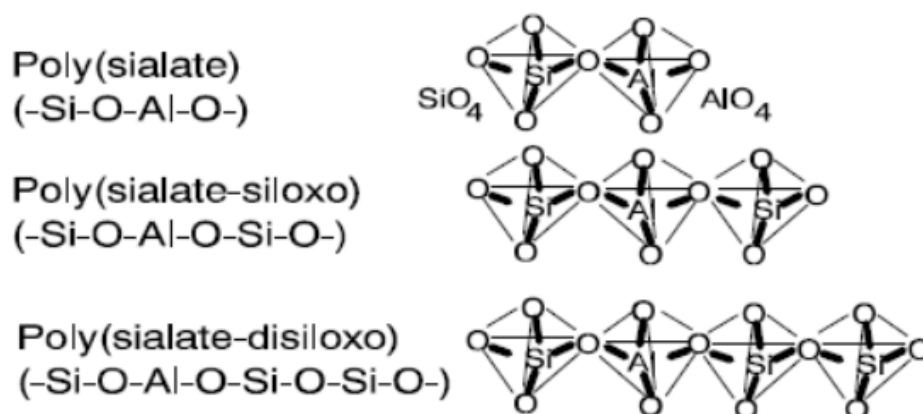
2.1.2 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุในการเชื่อมประสานมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติอยู่ในรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก อย่างเช่น เถ้าลอย ดินขาวเผา เป็นต้น นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะได้วัสดุเชื่อมประสานที่แข็งตัวและอนุภาคยึดเกาะกันได้ดี และมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ซึ่งจีโอพอลิเมอร์ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Dr. Victor Glukhovsky ในปี ค.ศ.1950 และหลังจากจากนั้นในปี ค.ศ.1970 Prof. Joseph Davidovits เป็นผู้นิยามจีโอพอลิเมอร์เป็นคนแรก

Palomo, Grutzeck, and Blanco (1999) ได้อธิบายเกี่ยวกับการกระตุ้นเถ้าลอยให้สามารถทำปฏิกิริยาเชื่อมประสาน ซึ่งสามารถทำได้สองวิธี วิธีแรกคือใช้สารละลายด่างที่มีความเข้มข้นต่ำทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีส่วนประกอบด้วยซิลิกาและแคลเซียม ซึ่งจะได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H) ส่วนวิธีที่สองใช้สารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูงเป็นตัวกระตุ้นทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีส่วนประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักกับสารละลายซิลิเกตและสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูงนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) หรือ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งปฏิกิริยานี้ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า จีโอพอลิเมอร์ มีสูตรทางเคมีดังนี้



โดยที่	M	คือ	ธาตุโลหะอัลคาไลน์
	-	คือ	การยึดเกาะของพันธะ
	z	คือ	จำนวนโมเลกุลของ SiO ₂ โดยจะมีค่าเป็น 1, 2 หรือ 3
	w	คือ	จำนวนโมเลกุลของน้ำ
	n	คือ	จำนวนโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ (Degree of Polycondensation)



รูปที่ 2 โครงสร้างสามเหลี่ยมของจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1994)

ปฏิกิริยาเคมีของจีโอพอลิเมอร์หรือปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบซิลิกาและอะลูมินาภายในวัสดุตั้งต้นกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง โดยใช้ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีวัสดุหลายประเภทที่สามารถนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับใช้สังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ เช่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุง และดินขาวเผา เป็นต้น โดยจำเป็นจะต้องมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่เหมาะสม จากรูปที่ 3 เป็นกระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าเป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งในเถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาได้ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูงจนเกิดการแตกตัวของซิลิกาและอะลูมินา แล้วเริ่มรวมตัวกันใหม่เป็น Aluminosilicate oligomers หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยาโอลิโกเมอร์ไรเซชัน (Oligomerization) รวมตัวกันเป็น Poly (Sialate) และเกิดการรวมตัวของของโครงสร้าง Poly (Sialate) หลายตัว เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) จนก่อตัวเป็นจีโอพอลิเมอร์เพสต์ (Geopolymer paste) และนำไปผ่านกรรมวิธีการบ่มเพื่อที่จะพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดจนเป็นจีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์/คอนกรีต ที่มีส่วนผสมมาจากเถ้าลอยโรงไฟฟ้า



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าถ่านหิน (Zhuang et al., 2016)

2.1.3 มวลรวม (Aggregate)

2.1.3.1 ประเภทของมวลรวม

การแบ่งประเภทของมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) ได้แก่ หินหรือหินกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไปหรือไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ กรวด หินย่อย หรือหินโม

2. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ได้แก่ มวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือต้องค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

2.1.3.2 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม มีอิทธิพลต่อคุณภาพของคอนกรีต สัดส่วนผสม และราคาของคอนกรีต หินทรายที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ต้องสะอาด แข็งแกร่ง ทนทาน มีเหลี่ยมคม ไม่ขยายตัวมาก มีสารหรือสิ่งสกปรกที่จะทำให้คอนกรีตคุณภาพเสื่อมน้อยที่สุด มีส่วนขนาดคล้อยอยู่ในขนาดที่กำหนด สิ่งต่าง ๆ ดังกล่าวจะช่วยให้คอนกรีตออกมามีคุณภาพที่ดี ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่จำเป็นต้องมีดังนี้

1. ความแข็งแรง (Strength) มวลรวมต้องมีความสามารถในการรับน้ำหนักกดอัด ที่ไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงอัดที่ต้องการของคอนกรีต โดยทั่วไปมวลรวมจะมีค่าการรับน้ำหนักกดอัดอยู่ระหว่าง 80-500 MPa และเฉลี่ยอยู่ที่ 200 MPa ซึ่งจะทดสอบโดยวิธี Crushing value test ซึ่งแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังทดสอบ Crushing strength ของหินประเภทต่างๆ (Neville, 2011)

Rock group	Crushing strength (MPa)
Basalt	200
Flint	205
Gabbro	195
Granite	185
Gritstone	220
Hornfels	340
Limestone	165
Prophyry	230
Quartzite	330
Schist	245

2. ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion resistance) เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของหินที่จะนำมาใช้งาน หินที่ดีต้องทนทานต่อแรงกระแทกและเสียดสีมาก ๆ ได้ ซึ่งสามารถหาค่าการสึกกร่อนได้จากการทดสอบลอสแอนเจลีส (Los Angeles test) ตามมาตรฐาน ASTM-C131 (2014) ซึ่งแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการสึกกร่อนของหินประเภทต่าง ๆ (Neville, 2011)

Rock group	Abrasion value (%)
Basalt	17.6
Flint	19.2
Granite	18.7
Limestone	16.5
Quartzite	18.9

3. ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับความพรุนและการดูดซึมน้ำของมวลรวม มวลรวมจะต้องมีรูพรุนพอที่จะดูดซึมน้ำ มีช่องว่างพอที่จะให้น้ำขยายตัวได้ในอากาศหนาว ไม่อย่างนั้นจะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

4. ความคงตัวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical stability) มวลรวมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ มวลรวมในบางสถานที่ที่มีสารเคมีผสมอยู่ในเนื้อหินจะทำปฏิกิริยากับต่างในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นลักษณะร่วน และขยายตัวทำให้เกิดรอยร้าวทั่วไปในคอนกรีต ในกรณีที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มีเปอร์เซ็นต์ต่ำ (Low-alkali cement)

5. ลักษณะรูปทรงและพื้นผิว (Particle shape and Surface texture) รูปทรงและลักษณะพื้นผิวของมวลรวมมีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งคอนกรีตที่อยู่ในสถานะเหลวหรือแข็งตัว ในด้านของรูปทรง มวลรวมที่มีรูปทรงเหลี่ยมคมจะมีการช่วยยึดขวางกันระหว่างอนุภาคสูง ซึ่งจะส่งผลต่อคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมประเภทนี้มีความสามารถในการเทต่ำ แต่การที่มีลักษณะของการยึดขวางที่ดีก็จะส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม มวลรวมที่มีลักษณะทรงกลมนั้น จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทสูงขึ้น เนื่องจากไม่มีการขัดกันของอนุภาคเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของคอนกรีตสด ในส่วนของพื้นผิว คอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมที่มีผิวหยาบมักจะสามารถในการเทที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมที่มีผิวเรียบ ดังนั้นแล้ว ในการเลือกรูปทรงและพื้นผิวของมวลรวมจึงต้องมีการผสมผสานระหว่างมวลรวมที่มีผิวหยาบและผิวละเอียดเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับเนื้อซีเมนต์

6. ความสะอาด มวลรวมจำเป็นต้องสะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกปนเปื้อนหรือสารที่จะทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตในระยะยาว

7. ขนาดคละหรือการกระจายตัวของมวลรวม (Aggregate grading) มวลรวมที่จะใช้ผสมคอนกรีตต้องมีการกระจายตัวตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งจะช่วยให้มวลรวมเรียงตัวกันได้แน่นและมีช่องว่างน้อยลง ช่วยเพิ่มความสามารถในการเท และช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง คือ เพียงพอที่จะเคลือบผิวของมวลรวมทั้งหมด และเติมเต็มช่องว่างให้มวลรวมยึดติดกัน ซึ่งการกระจายตัวของขนาดของมวลรวมสามารถหาได้จากการทดสอบ Sieve analysis ตามมาตรฐาน ASTM C136 ส่วนข้อกำหนดคุณสมบัติทั่วไปของมวลรวมในงานคอนกรีตสามารถหาได้จากมาตรฐาน ASTM C33

2.1.3.3 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน แต่เนื่องจากมวลรวมมีโพรงน้ำซึมผ่านได้และน้ำซึมผ่านไม่ได้ ดังนั้นทำให้ปริมาตรของมวลรวมมีหลายความหมายและมีหลายประเภทซึ่งมี 3 ประเภทที่นิยมใช้กัน

1. ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity) สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของแข็งทั้งหมดรวมช่องว่างภายใน

2. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity) สามารถคำนวณจากปริมาตรของแข็งรวมกับปริมาตรของช่องว่างทั้งหมดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (ไม่รวมปริมาตรของช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏของมวลได้แสดงในตารางที่ 4

3. ความถ่วงจำเพาะสถานะแบบอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity on Saturated surface dry) ช่องว่างทั้งหมดรวมของแข็งและน้ำที่อยู่ในช่องว่างที่ซึมผ่านได้ด้วย โดยพิจารณาว่าน้ำที่อยู่ในช่องว่างที่ซึมผ่านได้เป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมและไม่ทำปฏิกิริยาความถ่วงจำเพาะของวัสดุขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสมและความพรุนของก้อนวัสดุ ปริมาณความชื้นอาจทำให้ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมเปลี่ยนแปลงไปได้ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่หาได้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาสัดส่วนการผสมของหินและทรายในคอนกรีต โดยใช้เป็นตัวเปลี่ยนน้ำหนักที่กำหนดให้ของวัสดุเป็นปริมาณเนื้อแท้หรือเปลี่ยนปริมาตรเนื้อแท้ไปเป็นน้ำหนักเพื่อหาปริมาณวัสดุสำหรับการผสมคอนกรีต ซึ่งการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมสามารถทำได้ตามมาตรฐาน ASTM-C127 (2007) และ ASTM-C128 (2001) และทำการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะแต่ละประเภทดังนี้

$$\text{Bulk specific gravity} = A / (B - C) \quad (2-2)$$

$$\text{Apparent specific gravity} = A / (A - C) \quad (2-3)$$

$$\text{Bulk specific gravity on SSD} = B / (B - C) \quad (2-4)$$

โดยที่ A = น้ำหนักแห้ง
 B = น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง
 C = น้ำหนักชั่งในน้ำ

ตารางที่ 4 แสดงค่า Apparent specific gravity ของมวลรวมชนิดต่าง ๆ (Neville, 2011)

Rock group	Average specific gravity
Basalt	2.80
Flint	2.54
Granite	2.69
Gritstone	2.69
Hornfels	2.82
Limestone	2.66
Prophyry	2.73
Quartzite	2.62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.3.4 รูปพรุนและการดูดซึมน้ำ

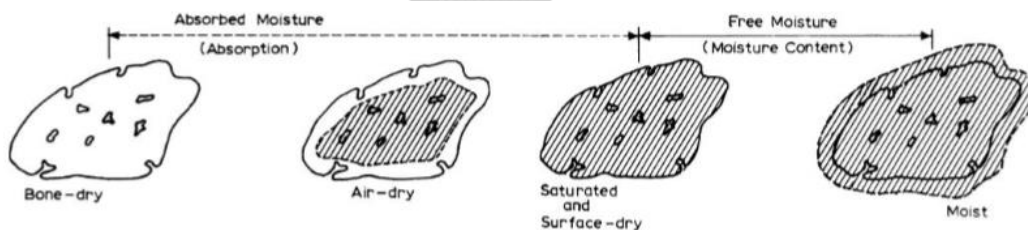
รูปพรุนในมวลรวมนั้นมีทั้งที่เชื่อมต่อถึงกันและไม่เชื่อมต่อถึงกัน การที่มวลรวมเป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีตโดยมากกว่าร้อยละ 60 ถึง 70 โดยปริมาตร รูปพรุนของมวลรวมย่อมต้องส่งผลโดยตรงต่อความพรุนของเนื้อคอนกรีตโดยรวมเช่นกัน โดยทั่วไปปริมาตรของรูปพรุนสัมพันธ์โดยตรงกับการดูดซึมน้ำของมวลรวม โดยมวลรวมที่มีความพรุนสูงก็ต้องมีการดูดซึมน้ำที่สูงเช่นกัน เมื่อนำมวลรวมที่มีความพรุนสูงมาผสมคอนกรีต ความพรุนของมวลรวมก็จะดูดน้ำออกจากส่วนผสมของคอนกรีตในปริมาณที่สูงทำให้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่เป็นตามที่ออกแบบไว้

ค่าการดูดซึมน้ำนั้นสามารถหาได้จากการนำผลต่างระหว่างน้ำหนักมวลรวมแห้งกับมวลรวมอิมัต์ผิวแห้งหารด้วยน้ำหนักของมวลรวมแห้งและคูณด้วย 100 ดังแสดงในสมการที่ (2-5)

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Absorption)} = \left[\frac{B - A}{A} \right] \times 100 \quad (2-5)$$

ค่าการดูดซึมน้ำมีผลต่อระดับความชื้นของมวลรวมเช่นกัน โดยระดับความชื้นของมวลรวมสามารถแบ่งได้ 4 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

1. มวลรวมชุ่มน้ำ (Wet) คือ มีน้ำเต็มช่องว่างทั้งหมดของมวลรวม ผิวนอกเปียกชุ่ม
2. มวลรวมอิมัต์ผิวแห้ง (Saturated surface dry) คือ มีน้ำเต็มช่องว่างทั้งหมดของมวลรวมผิวนอกเปียกแต่ไม่ชุ่มน้ำ
3. มวลรวมผิวแห้ง (Air dry) คือ ผิวนอกแห้ง แต่ยังคงมีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างของมวลรวม
4. มวลรวมแห้งสนิท (Oven dry) คือ ทั้งผิวนอกและช่องว่างของมวลรวมทั้งหมดแห้งสนิท



รูปที่ 4 ระดับความชื้นในมวลรวม (Neville, 2011)

ระดับความชื้นของมวลรวมก่อนนำมาผสมคอนกรีตนั้นมีผลต่อความสามารถในการเทของคอนกรีต มวลรวมที่แห้งมากจะดูดน้ำออกจากส่วนผสมของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตสูญเสียไปบางส่วน ซึ่งส่งผลให้มีความสามารถในการเทที่ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ ในทางกลับกันมวลรวมที่มีความชื้นมากเกินไปหรือเกินที่ระดับมวลรวมอิมัต์ผิวแห้งจะคายน้ำเข้าสู่ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความเหลวมากเกินไป ทำให้สัดส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) สูงเกินกว่าที่ออกแบบไว้ และจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าที่ออกแบบไว้

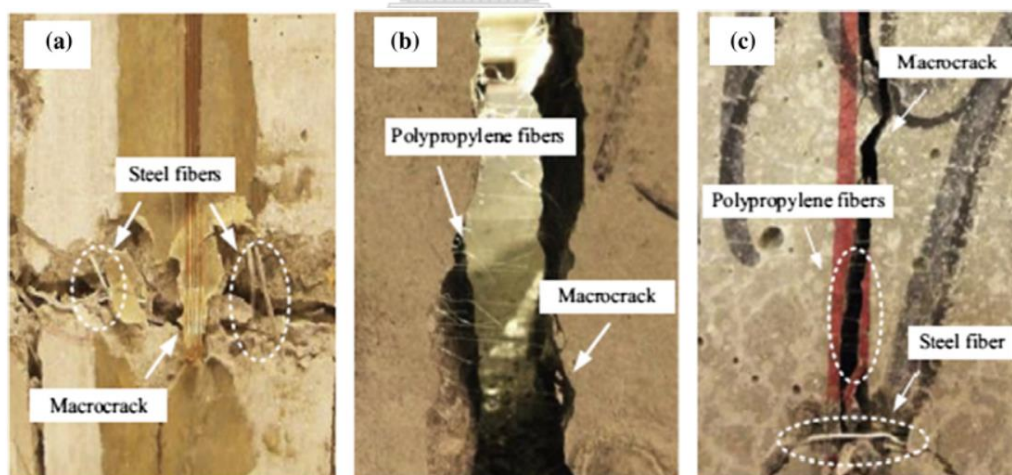
2.1.4 เส้นใยเสริมคอนกรีต

คอนกรีตถูกจัดให้เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยืดตัว (Low tensile strain capacity) และมักจะมีการหดตัวแห้ง (Shrinkage) เนื่องจากการสูญเสียเนื้ออย่างรวดเร็วของช่วงการก่อตัวของคอนกรีตระยะแรก ซึ่งการหดแห้งตัวดังกล่าวจะก่อให้เกิดความเค้นดึง (Tensile stress) ในจุดที่มีการยึดรั้ง (Constraints) และเมื่อคอนกรีตไม่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระและมีความเค้นดึงมากกว่ากำลังประลัยรับแรงดึง (Ultimate tensile strength) ซึ่งจะเกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีต และมีผลกระทบต่อความแข็งแรง ความคงทนและความเชื่อมั่นในโครงสร้างคอนกรีต นอกจากนี้ การที่คอนกรีตเป็นวัสดุที่แข็งเปราะ มีพลังงานของการแตกร้าวที่ต่ำ (Low fracture energy) ดังนั้นการขยายตัวของรอยร้าวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดการวิบัติได้อย่างฉับพลันเมื่อเริ่มมีการแตกร้าว และในสภาวะหลังการแตกร้าว คอนกรีตจึงไม่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้อย่างสิ้นเชิง จากข้อเสียดังกล่าว สามารถแก้ไขได้โดยการเสริมเส้นใยในคอนกรีตที่มีความเหมาะสมทั้งชนิดและปริมาณ และเรียกคอนกรีตชนิดนี้ว่า คอนกรีตเสริมเส้นใย (Fiber reinforced concrete, FRC) โดยมีสมมติฐานว่าการกระจายตัวของเส้นใยภายในคอนกรีตเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและมีทิศทางแบบสุ่ม เมื่อคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวขึ้น และรอยร้าวมีแนวผ่านเส้นใยตั้งรูปที่ 5 เส้นใยจะช่วยรับความเค้นดึง โดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยที่ฝังตัวอยู่ในคอนกรีต ในกรณีที่มีความเค้นดึงมีค่าไม่มากนักและเชื่อมรอยร้าวของคอนกรีต เส้นใยที่มีปริมาณมากเพียงพอที่จะช่วยลดอัตราการขยายตัวของรอยร้าวไม่ให้ขยายตัว และเมื่อรอยแตกขยายตัวจนคอนกรีตไม่สามารถรับกำลังได้ เส้นใยจะยังคงทำหน้าที่รับความเค้นเหล่านั้นต่อไปจนกระทั่งถึงจุดที่เส้นใยไม่สามารถรับความเค้นได้อีก ซึ่งการเสริมเส้นใยในคอนกรีต เป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับคอนกรีตและป้องกันการวิบัติของคอนกรีตแบบฉับพลัน (Huang et al., 2015; มาโนช สรรพกิจทิพากร, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต, & ปิติ สุขนธสุขกุล, 2555)

เส้นใยที่ใช้ในการผสมคอนกรีต อาจผลิตมาจากวัสดุที่หลากหลาย อาทิ เหล็ก พลาสติก แก้ว หรือวัสดุจากธรรมชาติอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยมีรูปทรงหลายแบบ ได้แก่ กลมแบน และอาจมีผิวเรียบหรือหยาบ ซึ่งรูปทรงของเส้นใยนั้นมีอิทธิพลต่อการควบคุมรอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยที่เส้นใยที่มีพื้นผิวที่ละเอียดกว่าจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมรอยแตกร้าวได้ดีกว่าเส้นใยที่หยาบ และเส้นใยที่ยาวจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมรอยแตกร้าวได้ดีกว่าเส้นใยที่สั้น (Banthia & Gupta, 2006)

ตารางที่ 5 ประเภทและคุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใย (Pakravan, Latifi, & Jamshidi, 2017)

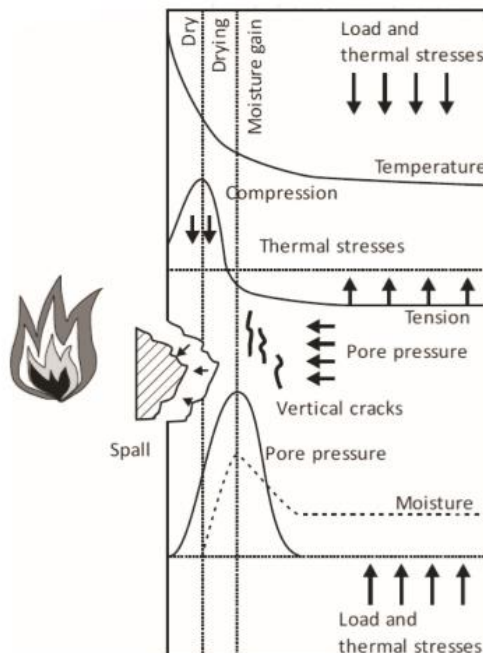
Fiber type	Density (g/cm ³)	Modulus of Elasticity (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation At break (%)
Polypropylene (PP)	0.91	1.5-4.2	240-550	50-80
Nylon (PA)	1.14	2.5-5.17	750-1000	15-30
Polyacrylonitril (PAN)	1.18	2-3	240-1000	20-45
Polyvinyl-alcohol (PVA)	1.29-1.3	20-42.8	1100-1600	6-7
Steel (ST)	7.84	200	500-2000	0.5-3.5
Polyethylene (Nuaklong et al.)	0.92-0.96	5-100	80-600	4-100
Cellulose	1.2	10	300-500	-
Jute (Ju)	1.34-1.46	13-26.5	400-800	1.8
Sisal (Ss)	1.33	9-22	600-700	2-3



รูปที่ 5 การเชื่อมรอยแตกร้าวของคอนกรีตโดยเส้นใย (Huang et al., 2015)

2.1.5 การหลุดล่อนของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้

โดยลักษณะทั่วไปของคอนกรีตนั้นจัดเป็นวัสดุที่ทนไฟได้ดี แต่เมื่อสัมผัสอุณหภูมิที่สูงมากไป ในระยะเวลาช่วงหนึ่ง โครงสร้างภายในและคุณสมบัติของคอนกรีตจะเปลี่ยนไปนอกเหนือจากเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการขยายตัวของวัสดุที่ต่างกัน ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงจากที่ได้ ออกแบบไว้ที่อุณหภูมิปกติ นอกจากนี้ความเสียหายยังเป็นผลมาจากช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ตามธรรมชาติที่สามารถกักเก็บน้ำอิสระไว้ได้ แต่เมื่อได้รับความร้อนมาระยะเวลาหนึ่ง ทำให้น้ำในช่องว่างเกิดการระเหย ก่อให้เกิดความดันไอในโพรง (Pore pressure) และอาจดันให้คอนกรีตแตกร้าวหรือหลุดล่อนออก (Spalling) ซึ่งจากรูปที่ 6 สามารถอธิบายกลไกการหลุดล่อนได้ซึ่ง ประกอบไปด้วย ความดันไอในโพรงและหน่วยแรงเชิงความร้อน (Thermal stress) โดยที่ความดันจากไอน้ำที่เปลี่ยนสถานะจากน้ำในโพรงภายในคอนกรีตเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประกอบด้วยหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของคอนกรีตเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีตเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและน้ำหนักบรรทุกของคอนกรีตที่รับภาระอยู่นั้น จะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวและหลุดล่อนออกดังแสดงในรูปที่ 7 (Jansson, 2013; ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 2556)



รูปที่ 6 กลไกการหลุดล่อนของคอนกรีตที่เกิดจากความดันไอ และหน่วยแรงเชิงความร้อน (So, 2016)



รูปที่ 7 ลักษณะการหลุดล่อนของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ (Jansson, 2013)

ระดับความรุนแรงของการหลุดล่อนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการทั้งคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ ความสามารถในการให้ซึมผ่าน (Permeability) อายุ กำลังรับแรงอัด ชนิดและขนาดของมวลรวม รวมทั้งปริมาณและระยะหุ้มเหล็กเสริม และอัตราส่วนน้ำหนักรวม โดยสามารถจำแนกลักษณะการหลุดล่อนของคอนกรีตออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ การหลุดล่อนของมวลรวม (Aggregates spalling) การหลุดล่อนแบบระเบิด (Explosive spalling) การหลุดล่อนบริเวณผิว (Surface spalling) การหลุดล่อนแบบลอกหลุด (Sloughing-off spalling) การหลุดล่อนบริเวณมุม (Corner spalling) และการหลุดล่อนหลังทำให้เย็น (Post-cooling spalling) ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 6 ในปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุหรือวิธีการที่สามารถช่วยลดความรุนแรงจากการแตกและหลุดล่อนของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ โดยใช้เส้นใย Polypropylene เพิ่มลงในส่วนผสมของคอนกรีต โดยถ้าคอนกรีตอยู่ในสภาวะเพลิงไหม้เส้นใย Polypropylene จะละลายเมื่ออุณหภูมิสูงประมาณ 165 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดโพรงขนาดเล็กภายในเนื้อคอนกรีต ช่วยลดความดันไอจากการระเหยของน้ำภายในโพรงของคอนกรีต ซึ่งช่วยลดความรุนแรงและป้องกันการหลุดล่อนได้ (Han et al., 2005; Daungwilailuk et al., 2019; ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 2556; สุวิมล สัจจาณิษฐ์, 2560)

ตารางที่ 6 รายละเอียดและลักษณะของการหลุดล่อนประเภทต่างๆ (ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 2556)

ประเภทของการหลุดล่อน	เวลาที่เกิด	ลักษณะการเกิด	ผลกระทบต่อโครงสร้าง	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหลุดล่อน
การหลุดล่อนของมวลรวม	7-30 นาที	กะเทาะ/มีเสียงเล็กน้อย	เล็กน้อย	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต
การหลุดล่อนบริเวณมุม	30-90 นาที	ไม่รุนแรง/ ไม่มีเสียง	อาจรุนแรง	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต เหล็กเสริม
การหลุดล่อนบริเวณผิว	7-30 นาที	รุนแรง/มีเสียง ร้าว	อาจรุนแรง	ความร้อน คอนกรีต
การหลุดล่อนแบบระเบิด	7-30 นาที	รุนแรง/มีเสียง ระเบิด	รุนแรง	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต หน้าตัด เหล็กเสริม น้ำหนักบรรทุก การเนื้ยวรั้ง
การหลุดล่อนแบบลอกหลุด	เมื่อคอนกรีต เสื่อมสภาพ	ไม่รุนแรง/ ไม่มีเสียง	อาจรุนแรง	ความร้อน คอนกรีต เหล็กเสริม น้ำหนักบรรทุก การเนื้ยวรั้ง
การหลุดล่อนหลังทำให้เย็น	ระหว่างและ หลังทำให้ เย็น	ไม่รุนแรง/ ไม่มีเสียง	อาจรุนแรง	ความร้อน มวลรวม คอนกรีต เหล็กเสริม น้ำหนักบรรทุก การเนื้ยวรั้ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

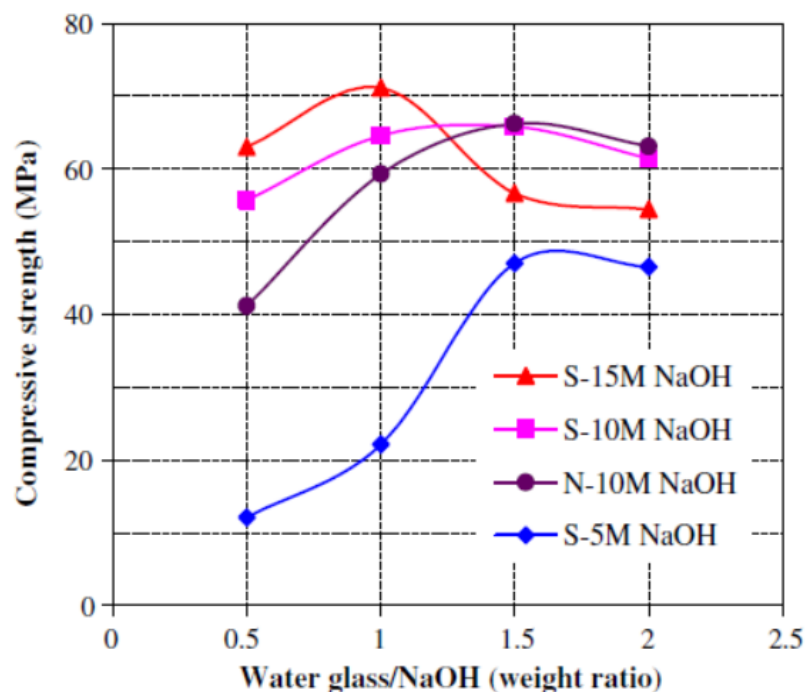
2.2.1 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จากการศึกษาของ Lloyd and Rangan (2010) พบว่า ความสามารถในการรับกำลังอัดและความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์เพสต์ และอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , NS) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , NH) หากค่าอัตราส่วน NS/NH มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ Guo et al. (2010) ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) ต่อแก้วลอย Class C (แบ่งตามมาตรฐาน ASTM C618) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 พบว่า สามารถรับกำลังอัดได้ 63.4 MPa โดยอบที่อุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และทำการบ่มต่อที่อุณหภูมิประมาณ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน ซึ่งกำลังรับแรงอัดสูงสุดนั้นเกิดขึ้นเมื่อแก้วลอยถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต นอกจากนั้นยังได้กล่าวไว้ว่าการใช้แก้วลอยเป็นส่วนผสมในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ถือเป็นการประหยัดพลังงาน และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งปล่อยออกมาจากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการอนุรักษ์ทรัพยากรและรักษาสิ่งแวดล้อม

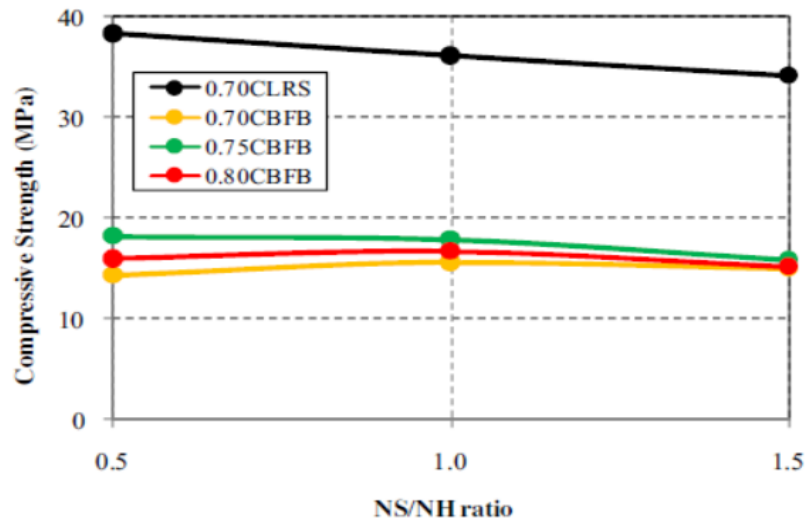
จากการศึกษาของ Rattanasak and Chindaprasirt (2009) เกี่ยวกับอิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอย พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยเป็นส่วนผสม จากผลการทดสอบพบว่าการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีความสามารถในการรับกำลังอัดน้อยที่สุด แต่เมื่อผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 และ 15 โมลาร์ และมีอัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 1.0 ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าสูงถึง 70 MPa แต่ที่ความเข้มข้นที่ 15 โมลาร์ และอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ที่มากกว่า 1.0 จะมีความสามารถในการรับกำลังอัดที่ลดลงอย่างมาก เมื่อใช้ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และ NS/NH มากกว่า 1.0 นั้น พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดจะลดลงตามค่าอัตราส่วน NS/NH ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในส่วนผสมอื่น ๆ แล้ว จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมลาร์ และอัตราส่วน NS/NH ที่มากกว่า 1.0 มีความสามารถในการ

การรับกำลังอัดที่ดีกว่าส่วนผสมอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงได้จากรูปที่ 8 ส่วนวิธีการผสมจีโอพอลิเมอร์ นั้น การผสมแบบแยก (Separate mixing, S) คือ การผสมเถ้าลอยกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตไปเป็นเวลาอีก 1 นาที เนื่องจากส่วนผสมค่อนข้างเหลวจำเป็นต้องใช้เวลาระยะที่สั้นหลังจากผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้าไปแล้ว ส่วนการผสมแบบปกติ (Normal mixing, N) คือ การนำเถ้าลอย สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ มาผสมรวมกันเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งวิธีนี้จะมีความสอดคล้องกับเวลาการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในวิธีการผสมแบบแยก จากงานวิจัยนี้ได้พบอีกว่า การผสมแบบแยก (S) ให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ดีกว่าการผสมแบบธรรมดา (N) โดยที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และมีอัตราส่วน NS (water glass)/NH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.0 แต่เมื่อ NS/NH มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 1.0 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมทั้งแบบแยก (S) และ แบบธรรมดา (N) จะลดลงดังแสดงในรูปที่ 8 และสรุปว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นมีความเหมาะสมเมื่อพิจารณากับการใช้งานและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

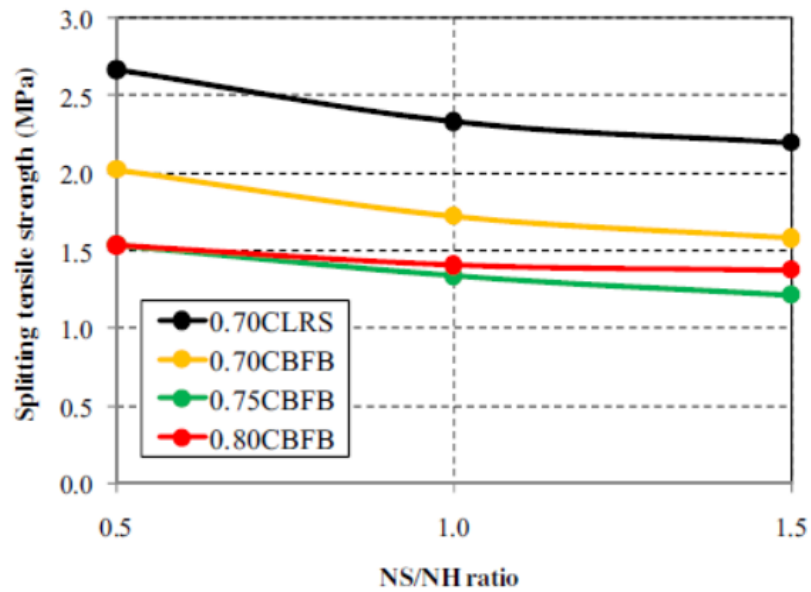


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Water glass) และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Rattanasak & Chindapasirt, 2009)

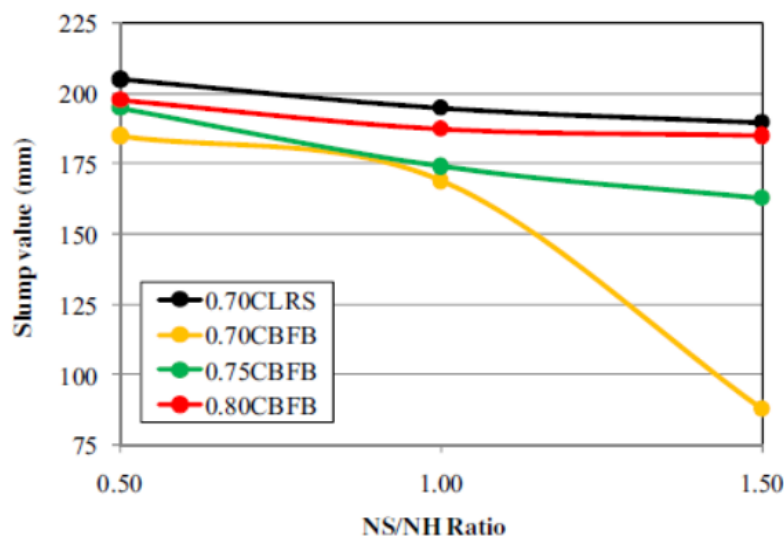
Wongsa et al. (2016) ได้วิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย (Fly ash, A) โดยมีมวลรวมหยาบคือ เถ้าก้นเตาหยาบ (Coarse bottom ash, CB) และมวลรวมละเอียดคือ เถ้าก้นเตาละเอียด (Fine bottom ash, FB) โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาอัลคาไลน์ และใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ที่มีค่าระหว่าง 0.5, 1.0 และ 1.5 กับ อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (L/A) ที่มีค่า 0.70, 0.75 และ 0.80 ตามลำดับ ในการตั้งชื่อส่วนผสมจะเรียงลำดับดังนี้คือ อัตราส่วน L/A มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด เช่น ส่วนผสม 0.70CBFB คือ อัตราส่วน L/A เท่ากับ 0.70 มีเถ้าก้นเตาหยาบ (CB) เป็นมวลรวมหยาบ เถ้าก้นเตาละเอียด (FB) เป็นมวลรวมละเอียด ส่วนการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดึงแยกได้ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm แล้วนำไปทดสอบเมื่อบ่มตัวอย่างครบ 7 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย โดยมีเถ้าก้นเตาหยาบเป็นมวลรวมหยาบและเถ้าก้นเตาละเอียดเป็นมวลรวมละเอียด มีความสามารถในการรับกำลังอัดเท่ากับ 14.3-18.1 MPa และกำลังรับแรงดึงแยกเท่ากับ 1.2-2.0 MPa ซึ่งคุณสมบัติที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าที่ต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ (0.70CLRS) คือ หินปูน (Crushed limestone, CL) และ ทรายแม่น้ำ (River Sand, RS) ซึ่งแสดงในรูปที่ 9 และ 10 นอกจากนี้การที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการยุบตัว ความสามารถในการรับกำลังอัด (Compressive strength) กำลังดึงแยก (Splitting tensile strength) และความต้านทานกัดกร่อนของพื้นผิวลดลง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน L/A ของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้มวลรวมจากเถ้าก้นเตาหยาบ (CB) และเถ้าก้นเตาละเอียด (FB) จะส่งผลให้มีค่าการยุบตัว (Slump value) ที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 11



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่ากำลังรับแรงอัด (Wongsa et al., 2016)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่ากำลังรับแรงดึงแยก (Wongsa et al., 2016)

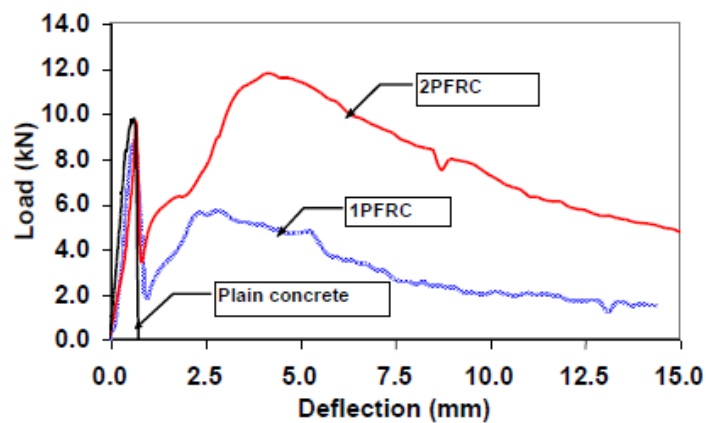


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่าการยุบตัว (Wongsa et al., 2016)

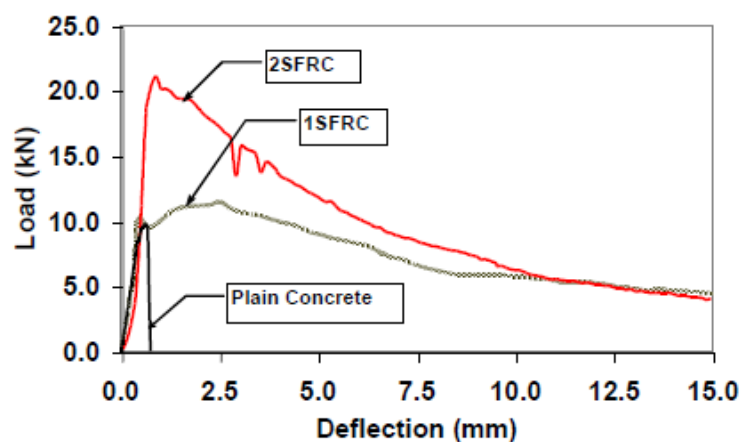
2.2.2 เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber)

Sukontasukkul (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความเหนียวของคานคองกรีตเสริมด้วยเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) และพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใส่เส้นใยเหล็กและพอลิโพรไพลีนลงในคานคองกรีตในปริมาณร้อยละ 1 และ 2 โดยปริมาตรของคานคองกรีต ซึ่งจากการศึกษาพบว่าทั้งคานคองกรีตที่ใส่เส้นใยเหล็ก (SFRC) และคานคองกรีตที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีน (PFRC) มีพฤติกรรมการรับกำลังดัดที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 12 และ 13 คานคองกรีตที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนมีพฤติกรรมที่เรียกว่า “Double-peak response” โดย First peak คือจุดที่คานคองกรีตเกิดรอยแตกร้าว (Cracking) หลังจากนั้นคานคองกรีตจะรับแรงกระทำได้น้อยลง อย่างไรก็ตามคานคองกรีตจะสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงจุดที่เรียกว่า “Post-cracking peak” ซึ่งมีผลมาจากการที่เส้นใยพอลิโพรไพลีนช่วยประสานรอยแตกร้าวของคานคองกรีต (Crack bridging) และรับแรงกระทำจนกระทั่งไปถึงจุด Post-cracking peak หลังจากนั้นแรงกระทำจะมีลดลง ในขณะที่ค่าการโก่งตัวจะเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งคานวิบัติ ในทางตรงกันข้าม คานคองกรีตที่ใส่เส้นใยเหล็กมีพฤติกรรมที่เรียกว่า “Single-peak response” ซึ่งแรงกระทำและค่าการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อถึงจุดตอบสนองสูงสุดแล้วคานคองกรีตเกิดจะรอยแตกร้าว แรงกระทำเริ่มลดลงแต่ค่าการโก่งตัวจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งคานคองกรีตเกิดการวิบัติ

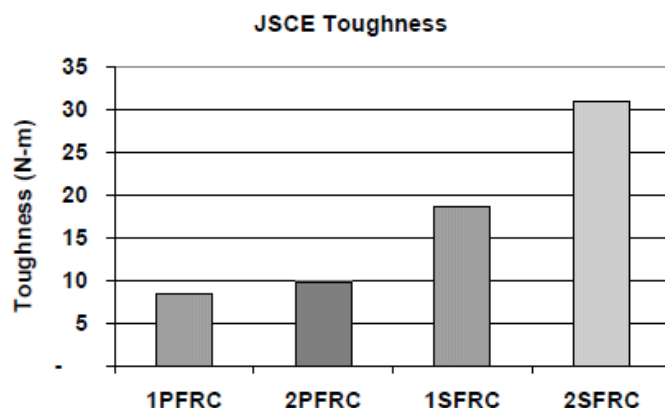
เนื่องจากเส้นใยมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้ค่าความเหนียว (Toughness) มีค่าที่แตกต่างกัน ในการทดสอบของ Sukontasukkul (2004) พบว่า เส้นใยเหล็กมีคุณสมบัติในการรับแรงดึงมากกว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีน เมื่อคำนวณค่าความเหนียวตามมาตรฐาน JSCE SF-4 พบว่า ค่าความเหนียวของคานคอนกรีตที่ใส่เส้นใยเหล็กมีค่ามากกว่าคานคอนกรีตที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีน และเมื่อมาพิจารณาปริมาณการใส่เส้นใยจากรูปที่ 14 พบว่าค่าความเหนียวมีค่าที่เพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตและเปรียบเทียบได้จากคานคอนกรีตที่ใส่เส้นใยเหล็กร้อยละ 1 (1SFRC) และร้อยละ 2 (2SFRC) มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนคานคอนกรีตที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1 (1PFRC) และร้อยละ 2 (2PFRC) ก็มีค่าความเหนียวที่เพิ่มขึ้นตามลำดับเช่นกัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Sukontasukkul, 2004)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Sukontasukkul, 2004)



รูปที่ 14 ค่าความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก (Sukontasukkul, 2004)

Song et al. (2005) ได้วิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) ในคอนกรีต คุณสมบัติของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ใช้แสดงในตารางที่ 7 โดยใช้ปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนเท่ากับ 0.6 kg/m^3 ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm และบ่มตัวอย่างคอนกรีตเป็นระยะเวลา 28 วัน จากงานวิจัยนี้พบว่า ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนสามารถรับกำลังแรงอัดที่ 24.35 MPa ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตปกติที่ไม่เสริมเส้นใย โดยคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใยสามารถรับกำลังแรงอัดที่ 23.02 MPa สำหรับความสามารถในการรับกำลังดึงแยก (Splitting tensile strength) และค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of rupture) ของคอนกรีตที่เสริมด้วยเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีความสามารถในการรับกำลังดึงแยกและค่าโมดูลัสการแตกหักมากกว่าคอนกรีตปกติ ดังแสดงในตารางที่ 8 การที่คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เนื่องจากเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีความต้านทานแรงดึงที่สูงซึ่งมีส่วนช่วยในการรับกำลังดึงที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีต

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางกายภาพเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Song et al., 2005)

Fiber type	Fiber Length (mm)	Specific weight	Elastic Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Melting Point (°C)
Polypropylene	19	0.91	4.11	413	160

ตารางที่ 8 ผลการทดลองความสามารถในการรับกำลังอัด กำลังดึงแยก โมดูลัสการแตกร้าวและค่าการยุบตัว ระหว่างคอนกรีตที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนและคอนกรีตปกติ (Song et al., 2005)

Concrete type	Compressive strength (MPa)	Splitting tensile Strength (MPa)	Modulus Of rupture (MPa)	Slump (cm)
Polypropylene-fiber-reinforced concrete	24.35	2.38	5.98	12
Plain control concrete	23.02	2.17	5.89	16

Banthia and Gupta (2006) ได้วิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของรูปทรงของเส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อการแตกร้าวของการหดตัวพลาสติกในคอนกรีต โดยใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนทั้งหมด 4 ชนิดซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 9 โดยผสมเข้าไปในคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.3 โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งผลการวิจัยได้พบว่า เส้นใยพอลิโพรไพลีนมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก โดยที่เส้นใยที่มีพื้นผิวที่ละเอียดกว่าจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมรอยแตกร้าวได้ดีกว่าเส้นใยที่หยาบ และเส้นใยที่ยาวจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมรอยแตกร้าวได้ดีกว่าเส้นใยที่สั้น ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 10 เส้นใย F1 ที่มีลักษณะยาวและมีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการลดพื้นที่รอยแตกร้าวและความกว้างของรอยแตกร้าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

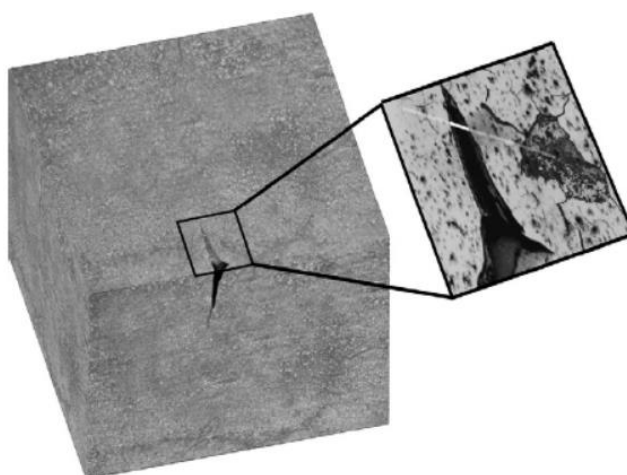
ตารางที่ 9 คุณสมบัติและลักษณะของเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Banthia & Gupta, 2006)

Fiber	Fiber type	Diameter (denier)	Length (mm)	Density (kg/m ³)	Dosages investigated
F1	Monofilament	3	12.5	900	0.1, 0.2 %
F2	Monofilament	6	12.5	900	0.1, 0.2 and 0.3 %
F3	Monofilament	6	6.35	900	0.1, 0.2 and 0.3 %
F4	Fibrillated	1000	12.5	900	0.1, 0.2 and 0.3 %

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบการเกิดรอยแตกร้าว (Banthia & Gupta, 2006)

Fiber volume	0%	0.1%	0.2%	0.3%	0%	0.1%	0.2%	0.3%
Fiber type	Crack area (mm ²)				Maximum crack width (mm)			
Control	329.9	-	-	-	3.00	-	-	-
F1	-	120.9	3.8	-	-	1.32	0.18	-
F2	-	216.0	119.5	101.9	-	1.32	1.04	0.89
F3	-	257.8	242.8	154.4	-	2.00	1.42	1.40
F4	-	172.9	42.9	31.0	-	1.02	0.54	0.38

Kakooei et al. (2012) ได้วิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของคุณสมบัติของเส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อสมบัติของโครงสร้างคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตรของเส้นใยพอลิโพรไพลีน โดยคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนปริมาณ 1.5 และ 2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเส้นใยพอลิโพรไพลีนยังมีประสิทธิภาพในการเชื่อมรอยแตกร้าวซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 15

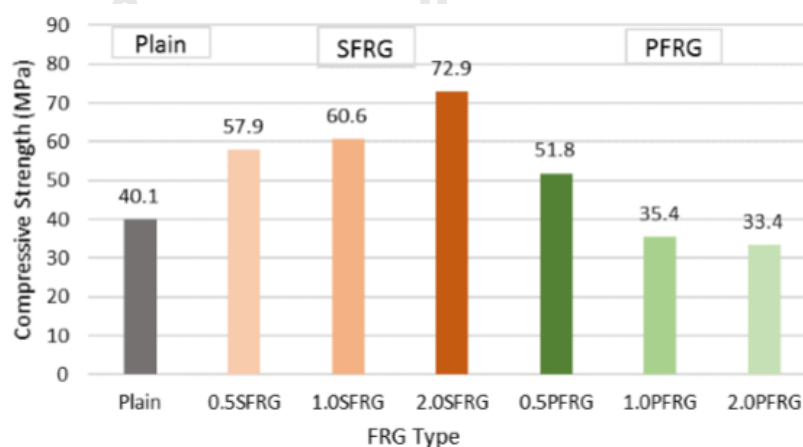


รูปที่ 15 รอยแตกร้าวที่ถูกเชื่อมด้วยเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Kakooei et al., 2012)

งานวิจัยของ ภัทรชัย พงษ์โสภา (2559) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์ที่เส้นใยเหล็ก (Steel fiber, SF) และเส้นใยพลาสติกสังเคราะห์พอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber, PP) ที่มีคุณสมบัติแสดงตามตารางที่ 11 แล้วทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 cm และบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน โดยศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เสริมเส้นใยเหล็ก (SFRG) และเส้นใยพอลิโพรไพลีน (PFRG) ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 1.0 และร้อยละ 2.0 โดยปริมาตร ผลการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสมเส้นใย (Plain geopolymer) มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 40.1 MPa และเมื่อเสริมเส้นใยเหล็กลงในจีโอพอลิเมอร์ร้อยละ 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยปริมาตร ส่งผลให้ส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 57.9, 60.6 และ 72.9 MPa ตามลำดับ ส่วนการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนลงในจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วนเดียวกัน ความสามารถในการรับกำลังอัดจะมีค่าเท่ากับ 51.8, 35.4 และ 33.4 MPa ตามลำดับ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดของแต่ละส่วนผสมได้จากรูปที่ 16

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย (ภัทรชัย พงษ์โสภา, 2559)

Name	End type	Material	Shape		Length (mm)	Tensile Strength (MPa)
			Section	L/D		
SF	Hooked Ends	Steel	Circle	85	60	1000
PP	Crimped	Polypropylene	Square	52	58	450



รูปที่ 16 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ภัทรชัย พงษ์โสภา, 2559)

สำหรับความสามารถในการรับกำลังดัดนั้นทดสอบจากคานขนาด 10x10x35 cm ซึ่งบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน พฤติกรรมภายใต้แรงดัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะแสดงค่ากำลังรับแรงดัดได้สองรูปแบบคือ กำลังรับแรงสูงสุดครั้งแรก (First peak) และกำลังรับแรงหลังจากการแตกร้าวสูงสุด (Post-cracking peak) โดยกำลังรับแรงสูงสุดครั้งแรกจะแสดงถึงกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์ ส่วนกำลังรับแรงหลังจากการแตกร้าวสูงสุดจะแสดงถึงประสิทธิภาพของเส้นใยเหล็กและเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์ จากการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงสูงสุดครั้งแรก (First peak) ของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเหล็ก (SFRG) มีค่ามากกว่าจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน (PFRG) เล็กน้อย เนื่องจากการแตกร้าวที่ควบคุมด้วยกำลังของจีโอพอลิเมอร์ ส่วนค่ากำลังหลังการแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเหล็กในร้อยละ 0.5, 1.0 และ 2.0 มีค่ากำลังรับแรงหลังจากการแตกร้าวเท่ากับ 22.6, 36.0 และ 41.8 ตามลำดับ ส่วนจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในอัตราส่วนเดียวกัน ค่ากำลังรับแรงหลังจากการแตกร้าวมีค่าเท่ากับ 2.9, 14.3 และ 26.4 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ภัทรชัย พงษ์โสภา, 2559)

Fiber proportion	First peak (kN)	Post-cracking peak (kN)
Plain	7.8	-
0.5PFRG	8.1	2.9
1.0PFRG	8.7	14.3
2.0PFRG	12.2	26.4
0.5SFRG	10.9	22.6
1.0SFRG	12.8	36.0
2.0SFRG	15.8	41.8

Patil and Patil (2015) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) ในการรับกำลังอัด (Compressive strength) กำลังดัด (Flexural strength) และกำลังดึงแยก (Splitting tensile strength) ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีน 2 ชนิดที่มีความยาวที่แตกต่างกัน ได้แก่ 12 mm และ 20 mm โดยส่วนผสมในการทดสอบมีการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนแต่ละชนิดในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต และใส่เส้นใยพร้อมกันทั้ง 2 ชนิดในปริมาณร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร ในการทดสอบกำลังอัดได้ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 cm และบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน จากการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยความยาว 20 mm (GPC2 1.5% fiber 20 mm) มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยความยาว 12 mm (GPC2 1.5% fiber 12 mm) และจีโอพอลิเมอร์ที่ใส่เส้นใยทั้ง 2 ชนิด (GPC3 0.75% fiber 12 mm + 0.75% fiber 20 mm) ดังแสดงในตารางที่ 13 โดยมีกำลังที่เพิ่มขึ้น 8.5 % เมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตธรรมดา (GPC 0% fiber)

ตารางที่ 13 ความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Patil & Patil, 2015)

MIX ID	Compressive strength (MPa)	Increase of strength (%)
GPC 0% fiber	35.88	-
GPC2 1.5% fiber 12 mm	38.21	6.2 %
GPC2 1.5% fiber 20 mm	39.21	8.5 %
GPC3 0.75% fiber 12 mm + 0.75% fiber 20 mm	38.72	7.3 %

ในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัด (Flexural strength) ได้ใช้ตัวอย่างคานขนาด 10x10x50 cm และบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยความยาว 20 mm (GPC2 1.5% fiber 20 mm) มีค่ากำลังดัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยความยาว 12 mm (GPC2 1.5% fiber 12 mm) และจีโอพอลิเมอร์ที่ใส่เส้นใยทั้ง 2 ชนิด (GPC3 0.75% fiber 12 mm + 0.75% fiber 20 mm) ดังแสดงในตารางที่ 14 โดยมีกำลังดัดเพิ่มขึ้น 19.2% เมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตธรรมดา (GPC 0% fiber)

ตารางที่ 14 ความสามารถในการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Patil & Patil, 2015)

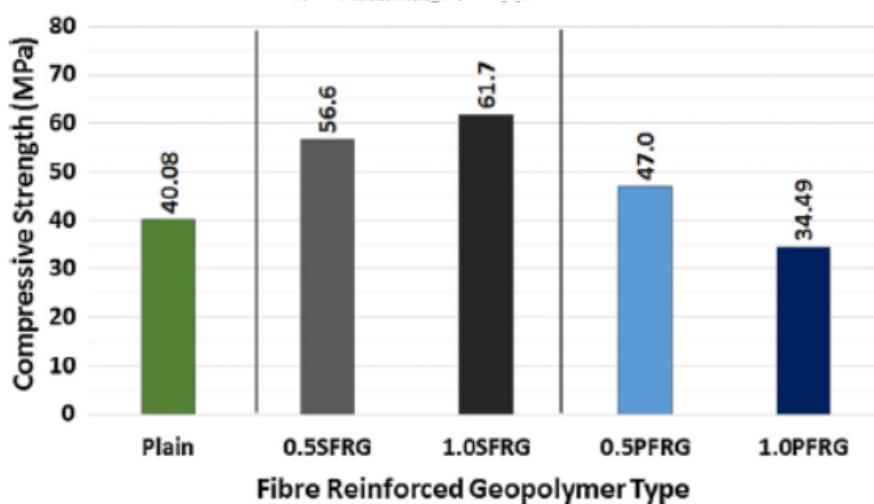
MIX ID	Flexural strength (MPa)	Increase of strength (%)
GPC 0% fiber	10.28	-
GPC2 1.5% fiber 12 mm	11.65	11.8 %
GPC2 1.5% fiber 20 mm	12.73	19.2 %
GPC3 0.75% fiber 12 mm + 0.75% fiber 20 mm	12.10	15.0 %

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแยก (Splitting tensile strength) ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดหน้าตัด 15 cm สูง 30 cm โดยบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยความยาว 20 mm (GPC2 1.5% fiber 20 mm) มีค่ากำลังดึงแยกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยความยาว 12 mm (GPC2 1.5% fiber 12 mm) และจีโอพอลิเมอร์ที่ใส่เส้นใยทั้ง 2 ชนิด (GPC3 0.75% fiber 12 mm + 0.75% fiber 20 mm) เปรียบเทียบได้จากตารางที่ 15 โดยมีกำลังดัดที่เพิ่มขึ้น 12.3 % เมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตธรรมดา (GPC 0% fiber)

ตารางที่ 15 ความสามารถในการรับกำลังดึงแยกของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Patil & Patil, 2015)

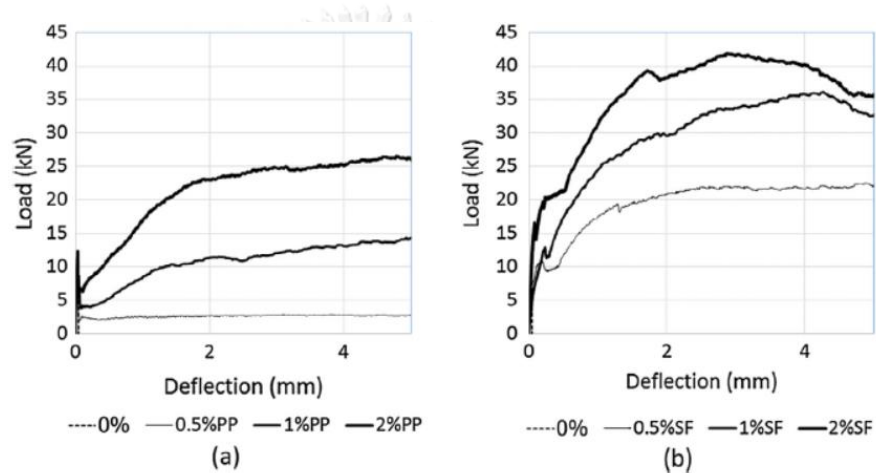
MIX ID	Splitting tensile strength (MPa)	Increase of strength (%)
GPC 0% fiber	3.65	-
GPC2 1.5% fiber 12 mm	3.92	6.9 %
GPC2 1.5% fiber 20 mm	4.16	12.3 %
GPC3 0.75% fiber 12 mm + 0.75% fiber 20 mm	4.05	9.9 %

Sukontasukkul et al. (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของจีโอพอลิเมอร์ในการรับกำลังดัดและความแข็งแรง ได้พบว่า เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 และบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน การเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในจีโอพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร (0.5PFRG) ทำให้ประสิทธิภาพในการรับกำลังแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์แบบธรรมดา (Plain geopolymer) ยกเว้นการเพิ่มเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร (1.0PFRG) ที่ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดลดลงต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์แบบธรรมดา ซึ่งเชื่อว่ามีผลมาจากการบดอัดที่ไม่ดีทำให้เกิดช่องว่างภายในตัวอย่างทดสอบมาก เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีปริมาณที่มากขึ้นทำให้การบดอัดที่ทำได้ยากขึ้นจึงส่งผลให้ตัวอย่างเกิดช่องว่างและความพรุนภายในตัวอย่างจึงส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำกว่าการเพิ่มเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ส่วนการเสริมเส้นใยเหล็กลงในจีโอพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 0.5 (0.5SFRG) และ 1.0 (1.0SFRG) โดยปริมาตร พบว่าทั้ง 2 กรณีให้ความสามารถในการรับกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์แบบธรรมดา ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 17



รูปที่ 17 ความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ธรรมดาและจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Sukontasukkul et al., 2018)

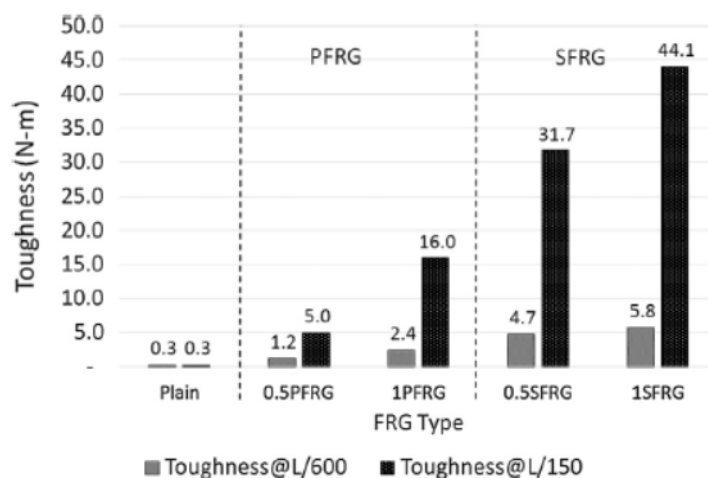
ส่วนประสิทธิภาพในการรับกำลังแรงดัดและความเหนียว ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1609 พบว่า การเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene FRG) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดัดและความเหนียวได้ ซึ่งมีผลมาจากการเชื่อมระหว่างรอยแตกริ้วของตัวอย่างกับเส้นใยพอลิโพรไพลีนในจีโอพอลิเมอร์ ส่วนการเสริมเส้นใยเหล็ก (Steel FRG) พบว่ามีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดและความเหนียวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบและแสดงประสิทธิภาพในการรับกำลังแรงดัดและความเหนียวของการเสริมการเสริมเส้นใยเหล็กและเส้นใยพอลิโพรไพลีนได้จากรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว

(a) จีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน (b) จีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเหล็ก

จุฬาร (Sukontasukkul et al., 2018)



รูปที่ 19 ค่าความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์ธรรมดาและจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

(Sukontasukkul et al., 2018)

Kumaravel and Sivakumar (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการเสริมกำลังของเส้นใยเหล็กต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยเส้นใยเหล็กมีลักษณะ Crimped-end steel นำไปผสมใส่ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต และทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดึง ซึ่งจากการทดสอบพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานและเวลาการก่อตัวใกล้เคียงคอนกรีตธรรมดา (Ordinary Portland cement concrete) ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสริมเส้นใยเหล็กช่วยให้มีความสามารถในการรับกำลังดึงที่ดีขึ้น ซึ่งเหมาะสำหรับในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านโครงสร้าง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่คล้ายคลึงกับซีเมนต์ และยังสามารถกล่าวได้ว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตนั้นค่อนข้างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพที่สามารถจะทดแทนการใช้คอนกรีต OPC ในการใช้งานด้านต่าง ๆ

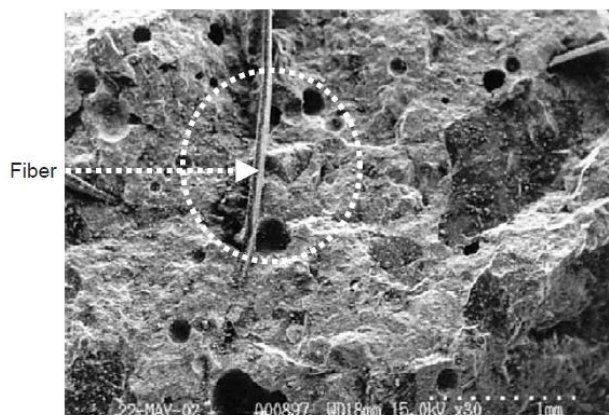
Z.-h. Zhang et al. (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสริมกำลังโดยเส้นใยพอลิโพรไพลีน การศึกษาในครั้งนี้ได้ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนในแต่ละส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 0.25, 0.50 และ 0.75 โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยในปริมาณร้อยละ 0.50 (PPf3) มีค่ากำลังอัดที่ 1 วัน และ 3 วัน เพิ่มขึ้น 67.8 % และ 19.5 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ธรรมดา (PPf1) และมีค่ากำลังอัดที่มากมีสุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ ส่วนความสามารถในการรับกำลังดัด (Flexural strength) ในส่วนผสมที่ใส่เส้นใยร้อยละ 0.50 โดยปริมาตร (PPf3) มีค่ากำลังดัดเพิ่มขึ้น 36.1 % ที่ 3 วัน เมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ธรรมดา แต่มีค่ากำลังดัดน้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใส่เส้นใยในร้อยละ 0.75 (PPf4) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากตารางที่ 16 แต่เมื่อมาเปรียบเทียบความสามารถด้านกำลังอัดพบว่าที่ส่วนผสม PPf4 มีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ธรรมดา เนื่องจากการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนที่มากเกินไปจึงมีผลกระทบต่อ การอัดตัวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้สรุปว่า เส้นใยพอลิโพรไพลีนมีความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเสีรูปของคอนกรีตภายใต้การรับแรงดึง และการใช้เข้าล่อยกับเส้นใยพอลิโพรไพลีนในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางที่สามารถเป็นไปได้ ในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และแก้ไขปัญหาการหดตัวและความเปราะของคอนกรีต

ตารางที่ 16 กำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Z.-h. Zhang et al., 2009)

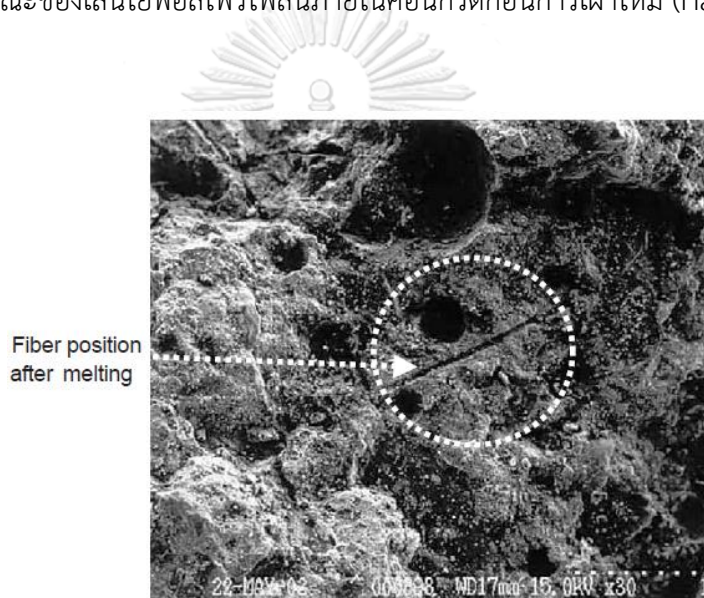
Mixture	Fiber % by volume.	Compressive strength (MPa)		Flexural strength (kPa)	
		1 day	3 day	1 day	3 day
PPf1	0	32.6	41.5	5.00	5.51
PPf2	0.25	54.2	49.6	6.03	8.45
PPf3	0.50	54.7	52.3	9.41	7.50
PPf4	0.75	36.6	38.3	10.0	9.41

Kalifa, Chene, and Galle (2001) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตประสิทธิภาพสูง (High performance concrete, HPC) ที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ได้ทดสอบตัวอย่างในสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO 834 จากผลการทดสอบพบว่าการใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนเป็นทางหนึ่งที่สามารถหลีกเลี่ยงการหลุดล่อนของคอนกรีตภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งการที่มีเส้นใยพอลิโพรไพลีนอยู่สามารถช่วยลดความดันไอที่เกิดขึ้นขณะเผาไหม้ได้อย่างมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนเส้นใยหลอมเหลวจะก่อให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ภายในคอนกรีตซึ่งมีส่วนช่วยในการลดความดันไอที่เกิดขึ้นและเป็นส่วนช่วยป้องกันการหลุดล่อนของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูงได้

Han et al. (2005) ได้วิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพการต้านทานการหลุดล่อนของคอนกรีตประสิทธิภาพสูง (High performance concrete, HPC) ที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนและวัสดุแผ่นโอบรัดทางด้านข้าง ในส่วนผสมได้ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนในอัตราส่วนร้อยละ 0.05 และ 0.1 โดยปริมาตรของคอนกรีต จากงานวิจัยได้พบว่าหลังจากการทดสอบตัวอย่างในสภาวะอุณหภูมิสูงการหลุดล่อนของคอนกรีตอย่างรุนแรงนั้นเกิดกับตัวอย่าง HPC ไม่ได้ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีน แต่การหลุดล่อนนั้นไม่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง HPC ที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีน การหลุดล่อนของคอนกรีตจะไม่เกิดขึ้นเมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนมากกว่าร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต เพราะว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีนจะละลายเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงมาก จะก่อให้เกิดโพรงอากาศขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 20 และ 21 ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการลดความดันไอภายในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่จะก่อให้เกิดการหลุดล่อนของคอนกรีต



รูปที่ 20 ลักษณะของเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายในคอนกรีตก่อนการเผาไหม้ (Han et al., 2005)

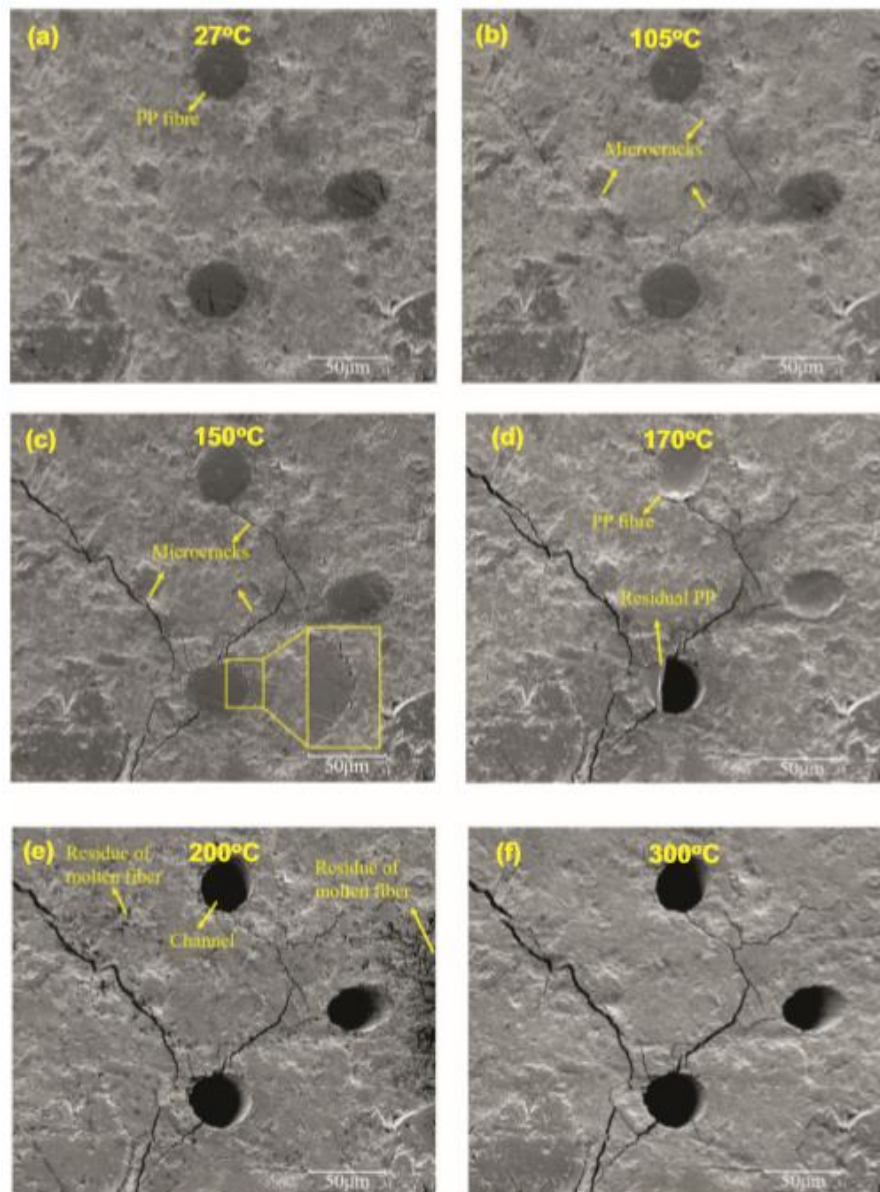


รูปที่ 21 ลักษณะของเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายในคอนกรีตหลังการเผาไหม้ (Han et al., 2005)

Jang, So, and So (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของรีแอคทีฟพาวเดอร์คอนกรีต (Reactive powder concrete, RPC) ที่ใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนและวัสดุปอซโซลานภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีประสิทธิภาพในการป้องกันการหลุดล่อนแบบระเบิด ส่วนผสม RPC ที่ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนมากกว่า 0.5% โดยปริมาตรของคอนกรีตได้แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการหลุดล่อนแบบระเบิดภายหลังจากการทดสอบการเผาไหม้และมีปริมาณโพรงภายในเนื้อคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเกิดโพรงภายในคอนกรีตมีส่วนช่วยลดความดันไอที่เกิดขึ้นขณะการทดสอบเผาไหม้และช่วยป้องกันไม่ให้คอนกรีตหลุดล่อนแบบระเบิด

จากงานวิจัย Pothisiri, Chou, and Sektheera (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเส้นใยพอลิโพรไพลีนและลวดตาข่ายในโครงสร้างชิ้นส่วนผนังหล่อในสภาวะเพลิงไหม้ ในส่วนผสมได้ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนในอัตราส่วนร้อยละ 0.05, 0.1 และ 0.2 โดยปริมาตรของคอนกรีตและทดสอบตัวอย่างในสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO 834 เป็นเวลา 180 นาที จากงานวิจัยได้พบว่าการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีประสิทธิภาพในการป้องกันการหลุดล่อนของผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปที่ดีขึ้น โดยที่การใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนในปริมาณร้อยละ 0.05 โดยปริมาตรของคอนกรีตมีประสิทธิภาพที่เพียงพอต่อการจำกัดปริมาณการหลุดล่อนของคอนกรีตได้

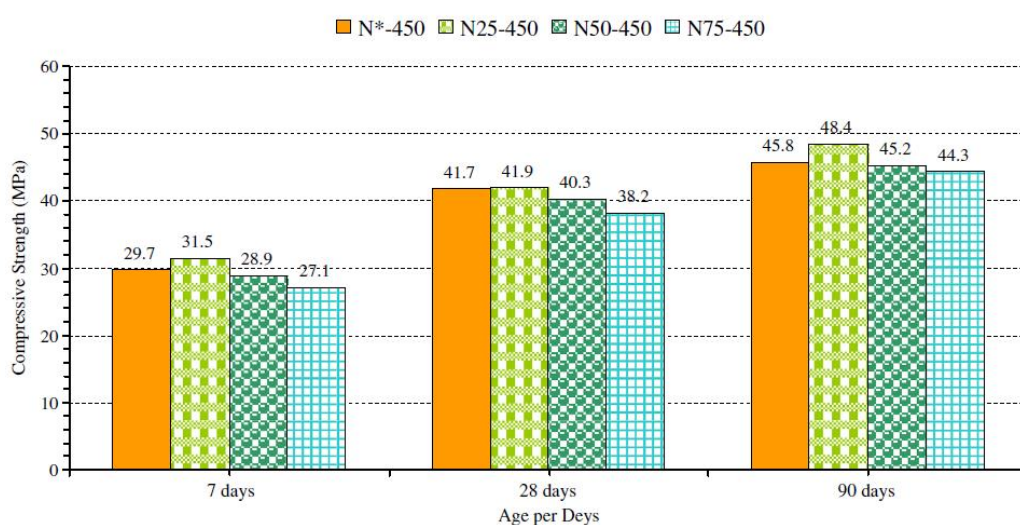
จากการศึกษาของ D. Zhang, Dasari, and Tan (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการป้องกันการหลุดล่อนแบบระเบิดในคอนกรีตประสิทธิภาพสูง (Ultra high performance concrete, UHPC) เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน โดยที่ในงานวิจัยนี้ได้เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในปริมาณ 3 kg/m^3 และทดสอบตัวอย่างในสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO 834 จากผลการทดสอบได้พบว่า โพรงภายในคอนกรีตมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงระหว่าง 150 และ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เส้นใยพอลิโพรไพลีนเริ่มละลายและเกิดรอยแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีต และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง 300 องศาเซลเซียส พบว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีนได้หลอมละลายไปหมดและมีโพรงอากาศภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 22 โพรงอากาศที่เกิดขึ้นจากการละลายของเส้นใยพอลิโพรไพลีนจะลดความดันไอที่เกิดขึ้นจากไอน้ำภายในเนื้อคอนกรีตขณะที่คอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยลดการหลุดล่อนแบบระเบิดของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิที่สูง



รูปที่ 22 โครงสร้างระดับจุลภาคภายในเนื้อคอนกรีต UHPC เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน ที่อุณหภูมิ 27, 105, 150, 170, 200 และ 300 องศาเซลเซียส (D. Zhang et al., 2018)

2.2.3 เศษหินแกรนิตและหินปูน

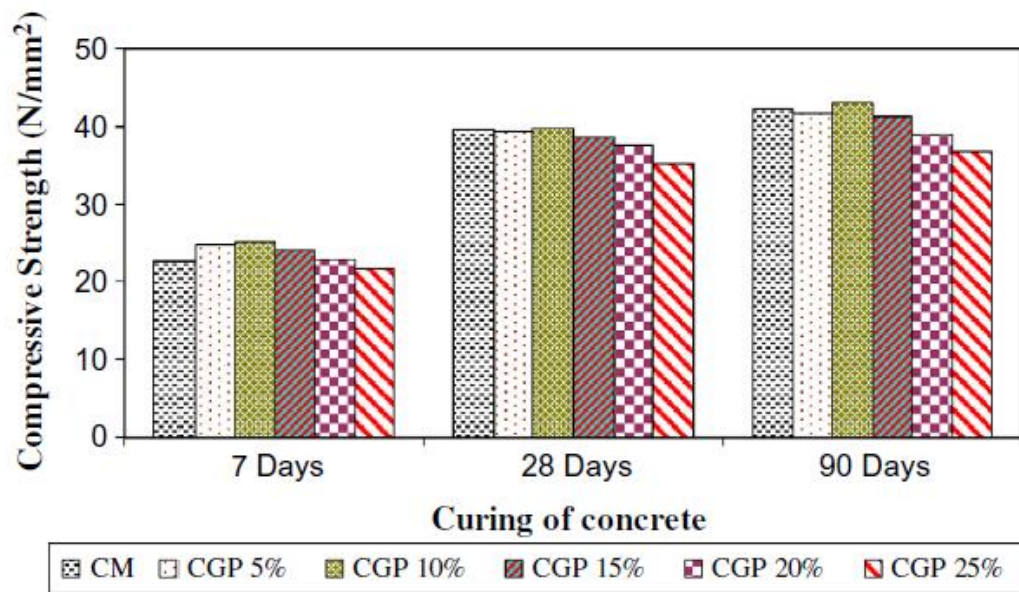
จากการศึกษาของ Omar et al. (2012) เกี่ยวกับอิทธิพลของเศษหินปูน (Limestone waste) ในการแทนที่ทรายในส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งเศษหินปูนได้มาจากการผลิตมวลรวมจากโรงงานในระหว่างกระบวนการบดหินปูน การศึกษานี้ใช้เศษหินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50 และ 75 แล้วนำมาทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 cm แล้วบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าการใช้เศษหินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 25 (N25-450) ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น 5%, 0.5% และ 5% เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (N*-450) สำหรับคอนกรีตอายุ 7 วัน, 28 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 23 ในขณะที่การใช้เศษหินปูนแทนที่ทรายในร้อยละ 50 (N50-450) และร้อยละ 75 (N75-450) พบว่ามีความสามารถในการรับกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาทั้งการบ่มในระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน และพบว่าการใช้เศษหินปูนแทนที่ทรายร้อยละ 75 มีความสามารถในการรับกำลังอัดลดลงมากที่สุดที่ 8 % ที่ 28 วันเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา



รูปที่ 23 ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาและแทนที่ด้วยเศษหินปูนร้อยละ 25, 50 และ 75 (Omar et al., 2012)

Vijayalakshmi and Sekar (2013) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผลิตจากเศษหินแกรนิต (Granite Powder, GP) จากขยะอุตสาหกรรม โดยได้นำเศษหินแกรนิตมาแทนที่ทรายในส่วนผสมของคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 5 (CGP5%), 10 (CGP10%), 15 (CGP15%), 20 (CGP20%) และ 25 (CGP25%) ในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดได้ใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 cm แล้วบ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วันจึงนำไปทดสอบ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 มีความสามารถในการรับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (CM) ซึ่งสามารถเห็นได้จาก รูปที่ 24 โดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 10 (CGP10%) มีความสามารถในการรับกำลังอัดที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (CM) และคอนกรีตในส่วนผสมอื่น ๆ ในขณะที่คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตทดแทนทรายในร้อยละ 20 และ 25 มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 25 (CGP25%) มีกำลังอัดต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตในส่วนผสมสัดส่วนอื่น ๆ ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 17

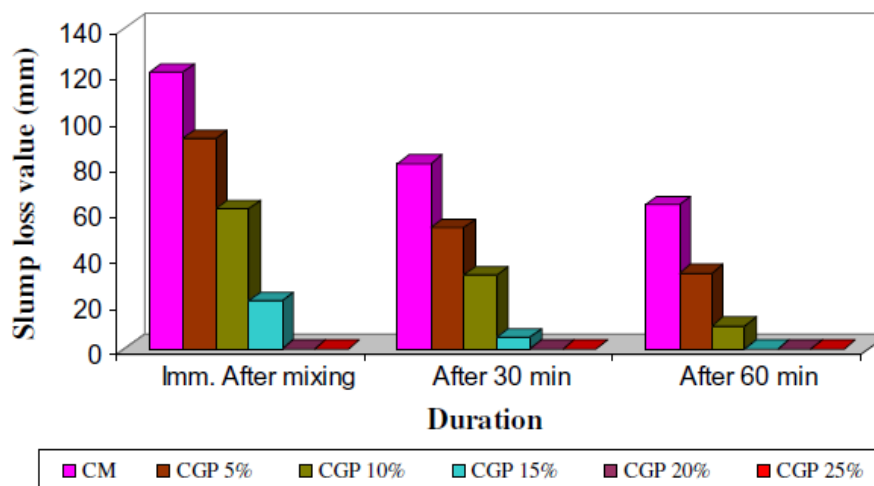
ในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังดึงแยก (Splitting tensile strength) และกำลังดัด (Flexural strength) พบว่าการนำเศษหินแกรนิตมาแทนที่ทรายในคอนกรีตไม่มีส่วนช่วยในการเพิ่มกำลังดึงแยกและกำลังดัด ซึ่งจากผลการทดสอบในตารางที่ 17 ได้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 มีค่ากำลังดึงแยกและกำลังดัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา (CM) นอกจากนี้จากการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump value test) พบว่าค่าการยุบตัวและความสามารถในการทำงานได้ (Workability) จะมีค่าที่ต่ำลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเศษหินแกรนิตที่แทนที่ทรายในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 24 ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยเศษหินแกรนิต ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 (Vijayalakshmi & Sekar, 2013)

ตารางที่ 17 ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม (Vijayalakshmi & Sekar, 2013)

Mixture	Compressive strength (MPa)			Splitting tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)
	7 days	28 days	90 days		
CM	22.75	39.46	42.07	3.4	6.10
CGP5%	24.75	39.32	41.66	3.2	5.97
CGP10%	25.11	39.83	42.90	3.3	5.77
CGP15%	24.07	38.55	41.17	2.9	5.53
CGP20%	22.95	37.59	38.93	2.2	4.23
CGP25%	21.74	35.06	36.73	1.6	3.26

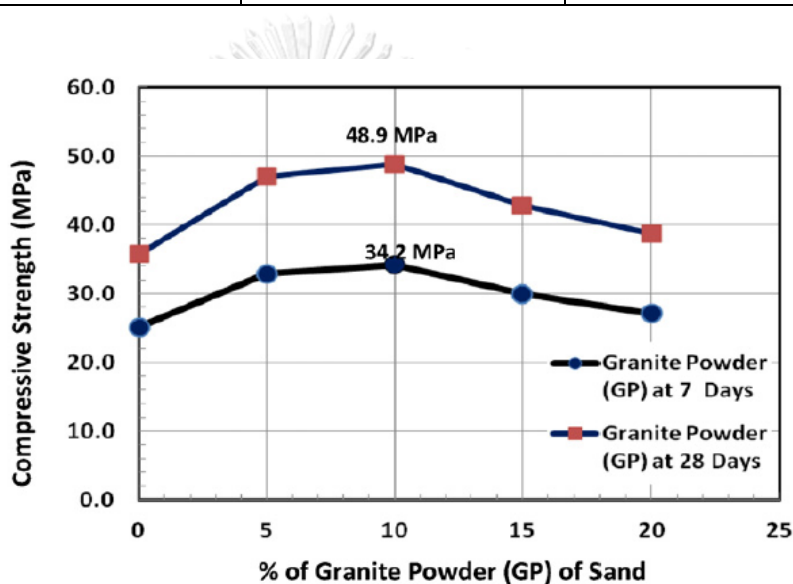


รูปที่ 25 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม (Vijayalakshmi & Sekar, 2013)

Ghannam, Najm, and Vasconez (2016) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิต (Granite Powder, GP) แทนที่ทรายบางส่วน โดยเศษหินแกรนิตมาจากอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากหินแกรนิต โดยได้นำเศษหินแกรนิตมาแทนที่ทรายในส่วนผสมของคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 5 (MG5), 10 (MG10), 15 (MG15) และ 20 (MG20) ในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด (Compressive strength) ได้ใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 cm แล้วบ่มเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน ซึ่งจากการทดสอบพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษหินแกรนิตในส่วนผสมของคอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (MG0) ทั้งตัวอย่างที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งแสดงในตารางที่ 18 แต่พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตในอัตราส่วนร้อยละ 15 และ 20 มีค่ากำลังอัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ดังแสดงในรูปที่ 26 นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ทรายถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในปริมาณร้อยละ 10 ให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดได้สูงที่สุดทั้งตัวอย่างที่อายุ 7 วันและ 28 วัน

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Ghannam et al., 2016)

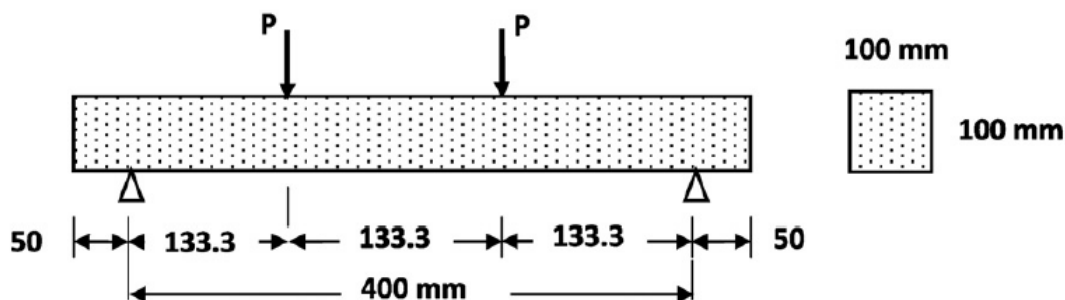
Mixture	Granite powder (%)	Compressive strength at 7 day (MPa)	Compressive Strength at 28 day (MPa)
MG0	0	25.1	35.8
MG5	5	32.9	47.1
MG10	10	34.2	48.9
MG15	15	30.0	42.9
MG20	20	27.1	38.7



รูปที่ 26 กำลังอัดของคอนกรีตอายุ 7 วัน และ 28 วัน (Ghannam et al., 2016)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัด (Flexural strength) ใช้ตัวอย่างคานขนาด 10x10x50 cm ตามรูปที่ 27 แล้วบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน จึงนำไปทดสอบ จากการทดสอบพบว่ากำลังดัดของคอนกรีตธรรมดา (MG0) มีค่าเท่ากับ 3.23 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5 (MG5), 10 (MG10), 15 (MG15) และ 20 (MG20) พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตมีค่ากำลังดัดที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ดังแสดงในตารางที่ 19 แต่เมื่อแทนที่ทรายด้วยเศษหินแกรนิตในอัตราส่วนร้อยละ 20 พบว่ากำลังดัดมีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตที่มีเศษหินแกรนิตในร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังดัดที่สูงที่สุด



รูปที่ 27 ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบกำลังดัด (Ghannam et al., 2016)

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบกำลังดัดคานคอนกรีต (Ghannam et al., 2016)

Mixture	Granite powder (%)	Flexural strength at 28 day (MPa)
MG0	0	3.23
MG5	5	3.61
MG10	10	4.62
MG15	15	3.49
MG20	20	3.24

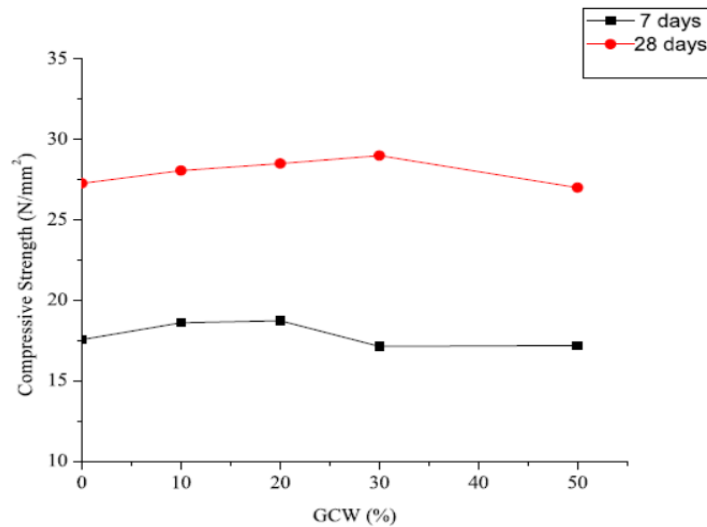
การทดสอบความสามารถในการรับกำลังดึงแยก (Splitting tensile strength) ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดหน้าตัด 15 cm สูง 30 cm แล้วบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน จึงนำไปทดสอบ จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตธรรมดา (MG0) มีค่ากำลังดึงแยกเท่ากับ 2.62 MPa แล้วเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่ทรายถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 5 (MG5), 10 (MG10) และ 15 (MG15) พบว่ามีค่ากำลังดึงแยกที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยที่คอนกรีตที่มีเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 15 มีกำลังดึงแยกเท่ากับ 3.39 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่มีเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายละเอียดในร้อยละ 5 และ 10 แต่พบว่าคอนกรีตที่มีเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 20 (MG20) มีค่ากำลังดึงแยกที่ต่ำกว่าคอนกรีตในส่วนผสมอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบกำลังดึงแยกของคอนกรีต (Ghannam et al., 2016)

Mixture	Granite Powder (%)	Splitting tensile strength at 28 day (MPa)
MG0	0	2.62
MG5	5	2.71
MG10	10	3.00
MG15	15	3.39
MG20	20	1.98

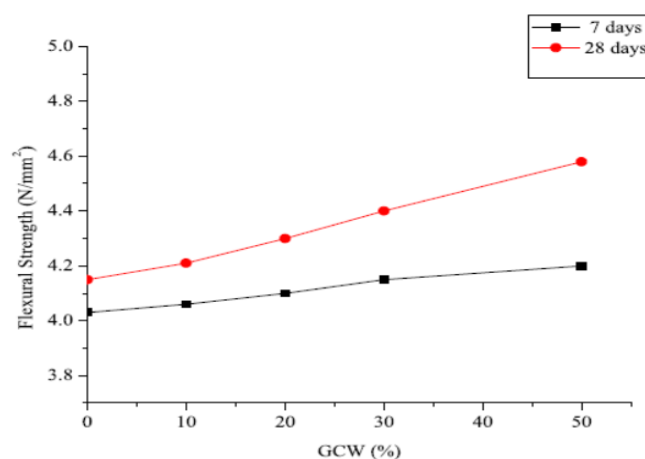
จากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 10 (MG10) เป็นส่วนผสมที่ให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ ซึ่งพบว่ามีความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น 36% และกำลังดึงเพิ่มขึ้น 43% เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน ส่วนความสามารถในการรับกำลังดึงแยก คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 15 มีค่ากำลังดึงแยกเพิ่มขึ้น 29% เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา และพบว่ามีความแข็งแรงที่มากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายร้อยละ 10 (MG10)

ต่อมา Singh et al. (2016) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิต (Granite Cutting Waste, GCW) ซึ่งมีค่า Fineness modulus เท่ากับ 2.57 นำมาแทนที่ทรายในสัดส่วนร้อยละ 10 (G10), 20 (G20), 30 (G30) และ 50 (G50) ในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด (Compressive strength) ใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 cm บ่มเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วันจึงนำไปทดสอบ ซึ่งหลังจากการทดสอบพบว่าคอนกรีตส่วนผสม G10, G20, G30 และ G50 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28.1 MPa, 28.5 MPa , 29.0 MPa และ 27.0 MPa ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตส่วนผสม G30 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (G0) และคอนกรีตในส่วนผสมอื่น ๆ เนื่องจากเศษหินแกรนิตไปช่วยเติมเต็มรูช่องว่างภายในคอนกรีต ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 28 ในทางตรงกันข้ามคอนกรีตส่วนผสม G50 มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดเมื่อเทียบคอนกรีตธรรมดาและส่วนผสมอื่น ๆ เนื่องจากมีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตที่มากเกินไปซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการจับตัวของซีเมนต์ภายในคอนกรีต



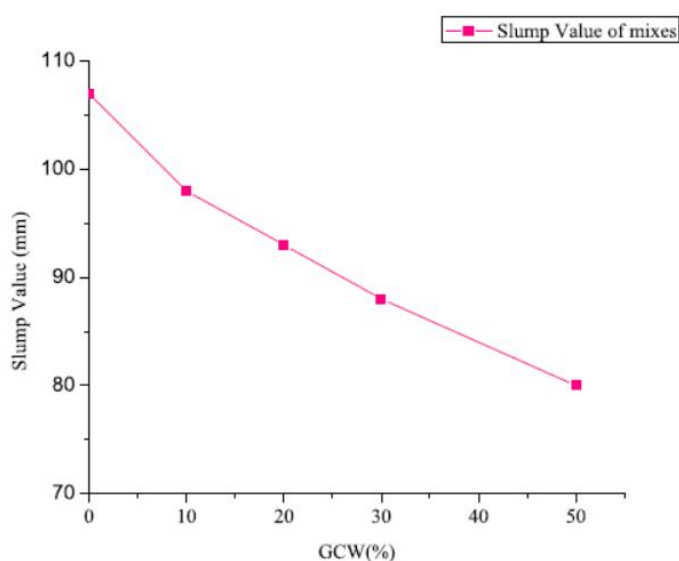
รูปที่ 28 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิต (Singh et al., 2016)

ส่วนการทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัด (Flexural Strength) ใช้ตัวอย่างคานขนาด 10x10x50 cm แล้วบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วันจึงนำไปทดสอบ หลังจากการทดสอบพบว่าคอนกรีตส่วนผสม G10, G20, G30 และ G50 ที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 4.21 MPa, 4.30 MPa, 4.40 MPa และ 4.58 MPa ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตส่วนผสม G50 มีค่ากำลังรับแรงดัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตในส่วนผสมอื่น ๆ และพบว่าการเพิ่มปริมาณเศษหินแกรนิต (GCW) ในส่วนผสมมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังแรงดัดได้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและปริมาณการเติมเศษหินแกรนิต
ในส่วนผสมคอนกรีต (Singh et al., 2016)

ส่วนการทดสอบความสามารถในการทำงานของคอนกรีต (Workability) พบว่าคอนกรีต ส่วนผสม G50 มีค่าการยุบตัวต่ำที่สุด (เท่ากับ 80 mm) เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (G0) ซึ่งมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 107 mm แสดงว่าคอนกรีตมีความสามารถในการไหลและความสามารถในการทำงานที่ลดลง ซึ่งจากรูปที่ 30 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษหินแกรนิตจะทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวลดลงและมีความสามารถในการทำงานที่ลดลงเช่นกัน ส่วนใหญ่แล้วมีผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม เช่น รูปร่างของอนุภาค ขนาดการกระจาย พื้นผิวของมวลรวม และการดูดซึมน้ำของมวลรวมเศษหินแกรนิต เป็นต้น



รูปที่ 30 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวและปริมาณการเติมเศษหินแกรนิต
ในส่วนผสมคอนกรีต (Singh et al., 2016)

จากงานวิจัยของ Khine (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในคอนกรีตกำลังสูง มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 54.5 MPa ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 10, 15 และ 25 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเศษหินแกรนิตมีลักษณะเป็นพื้นผิวขรุขระและรูปร่างผิดปกติ (irregular shape) ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสียดทานระหว่างมวลรวมจึงส่งผลให้มีความสามารถในการทำงานได้ลดลง สำหรับกำลังรับแรงอัดและกำลังดึงแยกพบว่ามีค่าลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังรับแรงดัดของ

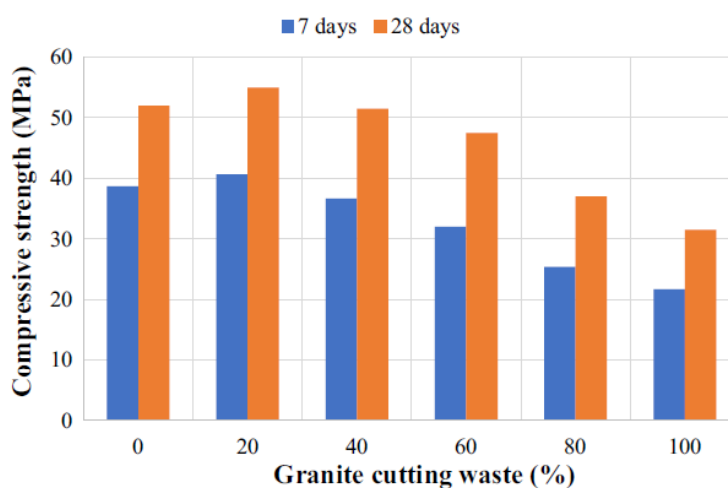
ส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตร้อยละ 15 มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น เนื่องจากพื้นผิวของเศษหินแกรนิตช่วยยึดระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์

ต่อมางานวิจัยของ ปภัสรา วรวัฒน์นฤนาท (2562) ได้ศึกษาผลกระทบของเศษหินแกรนิตต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 25, และ 50 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น ส่วนกำลังรับแรงอัดพบว่าในส่วนผสมที่มีเศษหินแกรนิตมีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะเหลี่ยมมุมของเศษหินแกรนิตมีส่วนช่วยพัฒนากำลังในช่วงแรก อย่างไรก็ตามพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วันมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่ากำลังรับแรงดัด พบว่าการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

Jain, Gupta, and Chaudhary (2019) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตไหลเข้าแบบโดยไม่จีเซย่า (Self-Compacting Concrete, SCC) โดยมีส่วนผสมของเศษหินแกรนิต (Granite Cutting Waste, GCW) แทนที่ทรายในสัดส่วนร้อยละ 20 (G20), 40 (G40), 60 (G60), 80 (G80) และ 100 (G100) ในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดได้ใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 cm บ่มเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่บ่ม 7 วัน มีค่าอยู่ที่ระหว่าง 21.67 MPa ถึง 38.67 MPa ส่วนค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่บ่ม 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 31.5 MPa ถึง 55.0 MPa ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายไปจนถึงร้อยละ 20 ดังแสดงรูปที่ 31 หลังจากนั้นพบว่าเมื่อปริมาณเศษหินแกรนิตเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง เมื่อทรายถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 100 (G100) มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 31.50 MPa ซึ่งมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตในส่วนผสมธรรมดา (G0) และส่วนผสมแบบอื่น ๆ ในส่วนผสมของคอนกรีตที่มีเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายในสัดส่วนร้อยละ 20 (G20) พบว่ามีค่ากำลังอัดที่มากที่สุด ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงในตารางที่ 21

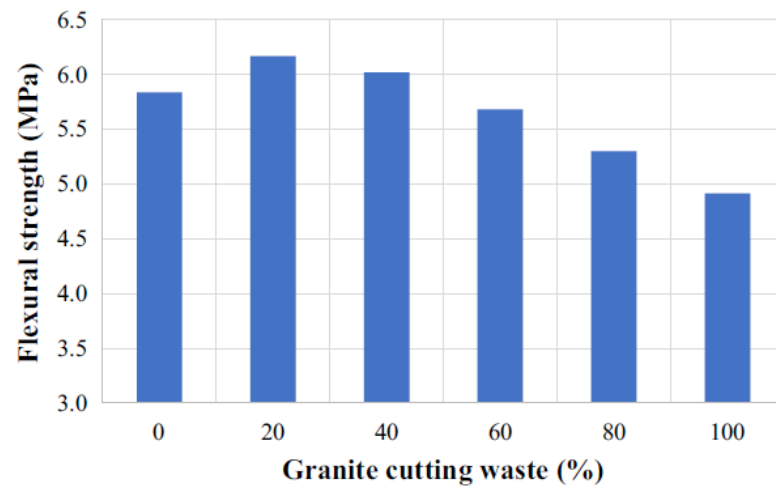
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด (Jain et al., 2019)

Mixture	Compressive strength (MPa)		Flexural strength (MPa)
	7 days	28 days	
G0	38.67	52.00	5.84
G20	40.67	55.00	6.17
G40	36.67	51.50	6.02
G06	32.00	47.50	5.68
G80	25.33	37.00	5.30
G100	21.67	31.50	4.91



รูปที่ 31 กำลังรับแรงอัดกับปริมาณการแทนที่เศษหินแกรนิต (Jain et al., 2019)

การทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัด (Flexural strength) ใช้ตัวอย่างคานขนาด 10x10x50 cm แล้วบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าอยู่ระหว่าง 4.91 MPa ถึง 6.17 MPa ซึ่งกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายจนถึงร้อยละ 20 ดังแสดงในรูปที่ 32 หลังจากนั้นพบว่าเมื่อปริมาณเศษหินแกรนิตเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 20 กลับทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าลดลง เมื่อทรายถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 100 (G100) มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 4.91 MPa ซึ่งมีค่าที่ต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 21



รูปที่ 32 กำลังรับแรงดัดกับปริมาณการแทนที่เศษหินแกรนิต (Jain et al., 2019)



บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัสดุหลักซึ่งประกอบด้วย มวลรวมหยาบ ทรายธรรมชาติ ทรายที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษหินแกรนิต เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) และเถ้าลอย (Fly ash) ผสมร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Zhuang & Tong, 2016) รายละเอียดของวัสดุมีดังนี้

- 1.) เถ้าลอยแคลเซียมสูงที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ตั้งอยู่ในอำเภอแม่เมาะ 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) มีอัตราส่วนโดยมวลระหว่างซิลิกา (SiO_2) กับโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 2.1 และมีสมบัติทางเคมีดังนี้ $\text{SiO}_2 = 30.0\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 14.5\%$ และน้ำ = 55.3%
- 3.) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์
- 4.) มวลรวมหยาบจากหินปูนย่อย (Crushed natural limestone) ซึ่งมีสมบัติตามตารางที่ 22
- 5.) มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ และเศษหินแกรนิตจากเหมืองเทพศิลา ในจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีสมบัติตามตารางที่ 23
- 6.) เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) ดังแสดงในรูปที่ 33 ซึ่งมีสมบัติตามตารางที่ 24

ตารางที่ 22 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะรวม (สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)	2.70
ร้อยละการดูดซึมน้ำ	0.60
หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	1,621

ตารางที่ 23 คุณสมบัติของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิต

มวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	การดูดซึมน้ำ (%)	โมดูลัสความละเอียด (FM)
ทรายธรรมชาติ	2.51	1,639	0.72	2.42
เศษหินแกรนิต	2.58	1,593	0.87	3.68

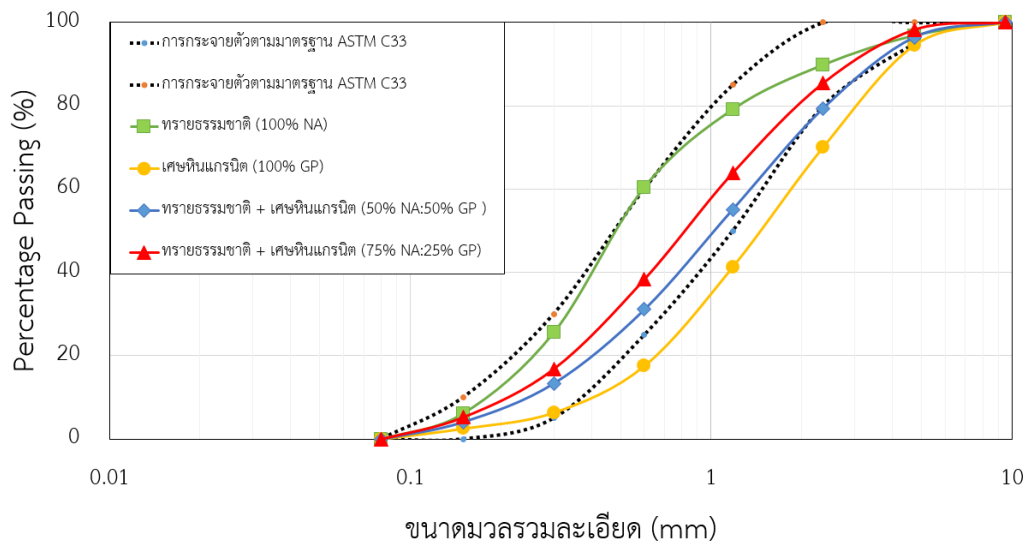
ตารางที่ 24 คุณสมบัติของเส้นใยพอลิโพรไพลีน

Length L _f (mm)	Density (kg/m ³)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Melting Point (°C)	Shape of cross section	Surface	Shape of the end
48	900	640	12	160	Rectangle	Rough	Straight



รูปที่ 33 เส้นใยพอลิโพรไพลีน

ขนาดการกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้แสดงในรูปที่ 34 จากผลการทดสอบการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM-C33 (2003) พบว่าอนุภาคของเศษหินแกรนิต (100% GP) มีคุณสมบัติการกระจายตัวไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 แต่เมื่อนำทรายทั้งสองชนิดมาผสมกันในปริมาณที่เหมาะสมจะพบว่า ทรายธรรมชาติที่ถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในปริมาณร้อยละ 25 (75%NA : 25%GP) และ 50 (50%NA : 50%GP) มีขนาดการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33



รูปที่ 34 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่

3.2 สัดส่วนผสมและวิธีการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุ โดยใช้ทรายแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry; SSD) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 และอัตราส่วนผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene fiber, PP) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.5 และ 1 โดยปริมาตรของคอนกรีต ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 25

การผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมี 3 ขั้นตอนด้วยกันซึ่งใช้เวลาผสม 15 นาที ในขั้นตอนแรกใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับเถ้าลอย (Fly ash) ผสมกันเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นใส่มวลรวมและเส้นใยผสมกันต่อเป็นเวลาอีก 5 นาที สุดท้ายใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และผสมอีกเป็นเวลา 5 นาที เมื่อผสมเรียบร้อยแล้วนำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมาเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบ ส่วนในการบ่มนั้นจะใช้พลาสติกห่อตัวอย่างแล้วบ่มอุณหภูมิห้องก่อนจะนำตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 25 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อส่วนผสม	เถ้าลอย (kg/m ³)	สารละลายต่าง (kg/m ³)		มวลรวม (kg/m ³)			PP (% โดย ปริมาตร)
		NaOH	Na ₂ SiO ₃	หินปูน	ทราย ธรรมชาติ	ทราย แกรนิต	
0GP	450	135	135	1150	500	-	-
25GP	450	135	135	1150	375	125	-
50GP	450	135	135	1150	250	250	-
100GP	450	135	135	1150	-	500	-
0GP-0.5	450	135	135	1150	500	-	0.5
25GP-0.5	450	135	135	1150	375	125	0.5
50GP-0.5	450	135	135	1150	250	250	0.5
100GP-0.5	450	135	135	1150	-	500	0.5
0GP-1.0	450	135	135	1150	500	-	1.0
25GP-1.0	450	135	135	1150	375	125	1.0
50GP-1.0	450	135	135	1150	250	250	1.0
100GP-1.0	450	135	135	1150	-	500	1.0

3.3 รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด (Fresh concrete) และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened concrete) การทดสอบความสามารถในการทำงานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะถูกทดสอบหลังจากผสมคอนกรีตโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-C1611 (2005) ส่วนการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะทำการทดสอบตามมาตรฐานที่ได้แสดงในตารางที่ 26

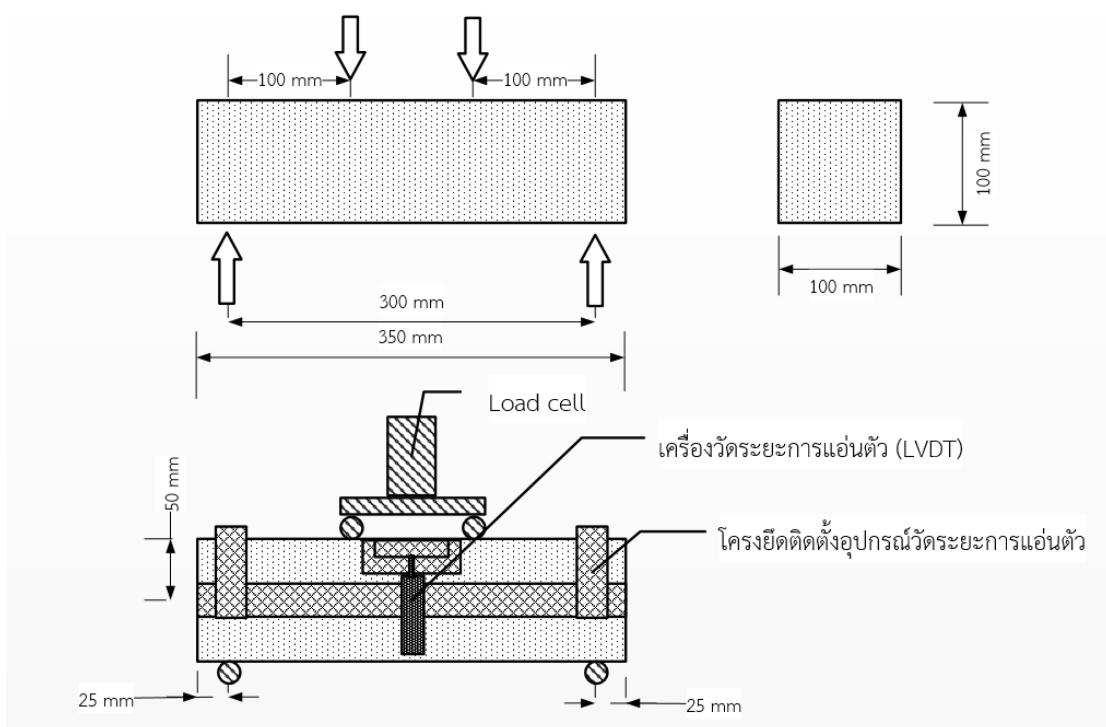
ตารางที่ 26 มาตรฐานการทดสอบและขนาดตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบ	มาตรฐานที่ใช้ อ้างอิง	ขนาดตัวอย่าง	อายุของตัวอย่าง ที่ทดสอบ
ความสามารถในการไหล แผ่ของคอนกรีต	ASTM-C1611 (2005)	-	-
กำลังอัด	ASTM-C39 (2018)	ทรงกระบอก เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	7 วัน 28 วัน และ 90 วัน
กำลังดัด	ASTM-C1609 (2010)	คาน ขนาด 10x10x35 cm	28 วัน
ปริมาณโพรง และการดูดซึมน้ำ	ASTM-C642 (2013)	ทรงลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 cm	28 วัน
ความสามารถในการ ต้านทานสภาวะเพลิงไหม้	ISO-834 (1999)	ทรงกระบอก เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28 วัน

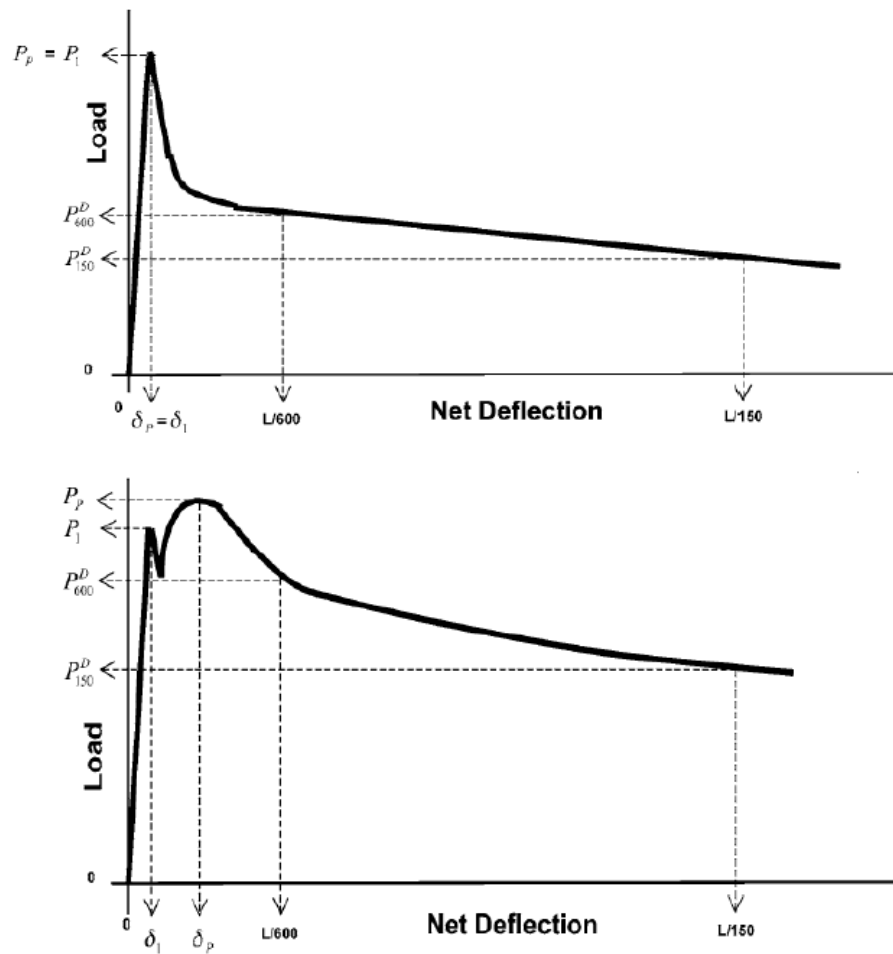
ในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัดใช้กระบวนการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-C1609 (2010) ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถรับกำลังดัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใย โดยมีลักษณะการติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือการทดสอบดังรูปที่ 35 และ 36 โดยตัวอย่างจะถูกกดในลักษณะ Third-point loading เหมือนกับการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM-C78 (2002) ในการทดสอบตามมาตรฐานตาม ASTM C1609 ยังสามารถประเมินค่าความเหนียว (Toughness) ของวัสดุโดยอาศัยการวิเคราะห์จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว (Load – deflection curve) ตามรูปที่ 37 ซึ่งการคำนวณกำลังรับแรงดัดสูงสุดครั้งแรก (First peak strength) ได้จากสมการที่ 3-1 ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด (Maximum peak strength) จากสมการที่ 3-2 โดยค่ากำลังดัดสูงสุดสามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของเส้นใยที่เสริมภายในคอนกรีต ส่วนค่าความเหนียว (Toughness) ที่ระยะการโก่งตัว L/600 และ L/150 สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ จุดโก่งตัวนั้นๆ



รูปที่ 35 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1609



รูปที่ 36 คานตัวอย่างที่ถูกกดในลักษณะ Third point loading และการติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน



รูปที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานตามมาตรฐาน

ASTM-C1609 (2010)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\text{กำลังรับแรงดัดครั้งแรก (First peak strength, } f_1) = \frac{P_1 \times L}{b \times d^2} \quad (3-1)$$

$$\text{กำลังรับแรงดัดสูงสุด (Maximum peak strength, } f_p) = \frac{P_p \times L}{b \times d^2} \quad (3-2)$$

กำลังรับแรงดัดที่ระยะการโก่งตัวต่างๆ

$$\text{(Flexural strength at point, } f_x) = \frac{P_x \times L}{b \times d^2} \quad (3-3)$$

โดยที่	P_1	หมายถึง	แรงตัดสูงสุดครั้งแรก
	P_p	หมายถึง	แรงตัดสูงสุด
	P_x	หมายถึง	แรงตัด ณ จุดโก่งตัวใดๆ ที่ระยะ $L/600$ $L/150$ และ $L/100$
	b	หมายถึง	ความกว้างของตัวอย่างคานคอนกรีต
	d	หมายถึง	ความสูงของตัวอย่างคานคอนกรีต
	L	หมายถึง	ความยาวช่วงพาดของตัวอย่างคานคอนกรีต
	δ_1	หมายถึง	การโก่งตัวที่แรงตัดสูงสุดครั้งแรก
	δ_p	หมายถึง	การโก่งตัวที่แรงตัดสูงสุด

3.4 การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยครั้งนี้จะวิเคราะห์ผลจากการทดสอบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้ทรายแกรนิต แทนที่ทรายธรรมชาติในสัดส่วนร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 แล้วใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.5 และ 1 โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งส่วนผสมเป็นไปตามตารางที่ 3.2 แล้ววิเคราะห์ผลการทดสอบการรับกำลังอัด กำลังดัด ความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีต ปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาปริมาณทรายแกรนิตและเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เหมาะสม เพื่อการประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไป

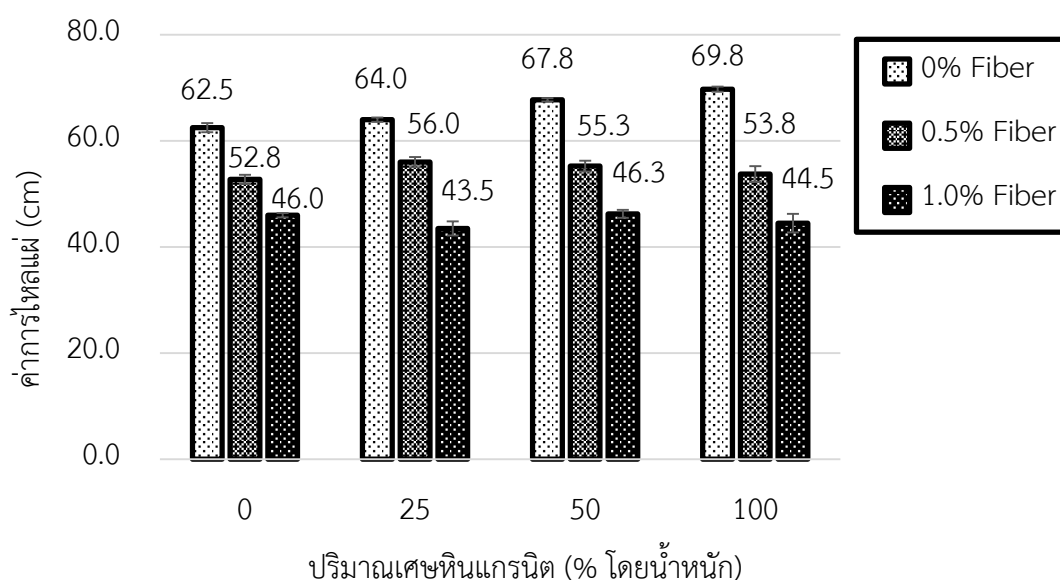
บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปราย

คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย ความสามารถในการทำงานได้, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM-C1609 (2010), โพรงและการดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อสภาวะเพลิงไหม้ ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ความสามารถในการทำงานได้

ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลโดยวัดค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM-C1611 (2005) ดังแสดงในรูปที่ 38 เมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 62.5, 64.0, 67.8 และ 69.8 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต การไหลแผ่มีค่า เท่ากับ 52.8, 56.0, 55.3 และ 53.8 เซนติเมตร และส่วนผสมที่ได้ใส่เส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ค่าการไหลแผ่เท่ากับ 46.0, 43.5, 46.3 และ 44.5 เซนติเมตร



รูปที่ 38 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล

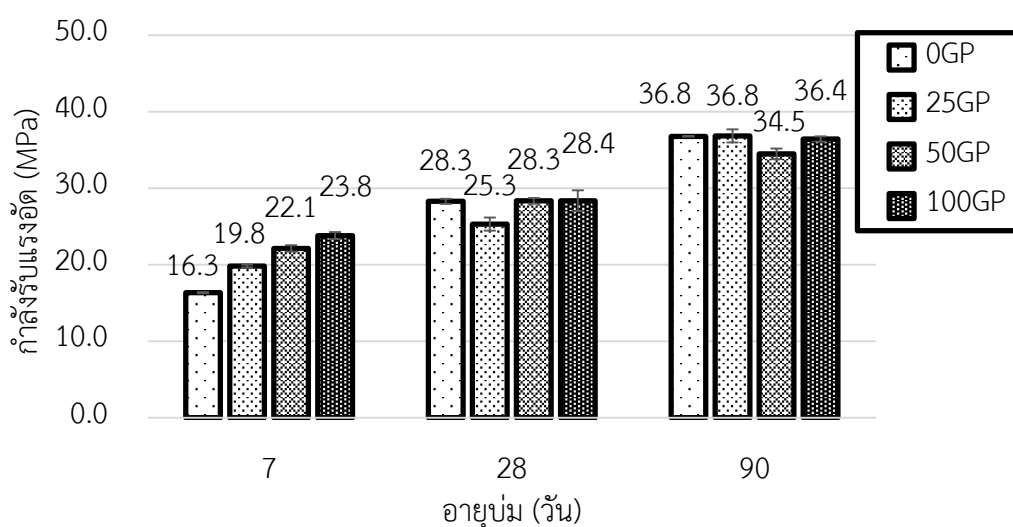
จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเศษหินแกรนิต โดยความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีสาเหตุมาจากเศษหินแกรนิตมีลักษณะที่หยาบและขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าทรายธรรมชาติ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยกว่า ดังนั้นความต้องการน้ำเพื่อมาเคลือบผิวของมวลรวมจึงลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปภัสรา วรวัฒน์นฤนาท (2562) ที่ศึกษาผลกระทบของเศษหินแกรนิตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Khine (2018) ที่พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตกำลังสูง

เมื่อมีการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในส่วนผสมพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อมีปริมาณเส้นใยในร้อยละ 1 โดยปริมาตรของคอนกรีต เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยที่มากซึ่งพื้นที่ผิวของเส้นใยได้ดูดซับซีเมนต์เพสต์เคลือบที่ผิวเส้นใย ส่งผลให้ความหนืดของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้นนำไปสู่ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตให้ลดลง (Chen & Liu, 2005)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณเศษหินแกรนิตและเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต โดยที่ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเศษหินแกรนิตเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเสริมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตเข้าไปในแต่ละส่วนผสม ซึ่งส่งผลให้มีความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลง

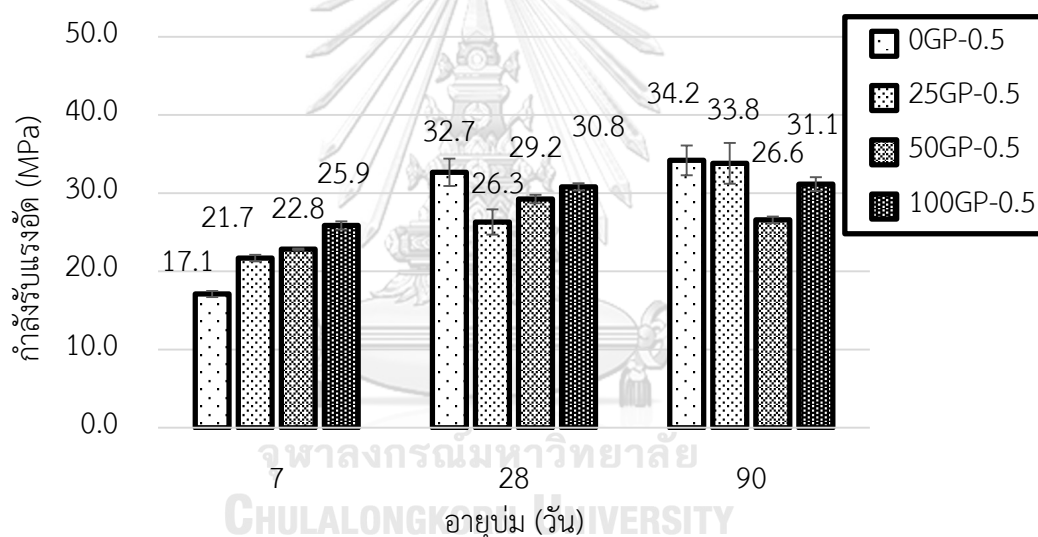
4.2 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรไพลีนปริมาณร้อยละ 0, 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 39, 40 และ 41 ตามลำดับ จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25 (25GP), 50 (50GP) และ 100 (100GP) โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 19.1, 22.1 และ 23.8 MPa ตามลำดับ มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน (0GP) ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 16.3 MPa เมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีอายุบ่มที่ 28 และ 90 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน โดยอาจจะกล่าวได้ว่าลักษณะของเศษหินแกรนิตที่เป็นเหลี่ยมมุมมีบทบาทสำคัญในการพัฒนากำลังในระยะต้นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ส่วนกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน อาจมีสาเหตุมาจากเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่างมวลรวมละเอียดและเพสต์จะมีบทบาทสำคัญในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าความเป็นเหลี่ยมมุมหรือลักษณะทางกายภาพของมวลรวม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปภัสรา วรวัฒน์นฤนาท (2562) ได้ศึกษาผลกระทบของเศษหินแกรนิตต่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่าส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่อายุบ่ม 7 วัน แต่เมื่ออายุ 28 และ 90 วันจะมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกันกับส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Khine (2018) ที่พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเศษหินแกรนิตเพิ่มขึ้นในคอนกรีตกำลังสูง

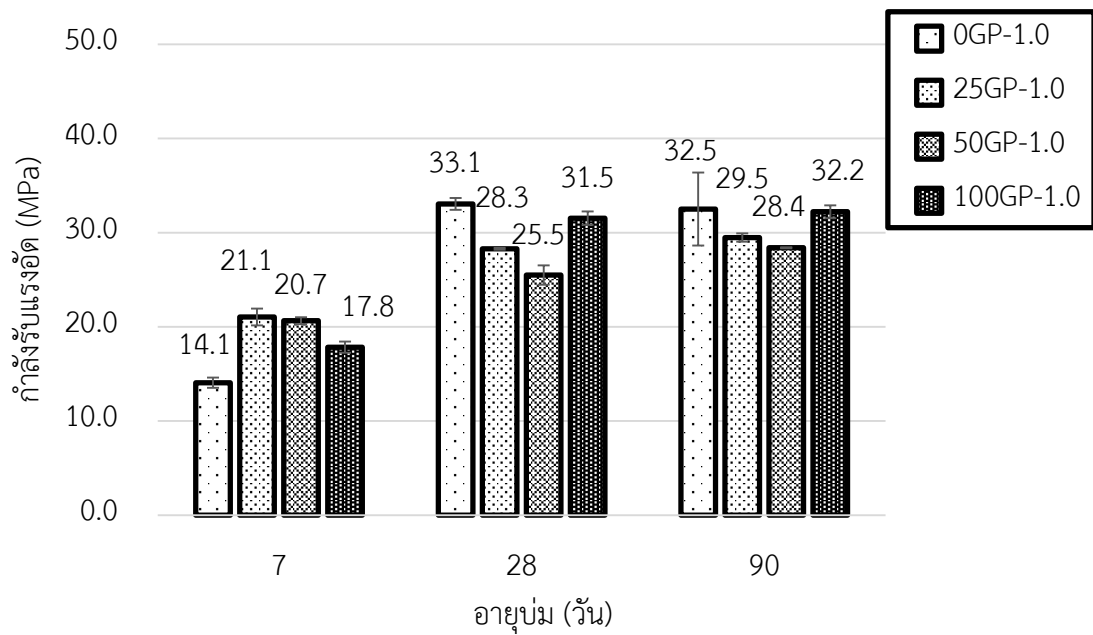


รูปที่ 39 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

จากรูปที่ 40 และ 41 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วันของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเศษหินแกรนิตทั้งในส่วนผสมที่เสริมเส้นใยร้อยละ 0.5 และ 1.0 ยกตัวอย่างเช่นส่วนผสม 0GP-0.5, 25GP-0.5, 50GP-0.5 และ 100GP-0.5 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 17.1, 21.7, 22.8 และ 25.9 MPa ตามลำดับ เมื่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยทุก ๆ ส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วนและส่วนผสมที่มีเศษหินแกรนิตเมื่อเปรียบเทียบในเชิงปริมาณการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่เสริมเส้นใยปริมาณ 0.5 และ 1.0 มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 28 วันของส่วนผสม 25GP-0.5 และ 25GP-1.0 มีค่าเท่ากับ 26.3 และ 28.3 MPa



รูปที่ 40 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต

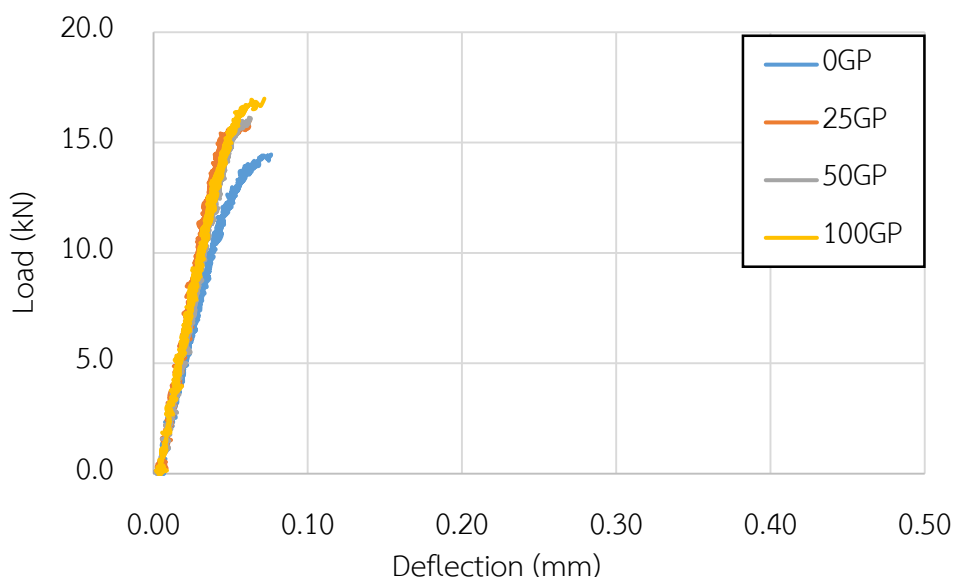


รูปที่ 41 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน ปริมาณร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต

4.3 กำลังรับแรงดัด

4.3.1 พฤติกรรมรับแรงดัด

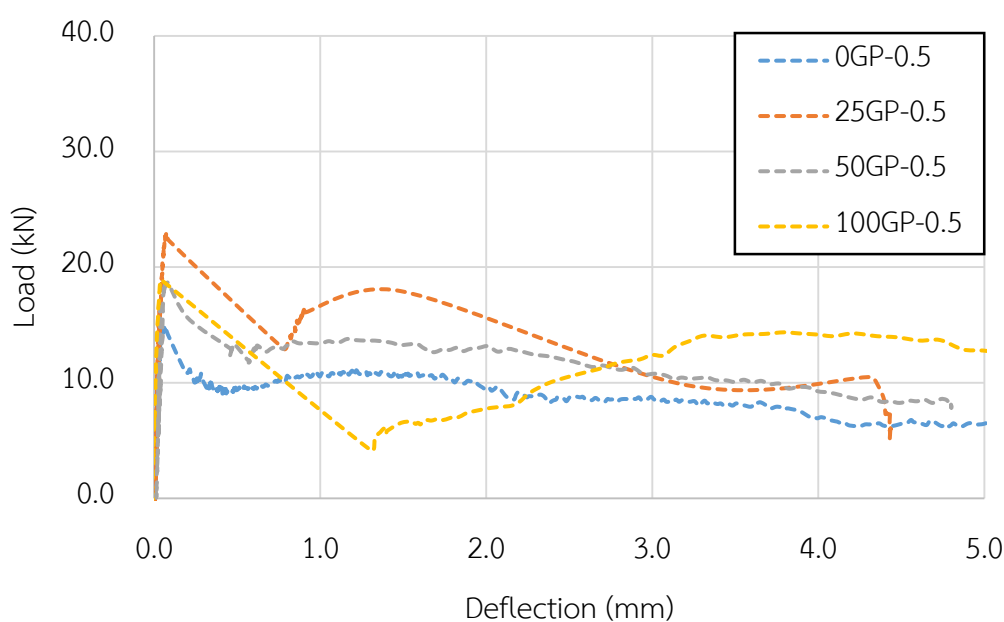
จากการทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 (0GP), 25 (25GP), 50 (50GP) และ 100 (100GP) โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) และระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน (Deflection) ดังแสดงในรูปที่ 42 พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานมีลักษณะเป็นเส้นตรงในทุกส่วนผสม แต่หลังจากเกิดรอยแตกร้าวครั้งแรกความสามารถในการรับแรงจะลดลงอย่างรวดเร็วไม่สามารถรับแรงต่อไปได้จนตัวอย่างวิบัติ ซึ่งมีพฤติกรรมการวิบัติแบบ “Brittle bending failure” (Wille, El-Tawil, & Naaman, 2014)



รูปที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

พฤติกรรมภายใต้แรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 (0GP-0.5), 25 (25GP-0.5), 50 (50GP-0.5) และ 100 (100GP-0.5) โดยน้ำหนัก และเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต แสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน ดังแสดงในรูปที่ 43 ซึ่งพบว่าในช่วงแรกอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงจุดแรงกระทำที่เกิดรอยแตกร้าวครั้งแรก (First-cracking load) แต่ภายหลังจากการ

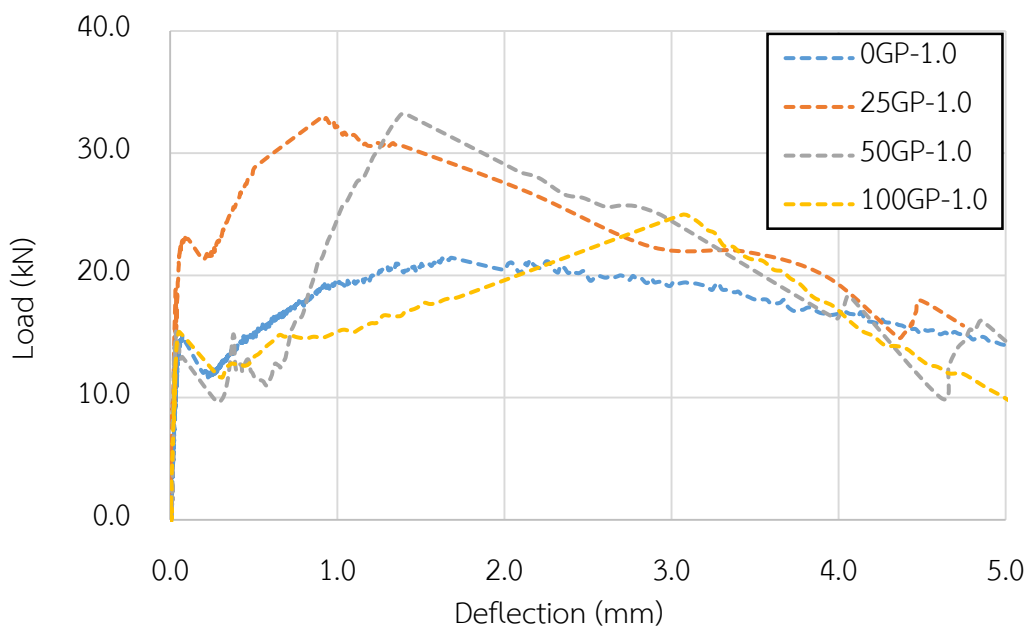
เกิดรอยแตกครั้งแรก แรงกระทำจะตกลงอย่างรวดเร็วแต่ตัวอย่างยังไม่วิบัติโดยทันทีและกลับมารับแรงกระทำได้อีก โดยการรับแรงดัดจะต่ำลงหลังจากการเกิดรอยแตกครั้งแรก แสดงจากรูปที่ 43 หลังจากนั้นแรงกระทำจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางคานจนถึงจุดรับแรงกระทำสูงสุด (Post-cracking load) จากนั้นแรงกระทำจะลดลงและระยะการแอนตัวจะเพิ่มขึ้นจนตัวอย่างวิบัติ ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบ “Deflection softening” โดยที่แรงกระทำสูงสุดมีค่าต่ำกว่าแรงกระทำที่เกิดรอยแตกครั้งแรก (Naaman & Reinhardt, 2006)



รูปที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางคานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

พฤติกรรมภายใต้แรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 (0GP-1.0), 25 (25GP-1.0), 50 (50GP-1.0) และ 100 (100GP-1.0) โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 44 พบว่า ในช่วงแรกอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำและระยะการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางคานมีลักษณะเป็นเส้นตรงคล้ายกับส่วนผสมที่ไม่เสริมเส้นใยและเสริมเส้นใยร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต จนถึงจุดแรงกระทำที่เกิดรอยแตกครั้งแรก หลังจากการเกิดรอยแตกครั้งแรก แรงกระทำจะตกลงอย่างรวดเร็วแต่ยังไม่วิบัติโดยทันทีและกลับมารับแรงกระทำได้อีกโดยพฤติกรรมรับแรงดัดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นหลังจากถึงจุดที่แรงดัดตกลง หลังจากนั้นแรงกระทำจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะการแอนตัวที่

จุดกึ่งกลางคานจนไปถึงจุดรับแรงกระทำสูงสุด ซึ่งสูงกว่าจุดแรงกระทำที่เกิดรอยแตกร้าวครั้งแรก จากนั้นแรงกระทำจะลดลงและระยะการแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้นจนตัวอย่างวิบัติ ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบ “Deflection hardening” โดยที่แรงกระทำสูงสุดมีค่าสูงกว่าแรงกระทำที่เกิดรอยแตกร้าวครั้งแรก (Naaman & Reinhardt, 2006)



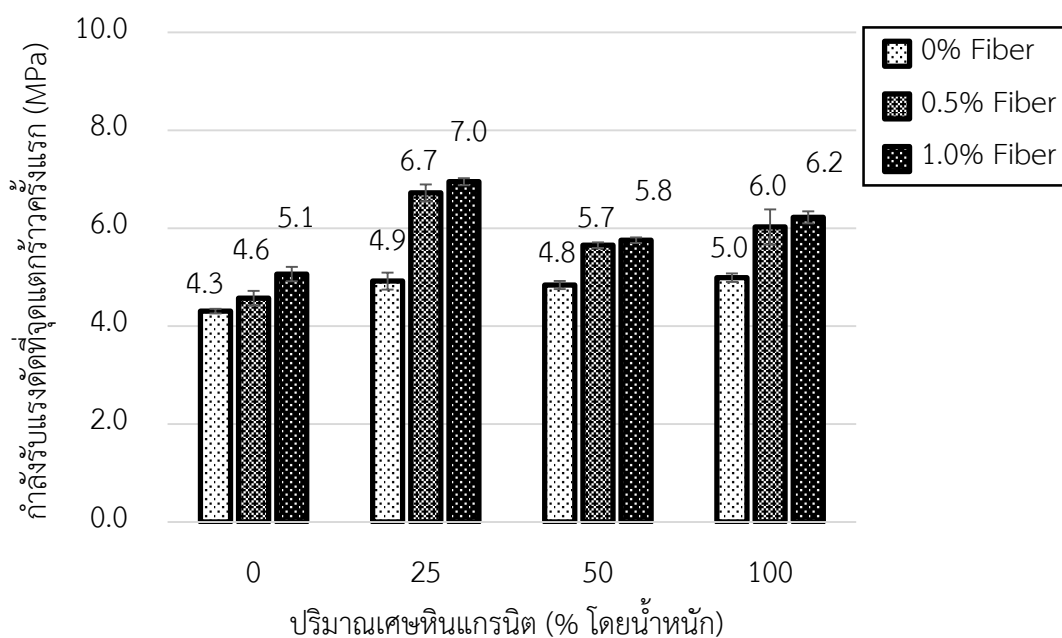
รูปที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน พบว่าแรงกระทำสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เพิ่มขึ้นโดยที่แรงกระทำสูงสุดภายหลังจากการแตกร้าวครั้งแรกของส่วนผสมที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 มีค่ามากกว่าส่วนผสมที่เสริมเส้นใยร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 43 และ 44 เนื่องจากเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีความสามารถในการต้านทานแรงดึง ซึ่งมีส่วนช่วยในการรับกำลังดึงที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของคอนกรีตและยังมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำเพื่อยับยั้งรอยแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer matrix) ที่สูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ล้วน อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการเชื่อมและยึดรั้งรอยแตกร้าวในเนื้อคอนกรีต (Song et al., 2005; Kakooei et al., 2012; Sukontasukkul et al., 2018)

4.3.2 กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวครั้งแรก (First-cracking strength, f_{cc})

กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวครั้งแรก (First-cracking strength, f_{cc}) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ผลการทดสอบแสดงได้จากรูปที่ 45 ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 3-1 จากผลการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่ยังไม่เสริมเส้นใยมี f_{cc} เท่ากับ 4.3, 4.9, 4.8 และ 5.0 MPa ตามลำดับ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติมี f_{cc} น้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษหินแกรนิตมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังดัดที่ดีขึ้น เพราะรูปร่างของเศษหินแกรนิตนั้นช่วยในการจับตัวกันระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ (Singh et al., 2016) ในส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตมีค่า f_{cc} ใกล้เคียงกัน และหลังจากเกิดรอยแตกร้าวแล้วตัวอย่างจึงวิบัติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khine (2018) ที่พบว่ากำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะความเป็นเหลี่ยมมุมและผิวขรุขระของเศษหินแกรนิตช่วยยึดเกาะมวลรวมและซีเมนต์เพสต์



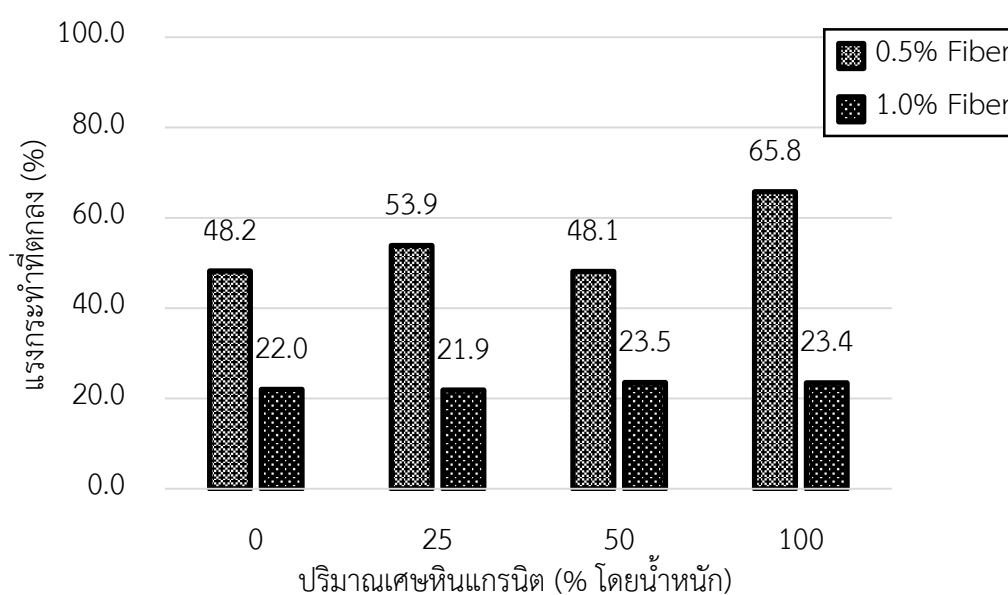
รูปที่ 45 f_{cc} ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ และเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน

แต่เมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตในทุกส่วนผสม พบว่า f_{cc} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต มี f_{cc} เท่ากับ 4.6, 6.7, 5.7 และ 6.0 MPa ตามลำดับ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติมี f_{cc} น้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีค่า f_{cc} เมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ ที่เสริมเส้นใยในร้อยละ 0.5 รองลงมาคือส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 100, 50 และ 0 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ส่วนจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก และเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต มี f_{cc} เท่ากับ 5.1, 7.0, 5.8 และ 6.2 MPa ตามลำดับ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติมี f_{cc} น้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิต ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25 โดยน้ำหนักมี f_{cc} สูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ ที่เสริมเส้นใยในร้อยละ 1.0 รองลงมาคือส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 100, 50 และ 0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อนำ f_{cc} ของส่วนผสมที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตมาเปรียบเทียบกับกัน จากรูปที่ 45 พบว่า f_{cc} มีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบในส่วนผสมเดียวกัน เนื่องจากประสิทธิภาพของเส้นใยจะแสดงออกมาหลังจาก f_{cc} เกิดขึ้นและเกิดรอยร้าว (Sukontasukkul et al., 2018)

จากรูปที่ 46 แสดงผลร้อยละของแรงกระทำที่ตกลงจากแรงกระทำสูงสุดครั้งแรก (% Load dropping) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าในส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีตมีค่าร้อยละของแรงกระทำที่ตกลงจากแรงกระทำสูงสุดครั้งแรกเท่ากับ 48.2, 53.9, 48.1 และ 65.8 ตามลำดับ พบว่าในส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 100 มีค่าแรงกระทำที่ตกลงจากแรง

กระทำสูงสุดครั้งแรกสูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ ที่เสริมเส้นใยในร้อยละ 0.5 เมื่อเสริมเส้นใยในร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่าแรงกระทำที่ตกลงจากแรงกระทำสูงสุดครั้งแรกมีค่าใกล้เคียงกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีส่วนช่วยลดร้อยละของแรงกระทำที่ตกลงจากแรงกระทำสูงสุดครั้งแรกที่เกิดขึ้น เนื่องจากเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีความต้านทานแรงดึงซึ่งมีส่วนช่วยในการรับแรงดึงที่ภายในคอนกรีตและมีประสิทธิภาพที่ช่วยยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น (Song et al., 2005; Z.-h. Zhang et al., 2009)

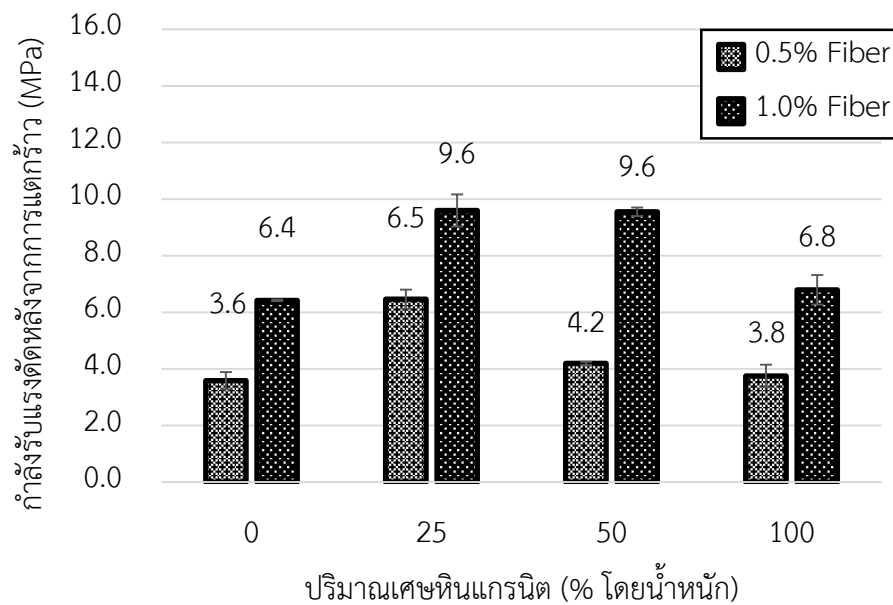


รูปที่ 46 ร้อยละของแรงกระทำที่ตกลงจาก First-cracking load

4.3.3 กำลังรับแรงดัดหลังจากการแตกร้าว (Post-cracking strength, f_{pc})

กำลังรับแรงดัดหลังจากการแตกร้าว (Post-cracking strength, f_{pc}) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ผลการทดสอบแสดงได้จากรูปที่ 47 ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 3-2 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต มี f_{pc} เท่ากับ 3.6, 6.5, 4.2 และ 3.8 MPa ตามลำดับ และส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตมี f_{pc} เท่ากับ 6.4, 9.6, 9.6 และ 6.8 MPa

ตามลำดับ ซึ่งจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มี f_{pc} ที่มากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ ทั้งเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต และพบว่า f_{pc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยพอลิโพรไพลีน เนื่องจากประสิทธิภาพของเส้นใยที่พยายามเชื่อมรอยแตกร้าวและรับแรงกระทำหลังการแตกร้าวของคอนกรีต ก่อนที่คอนกรีตจะวิบัติ (Sukontasukkul, 2004)



รูปที่ 47 f_{pc} ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติและเสริมเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน

ตารางที่ 27 กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวครั้งแรก (First-cracking strength) และกำลังรับแรงดัดหลังจากการแตกร้าว (Post-cracking strength)

ชื่อส่วนผสม	f_{cc} (MPa)	f_{pc} (MPa)
0GP	4.3±0.01	-
25GP	4.9±0.01	-
50GP	4.8±0.03	-
100GP	5.0±0.01	-
0GP-0.5	4.6±0.15	3.6±0.31
25GP-0.5	6.7±0.17	6.5±0.34
50GP-0.5	5.7±0.06	4.2±0.06
100GP-0.5	6.0±0.36	3.8±0.40
0GP-1.0	5.1±0.15	6.4±0.03
25GP-1.0	7.0±0.07	9.6±0.57
50GP-1.0	5.8±0.06	9.6±0.15
100GP-1.0	6.2±0.12	6.8±0.52

ตารางที่ 27 แสดงผล f_{cc} และ f_{pc} ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่ง f_{cc} คือ กำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวครั้งแรก ในขณะที่ f_{pc} คือ กำลังรับแรงหลังจากที่เกิดรอยแตกร้าวครั้งแรกก่อนที่คอนกรีตจะรับแรงได้น้อยลง ค่าการโก่งตัวจะเพิ่มมากขึ้นกระทั่งวิบัติ ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเส้นใยในการช่วยเสริมแรงภายในคอนกรีต จากตารางพบว่าส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0 (0GP-0.5), 25 (25GP-0.5), 50 (50GP-0.5) และ 100 (100GP-0.5) โดยน้ำหนัก และเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีตมี f_{pc} ที่น้อยกว่า f_{cc} เมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ในส่วนผสม 0GP-1.0, 25GP-1.0, 50GP-1.0 และ 100GP-1.0 พบว่า f_{pc} ที่มากกว่า f_{cc} ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยมีผลต่อการเพิ่มขึ้นและปรับปรุงกำลังรับแรงของคอนกรีต ในทางกลับกันส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเส้นใยได้แก่ ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0 (0GP), 25 (25GP), 50 (25GP) และ 100 (100GP) โดยน้ำหนัก เมื่อคอนกรีตรับกำลังได้ถึง f_{cc} และ

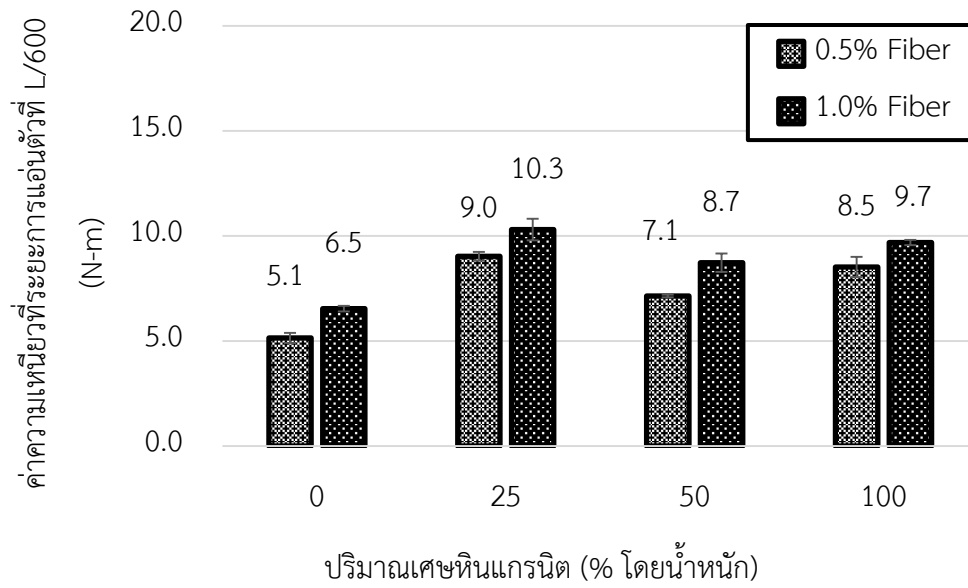
เกิดเลยแตกร้าว คอนกรีตก็จะไม่สามารถรับแรงกระทำต่อไปได้อีกและวิบัติในทันทีหลังจากเกิดรอยร้าว

4.3.4 ค่าความเหนียว

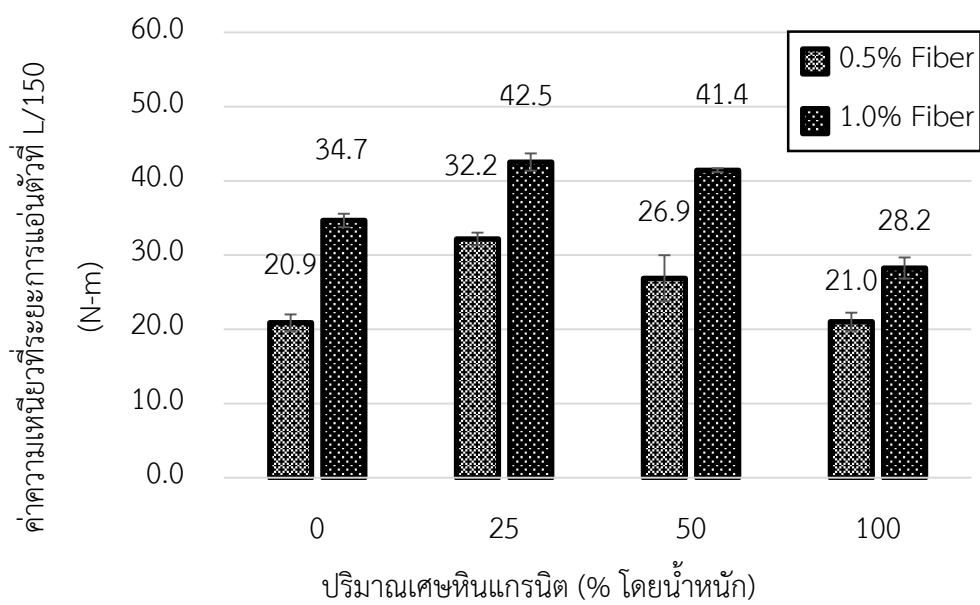
จากการทดสอบสมรรถนะการรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใย สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าความเหนียว (Toughness) ตามมาตรฐาน ASTM C1609 (2010) ซึ่งค่าความเหนียวสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการรับแรงดัดและความสามารถในการดูดซับพลังงานหลังการแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ค่าความเหนียวสามารถคำนวณได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางคาน ณ ตำแหน่งการแอ่นตัวที่ระยะ L/600 และ L/150 ดังแสดงในรูปที่ 48, 49 และตารางที่ 28

ตารางที่ 28 ผลการคำนวณค่าความเหนียวที่ระยะการแอ่นตัวที่ L/600 และ L/150

ชื่อส่วนผสม	ค่าความเหนียวที่ระยะ L/600 (MPa)	ค่าความเหนียวที่ระยะ L/150 (MPa)
0GP	-	-
25GP	-	-
50GP	-	-
100GP	-	-
0GP-0.5	5.4±0.24	20.9±1.11
25GP-0.5	9.0±0.21	32.2±0.85
50GP-0.5	7.1±0.07	26.9±3.11
100GP-0.5	8.5±0.48	21.0±1.22
0GP-1.0	6.5±0.14	34.7±0.90
25GP-1.0	10.3±0.51	42.5±1.16
50GP-1.0	8.7±0.44	41.4±0.26
100GP-1.0	9.7±0.13	28.2±1.42



รูปที่ 48 ค่าความเหนียวที่ระยะการแ่นตัวที่ L/600



รูปที่ 49 ค่าความเหนียวที่ระยะการแ่นตัวที่ L/150

จากรูปที่ 48 แสดงผลค่าความเหนียวระยะการแอนตัวที่ L/600 ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีค่าความเหนียวเท่ากับ 5.1, 9.0, 7.1 และ 8.5 N-m ตามลำดับ และเมื่อเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีค่าความเหนียวเท่ากับ 6.5, 10.3, 8.7 และ 9.7 N-m ตามลำดับ ส่วนค่าความเหนียวระยะการแอนตัวที่ L/150 แสดงในรูปที่ 49 ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีค่าความเหนียวเท่ากับ 20.9, 32.2, 26.9 และ 21.0 N-m ตามลำดับ และเมื่อเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีค่าความเหนียวเท่ากับ 34.7, 42.5, 41.4 และ 28.2 N-m ตามลำดับ โดยที่ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีค่าความเหนียวมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ โดยไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมที่เสริมเส้นใยในร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนเข้าไปในส่วนผสม โดยที่ส่วนผสมที่เสริมเส้นใยเส้นใยในร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตมีค่าความเหนียวที่มากกว่าส่วนผสมที่เสริมเส้นใยในร้อยละ 0.5 ในทุกส่วนผสม ซึ่งเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงกำลังรับแรงดัดและค่าความเหนียวของคอนกรีต (Wu, 2002; Xing et al., 2004)

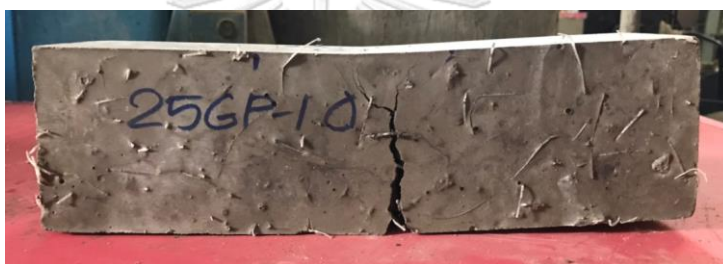
4.3.5 ลักษณะการวิบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้การรับกำลังดัด

1.) การแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural failure) รอยร้าวที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งเมื่อเกิดรอยร้าวแล้วจะทำให้ตัวอย่างวิบัติทันทีซึ่งจะส่งผลให้ตัวอย่างแยกออกจากกัน เป็นลักษณะการแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย เช่นตัวอย่างทดสอบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 50 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเส้นใยมีลักษณะแข็งเปราะ



รูปที่ 50 ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

2.) การแตกร้าวแบบรอยร้าวหยุดเคลื่อนที่ (Crack arrest) พบในตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนปริมาณ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต เนื่องจากเส้นใยจะยึดรั้งเนื้อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตไม่ให้รอยร้าวเกิดการขยายตัวออกและหยุดการเคลื่อนที่ของรอยแตกร้าว เช่นตัวอย่างทดสอบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ดังแสดงรูปที่ 51 ส่วนลักษณะการเสียรูปของเส้นใยพอลิโพรไพลีนสามารถมองเห็นได้ในลักษณะตัดขวางของหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 52 พบว่าเส้นใยมีลักษณะถูกดึงออกมาและขาดออกจากกันหลังจากช่วยยึดรั้งรอยแตกร้าวของคอนกรีตและรับภาระหลังกำลังรับแรงดัดที่จุดแตกร้าวครั้งแรกจนถึงกำลังรับแรงดัดหลังจากการแตกร้าว หลังจากนั้นคอนกรีตจึงวิบัติ



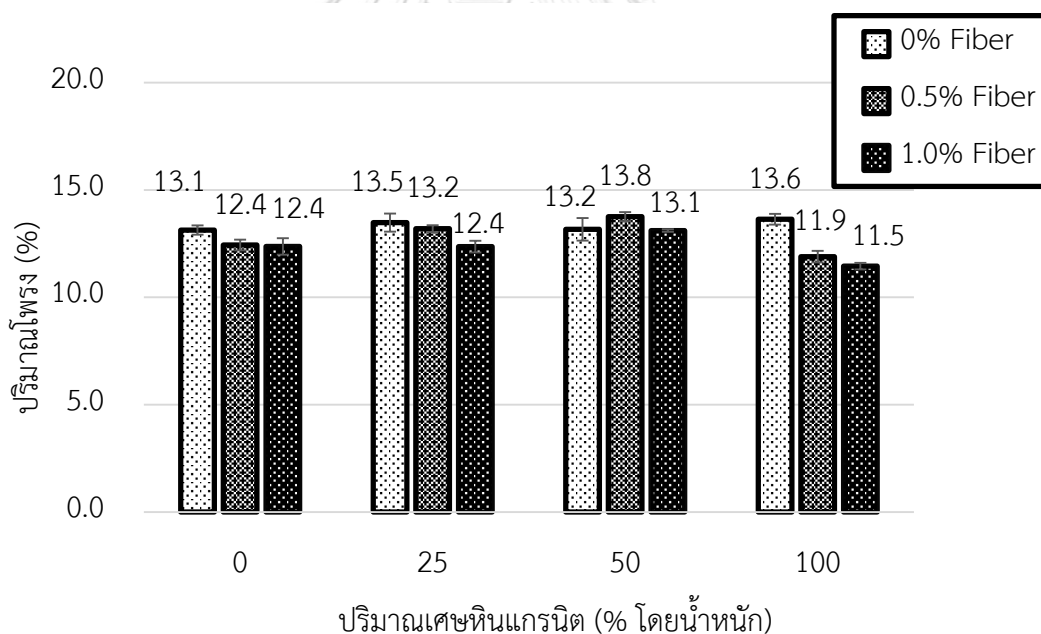
รูปที่ 51 ลักษณะการแตกร้าวแบบรอยร้าวหยุดเคลื่อนที่ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใย



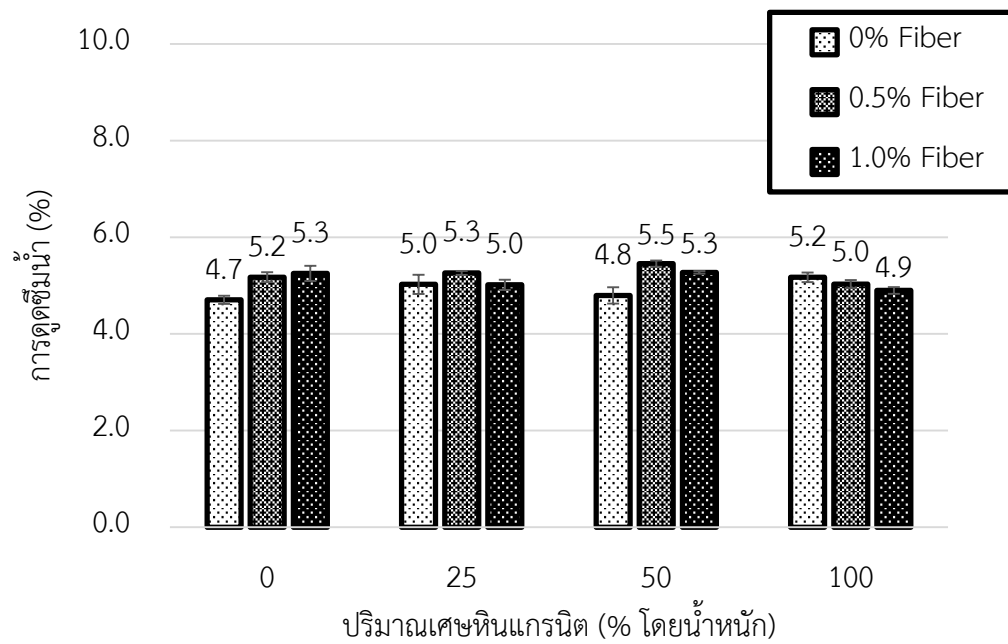
รูปที่ 52 ลักษณะการเสียรูปของเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายใต้การรับกำลังดัด

4.4 โพรงและการดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 53 และ 54 แสดงผลการทดสอบร้อยละปริมาณโพรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใย พอลิโพรไพลีนร้อยละ 0, 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่าร้อยละ ปริมาณโพรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในทุกส่วนผสมมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้น ใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตมีร้อยละปริมาณโพรงเท่ากับ 12.4, 12.4, 13.1 และ 11.5 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตพบว่าร้อยละการดูด ซึมน้ำมีค่าใกล้เคียงกันในทุกส่วนผสมเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วย เศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 5.3, 5.0, 5.3 และ 4.9 ตามลำดับ ซึ่งจากผล การทดสอบร้อยละปริมาณโพรงและร้อยละการดูดซึมน้ำนั้นแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



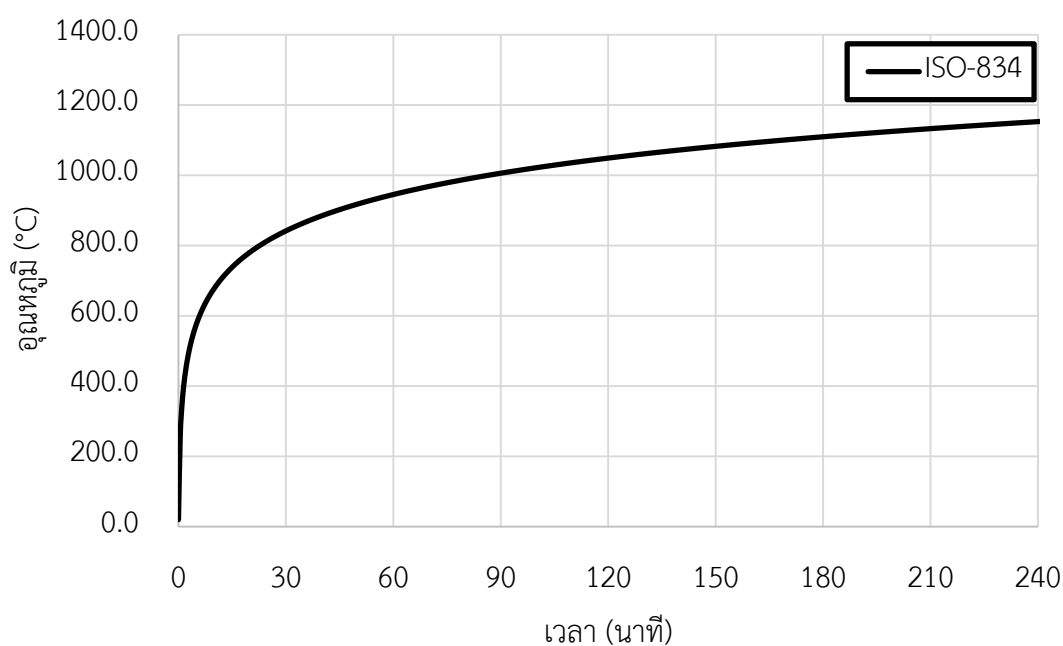
รูปที่ 53 ร้อยละปริมาณโพรงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 54 ร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

4.5 ความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้

ความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ใช้พิจารณาในการออกแบบโครงสร้างให้มีความปลอดภัย ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ศึกษาอัตราการทนไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลเศษหินแกรนิตและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน โดยศึกษาความเสียหายและกำลังอัดคงค้าง (Residual compressive strength) ภายหลังจากการเผาไฟตามมาตรฐาน ISO-834 (1999) เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 55



รูปที่ 55 อุณหภูมิทดสอบสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834

4.5.1 ความเสียหายของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ

การวิเคราะห์ความเสียหายของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟสามารถวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนคือ สีของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการทดสอบเผาไฟ ซึ่งแสดงในรูปที่ 56 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตก่อนการทดสอบเผาไฟมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน หลังจากทดสอบเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะเริ่มเปลี่ยนสีน้ำตาลเข้ม และเมื่อทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 56 C) จากการ

ทดสอบนั้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarker, Kelly, and Yao (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการทนไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่า สีผิวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะเปลี่ยนเป็นสีแดงหลังจากถูกเผาไฟที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีผิวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เป็นสีแดงนั้นเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ในแก้วลอย (Temuujin & Van Riessen, 2009)

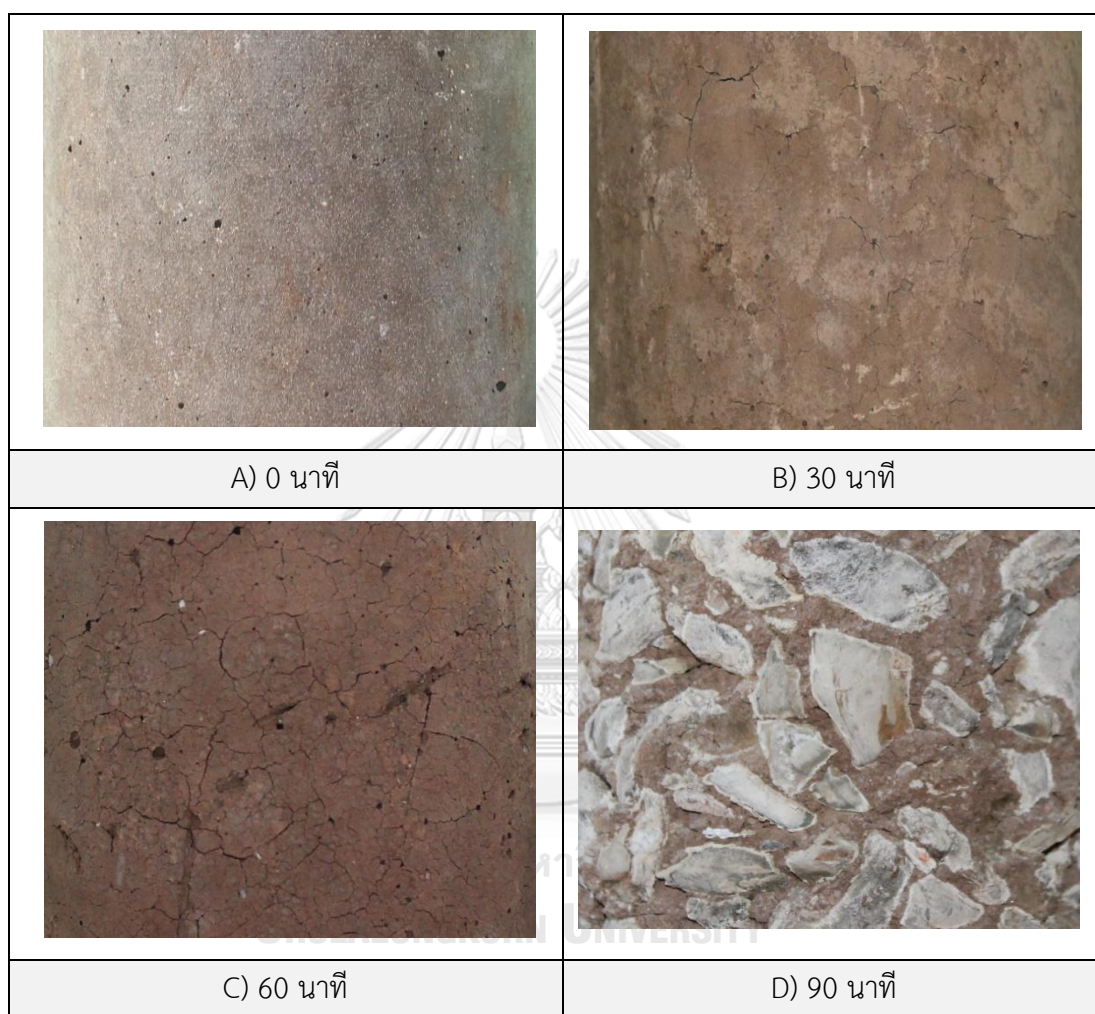


รูปที่ 56 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที

การเปลี่ยนแปลงของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่สามารถสังเกตเห็นได้อีกอย่าง คือ รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนหลังการทดสอบเผาไฟเป็นเวลา 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 57 ซึ่งรอยแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดจากการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์เฟสที่ตัวอย่างอยู่ในอุณหภูมิที่สูง เมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้ผิวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดการหดตัวซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวบนผิวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Abdulkareem et al., 2014)

หลังจากการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที พบว่าตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิดการหลุดล่อนของเนื้อคอนกรีต (Spalling) ดังแสดงในรูปที่ 56 D) และ 57 D) ซึ่งเกิดจากความดันไอจากไอน้ำในโพรงของเนื้อคอนกรีตไม่สามารถถ่ายเทออกมาได้ขณะอยู่ในอุณหภูมิที่สูง ซึ่งก่อให้เกิดความเค้นดึง (Tensile stress) ภายในเนื้อคอนกรีต การหลุดล่อนจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นดึงที่เกิดจาก

ความดันไอในโพรงของคอนกรีตเกินความต้านทานความเค้นดึงของผิวคอนกรีต (Sarker et al., 2014) และร่องรอยของโพรงที่เกิดจากการหลอมละลายของเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายใต้อุณหภูมิที่สูงมากซึ่งมีลักษณะเป็นแถบเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 58



รูปที่ 57 ผิวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังจากการทดสอบเผาไฟ
ที่ระยะเวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที



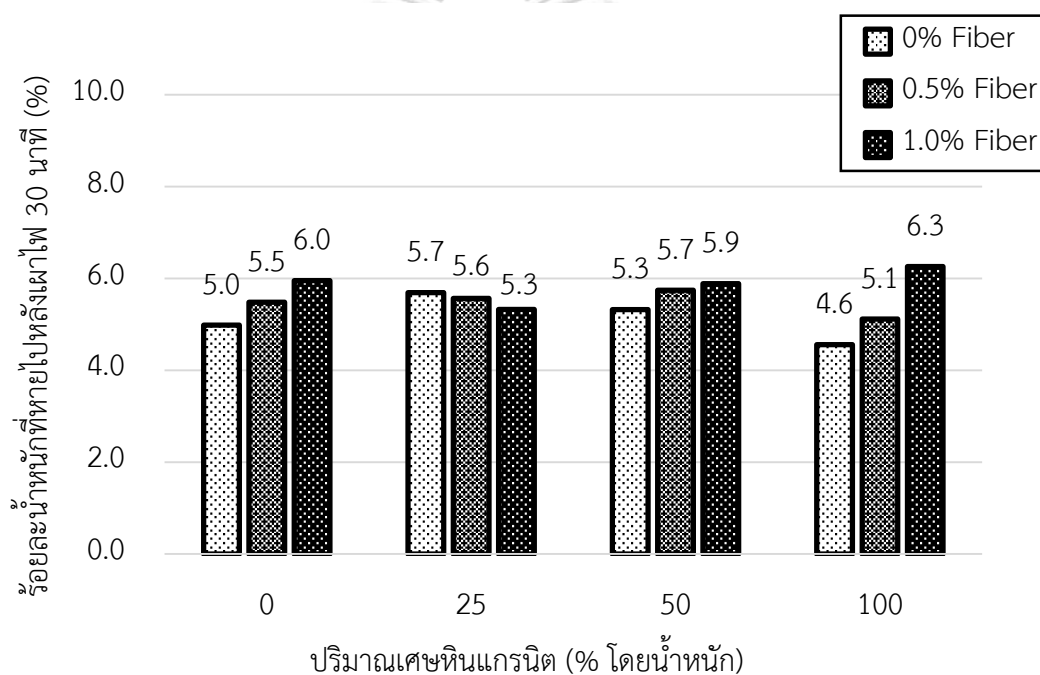
รูปที่ 58 โพรงภายในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เกิดจากการหลอมละลายของเส้นใยโพลีโพรไพลีน
ที่เวลา 90 นาที

4.5.2 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบเผาไฟ

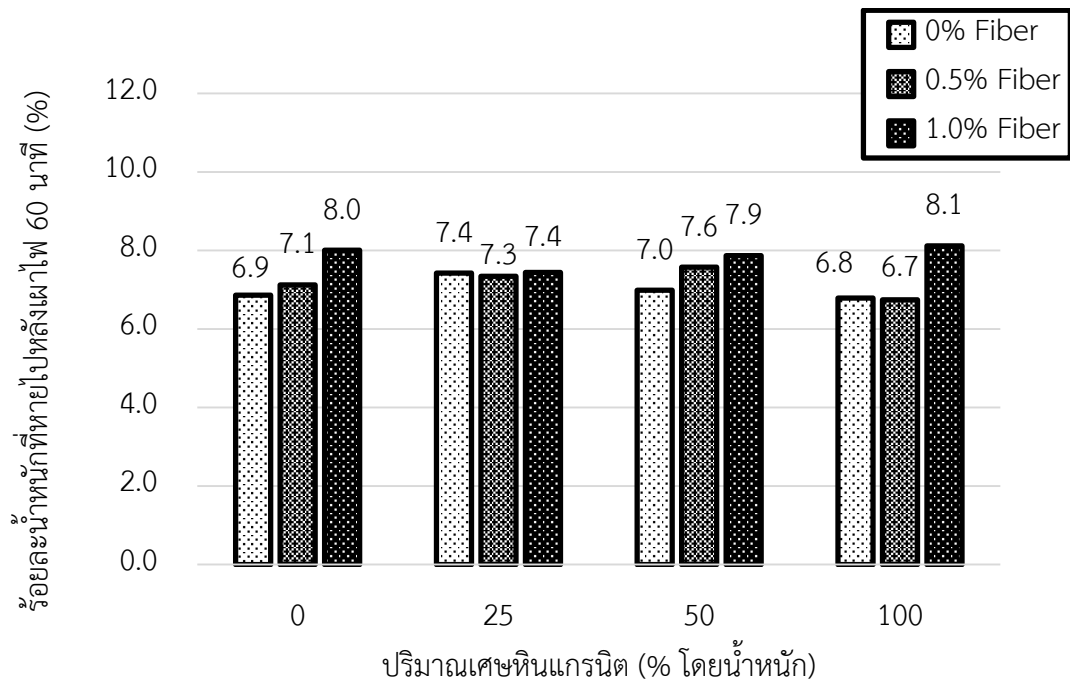
จากผลการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก มีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปใกล้เคียงกันในส่วนผสมที่ไม่ใส่เส้นใยโพลีโพรไพลีนทั้งในระยะเวลาเผาไฟ 30, 60 และ 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 59, 60 และ 61 ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ร้อยละน้ำหนักที่หายไปหลังจากการเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาทีมีค่าเท่ากับ 6.9, 7.4, 7.0 และ 6.8 ตามลำดับ

เมื่อเสริมเส้นใยโพลีโพรไพลีนในร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตลงในแต่ละส่วนผสม กลับพบว่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นทั้งระยะเวลาการเผาไฟ 30, 60 และ 90 นาที เมื่อเทียบกับในแต่ละส่วนผสม เนื่องจากเส้นใยโพลีโพรไพลีนจะสร้างโพรงอากาศภายในคอนกรีตหลังจากที่ถูกหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตสูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผาไฟ ส่วนผสมที่เสริมเส้นใยโพลีโพรไพลีนร้อยละ 0.5 จะมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าส่วนผสมที่เสริมเส้นใยร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยเสริมเส้นใยโพลีโพรไพลีนร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต มีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปหลังเผาไฟ 60 นาที 7.6 และ 7.9 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hiremath and

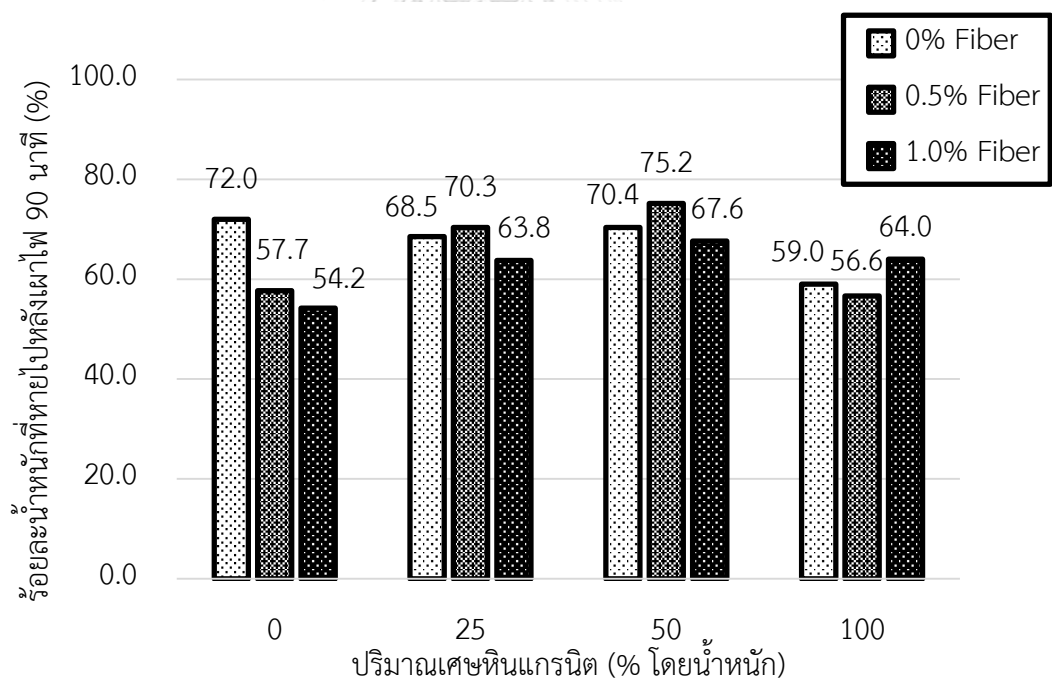
Yaragal (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนภายใต้อุณหภูมิสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้อธิบายไว้ว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผาไฟจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเส้นใยพอลิโพรไพลีนจะถูกหลอมละลายโดยสมบูรณ์และสร้างช่องโพรงอากาศไว้ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจะส่งผลให้สูญเสียน้ำหนักหลังการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามการผสมเส้นใยสามารถช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วนหลังจากการเผาไฟเป็นระยะเวลา 90 นาที แตกต่างจากส่วนผสมที่ใช้ทรายจากหินแกรนิตล้วนซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากโพรงที่เกิดขึ้นจากการละลายของเส้นใยเกิดการขยายตัวและกระจายแตกร้าวได้ง่ายขึ้นเมื่อใช้มวลรวมละเอียดจากหินแกรนิต เนื่องจากเศษแกรนิตเสื่อมสลายตัวได้ง่ายกว่าทรายธรรมชาติภายใต้การสัมผัสอุณหภูมิสูง (Hewlett & Liska, 2019)



รูปที่ 59 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 30 นาที



รูปที่ 60 ร้อยละน้ำหนักรั่วที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 60 นาที



รูปที่ 61 ร้อยละน้ำหนักรั่วที่หายไปหลังการทดสอบเผาไฟ 90 นาที

4.5.3 กำลังแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 0, 30, 60 และ 90 นาที แสดงในตารางที่ 29 จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมากหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ยกตัวอย่างเช่นส่วนผสมที่เศษหินแกรนิตร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (25GP) มีค่ากำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที เท่ากับ 26.3, 10.3 และ 4.3 MPa ตามลำดับ ซึ่งร้อยละกำลังรับแรงอัดคงค้างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ส่วนผสม 25GP หลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาทีเหลือเพียงแค่ร้อยละ 48.4 และ 16.3 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน

ในขณะที่เดียวกันผลกระทบของเส้นใยพอลิโพรไพลีนต่อกำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต กำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใย ยกตัวอย่างเช่นส่วนผสม 25GP-0.5 และ 25GP-1.0 มีค่ากำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาทีเท่ากับ 10.3 และ 9.0 MPa ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Serafini et al. (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างภายใต้การเผาไฟต่อคอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน และพบว่าเมื่อเส้นใยพอลิโพรไพลีนจะถูกหลอมละลายภายใต้อุณหภูมิที่สูงมากจะก่อให้เกิดโพรงอากาศและรอยแตกร้าวภายในคอนกรีต จะส่งผลให้เกิดความพรุนภายในซีเมนต์เพสต์ และทำให้คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตลดลง นอกจากนี้การเปลี่ยนรูปผลึกของควอตซ์ที่มีในทรายธรรมชาติและแกรนิตที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส จากรูปแบบ α -Trigonal ไปเป็นรูปแบบ β -Hexagonal ส่งผลให้ปริมาตรผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลให้เกิดการแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีต และการเปลี่ยนเฟสผลึกย้อนกลับจะมีผลเสียต่อการรับกำลังของคอนกรีตภายหลังที่คอนกรีตเย็นตัวลง ส่วนกำลังรับแรงอัดหลังเผาไฟที่ 90 นาที ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตไม่สามารถที่จะทดสอบกำลังอัดได้ เพราะตัวอย่างคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนและเสียหายหลังจากทดสอบเผาไฟที่ 90 นาทีในทุกส่วนผสม

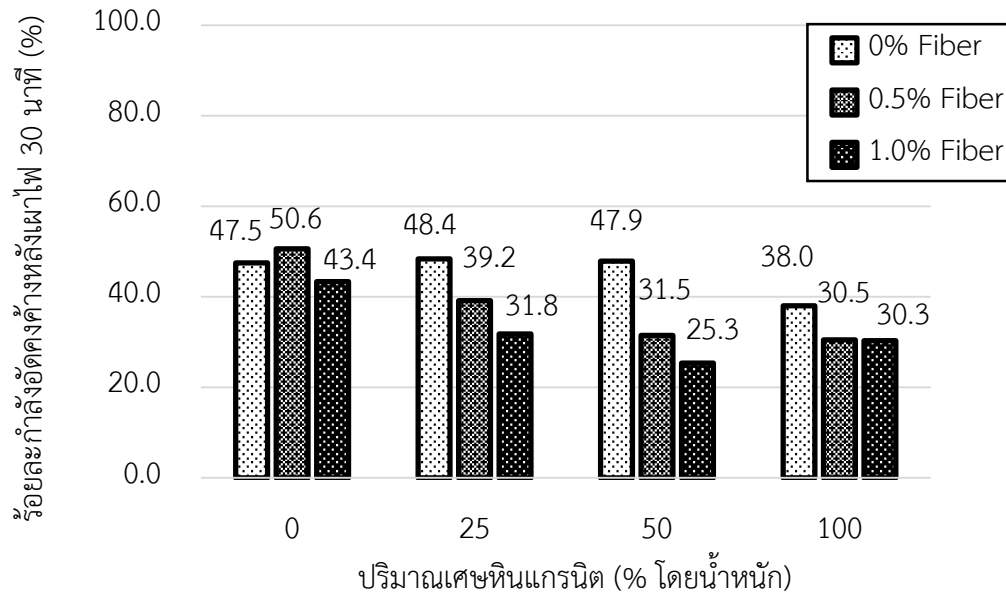
ตารางที่ 29 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 นาที

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ (MPa)			
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที
0GP	28.3 ± 0.47	13.4 ± 0.15	4.1 ± 0.06	-
25GP	25.3 ± 1.48	12.2 ± 0.16	4.1 ± 0.05	-
50GP	28.3 ± 0.53	13.6 ± 0.16	4.3 ± 0.03	-
100GP	28.4 ± 2.34	10.8 ± 0.03	4.7 ± 0.02	-
0GP-0.5	32.7 ± 2.47	16.5 ± 0.10	4.3 ± 0.19	-
25GP-0.5	26.3 ± 2.30	10.3 ± 0.15	4.3 ± 0.15	-
50GP-0.5	29.2 ± 0.95	9.2 ± 0.21	4.1 ± 0.08	-
100GP-0.5	30.8 ± 0.65	9.4 ± 0.14	5.1 ± 0.21	-
0GP-1.0	33.5 ± 1.08	14.5 ± 0.16	3.5 ± 0.21	-
25GP-1.0	28.3 ± 0.12	9.0 ± 0.09	3.6 ± 0.06	-
50GP-1.0	25.5 ± 1.45	6.5 ± 0.15	3.6 ± 0.24	-
100GP-1.0	31.5 ± 1.43	9.6 ± 0.21	4.1 ± 0.59	-

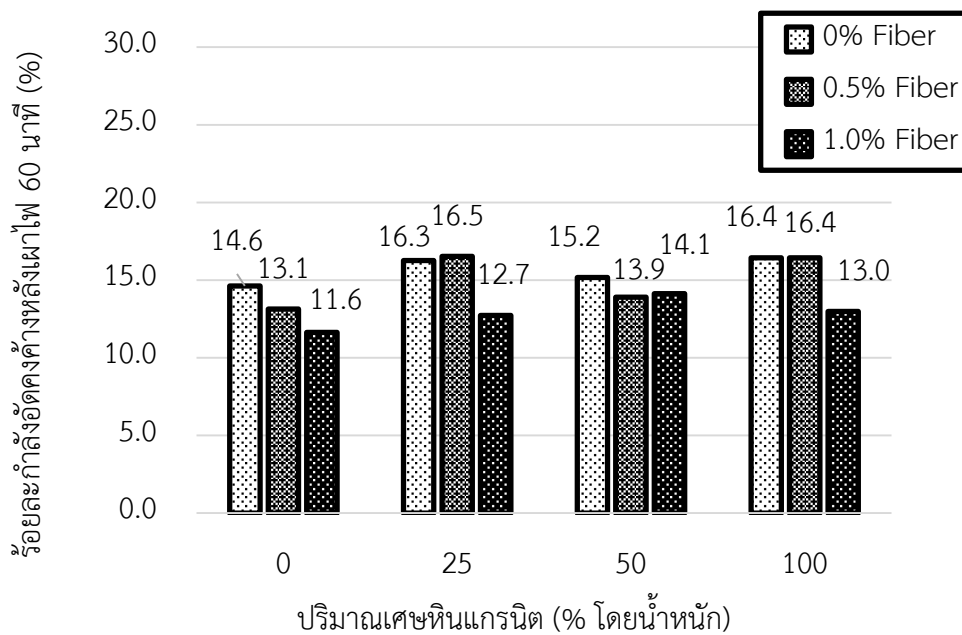
ค่าร้อยละกำลังอัดคงค้างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 30 และ 60 นาที แสดงในรูปที่ 62 และ 63 จากผลการทดสอบพบว่า ส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละกำลังอัดคงค้างหลังเผาไฟ 30 นาที เท่ากับ 47.5, 48.4, 47.9 และ 38.0 ตามลำดับ ซึ่งจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตล้วนมี ร้อยละกำลังอัดคงค้างน้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วนและส่วนผสมที่ใช้ทราย แกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ ส่วนร้อยละกำลังอัดคงค้างหลังการทดสอบเผาไฟที่เวลา 60 นาที พบว่า ทุกส่วนผสมมีค่าร้อยละกำลังอัดคงค้างที่ใกล้เคียงกัน

ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน พบว่าร้อยละกำลังอัดคงค้างมีค่าลดลง ตามปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วย เศษหินแกรนิตร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดย ปริมาตรของคอนกรีต มีค่ากำลังอัดคงค้างหลังเผาไฟ 30 นาที ร้อยละ 39.2 และ 31.8 ตามลำดับ เนื่องจากการหลอมละลายของเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่อุณหภูมิสูงจะก่อให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อ

คอนกรีต ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของรอยแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีต (Internal micro cracks) โดยมีผลต่อคุณภาพของคอนกรีตที่ลดลงโดยตรง เมื่อช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้คอนกรีตวิบัติในที่สุด (Hiremath et al., 2018)



รูปที่ 62 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 30 นาที



รูปที่ 63 ร้อยละกำลังอัดคงค้างของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตหลังทดสอบเผาไฟ 60 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกล ความทนทานและความสามารถในการทำงานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตเหลือทิ้งจากโรงโม่หินที่นำกลับมาใช้ใหม่มาแทนที่ทรายธรรมชาติในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก และผสมเส้นใยพอลิโพรไพลีนในปริมาณร้อยละ 0, 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต เพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมทรายธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้มีการทดสอบสมบัติทางกลซึ่งประกอบไปด้วย ความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตสด, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM C1609, ปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน ISO-834 ผลการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบเพื่อหาปริมาณทรายแกรนิตและเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เหมาะสมเพื่อการประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไป

จากผลการทดสอบพบว่าการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาตินั้นส่งผลให้ความสามารถในการทำงานมีแนวโน้มที่ดีขึ้น แต่เมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนลงในส่วนผสมพบว่าค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสดมีค่าลดลงตามปริมาณการเสริมเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งในอายุ 7 วัน พบว่าส่วนผสมที่มีเศษหินแกรนิตมีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน โดยส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตล้วนมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ที่อายุ 7 วัน อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยหลังจากตัวอย่างมีอายุ 28 และ 90 วัน และการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต แต่พบว่าเส้นใยพอลิโพรไพลีนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านกำลังรับแรงดัดและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น การใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 25 โดยน้ำหนักร่วมกับการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต ให้ผลลัพธ์ในการรับกำลังดัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ส่วนโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทั้งเสริมและไม่เสริมเส้นใยได้ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามการใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนกลับส่งผลเชิงลบต่อ

ความสามารถในการทนไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทั้งน้ำหนักที่สูญเสียและกำลังรับแรงอัดคงค้าง หลังการทดสอบเผาไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษหินแกรนิต

จากการทดสอบสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพบว่าเศษหินแกรนิตซึ่งเป็นของเหลือจากโรงโม่หินสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ โดยสามารถใช้แทนที่ทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก แต่นำมาใช้ร่วมกับเส้นใยพอลิโพรไพลีนสามารถใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีตจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีประสิทธิภาพที่ดีในการรับกำลังดัดโดยให้ค่าความเหนียวที่ระยะการแอนตัว L/150 สูงที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้พบว่าเศษหินแกรนิตสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ โดยสามารถใช้แทนที่ทรายธรรมชาติ โดยสมบัติทางกลต่าง ๆ ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติมีสมบัติทางกลที่คล้ายกันใช้ทรายธรรมชาติล้วนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ส่วนปริมาณการใช้เส้นใยพอลิโพรไพลีนควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาการใช้มวลรวมรีไซเคิลจากวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ และนำมาใช้ร่วมกับเส้นใยพอลิโพรไพลีนในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อศึกษาปรับปรุงสมบัติและพัฒนาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 30 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย	น้ำหนัก ทรายที่ค้ำ	ร้อยละ ทรายค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้ำ ตะแกรง สะสม	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง
เบอร์	g	g	g	%	%	%
No.4	503.91	519.75	15.84	3.17	3.17	96.83
No.8	481.00	516.24	35.24	7.05	10.22	89.78
No.16	416.13	469.54	53.41	10.68	20.90	79.10
No.30	389.36	482.73	93.37	18.67	39.57	60.43
No.50	344.52	518.64	174.12	34.82	74.40	25.60
No.100	334.41	431.43	97.02	19.40	93.80	6.20
Pan	373.49	403.00	29.51	5.90	99.70	0.30
โมดูลัสความละเอียด					2.42	

ตารางที่ 31 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติ

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
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 32 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
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 33 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษหินแกรนิต

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย	น้ำหนัก ทรายที่ค้าง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง สะสม	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง
เบอร์	g	g	g	%	%	%
No.4	503.87	531.39	27.52	5.50	5.50	94.50
No.8	481.16	603.33	122.17	24.43	29.94	70.06
No.16	416.13	560.00	143.87	28.77	58.71	41.29
No.30	388.06	506.68	118.62	23.72	82.44	17.56
No.50	344.27	400.25	55.98	11.20	93.63	6.37
No.100	334.26	353.39	19.13	3.83	97.46	2.54
Pan	373.49	386.50	13.01	2.60	100.00	0.00
โมดูลัสความละเอียด					3.68	

ตารางที่ 34 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเศษหินแกรนิต

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
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 35 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของเศษหินแกรนิต

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
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 36 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย	น้ำหนัก ทรายที่ค้ำ	ร้อยละ ทรายค้ำ ตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้ำ ตะแกรง สะสม	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง
เบอร์	g	g	g	%	%	%
No.4	503.88	512.56	8.68	1.74	1.74	98.26
No.8	481.09	545.06	63.97	12.79	14.53	85.47
No.16	416.19	524.00	107.81	21.56	36.09	63.91
No.30	388.20	515.91	127.71	25.54	61.63	38.37
No.50	344.20	451.76	107.56	21.51	83.15	16.85
No.100	334.24	392.15	57.91	11.58	94.73	5.27
Pan	373.48	399.86	26.38	5.28	100.00	0.00
โมดูลัสความละเอียด					2.92	

ตารางที่ 37 ผลการหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย	น้ำหนัก ทรายที่ค้าง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง	ร้อยละ ทรายค้าง ตะแกรง สะสม	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง
เบอร์	g	g	g	%	%	%
No.4	503.88	521.74	17.86	3.57	3.57	96.43
No.8	481.12	566.30	85.18	17.04	20.61	79.39
No.16	416.13	537.50	121.37	24.27	44.88	55.12
No.30	388.16	508.23	120.07	24.01	68.90	31.10
No.50	344.19	432.80	88.61	17.72	86.62	13.38
No.100	334.27	380.49	46.22	9.24	95.86	4.14
Pan	373.51	394.11	20.60	4.12	99.98	0.02
โมดูลัสความละเอียด					3.20	

ตารางที่ 38 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
ระดับน้ำมันก๊าดก่อนทดสอบ (ml)	1.0
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (°C)	20.0
น้ำหนักถาดและเถ้าลอยก่อนการทดลอง (g)	567.7
น้ำหนักถาดและเถ้าลอยที่เหลือ (g)	526.4
น้ำหนักเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลอง (g)	41.3
ระดับน้ำมันก๊าดหลังการทดลอง (g)	0.5
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งที่ 2 (°C)	21.0
ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (ml)	19.3
ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย	2.28

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 39 ข้อมูลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต (cm)			
	1	2	3	4
0GP	64.0	63.0	60.0	63.0
25GP	64.0	64.0	65.0	63.0
50GP	67.0	67.5	68.0	68.5
100GP	71.0	69.0	69.0	70.0
0GP-0.5	52.0	55.0	53.0	51.0
25GP-0.5	54.0	52.0	52.0	56.0
50GP-0.5	57.0	53.0	54.0	57.0
100GP-0.5	50.0	57.0	53.0	55.0
0GP-1.0	46.0	45.0	46.0	47.0
25GP-1.0	43.0	46.0	40.0	45.0
50GP-1.0	45.0	45.0	48.0	47.0
100GP-1.0	41.0	48.0	42.0	47.0

ตารางที่ 40 ข้อมูลการทดสอบการรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)				ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3	4		
0GP	1	7	101.1	101.5	100	101.4	202.9	131.1
0GP	2	7	101.8	102.7	100	101.3	199.9	131.6
0GP	3	7	99.6	100.4	100.6	100.8	200.6	167.8
0GP	4	7	99.3	98.9	98.6	98.2	200.0	153.2
0GP	1	28	101.0	101.1	100.5	102.1	200.0	183.1
0GP	2	28	100.1	100.1	100.5	100.8	200.9	220.5
0GP	3	28	99.7	100.0	100.5	100.0	201.5	307.5
0GP	4	28	100.3	100.6	100.1	100.2	201.0	226.3
0GP	1	90	100.0	99.5	100.3	100.0	199.7	288.6
0GP	2	90	100.3	100.5	100.7	100.3	200.1	217.6
0GP	3	90	101.6	99.0	101.7	100.0	203	210.1
0GP	4	90	99.5	99.3	99.8	100.0	200.5	285.9
25GP	1	7	100.0	100.6	100.5	100.3	201.2	209.4
25GP	2	7	100.3	99.2	100.0	100.5	200.6	156.6
25GP	3	7	100.0	100.5	100.3	99.5	201.8	155.0
25GP	4	7	100.5	100.2	100.8	100.0	200.5	204.7
25GP	1	28	99.7	100.3	100.2	100.0	199.6	199.0
25GP	2	28	101.3	100.3	100.2	101.4	202.0	182.7
25GP	3	28	99.2	99.5	99.9	99.9	200.7	128.4
25GP	4	28	100.6	100.5	100.0	100.5	200.6	178.4
25GP	1	90	99.7	100.2	100.9	100.3	200.2	202.6
25GP	2	90	99.8	101.4	101.1	98.8	199.8	223.0
25GP	3	90	100.2	100.1	100.5	100.0	203.5	290.8
25GP	4	90	99.3	98.1	100.0	98.1	200.7	194.3
50GP	1	7	100.7	100.4	99.7	100.9	200.7	178.0
50GP	2	7	99.0	100.2	101.3	101.2	201.8	171.1
50GP	3	7	100.2	99.5	99.6	99.9	201.6	199.2

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)				ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3	4		
50GP	4	7	98.0	98.5	98.0	99.0	200.0	214.4
50GP	1	28	100.2	100.4	100.0	100.1	201.0	226.5
50GP	2	28	100.0	99.9	99.3	100.0	199.2	218.5
50GP	3	28	100.0	99.0	99.9	100.2	200.5	182.3
50GP	4	28	100.5	100.6	100.2	100.3	200.7	171.5
50GP	1	90	100.6	100.2	100.9	100.6	202.2	279.4
50GP	2	90	100.2	100.3	100.5	100.5	200.5	267.2
50GP	3	90	100.5	101.5	100.3	101.7	200.7	197.6
50GP	4	90	99.9	100.8	100.1	100.4	201.5	165.1
100GP	1	7	100.0	100.0	100.1	100.2	200.8	180.00
100GP	2	7	98.9	100.0	100.3	100.1	200.0	190.00
100GP	3	7	100.0	102.6	102.0	100.3	198.7	195.00
100GP	4	7	99.7	100.0	100.2	100.3	199.1	220.00
100GP	1	28	100.6	99.4	100.8	99.8	199.1	205.3
100GP	2	28	100.0	100.9	101.3	101.0	198.9	245.3
100GP	3	28	100.0	100.0	100.1	99.4	198.4	221.6
100GP	4	28	99.6	100.1	100.0	99.9	199.0	295.3
100GP	1	90	98.2	100.5	98.6	100.0	199.5	278.0
100GP	2	90	100.1	99.7	99.9	100.0	200.0	304.6
100GP	3	90	99.1	100.1	100.9	100.4	195.7	291.9
100GP	4	90	100.5	99.4	100.0	100.2	198.8	285.4
0GP-0.5	1	7	98.8	100.5	100.1	99.4	200.0	130.5
0GP-0.5	2	7	100.0	100.1	100.5	100.0	202.4	137.8
0GP-0.5	3	7	100.0	99.9	100.3	100.5	196.0	107.0
0GP-0.5	1	28	101.1	101.0	100.5	100.2	201.3	270.6
0GP-0.5	2	28	99.2	99.9	100.0	100.0	201.1	293.0
0GP-0.5	3	28	100.1	102.0	102.5	102.5	200.9	216.1
0GP-0.5	1	90	100.4	100.1	100.0	100.3	201.2	284.6

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)				ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3	4		
0GP-0.5	2	90	100.2	100.5	100.9	100.6	199.7	256.4
0GP-0.5	3	90	100.0	100.3	100.2	100.0	203.3	326.8
25GP-0.5	1	7	100.7	100.5	100.9	99.9	200.6	170.2
25GP-0.5	2	7	99.5	100.1	100.0	99.9	199.7	176.4
25GP-0.5	3	7	100.1	102.4	102.7	100.2	200.9	170.4
25GP-0.5	1	28	101.0	100.5	100.2	101.1	202.1	340.8
25GP-0.5	2	28	100.0	99.6	99.9	99.5	201.9	218.3
25GP-0.5	3	28	102.1	100.3	101.5	102.5	199.3	200.1
25GP-0.5	1	90	99.8	100.0	101.1	100.3	201.8	246.6
25GP-0.5	2	90	98.3	99.6	98.1	99.6	200.5	203.3
25GP-0.5	3	90	101.1	100.8	101.5	100.9	200.1	292.2
50GP-0.5	1	7	99.8	100.0	100.2	99.9	200.7	179.9
50GP-0.5	2	7	100.1	101.1	101.5	100.9	199.0	142.2
50GP-0.5	3	7	100.2	100.6	101.4	101.0	200.5	181.5
50GP-0.5	1	28	99.5	100.9	99.3	100.7	199.8	236.9
50GP-0.5	2	28	100.7	100.1	100.4	100.8	199.1	233.2
50GP-0.5	3	28	101.6	102.2	99.9	103.0	204.1	229.2
50GP-0.5	1	90	99.6	100.0	99.5	100.0	200.4	211.1
50GP-0.5	2	90	100.2	99.7	100.0	100.2	200.8	158.3
50GP-0.5	3	90	99.2	100.3	100.5	100.0	201.6	205.6
100GP-0.5	1	7	100.2	101.6	101.9	100.1	201.8	238.6
100GP-0.5	2	7	100.4	100.0	100.1	100.9	201.0	225.8
100GP-0.5	3	7	102.0	100.0	101.4	99.5	202.5	153.4
100GP-0.5	1	28	100.5	100.6	101.1	100.3	200.4	241.3
100GP-0.5	2	28	98.9	99.9	100.4	100.0	202.0	366.6
100GP-0.5	3	28	100.4	100.9	100.8	100.1	203.1	248.2
100GP-0.5	1	90	100.1	100.9	100.0	100.2	202.6	244.6
100GP-0.5	2	90	98.9	100.9	100.8	100.6	201.1	227.3

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)				ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3	4		
100GP-0.5	3	90	99.3	100.7	100.2	99.9	199.7	265.0
0GP-1.0	1	7	99.2	100.0	101.6	100.0	201.1	106.6
0GP-1.0	2	7	100.0	100.0	99.9	100.1	204.0	114.7
0GP-1.0	3	7	101.2	100.0	101.0	101.0	202.7	64.2
0GP-1.0	1	28	100.7	101.0	100.5	100.0	202.0	233.8
0GP-1.0	2	28	100.0	99.6	100.1	100.0	201.3	218.9
0GP-1.0	3	28	100.0	100.0	100.3	100.1	201.9	260.1
0GP-1.0	1	90	100.6	100.7	99.8	100.3	202.0	257.1
0GP-1.0	2	90	100.0	99.7	100.5	100.6	201.9	133.3
0GP-1.0	3	90	100.4	100.0	99.1	100.7	202.3	330.2
25GP-1.0	1	7	98.1	99.0	98.4	99.5	201.0	158.8
25GP-1.0	2	7	100.5	100.8	100.2	100.0	202.3	187.3
25GP-1.0	3	7	100.1	99.7	99.9	100.0	201.1	167.6
25GP-1.0	1	28	101.2	102.4	100.0	102.2	202.9	282.2
25GP-1.0	2	28	100.5	101.9	100.7	101.4	201.4	226.5
25GP-1.0	3	28	101.3	100.5	100.9	101.2	202.7	227.2
25GP-1.0	1	90	99.0	100.4	99.4	100.4	203.4	236.9
25GP-1.0	2	90	100.8	100.2	100.1	100.8	204.0	233.2
25GP-1.0	3	90	100.8	101.1	99.5	101.6	201.0	229.2
50GP-1.0	1	7	101.5	101.0	101.6	98.9	202.5	101.1
50GP-1.0	2	7	100.8	99.8	100.7	100.6	201.5	166.6
50GP-1.0	3	7	99.7	101.9	100.4	101.6	203.7	162.3
50GP-1.0	1	28	100.9	100.3	100.6	100.0	203.5	183.2
50GP-1.0	2	28	100.2	100.1	99.8	99.9	203.9	217.7
50GP-1.0	3	28	100.1	101.3	100.3	100.9	200.1	204.2
50GP-1.0	1	90	99.9	98.6	100.2	100.0	200.4	177.5
50GP-1.0	2	90	101.1	99.0	100.0	101.0	204.4	246.2
50GP-1.0	3	90	100.8	101.1	99.9	100.5	200.3	248.5

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	ขนาดหน้าตัด (mm)				ความสูง mm	แรงอัด (kN)
			1	2	3	4		
100GP-1.0	1	7	101.4	100.5	101.7	100.9	202.9	134.2
100GP-1.0	2	7	100.5	100.6	100.1	99.7	203.6	149.1
100GP-1.0	3	7	99.4	100.2	101.1	100.2	203.0	141.2
100GP-1.0	1	28	100.0	100.0	100.1	100.0	201.8	256.5
100GP-1.0	2	28	100.9	100.2	101.1	100.9	202.3	238.7
100GP-1.0	3	28	100.1	100.0	101.3	100.6	200.8	254.2
100GP-1.0	1	90	101.1	100.7	100.3	101.0	200.0	262.5
100GP-1.0	2	90	100.0	100.4	99.6	100.2	202.0	248.0
100GP-1.0	3	90	100.9	101.6	99.2	100.9	201.8	220.6

ตารางที่ 41 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงดัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ความยาวด้านของตัวอย่าง (mm)			แรงดัดครั้งแรก (kN)	แรงดัด สูงสุด (kN)
		กว้าง	ลึก	ยาว		
0GP	1	100	100	350	14.2	-
0GP	2	100	100	350	14.0	-
0GP	3	100	100	350	14.7	-
0GP	4	100	100	350	14.5	-
25GP	1	100	100	350	16.0	-
25GP	2	100	100	350	17.5	-
25GP	3	100	100	350	15.7	-
25GP	4	100	100	350	14.1	-
50GP	1	100	100	350	15.6	-
50GP	2	100	100	350	16.1	-
50GP	3	100	100	350	15.2	-
50GP	4	100	100	350	17.6	-
100GP	1	100	100	350	13.9	-
100GP	2	100	100	350	17.0	-

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ความยาวด้านของตัวอย่าง (mm)			แรงตัดครั้งแรก (kN)	แรงตัด สูงสุด (kN)
		กว้าง	ลึก	ยาว		
100GP	3	100	100	350	17.7	-
100GP	4	100	100	350	17.9	-
0GP-0.5	1	100	100	350	15.3	19.9
0GP-0.5	2	100	100	350	14.7	11.1
0GP-0.5	3	100	100	350	13.4	10.8
0GP-0.5	4	100	100	350	15.7	14.0
25GP-0.5	1	100	100	350	21.8	19.2
25GP-0.5	2	100	100	350	24.4	24.1
25GP-0.5	3	100	100	350	25.5	21.4
25GP-0.5	4	100	100	350	23.0	17.9
50GP-0.5	1	100	100	350	-	-
50GP-0.5	2	100	100	350	19.0	14.2
50GP-0.5	3	100	100	350	18.7	13.8
50GP-0.5	4	100	100	350	11.7	5.1
100GP-0.5	1	100	100	350	13.9	-
100GP-0.5	2	100	100	350	21.3	8.0
100GP-0.5	3	100	100	350	29.7	10.6
100GP-0.5	4	100	100	350	18.9	14.4
0GP-1.0	1	100	100	350	16.4	9.5
0GP-1.0	2	100	100	350	17.3	21.6
0GP-1.0	3	100	100	350	15.1	21.4
0GP-1.0	4	100	100	350	17.0	21.2
25GP-1.0	1	100	100	350	18.2	25.9
25GP-1.0	2	100	100	350	25.5	31.8
25GP-1.0	3	100	100	350	26.0	31.3
25GP-1.0	4	100	100	350	23.0	32.9
50GP-1.0	1	100	100	350	17.6	29.6
50GP-1.0	2	100	100	350	15.4	33.2

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ความยาวด้านของตัวอย่าง (mm)			แรงตัดครั้ง แรก (kN)	แรงตัด สูงสุด (kN)
		กว้าง	ลึก	ยาว		
50GP-1.0	3	100	100	350	25.0	33.0
50GP-1.0	4	100	100	350	23.0	31.6
100GP-1.0	1	100	100	350	16.2	15.6
100GP-1.0	2	100	100	350	15.4	25.0
100GP-1.0	3	100	100	350	26.5	28.4
100GP-1.0	4	100	100	350	19.5	21.7

ตารางที่ 42 ข้อมูลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลัง อบในอากาศ (g)	น้ำหนักผิว แห้งหลัง แช่น้ำ (g)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน อากาศหลัง แช่น้ำและต้ม (g)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน น้ำหลังแช่ น้ำและต้ม (g)
0GP	1	4080	3900	4090	4135	2403
0GP	2	3480	3335	3490	3525	2054
0GP	3	3290	3155	3300	3335	1942
25GP	1	3240	3085	3250	3280	1904
25GP	2	3910	3750	3925	3960	2309
25GP	3	3830	3655	3840	3875	2252
50GP	1	2965	2830	2975	3010	1743
50GP	2	3655	3505	3665	3700	2150
50GP	3	3550	3405	3565	3595	2100
100GP	1	3840	3665	3855	3890	2250
100GP	2	3660	3505	3680	3710	2154
100GP	3	3840	3655	3850	3885	2245
0GP-0.5	1	3315	3179	3344	3356	1960
0GP-0.5	2	3205	3070	3234	3242	1886
0GP-0.5	3	3335	3207	3367	3375	1968

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลัง อบในอากาศ (g)	น้ำหนักผิว แห้งหลัง แช่น้ำ (g)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน อากาศหลัง แช่น้ำและต้ม (g)	น้ำหนักผิว แห้งซึ่งใน น้ำหลังแช่ น้ำและต้ม (g)
25GP-0.5	1	3371	3216	3387	3405	1999
25GP-0.5	2	3397	3244	3412	3429	1994
25GP-0.5	3	3213	3063	3225	3243	1885
50GP-0.5	1	3757	3584	3775	3796	2210
50GP-0.5	2	3045	2899	3058	3077	1790
50GP-0.5	3	3541	3370	3557	3580	2088
100GP-0.5	1	2900	2786	2930	2936	1721
100GP-0.5	2	3210	3093	3249	3254	1902
100GP-0.5	3	4085	3934	4126	4132	2399
0GP-1.0	1	3390	3258	3422	3433	1945
0GP-1.0	2	3685	3527	3723	3734	2151
0GP-1.0	3	3695	3542	3725	3735	2162
25GP-1.0	1	3696	3538	3708	3722	2166
25GP-1.0	2	3529	3367	3540	3556	2064
25GP-1.0	3	3564	3410	3584	3600	2091
50GP-1.0	1	3874	3696	3889	3912	2277
50GP-1.0	2	3728	3557	3746	3761	2193
50GP-1.0	3	3591	3427	3608	3626	2107
100GP-1.0	1	3560	3425	3593	3598	2088
100GP-1.0	2	3670	3538	3707	3711	2164
100GP-1.0	3	3290	3168	3327	3331	1939

ตารางที่ 43 ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักที่หายไปหลังเผาไหม้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไหม้ (นาที)	น้ำหนักก่อนเผาไหม้ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไหม้ (kg)
0GP	1	30	3.815	3.620
0GP	2	30	3.800	3.620
0GP	3	30	3.920	3.720
25GP	1	30	3.865	3.635
25GP	2	30	3.995	3.775
25GP	3	30	3.915	3.695
50GP	1	30	3.850	3.635
50GP	2	30	3.935	3.730
50GP	3	30	3.965	3.760
100GP	1	30	3.854	3.679
100GP	2	30	3.698	3.527
100GP	3	30	3.814	3.642
0GP-0.5	1	30	3.940	3.723
0GP-0.5	2	30	3.922	3.713
0GP-0.5	3	30	3.920	3.700
25GP-0.5	1	30	3.986	3.757
25GP-0.5	2	30	3.843	3.638
25GP-0.5	3	30	3.847	3.631
50GP-0.5	1	30	3.810	3.604
50GP-0.5	2	30	3.762	3.540
50GP-0.5	3	30	3.835	3.608
100GP-0.5	1	30	3.807	3.622
100GP-0.5	2	30	3.761	3.567
100GP-0.5	3	30	3.771	3.570
0GP-1.0	1	30	3.927	3.694
0GP-1.0	2	30	3.873	3.651
0GP-1.0	3	30	3.909	3.667

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	น้ำหนักก่อนเผาไฟ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไฟ (kg)
25GP-1.0	1	30	3.809	3.604
25GP-1.0	2	30	3.822	3.624
25GP-1.0	3	30	3.824	3.617
50GP-1.0	1	30	3.868	3.638
50GP-1.0	2	30	3.836	3.619
50GP-1.0	3	30	3.816	3.585
100GP-1.0	1	30	3.848	3.619
100GP-1.0	2	30	3.793	3.555
100GP-1.0	3	30	3.816	3.566
0GP	1	60	3.820	3.560
0GP	2	60	3.825	3.565
0GP	3	60	3.795	3.530
25GP	1	60	3.875	3.585
25GP	2	60	3.950	3.655
25GP	3	60	3.895	3.610
50GP	1	60	3.850	3.580
50GP	2	60	3.915	3.640
50GP	3	60	3.900	3.630
100GP	1	60	3.723	3.471
100GP	2	60	3.780	3.524
100GP	3	60	3.783	3.525
0GP-0.5	1	60	3.897	3.598
0GP-0.5	2	60	3.924	3.647
0GP-0.5	3	60	3.896	3.616
25GP-0.5	1	60	3.952	3.671
25GP-0.5	2	60	3.902	3.618
25GP-0.5	3	60	3.891	3.594
50GP-0.5	1	60	3.819	3.532

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	น้ำหนักก่อนเผาไฟ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไฟ (kg)
50GP-0.5	2	60	3.865	3.567
50GP-0.5	3	60	3.877	3.586
100GP-0.5	1	60	3.839	3.573
100GP-0.5	2	60	3.848	3.602
100GP-0.5	3	60	3.807	3.544
0GP-1.0	1	60	3.854	3.553
0GP-1.0	2	60	3.873	3.547
0GP-1.0	3	60	3.838	3.539
25GP-1.0	1	60	3.852	3.570
25GP-1.0	2	60	3.805	3.519
25GP-1.0	3	60	3.889	3.598
50GP-1.0	1	60	3.840	3.525
50GP-1.0	2	60	3.770	3.473
50GP-1.0	3	60	3.961	3.663
100GP-1.0	1	60	3.930	3.615
100GP-1.0	2	60	3.446	3.117
100GP-1.0	3	60	3.821	3.507
0GP	1	90	3.820	1.145
0GP	2	90	3.795	1.065
0GP	3	90	3.785	0.985
25GP	1	90	3.910	1.115
25GP	2	90	3.875	1.335
25GP	3	90	3.855	1.565
50GP	1	90	3.865	1.025
50GP	2	90	3.880	1.155
50GP	3	90	3.890	1.270
100GP	1	90	3.831	1.912
100GP	2	90	3.830	2.552

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	น้ำหนักก่อนเผาไฟ (kg)	น้ำหนักหลังเผาไฟ (kg)
100GP	3	90	3.735	1.199
0GP-0.5	1	90	3.848	1.628
0GP-0.5	2	90	3.838	2.03
0GP-0.5	3	90	3.982	2.168
25GP-0.5	1	90	3.863	1.178
25GP-0.5	2	90	3.976	1.233
25GP-0.5	3	90	3.924	1.077
50GP-0.5	1	90	3.882	0.942
50GP-0.5	2	90	3.760	0.955
50GP-0.5	3	90	3.707	1.925
100GP-0.5	1	90	3.822	1.611
100GP-0.5	2	90	3.817	1.770
100GP-0.5	3	90	3.774	1.570
0GP-1.0	1	90	3.861	1.619
0GP-1.0	2	90	3.772	0.981
0GP-1.0	3	90	3.759	1.867
25GP-1.0	1	90	3.831	1.425
25GP-1.0	2	90	3.830	1.507
25GP-1.0	3	90	3.735	1.318
50GP-1.0	1	90	3.833	1.312
50GP-1.0	2	90	3.721	1.427
50GP-1.0	3	90	3.860	0.947
100GP-1.0	1	90	3.847	0.853
100GP-1.0	2	90	3.798	1.284
100GP-1.0	3	90	3.875	1.480

ตารางที่ 44 ข้อมูลทดสอบกำลังรับแรงอัดค้ำหลังเผาไฟของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	หมายเลขตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาทีก)	ขนาดหน้าตัด (mm)				แรงอัดหลังเผาไฟ (kN)
			1	2	3	4	
0GP	1	30	100.0	101.0	99.0	100.5	90.3
0GP	2	30	99.7	99.8	99.5	101.4	73.7
0GP	3	30	102.0	100.9	101.5	100.9	108.6
25GP	1	30	99.7	100.3	100.3	99.5	96.3
25GP	2	30	101.1	100.2	100.7	100.4	116.3
25GP	3	30	99.7	100.0	100.5	100.8	108.8
50GP	1	30	99.7	100.6	99.9	100.0	106.7
50GP	2	30	99.2	101.3	101.6	100.8	134.2
50GP	3	30	101.9	100.6	100.8	101.0	134.5
100GP	1	30	101.0	101.3	100.0	100.4	85.5
100GP	2	30	98.0	99.2	98.7	98.4	84.9
100GP	3	30	98.6	99.3	101.0	100.9	82.2
0GP-0.5	1	30	100.6	101.3	101.4	99.7	139.4
0GP-0.5	2	30	100.0	100.3	99.6	100.7	170.3
0GP-0.5	3	30	99.6	100.3	100.8	100.0	130.3
25GP-0.5	1	30	100.2	102.0	102.3	100.4	82.9
25GP-0.5	2	30	100.2	101.0	100.5	99.6	122.5
25GP-0.5	3	30	100.0	100.1	99.4	100.7	124.9
50GP-0.5	1	30	100.0	100.5	100.6	100.6	72.9
50GP-0.5	2	30	99.9	100.1	100.0	100.0	34.9
50GP-0.5	3	30	100.0	101.0	101.5	100.5	60.6
100GP-0.5	1	30	99.9	100.0	100.2	100.2	73.2
100GP-0.5	2	30	100.9	101.1	99.9	101.0	75.9
100GP-0.5	3	30	100.7	100.8	101.1	100.0	74.2
0GP-1.0	1	30	101.1	101.4	100.6	100.5	120.3
0GP-1.0	2	30	99.9	100.8	100.4	100.0	114.7
0GP-1.0	3	30	101.1	102.2	102.0	101.6	135.0

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผา ไฟ (นาทีก)	ขนาดหน้าตัด (mm)				แรงอัดหลังเผาไฟ (kN)
			1	2	3	4	
25GP-1.0	1	30	100.7	100.5	99.9	100.6	49.2
25GP-1.0	2	30	100.5	100.2	100.9	99.5	73.5
25GP-1.0	3	30	100.1	102.0	102.1	100.6	69.7
50GP-1.0	1	30	99.5	101.0	100.8	100.1	47.9
50GP-1.0	2	30	100.0	101.1	99.8	101.2	32.2
50GP-1.0	3	30	101.1	99.8	101.6	101.7	51.8
100GP-1.0	1	30	100.2	100.5	99.8	100.0	77.9
100GP-1.0	2	30	99.6	100.8	100.6	99.4	72.6
100GP-1.0	3	30	98.3	100.8	99.4	100.1	88.7
0GP	1	60	99.5	100.6	100.6	100.2	30.9
0GP	2	60	99.8	100.3	100.4	100.1	32.6
0GP	3	60	100.0	100.1	100.1	100.3	30.0
25GP	1	60	99.8	99.7	98.8	101.4	28.6
25GP	2	60	101.2	101.6	99.5	99.8	34.5
25GP	3	60	99.2	99.3	100.0	100.5	33.7
50GP	1	60	100.0	100.0	100.0	100.3	33.4
50GP	2	60	99.8	100.4	100.5	100.1	36.5
50GP	3	60	100.0	100.2	100.3	100.6	31.7
100GP	1	60	100.3	99.9	100.2	100.4	37.1
100GP	2	60	100.3	99.7	99.0	100.5	36.0
100GP	3	60	101.0	99.4	101.0	100.4	37.1
0GP-0.5	1	60	102.1	100.7	102.0	102.7	35.0
0GP-0.5	2	60	100.3	100.1	100.2	100.3	35.4
0GP-0.5	3	60	100.0	100.5	100.5	99.7	32.3
25GP-0.5	1	60	100.7	100.0	100.9	99.9	32.3
25GP-0.5	2	60	101.0	99.9	101.2	101.0	36.9
25GP-0.5	3	60	102.0	100.9	101.3	102.0	35.1
50GP-0.5	1	60	100.2	101.3	101.6	100.0	38.6

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ระยะเวลาเผา ไฟ (นาที)	ขนาดหน้าตัด (mm)				แรงอัดหลังเผาไฟ (kN)
			1	2	3	4	
50GP-0.5	2	60	101.6	101.2	100.1	101.9	32.9
50GP-0.5	3	60	101.5	102.9	100.5	103.0	33.0
100GP-0.5	1	60	101.4	99.8	101.6	101.1	46.3
100GP-0.5	2	60	100.3	99.8	100.2	100.9	41.5
100GP-0.5	3	60	100.1	101.1	100.6	100.0	38.6
0GP-1.0	1	60	101.6	101.4	100.2	102.1	26.1
0GP-1.0	2	60	100.5	101.9	99.2	101.9	31.5
0GP-1.0	3	60	101.5	100.7	101.4	100.9	26.8
25GP-1.0	1	60	101.9	100.8	102.2	101.7	28.8
25GP-1.0	2	60	100.4	100.8	99.8	100.6	28.3
25GP-1.0	3	60	100.8	100.9	102.0	100.1	29.4
50GP-1.0	1	60	101.0	102.0	100.9	101.3	34.9
50GP-1.0	2	60	100.4	100.8	99.6	100.9	31.1
50GP-1.0	3	60	102.9	101.4	102.4	102.1	26.9
100GP-1.0	1	60	100.4	102.0	101.6	100.8	30.5
100GP-1.0	2	60	102.9	101.0	102.9	101.3	14.7
100GP-1.0	3	60	101.4	100.3	101.1	100.3	35.1

ภาคผนวก ค
รูปภาพประกอบงานวิจัย



รูปที่ 64 ทรายธรรมชาติ



รูปที่ 65 เศษหินแกรนิต



รูปที่ 66 ใ้ลอย



รูปที่ 67 เส้นใยพอลิโพรไพลีน



รูปที่ 68 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 69 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1609



รูปที่ 70 การทดสอบความทนทานของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในสภาวะเพลิงไหม้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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.
- ASTM-C33. (2003). American Society for Testing and Materials. In *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- ASTM-C39. (2018). American Society for Testing and Materials. In *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- ASTM-C78. (2002). American Society for Testing and Materials. In *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.
- ASTM-C127. (2007). American Society for Testing and Materials. In *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.
- ASTM-C128. (2001). American Society for Testing and Materials. In *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*.
- ASTM-C131. (2014). American Society for Testing and Materials. In *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*¹.
- ASTM-C618. (2005). American Society for Testing and Materials. In *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- ASTM-C642. (2013). American Society for Testing and Materials. In *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- ASTM-C1609. (2010). *American Society for Testing and Materials*
- ASTM-C1611. (2005). American Society for Testing and Materials. In *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*.
- Banthia, N., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic

- shrinkage cracking in concrete. *Cement and concrete Research*, 36(7), 1263-1267.
- Bei-Xing, L., Ming-xiang, C., Fang, C., & Lu-ping, L. (2004). The mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 19(3), 68-71.
- Chen, B., & Liu, J. (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and concrete Research*, 35(5), 913-917.
- Daungwilailuk, T., Kitagawa, T., Bui, P. T., Ogawa, Y., & Kawai, K. (2019). Penetration of moisture, CO₂, and Cl ions in concrete after exposure to high temperature. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(1), 1-15.
- Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6(2), 263-278.
- Ghannam, S., Najm, H., & Vasconez, R. (2016). Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 1-9.
- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147.
- Han, C.-G., Hwang, Y.-S., Yang, S.-H., & Gowripalan, N. (2005). Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and concrete Research*, 35(9), 1747-1753.
- Hewlett, P., & Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*: Butterworth-Heinemann.
- Hiremath, P. N., & Yaragal, S. C. (2018). Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures. *Construction and building materials*, 169, 499-512.
- Huang, L., Xu, L., Chi, Y., & Xu, H. (2015). Experimental investigation on the seismic performance of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns. *Construction and building materials*, 87, 16-27.
- ISO-834. (1999). British Standard Institute In *Part 1 Element of Building Construction*:

General Requirements for Fire Resistance Testing.

- Jain, A., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2019). Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. *Construction and building materials*, 221, 539-552.
- Jang, H.-s., So, H.-s., & So, S. (2016). The properties of reactive powder concrete using PP fiber and pozzolanic materials at elevated temperature. *Journal of Building Engineering*, 8, 225-230.
- Jansson, R. (2013). *Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies*. KTH Royal Institute of Technology,
- Kakooei, S., Akil, H. M., Jamshidi, M., & Rouhi, J. (2012). The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and building materials*, 27(1), 73-77.
- Kalifa, P., Chene, G., & Galle, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure. *Cement and concrete Research*, 31(10), 1487-1499.
- 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.
- Kumaravel, S., & Sivakumar, I. (2018). Influence of Fibre Reinforced Geopolymer Concrete. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 5(4), 111-114.
- Lloyd, N., & Rangan, V. (2010). *Geopolymer concrete with fly ash*. Paper presented at the Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies.
- Naaman, A. E., & Reinhardt, H.-W. (2006). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and structures*, 39(5), 547-555.
- Nazari, A., Maghsoudpour, A., & Sanjayan, J. G. (2015). Flexural strength of plain and fibre-reinforced boroaluminosilicate geopolymer. *Construction and building materials*, 76, 207-213.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (Vol. 5): Longman London.

- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindapasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- Omar, O. M., Abd Elhameed, G. D., Sherif, M. A., & Mohamadien, H. A. (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, 8(3), 193-203.
- Pakravan, H., Latifi, M., & Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and building materials*, 142, 280-294.
- Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete Research*, 29(8), 1323-1329.
- Patil, S., & Patil, A. (2015). Properties of polypropylene fiber reinforced geopolymer concrete. *International journal of current engineering and technology*, 5(4), 2909-2912.
- Pothisiri, T., Chou, S., & Sektheera, C. (2016). Effect of Polypropylene Fibers and Wire Mesh on Fire Performance of Precast Concrete Walls. *ACI Structural Journal*, 113(2).
- Rattanasak, U., & Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.
- 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.
- Serafini, R., Dantas, S. R., Salvador, R. P., Agra, R. R., Rambo, D. A., Berto, A. F., & de Figueiredo, A. D. (2019). Influence of fire on temperature gradient and physical-mechanical properties of macro-synthetic fiber reinforced concrete for tunnel linings. *Construction and building materials*, 214, 254-268.
- Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A., & Nagar, R. (2016). Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production*, 119, 86-98.
- So, H.-S. (2016). Spalling Prevention of High Performance Concrete at High Temperatures. *High Performance Concrete Technology and Applications*, 25.
- Song, P., Hwang, S., & Sheu, B. (2005). Strength properties of nylon-and polypropylene-

- fiber-reinforced concretes. *Cement and concrete Research*, 35(8), 1546-1550.
- Sukontasukkul, P. (2004). Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending. *Science & Technology Asia*, 35-41.
- Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P., & Songpiriyakij, S. (2018). Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. *Construction and building materials*, 161, 37-44.
- Temuujin, J., & Van Riessen, A. (2009). Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 634-639.
- Vijayalakshmi, M., & Sekar, A. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and building materials*, 46, 1-7.
- Wille, K., El-Tawil, S., & Naaman, A. E. (2014). Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, 48, 53-66.
- Wongsa, A., Zaetang, Y., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates. *Construction and building materials*, 111, 637-643.
- Wu, Y. (2002). Flexural strength and behavior of polypropylene fiber reinforced concrete beams. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 17(2), 54.
- Xiao Yu Zhuang , L. C., Sridhar Komarneni , Chun Hui Zhou , & Dong Shen Tong , H. M. Y., Wei Hua Yu , Hao Wang. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 253-267.
- Zhang, D., Dasari, A., & Tan, K. H. (2018). On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers. *Cement and concrete Research*, 113, 169-177.
- Zhang, Z.-h., Yao, X., Zhu, H.-j., Hua, S.-d., & Chen, Y. (2009). Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer. *Journal of Central South University of Technology*, 16(1), 49-52.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., . . . Wang, H.

- (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- ทิวากร ศรีจำปา. (2556). อิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเก่าลอยจีโอโพลิเมอร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทย.
- ธัญวัฒน์ โพธิศิริ. (2556). การออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยด้านอัคคีภัย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปภัสราร วรรณนันท. (2562). ผลกระทบของปริมาณแทนที่และสถานะความชื้นของเศษหินแกรนิต ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย.
- ภัทรชัย พงษ์โสภา. (2559). คุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เสริมเส้นใยไฮบริดระหว่างเส้นใยเหล็กและพลาสติกสังเคราะห์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย.
- มานิช สรรพกิจทิพากร, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต, & ปิติ สุคนธสุขกุล. (2555). วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเส้นใยสำหรับการเสริมแรงในคอนกรีต. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 22(3), 549-559.
- สุวิมล สัจจวานิชย์. (2560). คอนกรีตเทคโนโลยีขั้นสูง (พิมพ์ครั้งที่ 3 ed.). กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรจนพรินท์ติ้ง.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย กานต์ธิปก ฮามคำไพ
วัน เดือน ปี เกิด	3 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	มหาสารคาม
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	423/87 หมู่บ้านเมืองประชา ตำบล ศิลา อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัด ขอนแก่น 40000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY