

สมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT AND GEOPOLYMER CONCRETES USING COARSE
AGGREGATES FROM POLYPROPYLENE PLASTIC WASTE



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

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน
โดย	นายธิตี กางโหลน
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.กิม เหนือคลอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

ธิตี กางโหลน : สมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวม
 หยาบจากขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน. (PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT
 AND GEOPOLYMER CONCRETES USING COARSE AGGREGATES FROM
 POLYPROPYLENE PLASTIC WASTE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล,
 อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ภิม เหนือคลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่เป็นมวลรวมหยาบสำหรับ
 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50
 โดยปริมาตร โดยมีแผนการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตครอบคลุมการทดสอบค่าการ
 ไหลแผ่, เวลาการก่อตัว, กำลังอัด, กำลังดัด, กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต และความทนทานต่อ
 การกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก ผลการทดสอบคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยพลาสติกถูกนำมา
 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของคอนกรีตควบคุมที่ผสมมวลรวมหยาบจากวัสดุธรรมชาติ ผล
 การศึกษาพบว่า ความสามารถในการรับกำลังอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์
 คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นทั้งของอายุบ่ม 7 และ 28 วัน การใช้มวลรวม
 พลาสติกไม่ส่งผลต่อกำลังดัดและกำลังดึงแยกของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ
 ในทางตรงกันข้ามกำลังดัดและกำลังดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ
 มวลรวมพลาสติก ส่วนในด้านความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกนั้นตัวอย่างที่เป็นจีโอโพลิเมอร์
 คอนกรีตจะมีการทนกรดซัลฟิวริกดีขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการผสมพลาสติกเข้าไปแทนที่ในมวลรวม
 หยาบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270122821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Recycled plastic waste, Polypropylene, Geopolymer, Concrete

Thiti Kanglon : PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT AND GEOPOLYMER CONCRETES USING COARSE AGGREGATES FROM POLYPROPYLENE PLASTIC WASTE. Advisor: Assoc. Prof. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D. Co-advisor: Peem Nuaklong, Ph.D.

The objective of this research is to reuse the plastic waste as coarse aggregates for Portland cement and geopolymer concretes. Natural coarse aggregates were replaced with plastic waste by the amounts of 10%, 30% and 50% by volume. Slump flow, setting time, compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, and sulfuric acid resistance of the concretes were investigated. The test results of concretes contained with plastic wastes were compared with the results of control concrete made with the natural coarse aggregate. The results showed that, at the age of 7 and 28 days, the compressive strength of Portland cement and geopolymer concrete decreased with increasing the plastic waste content. Incorporating the plastic aggregate did not significantly affect the flexural strength and splitting tensile strength of Portland cement concrete. On the other hand, the flexural and splitting tensile strengths of geopolymer concrete decreased when the plastic aggregate was increased. In terms of sulfuric acid resistance, geopolymer concrete samples showed slightly better sulfuric acid resistance when plastic was displaced in the coarse aggregate.

Field of Study: Civil Engineering

Academic Year: 2021

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณทุนวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม โดยหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม สัญญาเลขที่ B16F630071 ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, ดร.กิม เหนือคลอง ที่ให้เกียรติมาช่วยในการปฏิบัติงานวิจัยและให้คำปรึกษาในงานวิจัย และขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนมาโดยตลอด

ธิตี กางโหลน



สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)	4
2.1.2 คอนกรีต (Concrete)	5
2.1.3 เถ้าลอย (Fly ash).....	6
2.1.4 จีโอโพลีเมอร์ (Geopolymer).....	7
2.1.5 มวลรวม (Aggregate).....	10
2.1.6 พลาสติก (Plastic).....	14

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.2.1 วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer).....	16
2.2.2 มวลรวมจากขยะพลาสติกรีไซเคิล	17
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	26
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	26
3.2 ส่วนผสมของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	28
3.3 ขั้นตอนการผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	28
3.4 รายละเอียดการทดสอบ.....	29
3.5 การวิเคราะห์ผล	31
บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	32
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต.....	32
4.1.1 ความสามารถในการทำงานได้.....	32
4.1.2 ระยะเวลาในการก่อตัว.....	33
4.1.3 หน่วยน้ำหนัก	34
4.1.4 กำลังรับแรงอัด.....	34
4.1.5 กำลังรับแรงดัด.....	35
4.1.6 กำลังรับแรงดึงแยก	36
4.1.7 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ.....	37
4.1.8 โพรงและการดูดซึมน้ำ.....	39
4.1.9 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต	40
4.1.10 ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริก	41
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	42
4.2.1 ความสามารถในการทำงานได้.....	42
4.2.2 ระยะเวลาในการก่อตัว.....	43

4.2.3 หน่วยน้ำหนัก	44
4.2.4 กำลังรับแรงอัด	45
4.2.5 กำลังรับแรงดัด	46
4.2.6 กำลังรับแรงดึงแยก	47
4.2.7 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ	48
4.2.8 โพรงและการดูดซึมน้ำ	50
4.2.9 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต	51
4.2.10 ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริก	52
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการทดสอบ	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	56
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	64
ภาคผนวก ค. รูปภาพประกอบงานวิจัย	72
บรรณานุกรม	80
ประวัติผู้เขียน	85

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	จำแนกประเภทแก้วลอยด้วยสมบัติทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 (2005).....	7
ตารางที่ 2	ค่ากำลังที่ทดสอบด้วยวิธี Crushing strength ของหินแต่ละประเภท (Neville, 2011).	11
ตารางที่ 3	ค่าการสึกกร่อนในหินประเภทต่าง ๆ (Neville, 2011).....	11
ตารางที่ 4	แสดงค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของมวลรวมประเภทต่าง ๆ (Neville, 2011).....	13
ตารางที่ 5	ประเภทของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมพลาสติกและคุณสมบัติทั่วไป (สถาบันพลาสติก, 2013).....	14
ตารางที่ 6	ประเภทของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมเซตติงพลาสติกและคุณสมบัติทั่วไป (สถาบันพลาสติก, 2013)	16
ตารางที่ 7	ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต (Choi et al.,2009).....	17
ตารางที่ 8	ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต (Jahidul et al.,2021)	23
ตารางที่ 9	สมบัติมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด.....	26
ตารางที่ 10	สมบัติของขยะพลาสติกชนิด Polypropylene (PP).....	27
ตารางที่ 11	ส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบ	28
ตารางที่ 12	ส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบ	28
ตารางที่ 13	คุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ทดสอบ	30
ตารางที่ 14	ข้อมูลดิบค่าการยุบตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต.....	56
ตารางที่ 15	ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ไม่ผสม PP ...	56
ตารางที่ 16	ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ผสม PP 10 %	57
ตารางที่ 17	ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ผสม PP 30 %	57

ตารางที่ 18 ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ผสม PP 50 %	57
.....	
ตารางที่ 19 ข้อมูลดิบหาหน่วยน้ำหนักของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	58
ตารางที่ 20 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 7 วัน	58
ตารางที่ 21 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน	58
ตารางที่ 22 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 90 วัน	59
ตารางที่ 23 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน	59
ตารางที่ 24 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดึงแยกของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน	60
ตารางที่ 25 ข้อมูลดิบโพรงและการดูดซึมน้ำของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	60
ตารางที่ 26 ข้อมูลดิบขนาดตัวอย่างที่ใช้หาอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	61
.....	
ตารางที่ 27 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตตั้งแต่ 0-30 นาที	61
.....	
ตารางที่ 28 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง	62
.....	
ตารางที่ 29 ข้อมูลดิบความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	63
.....	
ตารางที่ 30 ข้อมูลดิบค่าการไหลแผ่ของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	64
ตารางที่ 31 ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสม PP ...	64
ตารางที่ 32 ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม PP 10 %	65
.....	
ตารางที่ 33 ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม PP 30 %	65
.....	
ตารางที่ 34 ข้อมูลดิบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม PP 50 %	65
.....	
ตารางที่ 35 ข้อมูลดิบหาหน่วยน้ำหนักของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	66

ตารางที่ 36 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 7 วัน 66

ตารางที่ 37 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน..... 66

ตารางที่ 38 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 90 วัน..... 67

ตารางที่ 39 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน..... 67

ตารางที่ 40 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน 68

ตารางที่ 41 ข้อมูลดิบโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต..... 68

ตารางที่ 42 ข้อมูลดิบขนาดตัวอย่างที่ใช้หาอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.. 69

ตารางที่ 43 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตั้งแต่ 0-30 นาที 69

ตารางที่ 44 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง 70

ตารางที่ 45 ข้อมูลดิบความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต..... 71



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวิธีเผาแห้ง.....	5
รูปที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต.....	6
รูปที่ 3 รูปร่างและลักษณะขนาดของถ้ำลอย (Thiwakorn (2013)	7
รูปที่ 4 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 1994).....	8
รูปที่ 5 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Zhuang et al., 2016).....	9
รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Choi et al.,2009).....	19
รูปที่ 7 ความหนาแน่นของ SCMs ที่ทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกชนิด PET ในปริมาณที่ต่างกัน (Brahim Safi et al., 2013).....	20
รูปที่ 8 ความสามารถในการรับกำลังอัด เมื่อทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกชนิด PET ในปริมาณที่ต่างกัน (Brahim Safi et al., 2013).....	20
รูปที่ 9 ความสามารถในการรับกำลังดัด เมื่อทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกชนิด PET ในปริมาณที่ต่างกัน (Brahim Safi et al., 2013).....	20
รูปที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน (Akinyele et al., 2014).....	21
รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัด (Akinyele et al., 2014)	22
รูปที่ 12 ค่า Slump ของแต่ละตัวอย่างที่มีการแทนที่พลาสติกโพลีโพรพิลีนในมวลรวมหยาบ.....	24
รูปที่ 13 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน (Jahidul et al.,2021)	25
รูปที่ 14 ค่าความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสการแตกของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (Jahidul et al.,2021).....	25
รูปที่ 15 ขยะพลาสติกชนิด Polypropylene (PP)	27
รูปที่ 16 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบและขยะพลาสติกชนิด PP	27
รูปที่ 17 ความสามารถในการทำงานได้ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต.....	32

รูปที่ 18 เวลาการก่อตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต.....	33
รูปที่ 19 หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	34
รูปที่ 20 กำลังรับแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุป่ม 7, 28, 90 วัน	35
รูปที่ 21 กำลังรับแรงดัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน.....	36
รูปที่ 22 กำลังรับแรงดึงแยกของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน	36
รูปที่ 23 ITZ ระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ.....	38
รูปที่ 24 ค่าความแข็ง Vickers ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	39
รูปที่ 25 โพรงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน.....	40
รูปที่ 26 การดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน	40
รูปที่ 27 อัตราการดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน.....	41
รูปที่ 28 น้ำหนักที่สูญเสียไปเทียบกับเวลาของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน	42
รูปที่ 29 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต	43
รูปที่ 30 เวลาการก่อตัวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต	44
รูปที่ 31 หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต.....	45
รูปที่ 32 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 7, 28 และ 90 วัน.....	46
รูปที่ 33 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน	47
รูปที่ 34 กำลังดึงแยกของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน	48
รูปที่ 35 ITZ ระหว่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ	49
รูปที่ 36 ค่าความแข็ง Vickers ในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต.....	50
รูปที่ 37 โพรงของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน.....	51
รูปที่ 38 การดูดซึมน้ำของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน.....	51
รูปที่ 39 อัตราการดูดซึมน้ำของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน	52
รูปที่ 40 น้ำหนักที่สูญเสียไปเทียบกับเวลาของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน	53
รูปที่ 41 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	72

รูปที่ 42 ทฤษฎีธรรมชาติ.....	72
รูปที่ 43 มวลรวมหยาบ.....	73
รูปที่ 44 ตัวอย่างส่วนผสมที่เป็นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ถูกผ่าแยกเพื่อดูการกระจายตัวของ พลาสติก.....	73
รูปที่ 45 ตัวอย่างส่วนผสมที่เป็นจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ถูกทำการผ่าแยกเพื่อดูการกระจายตัวของ พลาสติก.....	74
รูปที่ 46 เตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบแซกรดซัลฟิวริก	74
รูปที่ 47 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงดัด	75
รูปที่ 48 ตัวอย่าง C-PP0 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน.....	75
รูปที่ 49 ตัวอย่าง C-PP50 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน.....	76
รูปที่ 50 ตัวอย่าง GPC-PP0 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน.....	76
รูปที่ 51 ตัวอย่าง GPC-PP50 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน.....	77
รูปที่ 52 ตัวอย่าง C-PP0 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน.....	77
รูปที่ 53 ตัวอย่าง C-PP50 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน	78
รูปที่ 54 ตัวอย่าง GPC-PP0 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน.....	78
รูปที่ 55 ตัวอย่าง GPC-PP50 หลังแซกรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน	79
รูปที่ 56 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต	79

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ณ ปัจจุบันนี้ได้มีการใช้พลาสติกหลากหลายชนิดมาประยุกต์ใช้กับการดำรงชีวิตของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ของใช้ทั่วไปภายในบ้าน ฯลฯ และเมื่อเวลาผ่านไปของใช้เหล่านี้ก็ได้มีการเสื่อมสภาพลงและหมดอายุการใช้งานในที่สุด จึงทำให้จำเป็นต้องเปลี่ยนหรือซื้อสินค้าตัวใหม่มาทดแทนของเดิม ซึ่งชิ้นส่วนพลาสติกที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในของใช้เหล่านั้นที่ยังคงมีสภาพดีอยู่จึงถูกทิ้งตามไปด้วยและก่อให้เกิดเป็นขยะพลาสติก ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษระบุว่า ในปี 2561 ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยรวม 27.8 ล้านตัน ซึ่งมี 34% ถูกคัดแยกและนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ และส่วนที่ใช้ประโยชน์ไม่ได้ ถูกกำจัดอย่างถูกต้อง 39% และกำจัดไม่ถูกต้อง 27% ซึ่งในปริมาณ 27.8 ล้านตันนั้น มีขยะพลาสติกอยู่ประมาณ 2 ล้านตัน และใน 2 ล้านตันนี้ สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพียงแค่ 5 แสนตันเท่านั้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2018)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นมีความนิยมอย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตซึ่งได้มาจากกระบวนการเผาสารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1400 – 1600 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิต เริ่มตั้งแต่การระเบิดภูเขาหินปูน การย่อย การลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดให้ละเอียด ซึ่งผลกระทบจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุทดแทนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งได้แก่ วัสดุปอซโซลาน ที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามวัสดุปอซโซลานสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น การศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะหาวัสดุทดแทนที่จะนำมาใช้แทนซีเมนต์ให้มากที่สุด โดยมีสมบัติที่ดีขึ้นหรือไม่แตกต่างไปจากเดิมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มี

ส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลักโดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์ หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และน้ำ (อุบลลักษณ์, 2017)

ในปัจจุบันการที่จะผลิตมวลรวมหยาบได้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ มากมายจากโรงโม่หินซึ่งทำมาจากวัสดุธรรมชาติ และนับเป็นส่วนผสมที่มีความสำคัญมากกับอุตสาหกรรมคอนกรีต ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นจะก่อให้เกิดปริมาณกากหินฝุ่นเป็นจำนวนมากเป็นผลให้เกิดมลภาวะทางอากาศและเป็นการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ ด้วยปัญหาเหล่านี้เราจึงอยากหาวัสดุทดแทนเพื่อที่จะช่วยลดปริมาณการผลิตลงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นโดยจะนำขยะพลาสติกรีไซเคิลมาผสมแทนที่มวลรวมหยาบในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต พร้อมทั้งศึกษาสมบัติเชิงกลและความทนทานเพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้ สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านความทนทานของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้ขยะพลาสติกแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ใช้ขยะพลาสติกรีไซเคิลที่เป็นชนิดโพลิโพรพิลีน (Polypropylene)
- 1.3.2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type I ordinary Portland cement)
- 1.3.3 ใช้ถัอลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง
- 1.3.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์
- 1.3.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีองค์ประกอบของ Na_2O , H_2O และ SiO_2 เท่ากับ 9.84% 61.45% และ 28.71% ตามลำดับ
- 1.3.6 ใช้อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 1 โดย น้ำหนัก
- 1.3.7 ใช้อัตราส่วนสารละลายต่าง ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) ต่อถัอลอยสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เท่ากับ 0.6 โดยน้ำหนัก

- 1.3.8 ใช้อัตราส่วนระหว่างการใช้ขยะพลาสติกแทนที่หินธรรมชาติ ในอัตราส่วนโดยปริมาตรร้อยละ 0, 10, 30 และ 50
- 1.3.9 ตัวอย่างทดสอบจะถูกบ่มในอุณหภูมิห้องและคลุมด้วยพลาสติกจนกระทั่งถึงวันที่ทำการทดสอบ
- 1.3.10 ทดสอบคุณสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ที่มีการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติก ดังนี้
- ความสามารถในการทำงานได้ (Slump flow) ตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2005)
 - เวลาการก่อตัว (Setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C403 (2008)
 - กำลังอัด (Compressive strength) หลังจากบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7, 28, 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 (2018)
 - กำลังดึงแยก (Splitting tensile strength) หลังจากบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C496 (2011)
 - กำลังดัด (Flexural strength) หลังจากบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C78 (2002)
 - โพรงและการดูดซึมน้ำ หลังจากบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C642 (2013)
 - ความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก หลังจากบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C267 (2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ CHULALONGKORN UNIVERSITY

- 1.4.1 สามารถพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ขยะรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหายาบในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต
- 1.4.2 สามารถนำคอนกรีตที่ใช่มวลรวมหายาบจากขยะพลาสติกไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ในน้ำ จึงใช้หล่อในแบบให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ผู้ผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นคนแรกคือ โจเซฟ แอสปดิน (Joseph Aspdin) ชาวอังกฤษ เมื่อประมาณ 170 ปีมาแล้ว เขาได้นำดินเหนียวกับหินปูนมาเผารวมกัน แล้วนำมาบดจนละเอียด ผลที่ได้เมื่อผสมน้ำและแข็งตัวแล้วจะเป็นก้อนสีเหลืองเทาเหมือนก้อนหินจากเหมืองของเมืองปอร์ตแลนด์ (Portland) ในประเทศอังกฤษ เขาจึงเรียกชื่อว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และได้จดทะเบียนสิทธิบัตรการผลิตไว้เป็นหลักฐาน ภายหลังจากนั้นอีกประมาณ 30 ปี จึงได้มีผู้พบว่า ถ้าเผาส่วนผสมให้มีอุณหภูมิสูงมากจนส่วนผสมแข็งตัว จะได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น นอกจากนี้โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของประเทศเยอรมนียังได้นำปูนเม็ดมาบดให้เป็นผง ทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพดีขึ้นไปอีก

ในปัจจุบัน การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำได้สองวิธีคือ วิธีเปียกและวิธีแห้ง วิธีแห้งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เพราะเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจำนวนมาก การผลิตทำได้โดยการบดวัตถุดิบซึ่งมีหลายชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ฯลฯ จนเป็นผงละเอียดเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) แล้วส่งเข้าเตาเผา (Rotary Kiln) เตาเผาเป็นท่อขนาดใหญ่ วางเป็นมุมเอียงและหมุนรอบตัวช้า ๆ ปล่อยวัตถุดิบให้ไหลมาในท่อทางด้านต่ำสวนทางกับไฟที่พุ่งเข้าไปโดยน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เตาเผาวัตถุดิบแข็งตัวที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้จากการเผาเรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) เมื่อนำปูนเม็ดไปบดให้ละเอียด แล้วผสมแรยิปซัม (Gypsum) ลงไปประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ก็จะได้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามที่ต้องการ โดยขั้นตอนการผลิตแบบแห้งจะแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวิธีเผาแห้ง

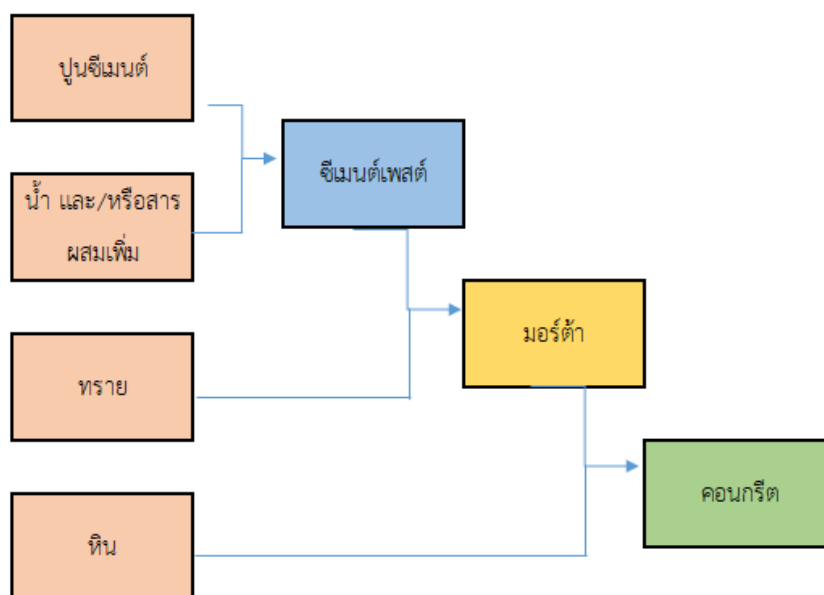
2.1.2 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับงานก่อสร้างอย่างแพร่หลายกันมานานหลายสิบปีแล้ว อันเป็น ผลมาจากคุณลักษณะที่เด่น ๆ คือ คอนกรีตสามารถออกแบบหล่อหลอมเป็นโครงสร้างหรือเป็นสิ่งก่อสร้างได้ตามรูปร่างที่ต้องการ คอนกรีตมีสมบัติในการรับแรงอัดได้ดีและมีความทนทานสูง ทั้งยังสามารถเลือกใช้ส่วนผสมให้ได้คอนกรีตที่มีสมบัติต่าง ๆ กัน เพื่อให้เหมาะกับงานก่อสร้างแต่ละชนิดได้ นอกจากนี้คอนกรีตยังสามารถนำมาใช้ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ เช่น เหล็ก จะสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้จากการผสม ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ เข้าด้วยกันโดยเมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้ ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทรายเรียกว่า มอร์ต้า (Mortar) มอร์ต้าผสมกับหินหรือกรวดเรียกว่า คอนกรีต (Concrete) ดังแสดงในรูปที่ 2

ซีเมนต์เพสต์มีหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม เช่น หิน กรวด และทราย หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ และให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ส่วนมวลรวม มีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก สมบัติของมวลรวมที่สำคัญคือ มีความแข็งแรง การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีความต้านทานต่อแรงกระแทกและ

การเสียดสี และน้ำมีหน้าที่หลักคือ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) กับปูนซีเมนต์ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ และเคลือบหินทรายให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ สำหรับขั้นตอนการผสมคอนกรีต

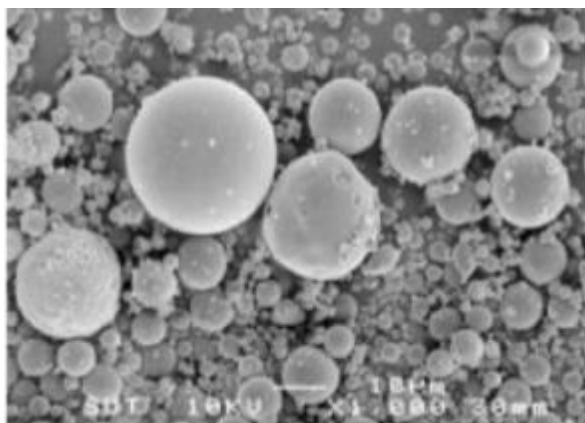


รูปที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต

2.1.3 เถ้าลอย (Fly ash)

ในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้กระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินนั้นหลังจากเผาไหม้แล้วจะก่อให้เกิดเถ้า 2 ชนิดด้วยกัน คือ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) และเถ้าลอย (Fly ash) โดยที่เถ้าก้นเตาเป็นเถ้าที่มีขนาดใหญ่จะตกลงก้นเตา และเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กทำให้ลอยไปกับอากาศร้อน ซึ่งโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ในประเทศไทยที่สำคัญนั้นคือโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีลักษณะเป็นผงสีเทาถึงน้ำตาลขึ้นอยู่กับวัสดุตั้งต้นและกระบวนการเผาไหม้ อีกทั้งมีลักษณะ เป็นทรงกลม ผิวไม่เรียบ มีรูพรุนเล็ก ๆ ดังรูปที่ 3 เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่สูง จึงทำการแบ่งเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM-C618 (2005) โดยจะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือเถ้าลอย Class C และ Class F ซึ่งแบ่งตามสมบัติตามตารางที่ 1



รูปที่ 3 รูปร่างและลักษณะขนาดของเถ้าลอย (Thiwakorn (2013))

ตารางที่ 1 จำแนกประเภทเถ้าลอยด้วยสมบัติทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 (2005)

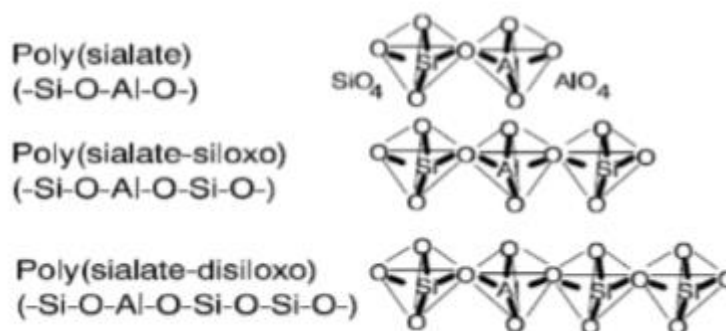
Chemical composition	Class of fly ash	
	Class F	Class C
Silica + Alumina + Ferrite, min (%)	70	50
SO ₃ , max (%)	5	5
Loss on ignition (LOI), max (%)	6	6
Moisture content, max (%)	3	3

จากงานวิจัยของ Koshy and Singh (2016) ระบุไว้ว่า เถ้าลอยสามารถใช้ประโยชน์ได้โดยการสังเคราะห์สารซีโอไลต์จากเถ้าลอยมาใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำที่เสีย ซึ่งสารซีโอไลต์ที่ได้จากเถ้าลอยนั้นสามารถช่วยเรื่องการบำบัดน้ำเสียโดยสามารถกำจัดสารพิษและโลหะหนักจากน้ำเสียได้ และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Aydin et al. (2007) ที่ระบุว่าพบเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีสมบัติที่ดีขึ้นกว่าคอนกรีตที่ใช้แค่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวทั้งเรื่องความทนทานการกัดกร่อน ความแข็งแรง และความสามารถในการเท เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลมนั่นเอง

2.1.4 จีโอโพลีเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลีเมอร์ค้นพบครั้งแรกโดย Dr. Victor Glukhovsky ชาวรัสเซีย ในปีค.ศ. 1950 จีโอโพลีเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์เซชันของสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความ

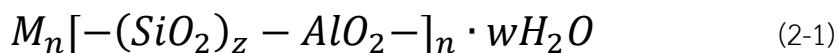
เข้มข้นสูง และออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ซึ่งจีโอโพลิเมอร์นั้นจะมีโครงสร้างอสัณฐาน เป็น 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4 และเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้ คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ วัสดุที่ใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์คือวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ซึ่งมีซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ดินขาว ดินขาวเผา และวัสดุของเหลือจำพวกเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็ก ฯลฯ



รูปที่ 4 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits, 1994)

จากงานวิจัยของ Davidovits (2015) ระบุว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการของการผลิตปูนกับกระบวนการเกิดของเถ้าลอยแล้วพบว่ากระบวนการผลิตปูนนั้นเมื่อวัดที่ปริมาณ 1 ตันจะเกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่ากระบวนการเกิดเถ้าลอยเป็นจำนวนถึง 9 เท่า

ส่วนงานวิจัยของ Palomo et al. (1999) ได้กล่าวว่าการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงมากกระตุ้นปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานที่มีส่วนประกอบของซิลิกา และอลูมินาเป็นหลักโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายซิลิกา และอลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารละลายซิลิเกตและสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งจะถูกเรียกว่า ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดวัสดุประเภทอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate material) จะมีสูตรทางเคมีได้ดังสมการที่ (2-1)



โดยที่ M คือ ธาตุโลหะอัลคาไลน์

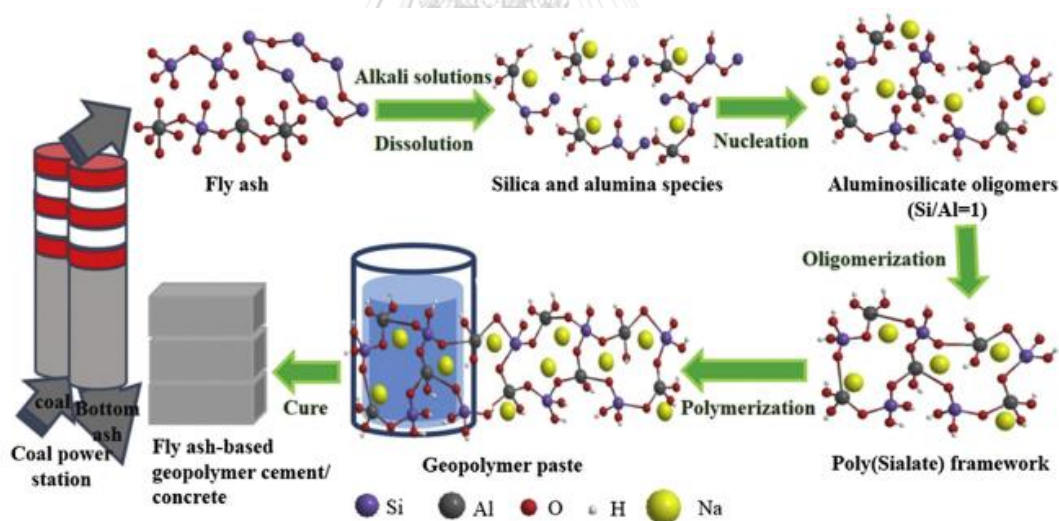
- คือ การยึดเกาะของพันธะ

z คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 โดยจะมีค่าเป็น 1, 2 หรือ 3

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

n คือ จำนวนโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ (Degree of Polycondensation)

อย่างที่กล่าวไปข้างต้น ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ที่เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบซิลิกากับอลูมินาและสารละลายที่มีความเป็นด่างที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งใช้ความร้อนในการกระตุ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ในส่วนของกระบวนการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นนั้น มีกระบวนการแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Zhuang et al., 2016)

ส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินานี้ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างที่เข้มข้นสูงแล้วทำให้เกิดการแตกตัวของซิลิกากับอลูมินาแล้วรวมตัวกันเป็น Aluminosilicate oligomers หลังจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Oligomerization) หรือการรวมกันเป็น

โพลิโเมอร์จนกลายเป็นโครงข่ายโพลิเมอร์ แต่ละโครงข่ายจะรวมตัวกันและอัดแน่นจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน จนก่อตัวได้เป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Geopolymer paste)

จากงานวิจัยของ Aleem and Arumairaj (2012) ได้ระบุไว้ว่าจีโอโพลิเมอร์นั้นสามารถดึงของเสียที่มีมลพิษได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความทนทาน มีอายุการใช้งานที่นาน อีกทั้งยังมีกำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ทั่ว ๆ ไปถึง 1.5 เท่าในส่วนผสมที่มีอัตราส่วนผสมเท่ากัน และในงานวิจัยของ Songpiriyakij et al. (2011) วัสดุจีโอโพลิเมอร์นั้นสามารถนำมาใช้ในงานซ่อมแซมได้ดีเนื่องจากว่าการก่อตัวอย่างรวดเร็วและมีกำลังอัดที่สูงในระยะเวลาสั้น ๆ

2.1.5 มวลรวม (Aggregate)

2.1.5.1 ประเภทมวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสมนั้นเป็นหัวใจสำคัญที่มีผลต่อการรับกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมากเนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70-80% ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นแล้วคุณภาพของมวลรวมที่นำมาใช้ก็ควรมีคุณภาพและมาตรฐานในการเลือกใช้ที่เหมาะสมด้วย ซึ่งการแบ่งประเภทของมวลรวมที่นำมาใช้ในงานผสมคอนกรีตหลัก ๆ แล้วจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. มวลรวมละเอียด หรือ Fine aggregate ประกอบไปด้วยมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือต้องสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ไปได้แต่ต้องมีขนาดไม่เล็กเกินกว่า 0.07 มิลลิเมตร กล่าวคือจะต้องค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 200

2. มวลรวมหยาบ หรือ Coarse aggregate นั้นประกอบไปด้วย หินหรือหินกรวดที่มีขนาดมากกว่า 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือต้องไม่สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ลงไปได้ ตัวอย่างหินที่ใช้ ได้แก่ กรวด หินโม่ และหินย่อย เป็นต้น

2.1.5.2 สมบัติมวลรวม

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันปัจจัยที่สำคัญลำดับต้น ๆ ที่ทำให้คอนกรีตมีคุณภาพดีจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของมวลรวม สัดส่วนการผสม หินและทรายที่จะถูกนำมาใช้จะต้องมีความสะอาด แข็งแรงทนทาน อีกทั้งยังต้องมีขนาดคละที่ได้ตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งสมบัติทางกายภาพของมวลรวมที่ควรคำนึงถึงจะต้องมีดังนี้

1. ความแข็งแรง หรือ Strength วัสดุที่ใช้จะต้องมีความสามารถในการรับน้ำหนักแรงอัดที่ไม่ควรน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดที่คอนกรีตต้องการ โดยทั่วไปแล้วมวลรวมจะมีค่าการรับน้ำหนักแรงอัดอยู่ที่ระหว่าง 80-500 MPa และค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 200 MPa ซึ่งวิธีที่ทำการทดสอบ คือ Crushing value test จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่ากำลังที่ทดสอบด้วยวิธี Crushing strength ของหินแต่ละประเภท (Neville, 2011)

ประเภทหิน	กำลังกดอัด (MPa)
Basalt	200
Flint	205
Gabbro	195
Granite	185
Gritstone	220
Hornfels	340
Limestone	165
Prophyry	230
Quartzite	330
Schist	245

2. ค่าความทนทานการสึกกร่อน หรือ Abrasion resistance ค่านี้เป็นตัวบ่งชี้ว่าคุณภาพของหินที่จะนำมาใช้งานนั้นเป็นหินที่ทนทานต่อการกระแทกและเสียดสีได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะใช้วิธีการทดสอบลอสมแอนเจลลิส (Los Angeles test) โดยที่จะอิงตามมาตรฐาน ASTM-C131 (2014) ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการสึกกร่อนในหินประเภทต่าง ๆ (Neville, 2011)

ประเภทหิน	เปอร์เซ็นต์การสึกกร่อน
Basalt	17.6
Flint	19.2
Granite	18.7
Limestone	16.5
Quartzite	18.9

3. ความทนทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตัวของมวลรวมนั้นจะต้องมีรูพรุนเพียงพอที่จะสามารถดูดซึมน้ำและควรมีช่องว่างพอที่จะให้น้ำมีการขยายตัวภายใต้อากาศหนาวได้เพื่อไม่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว

4. ความคงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี หรือ Chemical stability ซึ่งมวลรวมที่นำมาใช้ต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ และภายในมวลรวมนั้นไม่ควรมีส่วนประกอบของสารเคมีผสมอยู่เพราะเนื่องจากว่าสารเคมีนั้นจะมาทำปฏิกิริยากับต่างในปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายวัณและมีการขยายตัวส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวในคอนกรีต

5. ลักษณะรูปทรงและพื้นผิวของมวลรวม หรือ Particle shape and Surface texture จะมีผลต่อคุณภาพของคอนกรีตทั้งที่อยู่ในสภาวะเหลวและแข็งตัว มวลรวมที่มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมคมนั้นจะมีการช่วยยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคสูง ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทที่ต่ำแต่จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่สูงขึ้น ตรงกันข้ามเมื่อมวลรวมมีลักษณะเป็นทรงกลมจะช่วยให้คอนกรีตสามารถเทได้ดีขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมควรมีการคละกันของรูปทรงต่าง ๆ เพื่อให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถในการเทและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับเนื้อของคอนกรีตที่ดี

6. ความสะอาดของมวลรวม มวลรวมจำเป็นที่จะต้องมีความสะอาดปราศจากสิ่งสกปรกหรือปนเปื้อนสารเคมีที่อาจทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพได้ โดยจะส่งผลกับคุณภาพคอนกรีตในระยะยาว

7. ขนาดคละและการกระจายตัวของมวลรวม หรือ Aggregate grading ควรที่มีการกระจายตัวตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งจะส่งผลให้มวลรวมมีการเรียงตัวกันแน่นและช่วยลดช่องว่าง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ดีขึ้น ซึ่งวิธีการทดสอบจะใช้การ Sieve analysis ตามมาตรฐาน ASTM-C136 (2001) และในส่วนของการข้อกำหนดสมบัติทั่วไปในมวลรวมสามารถดูได้จากมาตรฐาน ASTM-C33 (2008)

2.1.5.3 ความถ่วงจำเพาะมวลรวม

ความถ่วงจำเพาะหรือ Specific gravity คือ อัตราส่วนน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้วัสดุต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรที่เท่ากัน แต่เนื่องจากในมวลรวมนั้นมีโพรงอยู่ซึ่งน้ำสามารถไหลผ่านได้

และโพรงที่น้ำไม่สามารถไหลผ่านได้ ดังนั้นแล้วจึงทำให้ปริมาตรของมวลรวมถูกแบ่งเป็น 3 ประเภทที่นิยมใช้ดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะรวม หรือ Bulk specific gravity คำนวณได้จากปริมาตรของแข็งทั้งหมดที่รวมช่องว่างภายในแล้ว

2. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ หรือ Apparent specific gravity จะคำนวณได้จากปริมาตรของแข็งที่รวมกับปริมาตรของช่องว่างทั้งหมดที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ซึ่งจะแสดงค่าในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของมวลรวมประเภทต่าง ๆ (Neville, 2011)

ประเภทหิน	ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะ
Basalt	2.80
Flint	2.54
Granite	2.69
Gritstone	2.69
Hornfels	2.82
Limestone	2.66
Prophyry	2.73
Quartzite	2.62

3. ความถ่วงจำเพาะสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง หรือ Bulk specific gravity on saturated surface dry ช่องว่างทั้งหมดซึ่งรวมของแข็งและน้ำที่อยู่ในช่องว่างที่สามารถซึมผ่านได้ โดยที่จะพิจารณาน้ำที่อยู่ในช่องว่างที่สามารถซึมผ่านได้เป็นส่วนหนึ่งกับมวลรวมและไม่ทำปฏิกิริยา ซึ่งความถ่วงจำเพาะนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสมและความพรุนของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งการทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะมวลรวมสามารถอิงตามมาตรฐาน ASTM-C127 (2001) และ ASTM-C128 (2015)

2.1.6 พลาสติก (Plastic)

พลาสติกสังเคราะห์ชนิดแรกที่ถูกคิดค้นขึ้นมา คือ เบคคาไลท์ (Bakelite) โดยที่ Leo Baekeland ได้คิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1907 ณ เมืองนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา และต่อมาได้มีนักเคมีคนสำคัญอีกหลายคนที่ศึกษาเรื่องพลาสติก อาทิเช่น Hermann Staudinger ผู้ได้รับการยกย่องว่าเป็นบิดาแห่งเคมีพอลิเมอร์ และ Herman Mark ผู้ได้รับการยกย่องว่าเป็นบิดาแห่งฟิสิกส์พอลิเมอร์

พลาสติกเป็นวัสดุที่จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นจากสารประกอบอินทรีย์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และสามารถหลอมขึ้นรูปเป็นของแข็งเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย มีการนำมาใช้งานหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น ถุงพลาสติก ขวดน้ำ ภาชนะ บรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น พลาสติกนั้นได้ถูกแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ เทอร์โมพลาสติก และ เทอร์โมเซตติงพลาสติก ดังนี้

2.1.6.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

เทอร์โมพลาสติกเป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในโลก เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงทำให้สามารถหลอมเหลวได้ หรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน โพลีโพรพิลีน พอลิสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ ชนิดของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมพลาสติกจะถูกแบ่งได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประเภทของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมพลาสติกและคุณสมบัติทั่วไป (สถาบันพลาสติก, 2013)

ชนิดพลาสติก	ตัวย่อ	สมบัติทั่วไป	การใช้งาน
Polyethylene	PE	ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย อากาศผ่านเข้าออกได้ มีลักษณะขุ่น ทนความร้อนได้พอควร	ท่อน้ำ ถัง ขวด
Polypropylene	PP	เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แข็งกว่า Polyethylene ทนต่อสารไขมันและความร้อนสูง	หลอดพลาสติก กล่องบรรจุอาหาร ชั้นวางของ ชิ้นส่วน เครื่องใช้ไฟฟ้า

ชนิดพลาสติก	ตัวย่อ	สมบัติทั่วไป	การใช้งาน
Polystyrene	PS	มีลักษณะโปร่งใส เปราะ ทนต่อกรดและด่าง ใสและอากาศซึมผ่านได้พอควร	ชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
Polystyrene	PC	โปร่งใส แข็ง ทนแรงยึดและแรงกระแทก ทนความร้อนสูง ทนกรดแต่ไม่ทนด่าง	ใช้ผลิตชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนยานยนต์
Acrylonitrile-butadiene-styrene	ABS	สมบัติคล้าย Polystyrene แต่ทนสารเคมีดีกว่า เหนียวกว่า โปร่งแสง	ถ้วย ถาด
Polyamides: Nylon	PA	เหนียวมาก มีน้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ทนความร้อน ทนกรดและด่างชนิดอ่อน	เชือกไนลอน
Polyvinylchloride	PVC	มีลักษณะขุ่นทึบ เป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี ไม่ติดไฟ มีลักษณะทั้งที่เป็นของแข็งคงรูปและอ่อนนุ่มเหนียว	ท่อน้ำ
Polyethylene Terephthalate	PET	เหนียวมาก โปร่งใส	ขวดน้ำ
Polymethyl methacrylate	PMMA	โปร่งใส แข็งแรงพอสมควร เป็นรอยขีดข่วนง่าย ทนแสงอัลตราไวโอเล็ต ทนความร้อนความเย็น เป็นฉนวนไฟฟ้า ทนสารเคมีได้	กล่องใส

2.1.6.2 เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic)

เทอร์โมเซตติงพลาสติกเป็นพลาสติกที่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก คงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะ

แตกและไหม้เป็นซี้ถ้าสีดำ ทำให้ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ จะถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประเภทของพลาสติกในตระกูลเทอร์โมเซตติงพลาสติกและคุณสมบัติทั่วไป (สถาบันพลาสติก, 2013)

ชนิดพลาสติก	ตัวย่อ	สมบัติทั่วไป	การใช้งาน
Melamine Formaldehyde	MF	รับแรงดึงได้ดีพอสมควร รับแรงอัด และแรงบิดงอได้ดีมาก ทนความร้อน และทนกรดต่างชนิดกันได้	นิยมมาใช้ทำเป็นถ้วยชาม
Phenol - Formaldehyde	PE	รับแรงอัดและแรงบิดงอได้ดีมาก ทนความร้อนหากผสมใยหินจะทนความร้อนได้ถึง 400°F และใช้เก็บความเย็นได้ในอุณหภูมิ -70°F เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีกับกระแสไฟฟ้า ทนกรดและด่างได้ดี	ปลอกหุ้มคอยล์รถยนต์ สารเคลือบในอาคาร ต่อมจับอุปกรณ์ช่าง และสารเคลือบผิว

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จากการศึกษาค้นคว้าของ Rattanasak and Chindaprasirt (2009) ได้ระบุไว้ว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเป็นเถ้าลอย จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ส่งผลทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีความสามารถในการรับแรงอัดน้อยที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 10 และ 15 โมลาร์ ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วน NS/NH เท่ากับ 1.0 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงถึง 70 MPa แต่ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ โดยมีอัตราส่วน NS/NH มากกว่า 1.0 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงมามากเมื่อใช้ความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ โดยมีอัตราส่วน NS/NH มากกว่า 1.0 พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงตามค่าที่เพิ่มขึ้นของอัตราส่วน NS/NH อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ แล้วสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 10 โมลาร์ โดยมีอัตราส่วน NS/NH มากกว่า 1.0 ก็ยังมีค่าการรับกำลังอัดที่ดีกว่าส่วนผสมอื่น ๆ

งานวิจัยของ Lloyd and Rangan (2010) นั้นพบว่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีผลต่อการรับกำลังอัดและความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยที่หากค่าอัตราส่วน NS/NH มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ตีขึ้นไปด้วย

ในงานวิจัยของ Guo et al. (2010) ได้ทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบของสารโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) ต่อเกลือลอย Class C ที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน ASTM C618 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 จึงพบว่ากำลังรับแรงอัดที่ได้อยู่ที่ 63.4 MPa โดยตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการบ่มอีก 28 วัน โดยมีอุณหภูมิอยู่ที่ 23 องศาเซลเซียส ซึ่งผลปรากฏว่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงสุดเมื่อเกลือลอยถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) และยังคงกล่าวอีกว่าการใช้เกลือลอยมาเป็นส่วนผสมในการทำจีโอโพลิเมอร์เป็นการประหยัดพลังงาน อีกทั้งยังสามารถลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากในการอนุรักษ์ทรัพยากรและช่วยรักษาสภาพแวดล้อม

2.2.2 มวลรวมจากขยะพลาสติกกรีไซเคิล

งานวิจัยของ Choi et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้มวลรวมละเอียดที่ผลิตจากขวดพลาสติกเหลือทิ้งโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) มาแทนที่ทราย ในส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตนั้นจะแสดงในตารางที่ 7

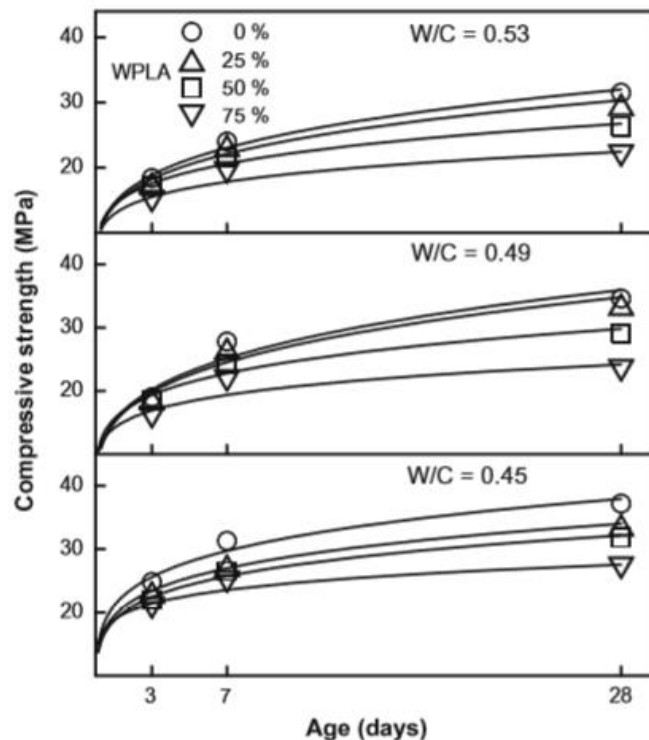
ตารางที่ 7 ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต (Choi et al.,2009)

W/C	เปอร์เซ็นต์ ขยะพลาสติก	Unit weight (kg/m^3)				
		น้ำ	ปูนซีเมนต์	ทราย	ขยะพลาสติก	หิน
0.53	0	178	336	844	0	930
	25			665	119	885
	50			465	249	840
	75			246	394	786
0.49	0	180	367	805	0	939
	25			636	113	895
	50			445	238	850
	75			235	378	797

W/C	เปอร์เซ็นต์ ขยะพลาสติก	Unit weight (kg/m ³)				
		น้ำ	ปูนซีเมนต์	ทราย	ขยะพลาสติก	หิน
0.45	0	181	402	771	0	941
	25			604	108	906
	50			428	229	854
	75			226	363	802

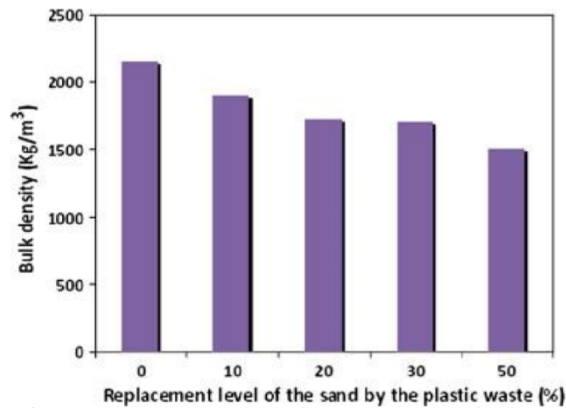
ผลการวิจัยพบว่าค่า Slump ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติก PET ในปริมาณแตกต่างกันนั้น มีค่าตั้งแต่ 153 ถึง 223 มม. ซึ่งสิ่งนี้บ่งชี้ได้ว่าการใช้ขยะพลาสติก PET มาแทนที่ทรายจะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีตได้ และปริมาณอากาศของคอนกรีตที่ใช้ขยะพลาสติก PET มาแทนที่ทรายนั้นมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เป็นตัวควบคุมเล็กน้อยสำหรับอัตราส่วน W/C ที่เท่ากัน นอกจากนี้เมื่อปริมาณน้ำลดลงค่าปริมาณอากาศของส่วนผสมที่มี W/C เท่ากับ 0.49 จะลดลงจาก 5% เป็น 4.2% เนื่องจากสัดส่วนของขยะพลาสติก PET ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 75%

ผลการทดสอบสมบัติทางกลในด้านกำลังรับแรงอัดแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดสัมพันธ์กับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตถูกผสมโดยการเปลี่ยน W/C จาก 0.45 เป็น 0.53 และเปลี่ยนส่วนผสมของขยะพลาสติก PET จาก 0% ถึง 75% โดยรวมแล้วส่วนผสมคอนกรีตที่มีการแทนที่ขยะพลาสติก PET ที่ 25%, 50% และ 75% กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง 6%, 16% และ 30% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

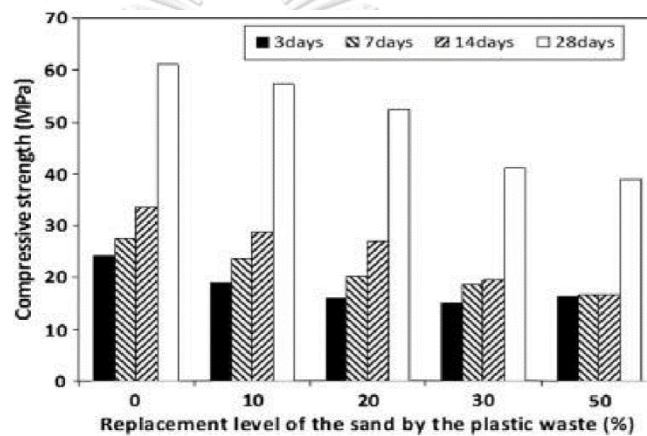


รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Choi et al.,2009)

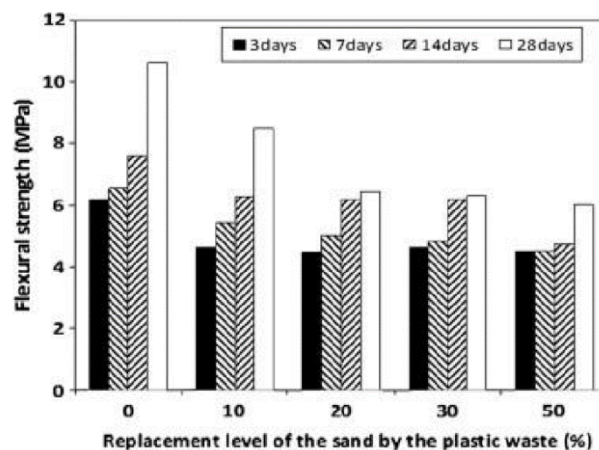
จากงานวิจัยของ Brahim et al. (2013) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลขยะพลาสติก โพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายในการทำมอร์ตาร์สมรรถนะสูง (SCMs) ซึ่งทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกในปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 0.45 จะมีการทดสอบสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น ความพรุนและการดูดซึมน้ำ) และการทดสอบสมบัติทางกล (ความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังดัดที่ 7, 14 และ 28 วัน) จากรูปที่ 7 เนื่องจากความหนาแน่นของพลาสติกต่ำกว่าทรายถึง 70% เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ จะพบการลดลงของความหนาแน่นของ SCMs ซึ่งอาจเกิดจากการที่วัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่า (ทราย) ถูกแทนที่ด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่า ดังนั้นเมื่อแทนที่มากถึง 50% การลดลงของความหนาแน่นของ SCMs จะลดลงประมาณ 37.5% และมีความหนาแน่นรวมอยู่ที่ประมาณ 1,500 กก./ลบ. ม. ซึ่งนับว่าเป็นมอร์ตาร์มวลเบา ในส่วนของการรับกำลังอัดของ SCMs จะลดลงเมื่อใช้ขยะพลาสติกแทนที่ 30% และ 50% โดยปริมาตร ทำให้การรับกำลังอัดลดลงเท่ากับ 15% และ 33% ตามลำดับ ซึ่งจะถูกแสดงในรูปที่ 8 ส่วนผลการทดสอบกำลังดัดของ SCMs จะแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งผลทดสอบดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าความต้านทานกำลังดัดจะลดลงตามปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 ความหนาแน่นของ SCMs ที่ทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกชนิด PET ในปริมาณที่ต่างกัน (Brahim Safi et al., 2013)

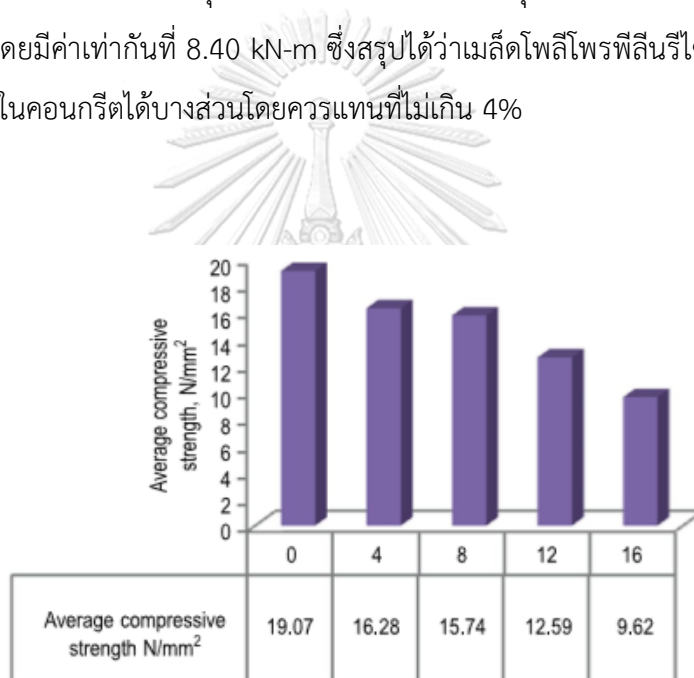


รูปที่ 8 ความสามารถในการรับกำลังอัด เมื่อทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกชนิด PET ในปริมาณที่ต่างกัน (Brahim Safi et al., 2013)

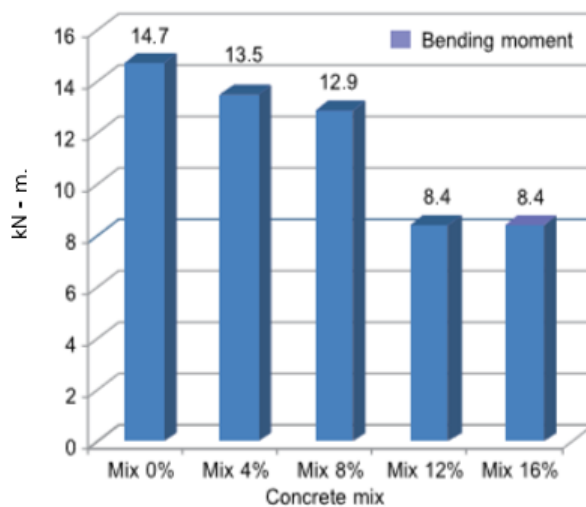


รูปที่ 9 ความสามารถในการรับกำลังดัด เมื่อทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกชนิด PET ในปริมาณที่ต่างกัน (Brahim Safi et al., 2013)

งานวิจัยของ Akinyele et al. (2014) ได้นำผลิตภัณฑ์เหลือใช้ไปรีไซเคิลเป็นเม็ดโพลีพรพี ลินที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. แล้วนำไปแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีตธรรมดาที่มีขนาด 150 mm x 150 mm x 150 mm และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาด 600 mm x 150 mm x 200 mm ซึ่งมีส่วนผสมของวัสดุรีไซเคิลชนิดโพลีพรพีลีนในอัตราร้อยละ 0, 4%, 8%, 12% และ 16% โดยที่คอนกรีตธรรมดากจะถูกนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10 พบว่ากำลังอัดของส่วนผสม 4% นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของส่วนผสมควบคุมที่สุด ในขณะที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกนำไปทดสอบโมเมนต์ดัด ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11 พบว่าส่วนผสมควบคุมให้ค่ากำลังรับแรงดัดมากที่สุด ในขณะที่ส่วนผสมที่มีวัสดุรีไซเคิล 12% และ 16% มีค่ากำลังรับแรงดัดต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากันที่ 8.40 kN-m ซึ่งสรุปได้ว่าเม็ดโพลีพรพีลีนรีไซเคิลสามารถใช้แทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีตได้บางส่วนโดยควรแทนที่ไม่เกิน 4%



รูปที่ 10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน (Akinyele et al., 2014)



รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับโมเมนต์คด (Akinyele et al., 2014)

งานวิจัยของ Nantachai et al. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล HDPE ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยอัตราส่วนการแทนที่ที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด มีค่า W/C เท่ากับ 0.4 แบ่งเป็น ปริมาณซีเมนต์ 660 kg/m³ และ 560 kg/m³ ทำการทดสอบดังนี้ การไหลแผ่ Slump flow การแยกตัวโดย V-funnel การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน L-box และ J-ring ซึ่งพบว่าที่การแทนที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดนั้น การไหลแผ่สูงขึ้นและสูงกว่าอัตราส่วนผสมที่เป็นตัวควบคุมประมาณร้อยละ 4-6 แต่เมื่อเพิ่มการแทนที่มากกว่าร้อยละ 5 การไหลแผ่ลดลงประมาณร้อยละ 15 - 30 ของอัตราส่วนที่ใช้เป็นตัวควบคุม ค่าการแยกตัวของทุกอัตราส่วนผสมสูงกว่าเกณฑ์อย่างมากและแปรผันตามการเพิ่มของร้อยละการแทนที่ ซึ่งบ่งชี้ชัดว่าอัตราส่วนผสมของการศึกษานี้หนืดมากจึงมีแนวโน้มสูงที่จะทำให้มวลรวมเกิดการแยกตัวขณะเทสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนของอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ 660 kg/m³ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน ขณะที่อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ 560 kg/m³ มีแนวโน้มลดลงชัดเจน โดยที่การแทนที่มากกว่าร้อยละ 5 มีค่าการไหลผ่าน L-box ลดลงประมาณร้อยละ 67-76 ของอัตราส่วนที่เป็นตัวควบคุม สรุปได้ว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลร้อยละ 5 ทำให้คอนกรีตสดไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีสมบัติการไหลแผ่ การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน L-box และ J-ring ไม่แตกต่างจากเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASTM

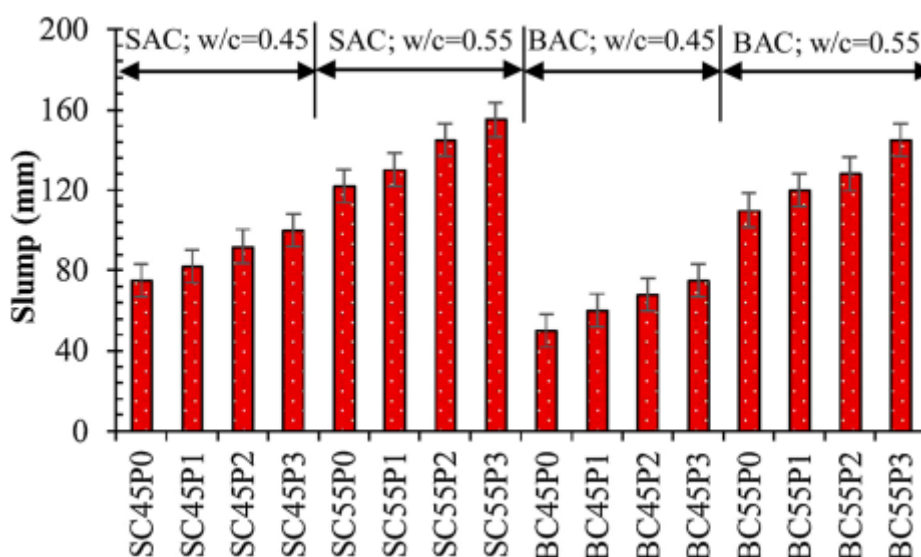
งานวิจัยของ Jahidul and Shahjalal (2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของพลาสติกโพลีโพรไพลีนต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อมีการนำไปแทนที่ในมวลรวมจากหินธรรมชาติและอิฐดินเผา ซึ่งตัวแปรหลักประกอบไปด้วยการแทนที่พลาสติกโพลีโพรพิลีน (PP) ในมวลรวมหยาบของทั้งหินธรรมชาติ (SA) และอิฐดินเผา (BA) ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยปริมาตร ซึ่งจะแบ่ง W/C เป็น 0.45 และ 0.55 ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีต (Jahidul et al.,2021)

W/C Ratio	Designation	Proportions of Coarse Aggregate (%)			Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Fine Aggregate (kg/m ³)	Coarse Aggregate (kg/m ³)	
		SA	BA	PP				SA/BA	PP
0.45	SC45P0	100	-	0	340	153	539.3	1251.2	0
	SC45P1	90	-	10				1126	40.5
	SC45P2	80	-	20				1000.9	81
	SC45P3	70	-	30				875.8	121.6
0.55	SC55P0	100	-	0	340	187	513.8	1192	0
	SC55P1	90	-	10				1072.8	38.6
	SC55P2	80	-	20				953.6	77.2
	SC55P3	70	-	30				834.4	115.8
0.45	BC45P0	-	100	0	340	153	539.3	1102.6	0
	BC45P1	-	90	10				992.3	40.5
	BC45P2	-	80	20				882	81
	BC45P3	-	70	30				771.8	121.6
0.55	BC55P0	-	100	0	340	187	513.8	1050.4	0
	BC55P1	-	90	10				945.4	38.6
	BC55P2	-	80	20				840.3	77.2
	BC55P3	-	70	30				735.3	115.8

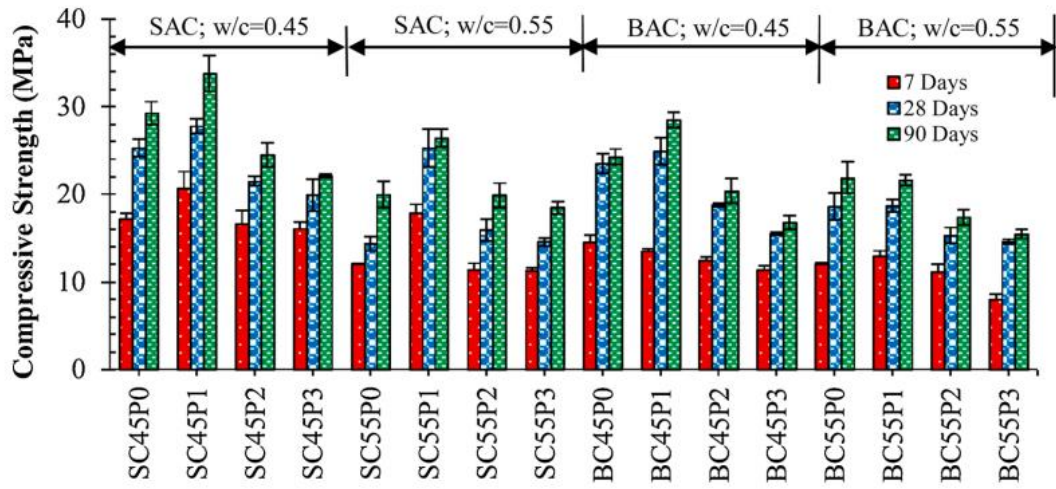
ผลการทดสอบในด้านของความสามารถในการทำงานได้หรือค่า Slump แสดงในรูปที่ 12 จะเห็นว่าที่อัตราส่วน w/c คงที่ ค่า Slump จะเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของ PP ในทางกลับกัน

การเปรียบเทียบค่า Slump ระหว่างตัวอย่างที่มีอิฐดินเผาเป็นมวลรวมหยาบ (BAC) และตัวอย่างที่มีหินธรรมชาติเป็นมวลรวมหยาบ (SAC) ความสามารถในการทำงานได้สำหรับ BAC นั้นค่อนข้างจะต่ำกว่าของ SAC มาก อีกทั้งในตัวอย่างที่เป็น SAC และ BAC ที่มี W/C ต่ำกว่า 0.45 และมีส่วนผสมพลาสติกอยู่ 30% ของมวลรวมหยาบ จะมีค่า Slump ที่เพิ่มขึ้นคือ 33% และ 50% ตามลำดับ



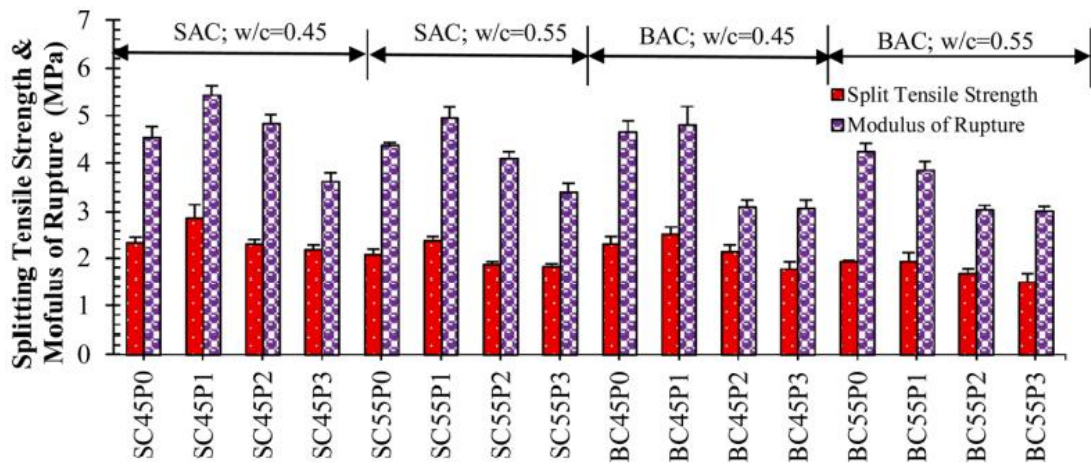
รูปที่ 12 ค่า Slump ของแต่ละตัวอย่างที่มีการแทนที่พลาสติกโพลีโพรพิลีนในมวลรวมหยาบ (Jahidul et al.,2021)

ในส่วนของการรับแรงอัดและการรับแรงดึงจะแสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในด้านของการรับแรงอัดคอนกรีตที่มีการผสม PP ที่ 10% มีการยึดเกาะที่ดีขึ้นระหว่างมวลรวมและซีเมนต์ส่งผลให้มีแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แต่เมื่อมีการแทนที่ PP ที่ 20% และ 30% จะส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติก PP ที่เพิ่มขึ้น และในด้านของการรับแรงดึงและโมดูลัสการแตกสำหรับอัตราส่วน w/c คงที่ ค่าความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของการแตกจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่พลาสติก PP ที่ 10% จากนั้นกำลังจึงจะเริ่มลดลงเมื่อมีการแทนที่พลาสติก PP ที่ 20% และ 30% ตามลำดับ



รูปที่ 13 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

(Jahidul et al.,2021)



รูปที่ 14 ค่าความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสการแตกของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

(Jahidul et al.,2021)

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานศึกษาวิจัยนี้มีวัสดุที่ใช้ประกอบไปด้วย มวลรวมหยาบธรรมชาติ ทรายธรรมชาติ ขยะพลาสติกชนิดโพลิโพรไพลีน (Polypropylene plastic waste) ซึ่งจะถูกนำมาแทนที่มวลรวมหยาบ อีกทั้งยังมีเถ้าลอย (Fly ash) สารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีรายละเอียดส่วนผสมดังนี้

1) เถ้าลอยแคลเซียมสูง (HCF) ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 นับเป็น Class C

2) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งมีองค์ประกอบ Na_2O เท่ากับ 9.84% และ H_2O เท่ากับ 61.45% และ SiO_2 เท่ากับ 28.71%

3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่จะใช้ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ มีความเข้มข้น 10 โมลาร์

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type I ordinary Portland cement)

5) มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้นั้นจะอยู่สภาวะแห้งในอากาศ (Air dry) ซึ่งขนาดคละจะเป็นตามมาตรฐาน ASTM C33 มีสมบัติดังตารางที่ 9

6) ขยะพลาสติกที่ใช้จะเป็นชนิด Polypropylene (PP) ซึ่งเป็นพลาสติกเป็นเม็ดคล้ายมวลรวมหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 สมบัติมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

มวลรวม	ความ ถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	โมดูลัสความละเอียด (FM)	ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ
มวลรวมหยาบ	2.7	1621	7.19	0.6
มวลละเอียด	2.57	1664	2.66	0.72

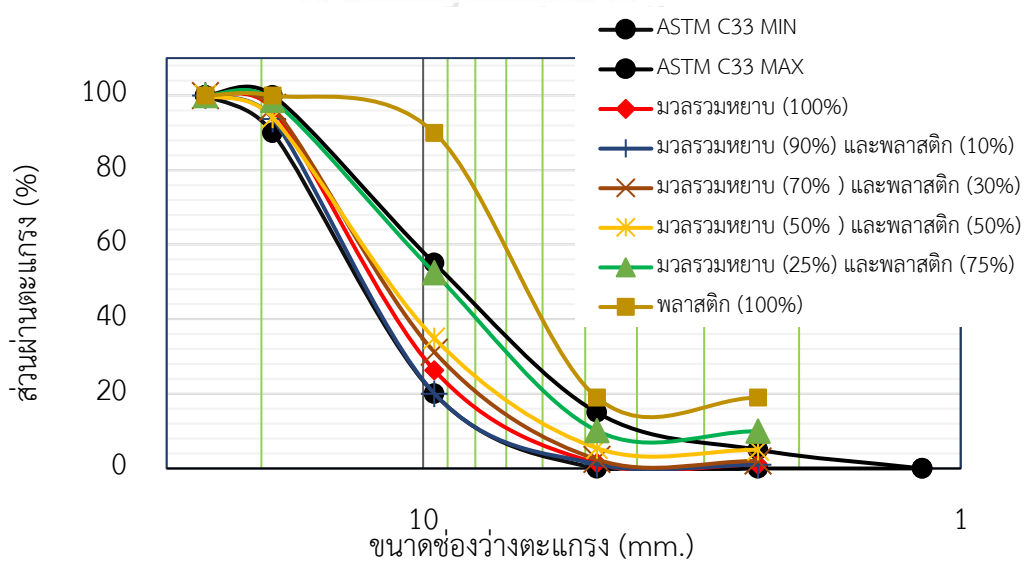
ตารางที่ 10 สมบัติของขยะพลาสติกชนิด Polypropylene (PP)

มวลรวม	ความ ถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	โมดูลัสความละเอียด (FM)	ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ
ขยะพลาสติก	0.9	908	4.97	-



รูปที่ 15 ขยะพลาสติกชนิด Polypropylene (PP)

ในส่วนของการกระจายตัวของขยะพลาสติกและมวลรวมหยาบที่ใช้แสดงในรูปที่ 16 ตามมาตรฐาน ASTM C33 (2008) จากผลการทดสอบพบว่าขนาดคละของขยะพลาสติกชนิด PP ล้วนไม่เป็นไปตามค่าที่มาตรฐานแนะนำ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้มวลรวมผสมที่ใช้ขยะพลาสติกแทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 50 โดยปริมาตร จะมีขนาดคละที่เป็นไปตามเกณฑ์



รูปที่ 16 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบและขยะพลาสติกชนิด PP

3.2 ส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ในงานวิจัยครั้งนี้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต โดยที่มวลรวมหยาบจะถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกชนิด PP ในอัตราส่วน 0%, 10%, 30% และ 50% โดยปริมาตร ซึ่งส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตแสดงในตารางที่ 11 และส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 11 ส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบ

ชื่อส่วนผสม	W/C	Slump (cm)	ปูนซีเมนต์ (kg/m ³)	น้ำ (kg/m ³)	มวลรวม (kg/m ³)		
					หิน	ทราย	ขยะพลาสติก
C-PP0	0.55	5 - 10	375	206	1120	760	-
C-PP10			375	206	1008	760	37
C-PP30			375	206	784	760	112
C-PP50			375	206	560	760	187

ตารางที่ 12 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบ

ชื่อส่วนผสม	เถ้าลอย (kg/m ³)	สารละลายต่าง (kg/m ³)		มวลรวม (kg/m ³)		
		NaOH	Na ₂ SiO ₃	หิน	ทราย	ขยะพลาสติก
GPC-PP0	450	135	135	1150	500	-
GPC-PP10	450	135	135	1035	500	38.5
GPC-PP30	450	135	135	805	500	115
GPC-PP50	450	135	135	575	500	192

3.3 ขั้นตอนการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

วิธีการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต เริ่มด้วยขั้นตอนแรกคือตวงส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบตามส่วนผสมที่ได้ทำการออกแบบไว้ จากนั้นให้นำไปเทรวมกันใน โม่ผสมแล้วเปิดเครื่องเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้ส่วนผสมได้คลุกเคล้าให้เข้ากัน เมื่อครบ 5 นาทีแล้วจะ เริ่มขั้นตอนที่สอง ให้เติมน้ำลงไปผสมในเครื่องอีก 3 นาที จากนั้นปิดเครื่องพักไว้สัก 2 นาที และ ขั้นตอนสุดท้าย ทำการเปิดเครื่องให้ปั่นอีก 2 นาที แล้วจึงทำการปิดเครื่องเพื่อเอาส่วนผสมเข้าแบบ หล่อต่อไป

วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ซึ่งจะใช้เวลาผสม 15 นาที ขั้นตอนแรกใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับเถ้าลอย เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยขั้นตอนที่สองคือใส่มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบผสมกันเป็นเวลา 5 นาที ขั้นตอนสุดท้ายให้ใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกตและทำการผสมอีก 5 นาที จากนั้นเมื่อทำครบสามขั้นตอนนี้ก็นำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไปเทเข้าแบบหล่อที่ได้ทำการเตรียมไว้สำหรับการทดสอบ เมื่อทำการแกะออกจากแบบแล้วจะทำการบ่มด้วยพลาสติกโดยห่อตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนจะนำตัวอย่างไปทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ

3.4 รายละเอียดการทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติด้านความทนทาน และความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมพลาสติกกรีซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบบางส่วน โดยสมบัติที่ศึกษามีดังนี้ การวัดค่าการไหลแผ่ (Slump flow), เวลาการก่อตัว (Setting time), กำลังอัด (Compressive strength) จะมีตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีนั้นจะหาค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างนั้น โดยจะมีทั้งหมด 24 กรณี, กำลังดัด (Flexural strength) จะมีตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีนั้นจะหาค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างนั้น โดยจะมีทั้งหมด 8 กรณี, กำลังรับแรงดึงแยก (Splitting tensile strength) จะมีตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีนั้นจะหาค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างนั้น โดยจะมีทั้งหมด 8 กรณี, โพรงและการดูดซึมน้ำ (Porosity and water absorption) จะมีตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีนั้นจะหาค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างนั้น โดยจะมีทั้งหมด 8 กรณี, การทดสอบหาค่าความแข็งของโครงสร้างระดับจุลภาคโดยวิธี Vickers, อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต จะมีตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 กรณี ซึ่งแต่ละกรณีนั้นจะหาค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างนั้น โดยจะมีทั้งหมด 8 กรณี และสุดท้ายความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริก ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะถูกแสดงในตารางที่

ตารางที่ 13 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ทดสอบ

คุณสมบัติที่ทดสอบ	ลักษณะและตัวอย่าง	อายุทดสอบ	มาตรฐานทดสอบ
ค่าการไหลแผ่ (Slump flow)	-	-	ASTM-C1611 (2005)
เวลาการก่อตัว (Setting time)	-	-	ASTM-C403 (2008)
หน่วยน้ำหนัก (Unit weight)	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28 วัน	-
กำลังอัด (Compressive strength)	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	7 วัน, 28 วัน และ 90 วัน	ASTM-C39 (2018)
กำลังดัด (Flexural strength)	คานสี่เหลี่ยมขนาด 10x10x50 cm ³	28 วัน	ASTM-C78 (2002)
กำลังรับแรงดึงแยก (Splitting tensile strength)	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28 วัน	ASTM-C496 (2011)
การทดสอบหาค่าความแข็ง ของโครงสร้างระดับจุลภาค โดยวิธี Vickers	-	-	-
โพรงและการดูดซึมของน้ำ (Porosity and water absorption)	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28 วัน	ASTM-C642 (2013)
อัตราการดูดซึมน้ำของ คอนกรีต	แผ่นกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 5 cm	28 วัน	ASTM-C1585 (2013)
ความสามารถในการทน กรดซัลฟิวริก	ทรงลูกบาศก์ 10 cm ³	7, 14, 28, 56 และ 84 วัน	ASTM-C267 (2012)

การทดสอบปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C642 (2013) โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักให้เป็นน้ำหนักอบแห้ง (a) แล้วนำไปแช่น้ำไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง นำขึ้นมาเช็ดให้ผิวแห้ง จึงนำไปชั่งน้ำหนักที่สภาวะอิมมersion (b) จากนั้นนำไปต้มในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำขึ้นมาเช็ดและชั่งน้ำหนักในอากาศ (c) และ ชั่งน้ำหนักในน้ำ (d) โดยที่ค่าปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-1) และ (3-2)

$$\text{Absorption after immersion (\%)} = \frac{b-a}{a} \times 100 \quad (3-1)$$

$$\text{Volume of permeable pore space (\%)} = \frac{c-a}{c-d} \times 100 \quad (3-2)$$

ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของตัวอย่างทดสอบนั้นจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C267 (2012) ซึ่งจะมีวิธีการเริ่มแรกโดยการนำตัวอย่างไปแช่ในกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 จากนั้นทำการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากแช่ไปแล้วเป็นเวลา 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน

ในส่วนของการทดสอบหาค่าความแข็งของโครงสร้างระดับจุลภาคโดยวิธี Vickers งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความแข็งของโครงสร้างระดับจุลภาคในบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์ (Interfacial Transition Zone, ITZ) โดยวัดความแข็งตามแบบ Vickers โดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็กลงบนตัวอย่างทดสอบโดยให้น้ำหนัก 0.01 kg เป็นระยะเวลา 10 วินาที ตำแหน่งแรกที่ทำกรวัดจะอยู่ชิดกับมวลรวมหยาบ (0 μm) และทำการกดวัดค่าความแข็งห่างจากจุดแรกเป็นระยะ 20, 40, 60, 80, 100 และ 200 μm

3.5 การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์จากผลการทดสอบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต โดยที่ขยะพลาสติกชนิด PP จะถูกแทนที่มวลรวมหยาบในสัดส่วนร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร ซึ่งส่วนผสมนั้นเป็นดังตารางที่ 11 และ 12 ตามลำดับ โดยหลังจากที่คอนกรีตมีการแข็งตัวแล้วก็จะทำการทดสอบสมบัติตามตารางที่ 13

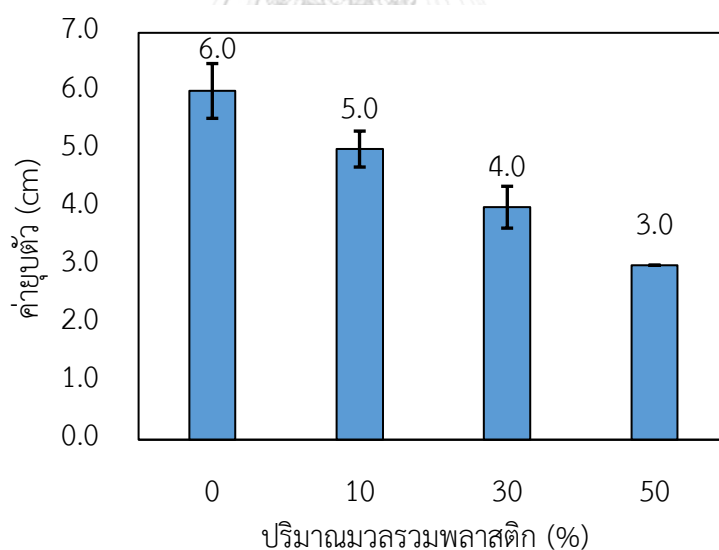
บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

คุณสมบัติของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้นั้นประกอบไปด้วยความสามารถในการทำงานได้, ระยะเวลาการก่อตัว, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง, แยก, โพรงและการดูดซึมน้ำ, อัตราการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของคอนกรีต โดยมีผลการทดสอบที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 ความสามารถในการทำงานได้

ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยทำการวัดค่าการไหลผ่านตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2005) ถูกแสดงดังรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกบดร้อยละ 0, 10, 30, 50 โดยปริมาตรจะมีค่าการยุบตัวอยู่ที่ 6.0, 5.0, 4.0, 3.0 cm ตามลำดับ



รูปที่ 17 ความสามารถในการทำงานได้ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

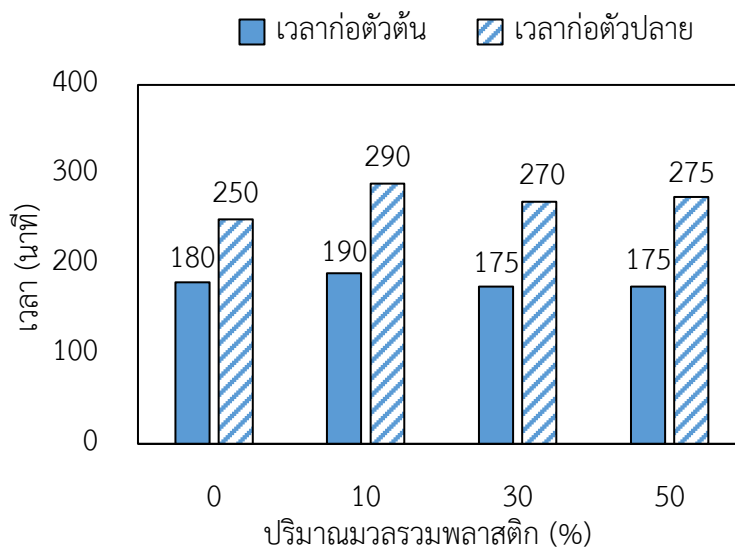
จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตจะลดลงตามปริมาณการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่จะส่งผลให้ความสามารถในการ

ทำงานของคอนกรีตนั้นลดลงตามไปด้วยซึ่งการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดที่ 50% มีค่าความสามารถในการทำงานได้น้อยที่สุด

สาเหตุที่ความสามารถในการทำงานได้ของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นนั้นอันเนื่องมาจากว่าขยะพลาสติกที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เมื่อนำมาผ่านเครื่องบดพลาสติกแล้วนั้นขนาดและรูปร่างที่ออกมาจะแตกต่างกัน โดยที่บางชิ้นรูปร่างยาวและมีเหลี่ยมมุมมาก จึงส่งผลให้เมื่อทำการผสมหินและทรายเข้ากับพลาสติกบดแล้วความสามารถในการไหลของส่วนผสมจึงลดลงตามไปด้วย

4.1.2 ระยะเวลาในการก่อตัว

ระยะเวลาในการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตถูกแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 (2008) จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดที่ 0%, 10%, 30% และ 50% จะทำให้เวลาในการก่อตัวต้นเท่ากับ 180, 190, 175, 175 นาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเทียบตัวอย่างที่มีการแทนที่พลาสติกบด 10% กับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดแล้วจึงพบว่ามีการก่อตัวต้นที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยที่ห่างกันเพียง 10 นาที และส่วนผสมที่ทำการแทนที่หินด้วยพลาสติกบด 30% และ 50% มีการก่อตัวต้นที่เร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่อยู่ที่เพียง 5 นาที



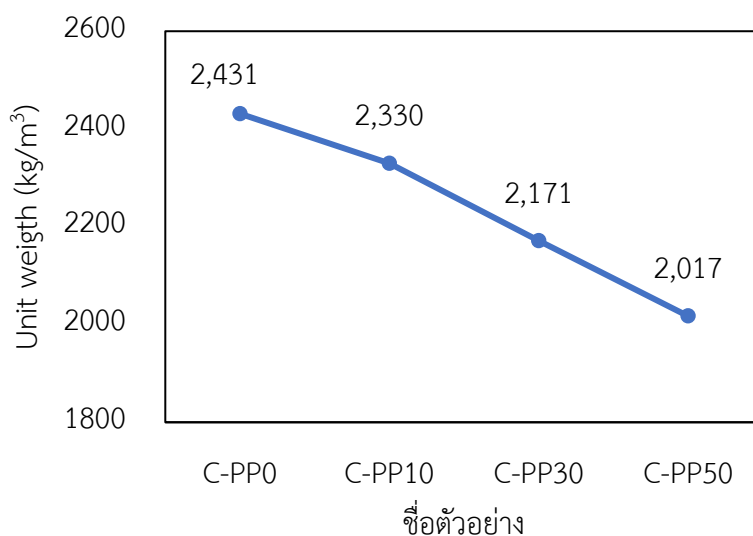
รูปที่ 18 เวลาการก่อตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ในส่วนของระยะเวลาการก่อตัวปลายของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีการแทนที่พลาสติกบด 0%, 10%, 30% และ 50% จะมีเวลาการก่อตัวปลายอยู่ที่ 250, 290, 270 และ 275

นาที่ ซึ่งเมื่อทำการเทียบตัวอย่างที่มีการแทนที่พลาสติกบด 10%, 30% และ 50% กับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดจึงพบว่ามึระยะเวลาการก่อตัวปลายที่นานกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกทั้งหมดซึ่งมีระยะเวลามากกว่ากันอยู่ 40, 20 และ 25 นาที่ ตามลำดับ

4.1.3 หน่วยน้ำหนัก

รูปที่ 19 แสดงผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างที่เป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ซึ่งหาได้จากการนำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่ชัดแล้วไปชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนัก ผลปรากฏว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกชนิด PP หรือ C-PP0 นั้นมีหน่วยน้ำหนักมากที่สุดก็คือ 2431 kg/m^3 ส่วนตัวอย่างที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกชนิด PP ที่ 10%, 30% และ 50% จะมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2330, 2171 และ 2017 kg/m^3 ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกชนิด PP ที่มากขึ้นจะส่งผลให้น้ำหนักของตัวอย่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เกิดจากที่วัสดุพลาสติกนั้นมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับมวลรวมหยาบที่เป็นหิน จึงส่งผลให้เมื่อมีการนำหินออกไปและนำพลาสติกเข้ามาแทนที่ตัวอย่างจึงมีน้ำหนักเบาขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เป็นตัวควบคุม

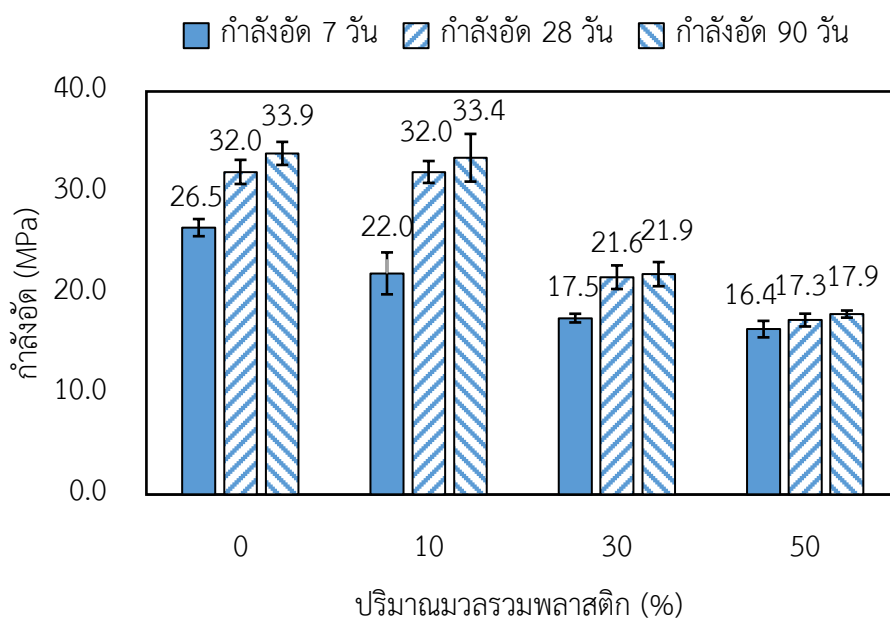


รูปที่ 19 หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

4.1.4 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบผลกระทบของปริมาณการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกบดที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 (2018) ถูกแสดงในรูปที่ 20 จากผลการทดสอบ

กำลังรับแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตพบว่าเมื่อมีการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกกดเข้าไป 0%, 10%, 30% และ 50% ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกกดที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมที่มีการแทนที่ 10% นั้นค่ากำลังจะต่ำกว่าเพียงเล็กน้อยซึ่งนับว่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ขยะพลาสติก ยกตัวอย่างที่อายุการบ่มที่ 90 วัน ค่ากำลังอัดจะอยู่ที่ 33.4 MPa เทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 90 วัน ของตัวอย่างที่เป็นตัวควบคุมคือ 33.9 MPa ซึ่งต่างกันอย่างไรไม่มีนัยสำคัญ

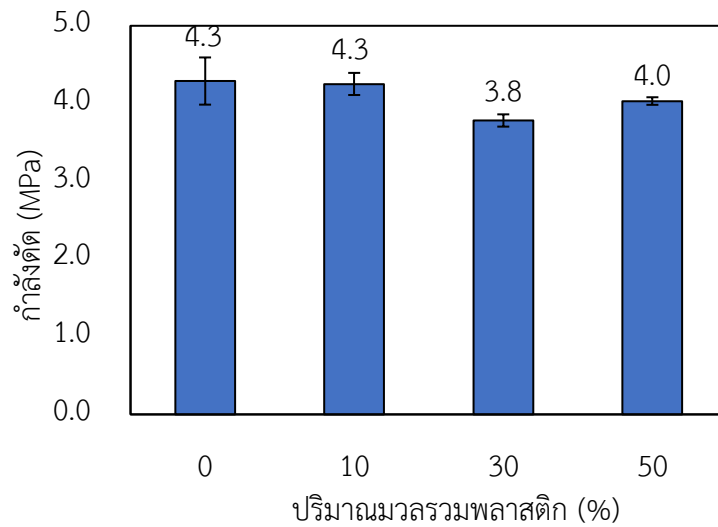


รูปที่ 20 กำลังรับแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7, 28, 90 วัน

ทั้งนี้สาเหตุที่ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกกดที่เพิ่มขึ้นนั้นอันเนื่องมาจาก วัสดุพลาสติกกดที่นำมาใช้นั้นมีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุที่เป็นมวลรวมหยาบอย่างหิน ดังนั้นแล้วเมื่อมีการแทนที่วัสดุมวลรวมหยาบที่เป็นหินด้วยพลาสติกกดจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีค่าที่ลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้น

4.1.5 กำลังรับแรงดัด

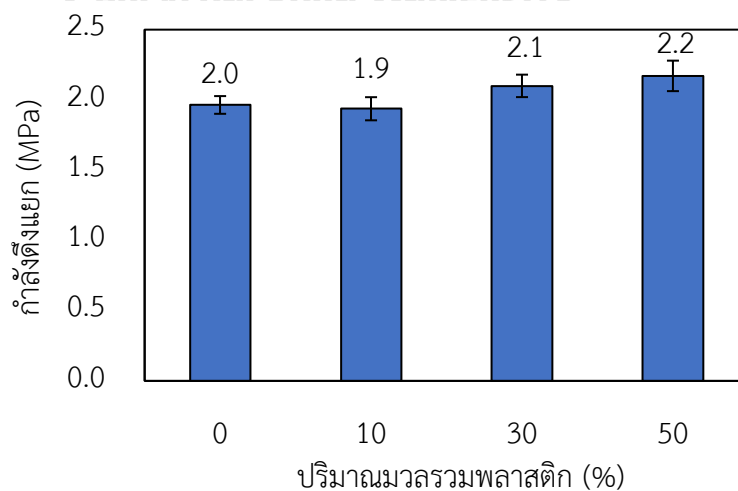
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) และมีอายุบ่มตัวอย่างอยู่ที่ 28 วัน ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C78 (2002) ถูกแสดงในรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกกดที่ 0%, 10%, 30% และ 50% นั้นจะได้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 4.3, 4.3, 3.8 และ 4.0 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 21 กําลังรับแรงดัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

4.1.6 กําลังรับแรงดึงแยก

ผลการทดสอบกําลังรับแรงดึงแยกของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) และมีอายุบ่มตัวอย่างอยู่ที่ 28 วัน ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 (2011) จะถูกแสดงในรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่เพิ่มขึ้นจาก 0%, 10%, 30% และ 50% จะมีค่ากําลังรับแรงดึงอยู่ที่ 2.0, 1.9, 2.1 และ 2.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้นั้นไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นแล้วการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่ได้ส่งผลต่อกําลังรับแรงดึงแยกของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต



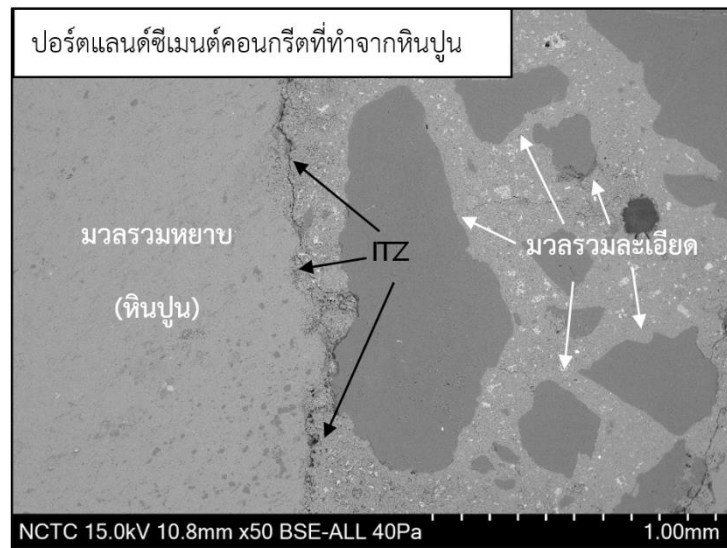
รูปที่ 22 กําลังรับแรงดึงแยกของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

4.1.7 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ

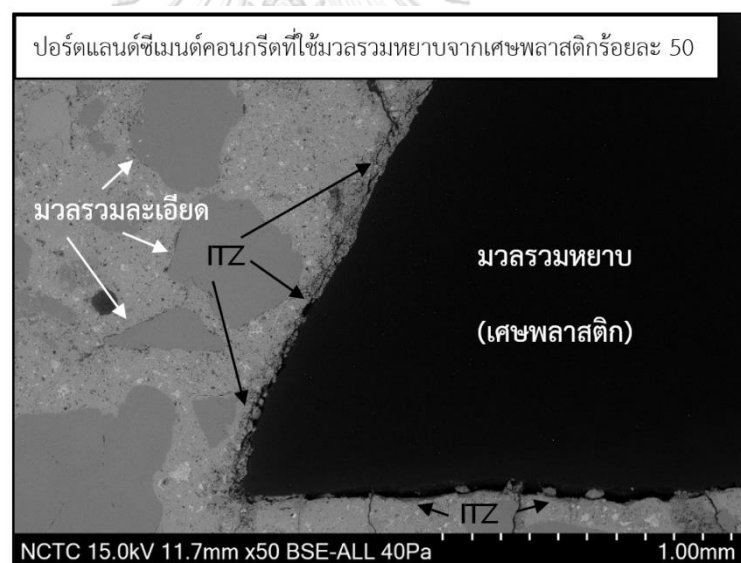
รูปที่ 23 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของแนวรอยต่อระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์ (Interfacial transition zone, ITZ) ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตจะเห็นได้ว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์สามารถยึดเหนี่ยวหินปูนได้ดีกว่าเม็ดพลาสติกซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากแนวรอยต่อระหว่างมอร์ตาร์และมวลรวม มอร์ตาร์จะยึดเกาะกับหินปูนได้จนเกือบเป็นเนื้อเดียวกันโดยจะสังเกตเห็นรอยแยกเล็กน้อยบริเวณ ITZ (รูปที่ 23 (a)) ในขณะที่แนวรอยต่อระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และเม็ดพลาสติกจะมีขนาดใหญ่และมองเห็นได้ชัดเจนบ่งบอกได้ถึงแรงยึดเหนี่ยวที่ต่ำกว่า

รูปที่ 24 แสดงผลการทดสอบวัดค่าความแข็ง Vickers บริเวณรอยต่อของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ โดยเก็บตัวอย่างจากส่วนผสม C-PP0 และ C-PP50 เพื่อศึกษาความแข็งแรงของ ITZ ความแข็ง Vickers มีค่าเท่ากับ 581, 613, 667, 1010, 1015, 1085, 1114 N/mm² เมื่อวัดจากตำแหน่งที่มีระยะห่างจากหินปูนเท่ากับ 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 200 μm ตามลำดับ จากผลการทดสอบสามารถประเมินได้ว่า ITZ มีความหนาประมาณ 40 μm เนื่องจากค่าความแข็งที่ระยะ 60 μm เป็นต้นไปมีแนวโน้มที่สูงขึ้นมากอาจเป็นส่วนของซีเมนต์เจลหรือผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่สมบูรณ์แตกต่างจากซีเมนต์เจลที่พบใน ITZ

เมื่อวัดค่าความแข็งในส่วนผสม C-PP50 พบว่าตำแหน่งที่มีระยะห่างจากเม็ดพลาสติก 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 200 μm มีความแข็ง Vickers เท่ากับ 484, 551, 593, 954, 1004, 1062 และ 1058 N/mm² ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 24 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม C-PP0 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็ง Vickers ที่พบในส่วนผสม C-PP50 มีค่าน้อยกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงระยะ 0-40 μm หรือช่วงขอบเขตของ ITZ ซึ่งบ่งชี้ถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์และเม็ดพลาสติกที่ต่ำกว่าสอดคล้องกับรูปถ่ายของโครงสร้างระดับจุลภาค (รูปที่ 23) ที่ได้นำเสนอไปแล้ว

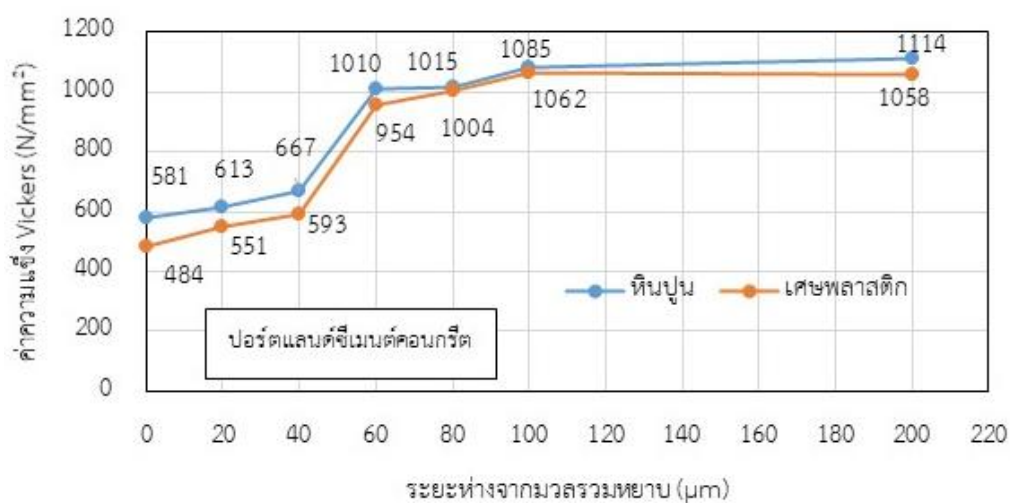


(a) ITZ ระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบจากหินปูน



(b) ITZ ระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบจากเศษพลาสติก

รูปที่ 23 ITZ ระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ

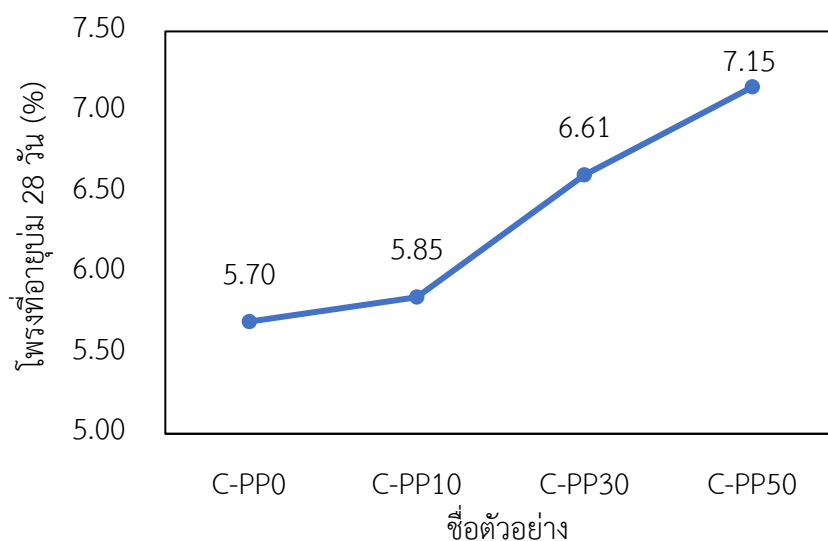


รูปที่ 24 ค่าความแข็ง Vickers ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

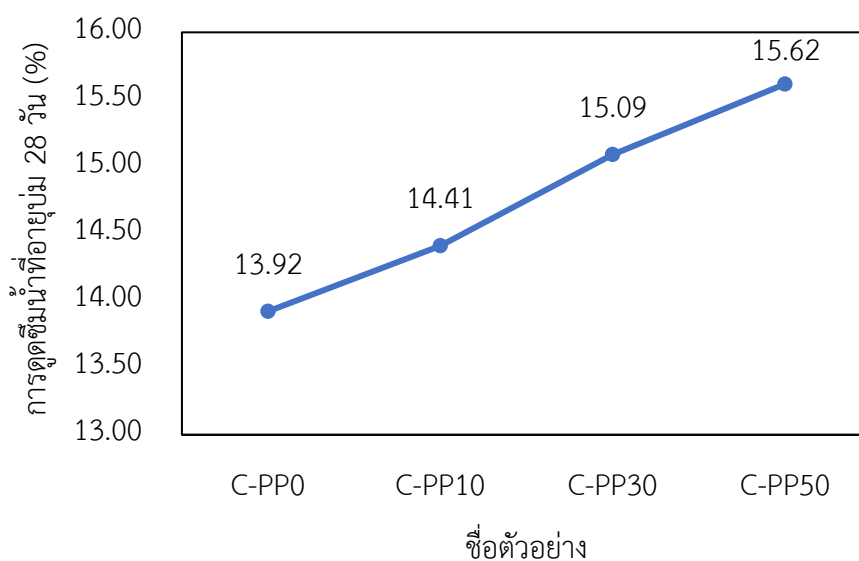
4.1.8 โพรงและการดูดซึมน้ำ

การทดสอบของโพรงและการดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C642 (2013) แสดงในรูปที่ 25 และ 26 ตามลำดับ จากรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างทดสอบ C-PP0, C-PP10, C-PP30 และ C-PP50 มีค่าร้อยละโพรงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตอยู่ที่ 5.70%, 5.85%, 6.61% และ 7.15% ตามลำดับ ซึ่งค่าร้อยละโพรงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างค่าร้อยละโพรงของ C-PP50 เทียบกับ C-PP0 จะมีค่าร้อยละโพรงต่างกัน 1.45%

จากรูปที่ 26 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าร้อยละการดูดซึมน้ำในตัวอย่างทดสอบ C-PP0, C-PP10, C-PP30 และ C-PP50 เท่ากับ 13.92%, 14.41%, 15.09% และ 15.62% ตามลำดับ ซึ่งค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโพรง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีโพรงหรือช่องว่างจำนวนมากในตัวอย่างทดสอบจะทำให้ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น



รูปที่ 25 โพรงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

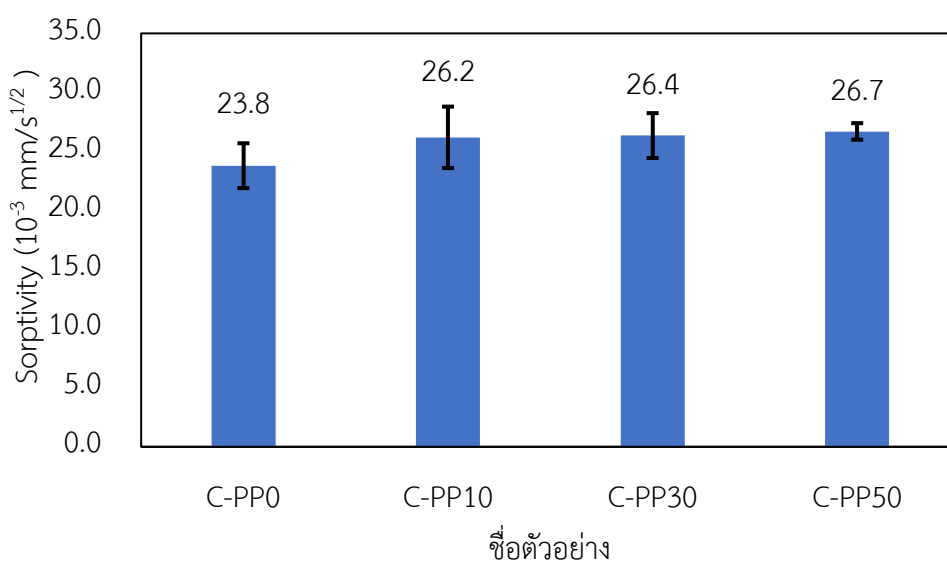


รูปที่ 26 การดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

4.1.9 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน ทดสอบจากตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 5 เซนติเมตร ซึ่งอิงตามมาตรฐาน ASTM C1585 (2011) แสดงในรูปที่ 27 จากรูปจะเห็นว่าอัตราการดูดซึมน้ำของพอร์ต

แลนดซีเมนต์คอนกรีตในตัวอย่าง C-PP0, C-PP10, C-PP30 และ C-PP50 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 23.8×10^{-3} , 26.2×10^{-3} , 26.4×10^{-3} และ $26.7 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^{1/2}$ ตามลำดับ โดยที่ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนดซีเมนต์คอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกบดที่ถูกลำมาแทนที่หินในตัวอย่าง ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดมาจากเมื่อนำพลาสติกบดมาแทนที่ในมวลรวมหยาบอย่างหินแล้วทำให้เกิดโพรงและช่องว่างขึ้นในตัวอย่างที่นำมาทดสอบซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลทดสอบในหัวข้อที่ 4.1.8 โพรงและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตก็จะพบว่าเมื่อมีปริมาณโพรงมากอัตราการดูดซึมน้ำก็จะมีค่าที่มากขึ้นตามไปด้วย



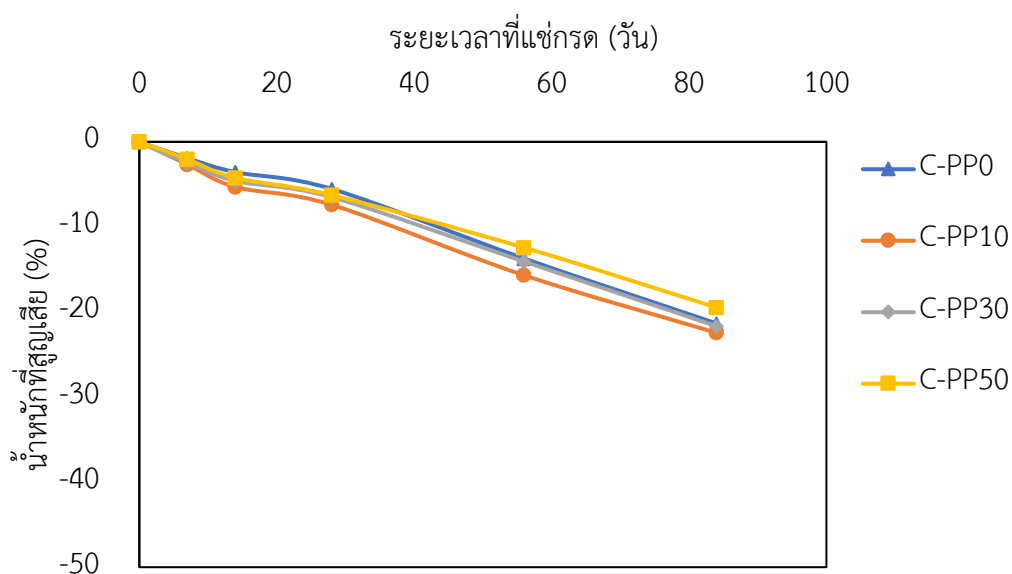
รูปที่ 27 อัตราการดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนดซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

4.1.10 ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริก

ผลการทดสอบความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของพอร์ตแลนดซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน โดยที่ได้นำตัวอย่างไปแช่ในกรดซัลฟิวริกเป็นระยะเวลา 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน ซึ่งจะนำไปตามมาตรฐาน ASTM C267 (2012) ถูกแสดงดังรูปที่ 28

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ถูกแช่อยู่ในกรดซัลฟิวริกในช่วงเริ่มแรกจนถึงระยะเวลา 28 วัน ตัวอย่าง C-PP0 จะมีร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่าง C-PP50, C-PP30 และ C-PP10 ตามลำดับ โดยที่ร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปของตัวอย่างมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 7.4% แต่เมื่อพิจารณาจากผลทดสอบที่ตัวอย่างถูกแช่อยู่ในกรดซัลฟิวริกที่ 90 วัน จะพบว่า

ตัวอย่างที่มีร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปต่ำที่สุดคือ C-PP50 เมื่อเทียบกับตัวอย่าง C-PP0, C-PP30 และ C-PP10 ตามลำดับ โดยค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปนั้นมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 22.4% ซึ่งค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณาตัวอย่างทั้งสี่ในช่วงระยะเวลาเดียวกัน



รูปที่ 28 น้ำหนักที่สูญหายไปเทียบกับเวลาของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

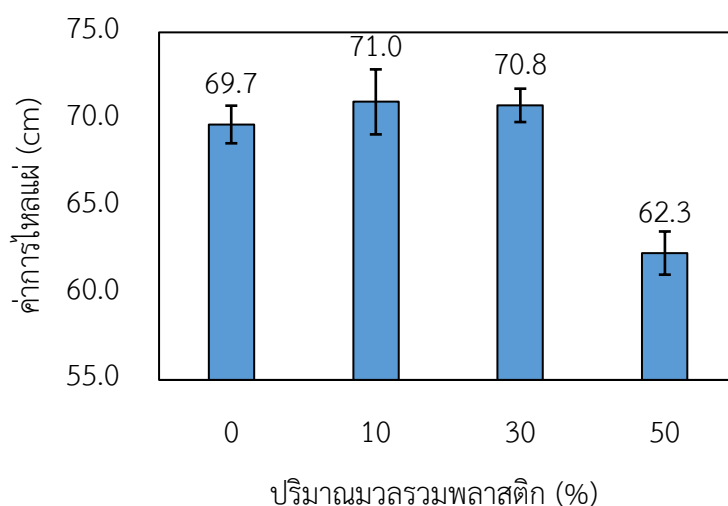
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

คุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้นั้นประกอบไปด้วยความสามารถในการทำงานได้, ระยะเวลาการก่อตัว, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง, กำลังรับแรงดัด, โพรงและการดูดซึมน้ำ, อัตราการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริก โดยมีผลการทดสอบที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 ความสามารถในการทำงานได้

จากผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตโดยวัดค่าการไหลผ่านตามมาตรฐาน ASTM C1611 (2005) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 29 พบว่าเมื่อมีการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกบดร้อยละ 0, 10, 30, 50 โดยปริมาตร จะมีค่าการไหลผ่านเท่ากับ 69.7, 71.1, 70.8, 62.3 cm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการแทนที่ 10% และ 30% นั้นจะไม่ส่งผลต่อค่าการไหลของ

คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่มากเกินไปที่ 50% นั้นจะทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงมากกว่าตัวที่ไม่มีการแทนที่



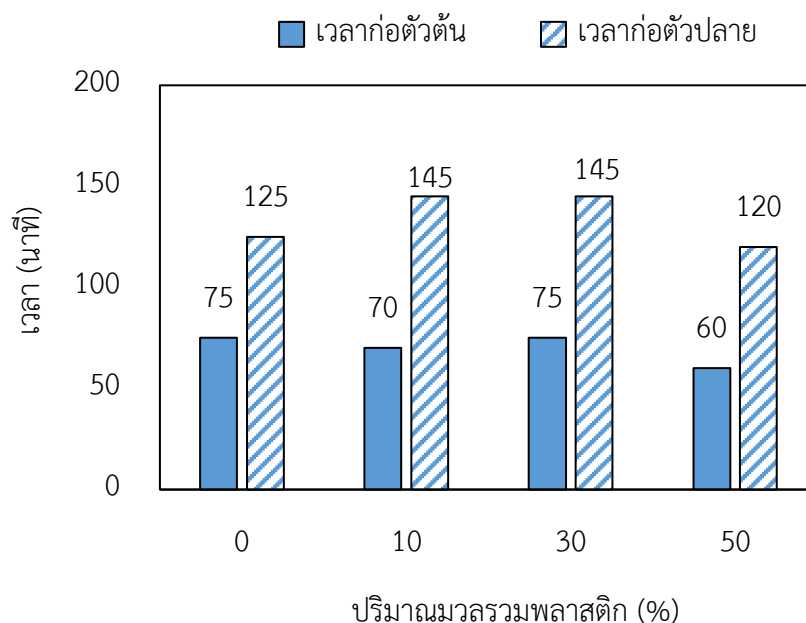
รูปที่ 29 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดจากวัสดุประสานอย่างจีโอโพลิเมอร์นั้นไม่สามารถยึดเกาะได้ดีกับผิวพลาสติกบดที่เป็นผิวมันดังนั้นเมื่อทำการใส่พลาสติกบดลงไปแทนที่หินในปริมาณที่เหมาะสมจึงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าการไหลแม่ที่เยอะกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่ แต่เมื่อมีการแทนที่พลาสติกบดมากเกินไปด้วยลักษณะทางกายภาพที่มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่ามวลรวมหยาบอย่างหินแล้วจึงส่งผลให้ค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลง

4.2.2 ระยะเวลาในการก่อตัว

ระยะเวลาในการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นจะถูกแสดงในรูปที่ 30 ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 (2008) จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดที่ 0%, 10%, 30% และ 50% จะทำให้เวลาในการก่อตัวต้นเท่ากับ 75, 70, 75 และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเทียบตัวอย่างที่มีการแทนที่พลาสติกบดกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบด พบว่าระยะเวลาการก่อตัวต้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยที่ห่างกันมากที่สุดเพียง 10 นาที

ในส่วนของระยะเวลาการก่อตัวปลายของของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีการแทนที่พลาสติก บด 0%, 10%, 30% และ 50% จะมีเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 120, 145, 145 และ 120 นาที โดยจะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยพลาสติก 10% และ 30% จะมีเวลาการก่อตัวปลายนานกว่าส่วนผสมควบคุมอยู่ 20 นาที แต่ตัวอย่างที่มีการแทนที่ 50% จะมีเวลาการก่อตัวไวกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่เพียงเล็กน้อยที่ 5 นาที เท่านั้น กล่าวได้ว่าการใช้มวลรวมพลาสติกแทนที่หินไม่ส่งผลต่อค่าระยะเวลาการก่อตัวปลายอย่างมีนัยสำคัญ



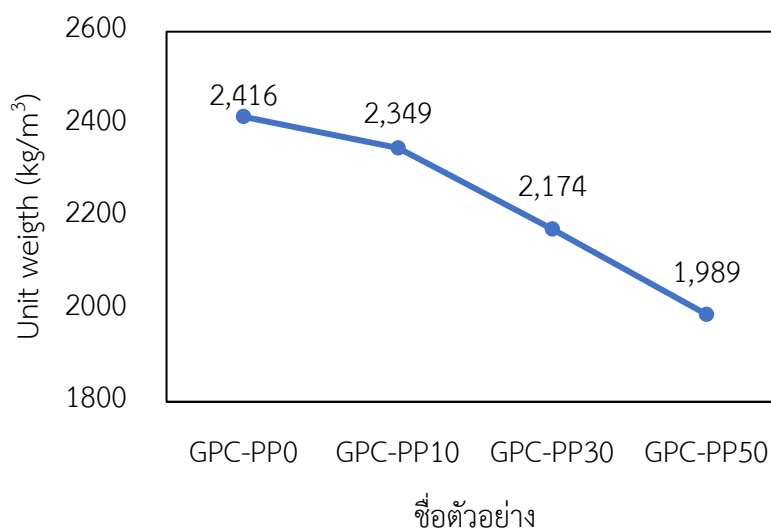
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 30 เวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4.2.3 หน่วยน้ำหนัก

จากรูปที่ 31 ซึ่งแสดงผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างที่เป็นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ผลปรากฏว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกชนิด PP หรือ GPC-PP0 นั้นมีหน่วยน้ำหนักมากที่สุดก็คือ 2416 kg/m^3 ส่วนตัวอย่างที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกชนิด PP ที่ 10%, 30% และ 50% มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ 2349 , 2174 และ 1984 kg/m^3 ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกชนิด PP ที่มากขึ้นจะส่งผลให้น้ำหนักของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นมีน้ำหนักที่ลดลงตามไปด้วยเช่นเดียวกับกรณีตัวอย่างพอร์ต

แลนดซีเมนต์คอนกรีต ทั้งนี้เกิดจากที่วัสดุพลาสติกนั้นมึน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับมวลรวมหยาบที่เป็น หิน

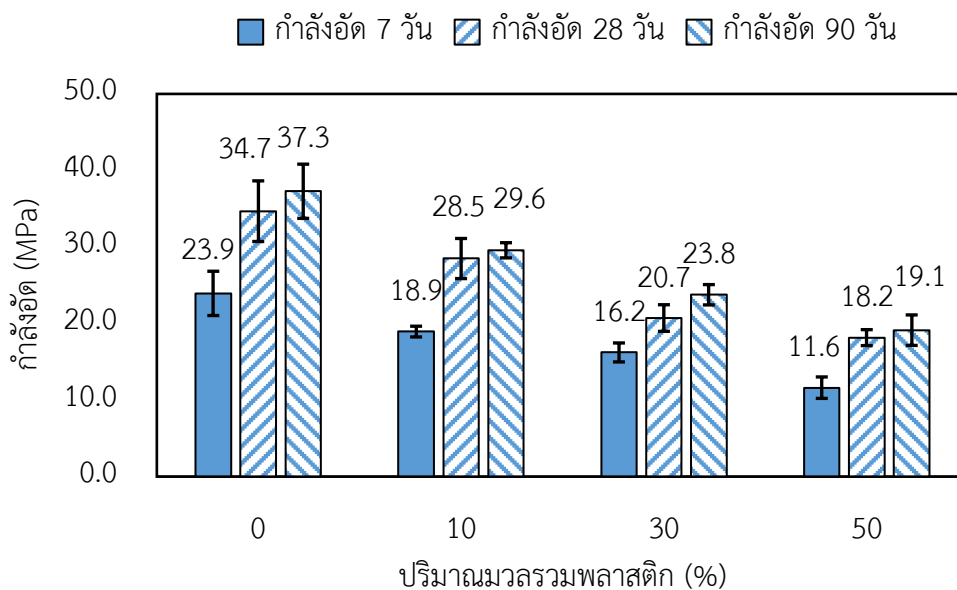


รูปที่ 31 หน่วยน้ำหนักของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4.2.4 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบผลกระทบของปริมาณการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกบดที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 (2018) ถูกแสดงในรูปที่ 32

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 32 พบว่า เมื่อมีการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกบดเข้าไป 0%, 10%, 30% และ 50% ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกบดที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมที่มีการแทนที่พลาสติกบดที่ 10% นั้นค่ากำลังจะต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่พลาสติกบดอยู่ประมาณ 20% ยกตัวอย่างที่อายุการบ่มที่ 90 วัน ค่ากำลังอัดเท่ากับ 29.6 MPa และเมื่อนำมาเทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 90 วัน ของตัวอย่างที่เป็นตัวควบคุมคือ 37.3 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังจะลดลงไป 20.64% ทั้งนี้สาเหตุที่ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงนั้นจะเป็นสาเหตุเดียวกันกับหัวข้อ 4.1.4 กำลังรับแรงอัดของพอร์ตแลนดซีเมนต์คอนกรีต

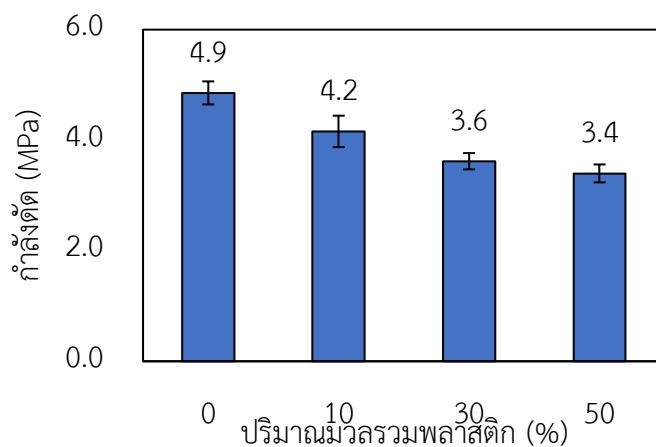


รูปที่ 32 กำลังรับแรงอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

4.2.5 กำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) และมีอายุบ่มตัวอย่างอยู่ที่ 28 วัน ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C78 (2002) จะถูกแสดงในรูปที่ 33

จากรูปที่ 33 นั้นแสดงถึงค่ากำลังรับแรงดัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วันจะเห็นว่าเมื่อมีการแทนที่หินด้วยขยะพลาสติกบดที่ 0%, 10%, 30% และ 50% นั้นจะได้ค่ากำลังรับแรงดัดอยู่ที่ 4.9, 4.2, 3.6 และ 3.4 MPa ตามลำดับ ซึ่งกำลังรับแรงดัดมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้น

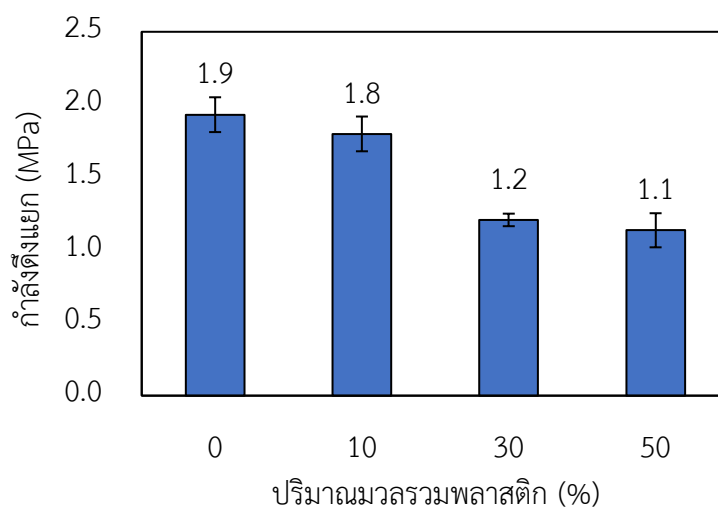


รูปที่ 33 กำลังรับแรงดึงของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

ทั้งนี้สาเหตุที่ กำลังรับแรงดึงของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากวัสดุประสานอย่างจีโอโพลีเมอร์นั้นยึดเกาะกับผิวของพลาสติกที่เป็นผิวมันและลื่นได้ไม่ดีนักจึงทำให้เกิดรอยต่อที่ไม่แข็งแรงระหว่างมวลรวมที่เป็นพลาสติกและเพสต์ขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงของกำลังรับแรงดึงของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

4.2.6 กำลังรับแรงดึงแยก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมในสถานะแห้งในอากาศ (AD) และมีอายุบ่มตัวอย่างอยู่ที่ 28 วัน ซึ่งได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 (2011) จะถูกแสดงในรูปที่ 34 จะเห็นได้ว่าการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่เพิ่มขึ้นจาก 0% ,10% ,30% และ 50% จะมีค่ากำลังรับแรงดึงอยู่ที่ 1.9, 1.8, 1.2 และ 1.1 MPa ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ กำลังรับแรงดึงแยกของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นตามที่แสดงในรูปที่ 34 นั้น อันเนื่องมาจากเหตุผลเดียวกันกับของหัวข้อ 4.2.5 กำลังรับแรงดึง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับเรื่องของผิวพลาสติกและการยึดเกาะระหว่างวัสดุประสานที่เป็นจีโอโพลีเมอร์



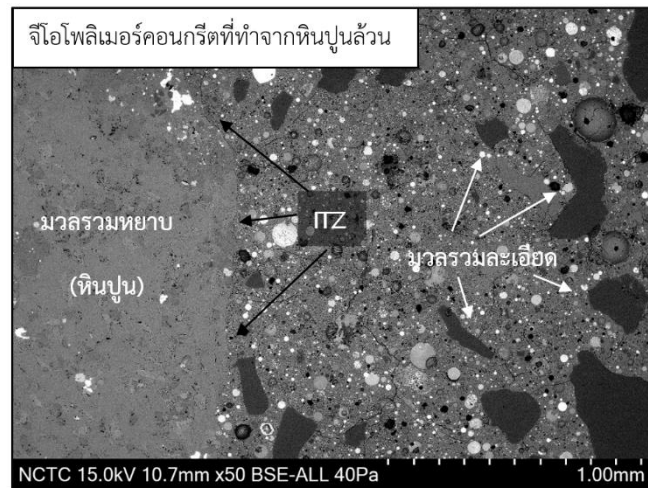
รูปที่ 34 กำลังดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

4.2.7 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ

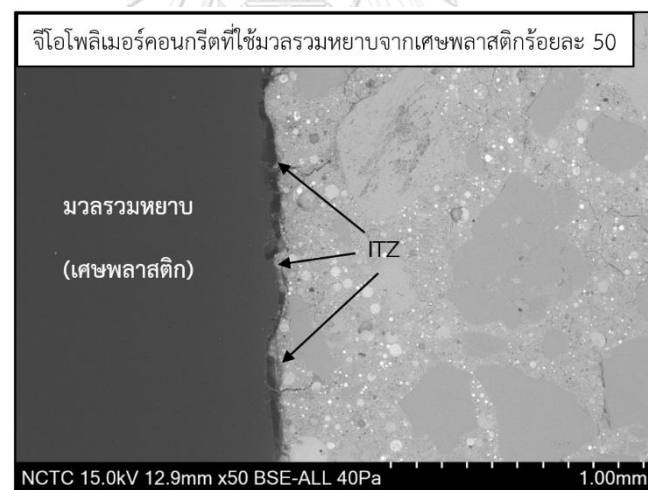
รูปที่ 35 แสดงรอยต่อระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ โดยรูปที่ 35(a) จะแสดง ITZ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และหินปูนซึ่งเก็บตัวอย่างจากส่วนผสม GPC-PP0 ในขณะที่รูปที่ 35(b) จะแสดง ITZ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และเม็ดพลาสติกที่ได้จากส่วนผสม GPC-PP50 จะเห็นว่าแนวรอยต่อของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับหินปูนแทบจะเป็นเนื้อเดียวกันบ่งบอกถึงแรงยึดเหนี่ยวที่ดีระหว่างวัสดุทั้งสอง แตกต่างจาก ITZ ในคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกที่มีรอยต่อที่กว้างและสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับที่พบในกรณีของส่วนผสม C-PP50 ที่ใช้วัสดุประสานจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ค่าความแข็ง Vickers ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้หินปูนล้วนและเศษพลาสติกเป็นมวลรวมหยาบแสดงในรูปที่ 36 ในตำแหน่งที่ห่างจากมวลรวมหยาบเป็นระยะ 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 200 μm ค่าความแข็ง Vickers มีค่าเท่ากับ 530, 566, 948, 933, 966, 971 และ 939 N/mm^2 ตามลำดับ สำหรับมวลรวมหยาบที่ได้จากหินปูน และมีค่าเท่ากับ 275, 298, 335, 909, 943, 1001 และ 998 N/mm^2 สำหรับมวลรวมหยาบที่ได้จากเม็ดพลาสติก จากผลการทดสอบสามารถประเมินได้ว่าความหนาของ ITZ ในบริเวณรอบหินปูนมีค่าอยู่ระหว่าง 20 – 40 μm โดยสังเกตจากค่าความแข็ง Vickers ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 566 N/mm^2 ที่ตำแหน่งห่างจากหินปูนเป็นระยะ 20 μm เป็น 948 N/mm^2 ที่ตำแหน่ง 40 μm และมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากนั้น ในขณะที่ความหนาของ ITZ ใน

บริเวณรอบเม็ดพลาสติกจะมีค่าประมาณ 40 – 60 μm และมีความแข็งแรงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ ITZ ในบริเวณหินปูน

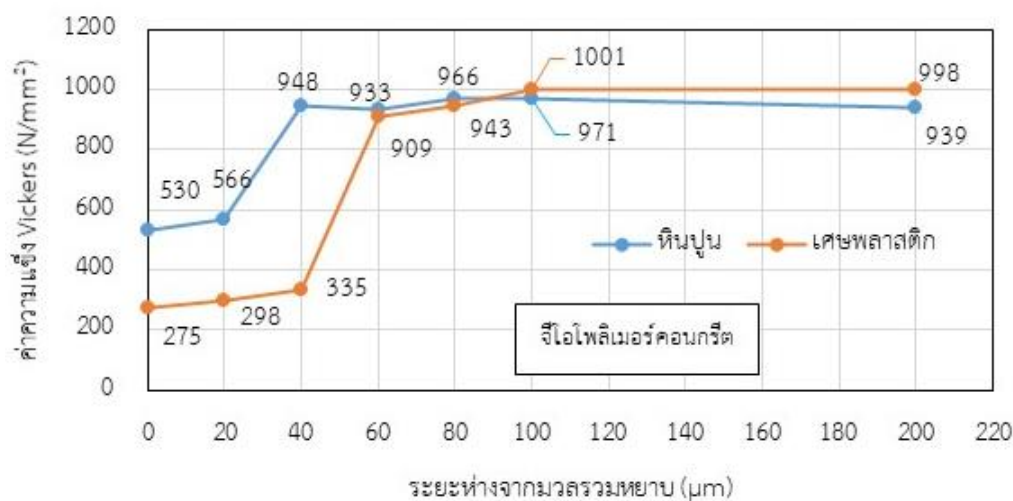


(a) ITZ ระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบจากหินปูน



(b) ITZ ระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบจากเศษพลาสติก

รูปที่ 35 ITZ ระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ

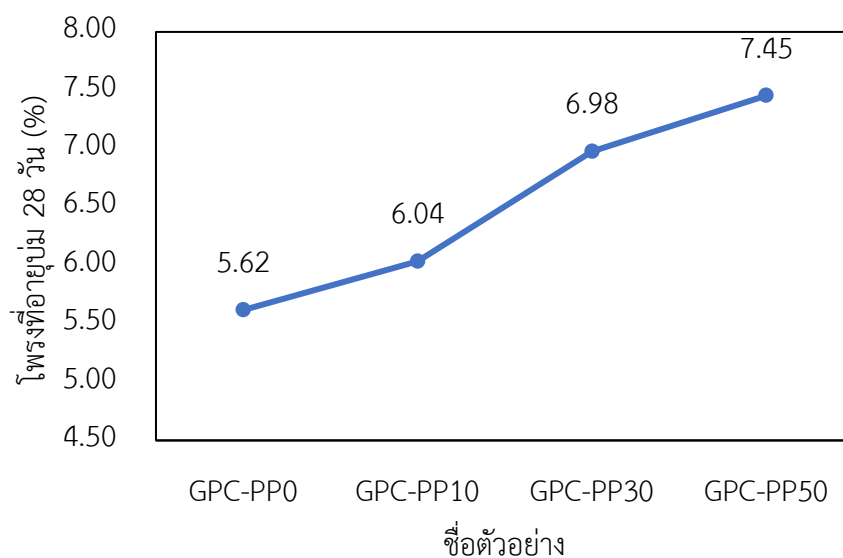


รูปที่ 36 ค่าความแข็ง Vickers ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

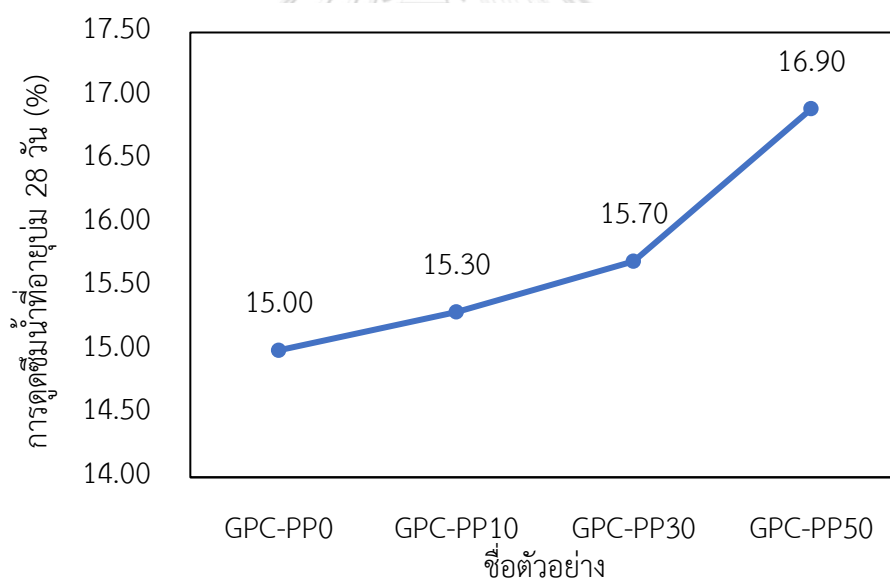
4.2.8 โพรงและการดูดซึมน้ำ

การทดสอบของโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน จะถูกแสดงในรูปที่ 37 และ 38 ตามลำดับ ซึ่งจะอิงตามมาตรฐาน ASTM C642 (2013) ซึ่งสังเกตจากรูปที่ 37 จะเห็นได้ว่าโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในตัวอย่างทดสอบ GPC-PP0, GPC-PP10, GPC-PP30 และ GPC-PP50 จะมีค่าร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเท่ากับ 5.62%, 6.04%, 6.98% และ 7.45% ตามลำดับ ซึ่งค่าร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างค่าร้อยละโพรงของ GPC-PP50 เทียบกับ GPC-PP0 จะมีค่าร้อยละโพรงต่างกันอยู่ 1.83%

ในส่วนของร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะถูกแสดงในรูปที่ 38 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในตัวอย่างทดสอบ GPC-PP0, GPC-PP10, GPC-PP30 และ GPC-PP50 จะมีค่าเท่ากับ 15.0%, 15.3%, 15.7% และ 16.9% ตามลำดับ ซึ่งค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโพรงด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเมื่อมีโพรงหรือช่องว่างจำนวนมากในตัวอย่างทดสอบซึ่งหลังจากนำไปแช่น้ำแล้วทำให้น้ำได้ซึมผ่านตัวอย่างเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านั้นแทน



รูปที่ 37 โพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน

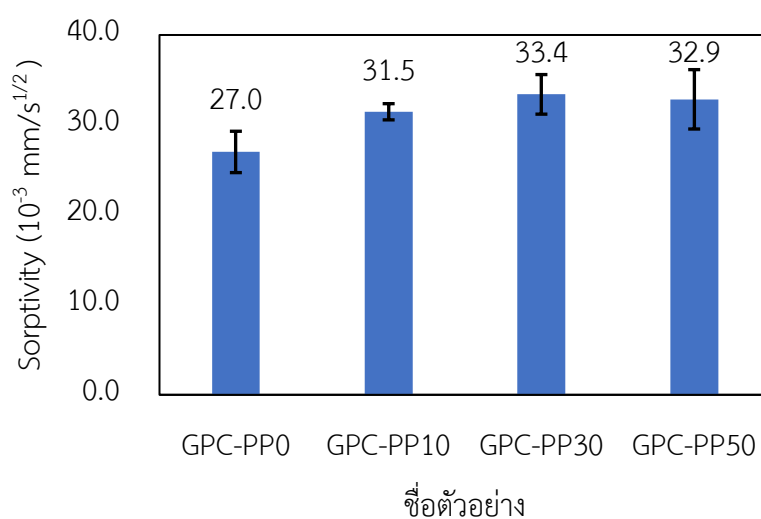


รูปที่ 38 การดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน

4.2.9 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุป่ม 28 วัน โดยที่ตัวอย่างจะเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 5 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1585 (2011) แสดงในรูปที่ 39 จะเห็นว่าอัตราการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใน

ตัวอย่าง GPC-PP0, GPC-PP10, GPC-PP30 และ GPC-PP50 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 27.0×10^{-3} , 31.5×10^{-3} , 33.4×10^{-3} และ 32.9×10^{-3} mm/s^{1/2} ตามลำดับ โดยที่ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลาสติกบดที่ถูกนำมาแทนที่หินในตัวอย่าง ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดมาจากเมื่อทำการนำพลาสติกบดมาแทนที่ในมวลรวมหยาบอย่างหินแล้วจึงทำให้เกิดโพรงและช่องว่างขึ้นในตัวอย่างที่นำมาทดสอบซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.8 โพรงและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตก็จะพบว่าเมื่อมีปริมาณโพรงมากอัตราการดูดซึมน้ำก็จะมีค่าที่มากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 39 อัตราการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

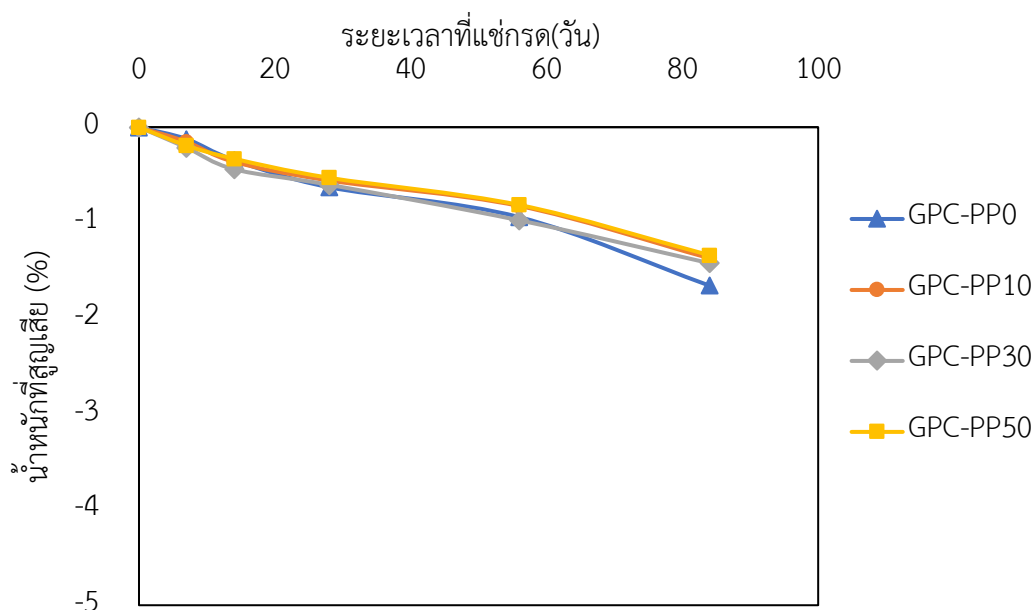
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.10 ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริก

ผลการทดสอบความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน แล้วนำตัวอย่างไปแช่ในกรดซัลฟิวริกเป็นระยะเวลา 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน ซึ่งจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C267 (2012) จะถูกแสดงดังรูปที่ 40 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ถูกแช่อยู่ในกรดซัลฟิวริกในช่วงเริ่มต้นแช่จนถึงระยะเวลา 7 วัน ตัวอย่าง GPC-PP0 จะมีร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่าง GPC-PP10, GPC-PP50 และ GPC-PP30 ตามลำดับ โดยที่ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียน้อยที่สุดของตัวอย่างมีค่าที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาจากผลทดสอบที่ตัวอย่างถูกแช่อยู่ในกรดซัลฟิวริกที่ 90 วัน จะพบว่าตัวอย่างที่มีร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียน้อยที่สุดคือ GPC-PP50 เมื่อเทียบกับตัวอย่าง GPC-PP10, GPC-PP30 และ GPC-PP0 ตามลำดับ โดยค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียน้อยที่สุดของตัวอย่างที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดทั้งสามตัวอย่างจะมี

ค่าที่ใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบด และเมื่อดูจากค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปแล้วนั้นถือว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

สาเหตุที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นมีความค่าร้อยละน้ำหนักที่สูญหายไปที่น้อยนั้นอันเนื่องมาจากวัสดุประสานอย่างจีโอโพลิเมอร์นั้นมีความทนทานต่อกรดได้ดีกว่าวัสดุประสานอย่างปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ซึ่งสามารถเทียบกับหัวข้อ 4.1.10 ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต



รูปที่ 40 น้ำหนักที่สูญเสียนไปเทียบกับเวลาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาวัสดุประเภทปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยการนำขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีนมาเข้าเครื่องบดและเอามาใส่แทนที่มวลรวมหยาบอย่างหินซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร และทดสอบความสามารถในการทำงานได้, เวลาการก่อตัว, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, กำลังรับแรงดึงแยก, โพรง, การดูดซึมน้ำ, อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต และความทนทานต่อการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1) ค่าการไหลแผ่ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณมวลรวมพลาสติกที่มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อแทนที่หินด้วยพลาสติกไม่เกิน 30%

2) การนำพลาสติกบดมาใช้เป็นมวลรวมหยาบส่งผลให้เวลาในการก่อตัวปลายของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ

3) เมื่อมีการแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยมวลรวมพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีนส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลง โดยหน่วยน้ำหนักลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มสูงขึ้น

4) ความสามารถในการรับกำลังอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นทั้งของอายุบ่ม 7 28 และ 90 วัน

5) การเพิ่มปริมาณมวลรวมพลาสติกไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดและกำลังดึงแยกของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงดัดและกำลังดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกลับมีค่าลดลงตามปริมาณมวลรวมพลาสติกที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปัญหาของการยึดเกาะระหว่างมวลรวมพลาสติกกับวัสดุประสานอย่างจีโอโพลิเมอร์

6) ร้อยละโพรงและร้อยละการดูดซึมน้ำของทั้งปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณพลาสติกที่ถูกแทนที่ในมวลรวมหยาบ

7) อัตราการดูดซึมน้ำของทั้งปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่มากขึ้นตามปริมาณพลาสติกที่ถูกแทนที่หิน

8) ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตนั้นเมื่อนำพลาสติกบดมาแทนที่หินในปริมาณที่มากขึ้นน้ำหนักที่สูญเสียไปนั้นจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางกลับกันตัวอย่างที่เป็นจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเมื่อมีการนำพลาสติกบดมาแทนที่หินจะทำให้ความสามารถในการทนกรดนั้นดีขึ้นเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้พบว่าการใช้พลาสติกบดชนิดโพลีโพรไพลีนมาแทนที่ในมวลรวมหายยที่เป็นหินนั้นสามารถทำได้ไม่ควรเกินร้อยละ 10 โดยปริมาตร ของทั้งในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต โดยที่ความสามารถในการรับแรงอัด กำลังดัด และกำลังดึงแยก อยู่ในเกณฑ์ที่ดีเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นพื้นคอนกรีตที่วางบนพื้นดิน เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหายจากเศษพลาสติกจะใกล้เคียงกับการใช้หินปูน อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาสมบัติด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การต้านทานต่อซัลเฟต และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม เป็นต้น

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ตารางที่ 14 ข้อมูลค่าการยุบตัวของส่วนผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ตัวอย่าง	ค่าการยุบตัว (cm.)
C-PP0	6.0
C-PP10	5.0
C-PP30	4.0
C-PP50	3.0

ตารางที่ 15 ข้อมูลระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ไม่ผสม PP

เวลา (min.)	พื้นที่หัวกด (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
87	1	30	30
111	0.5	34	68
137	0.25	26	104
175	0.1	36	360
191	0.05	35	700
212	0.025	34	1360

ตารางที่ 16 ข้อมูลติระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ผสม PP 10 %

เวลา (min.)	พื้นที่หั่วกด (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
82	1	46	46
122	0.5	56	112
149	0.25	22	88
177	0.1	40	400
197	0.05	22	440
220	0.025	24	960

ตารางที่ 17 ข้อมูลติระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ผสม PP 30 %

เวลา (min.)	พื้นที่หั่วกด (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
83	1	72	72
110	0.5	56	112
140	0.25	86	344
187	0.1	104	1040
217	0.05	40	800
228	0.025	70	2800

ตารางที่ 18 ข้อมูลติระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ผสม PP 50 %

เวลา (min.)	พื้นที่หั่วกด (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
81	1	48	48
115	0.5	40	80
159	0.25	100	400
180	0.1	118	1180
222	0.05	38	760
238	0.025	60	2400

ตารางที่ 19 ข้อมูลดิบหาหน่วยน้ำหนักของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ตัวอย่าง	ปริมาตร ทรงกระบอก (m ³)	น้ำหนัก เฉลี่ย (kg)
C-PP0	0.0016	3.819
C-PP10	0.0016	3.660
C-PP30	0.0016	3.410
C-PP50	0.0016	3.168

ตารางที่ 20 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	กำลังอัดที่ 7 วัน (MPa.)		
	1	2	3
C-PP0	24.31	25.20	27.78
C-PP10	25.06	16.53	18.84
C-PP30	18.56	17.09	16.88
C-PP50	19.42	16.53	16.31

ตารางที่ 21 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	กำลังอัดที่ 28 วัน (MPa.)		
	1	2	3
C-PP0	20.60	16.36	20.89
C-PP10	17.56	18.39	21.90
C-PP30	21.57	17.62	16.97
C-PP50	17.32	14.90	15.08

ตารางที่ 22 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 90 วัน

ตัวอย่าง	กำลังอัดที่ 90 วัน (MPa.)		
	1	2	3
C-PP0	36.66	32.43	32.48
C-PP10	32.61	24.84	34.24
C-PP30	21.40	17.55	22.35
C-PP50	18.75	17.33	17.65

ตารางที่ 23 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	b (mm.)	h (mm.)	L (mm.)	W (kg.)	L_u (mm.)	Density (kg/m ³)	Peak Load (kg.)	Avg. Peak Load (kg.)
C-PP0-1	100	100	500	12.25	300	2451.0	1100	1320.0
C-PP0-2	100	98	503	12.10	300	2455.7	1330	
C-PP0-3	100	100	505	12.04	300	2384.2	1530	
C-PP10-1	99	99	503	11.62	300	2358.1	1330	1386.7
C-PP10-2	99	99	500	11.64	300	2376.3	1360	
C-PP10-3	98	98	505	11.87	300	2448.4	1470	
C-PP30-1	100	100	505	10.93	300	2164.4	1190	1253.3
C-PP30-2	100	100	500	10.93	300	2187.0	1300	
C-PP30-3	100	100	500	10.90	300	2180.0	1270	
C-PP50-1	100	100	500	10.36	300	2072.0	1390	1386.7
C-PP50-2	100	100	505	10.13	300	2005.9	1420	
C-PP50-3	100	100	505	10.32	300	2043.6	1350	

ตารางที่ 24 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดึงแยกของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	แรงกระทำ (N.)	d (mm.)	L (mm.)	Splitting tensile Strength (MPa)
C-PP0-1	61700	100	200	1.96
C-PP0-2	53300	100	200	1.70
C-PP0-3	57700	100	200	1.84
C-PP10-1	57600	100	200	1.83
C-PP10-2	64100	100	200	2.04
C-PP10-3	53200	100	200	1.69
C-PP30-1	59900	100	200	1.91
C-PP30-2	69900	100	200	2.22
C-PP30-3	68100	100	200	2.17
C-PP50-1	68600	100	200	2.18
C-PP50-2	80700	100	200	2.57
C-PP50-3	67800	100	200	2.16

ตารางที่ 25 ข้อมูลดิบโพรงและการดูดซึมน้ำของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ตัวอย่าง	น้ำหนักปกติ (kg.)	น้ำหนักหลังอบ (kg.)	น้ำหนักหลังแช่น้ำ (kg.)	น้ำหนักซังในน้ำ (kg.)	น้ำหนักซังในอากาศ (kg.)
C-PP0-1	5.495	5.305	5.610	3.302	5.627
C-PP0-2	5.720	5.530	5.845	3.447	5.861
C-PP0-3	6.050	5.845	6.175	3.696	6.200
C-PP10-1	4.820	4.645	4.925	2.840	4.960
C-PP10-2	5.275	5.090	5.390	3.103	5.425
C-PP10-3	4.875	4.710	4.975	2.865	5.008
C-PP30-1	4.330	4.150	4.425	2.425	4.465
C-PP30-2	5.395	5.175	5.510	2.982	5.555
C-PP30-3	4.890	4.685	5.000	2.705	5.036
C-PP50-1	4.620	4.430	4.725	2.394	4.785
C-PP50-2	4.235	4.050	4.345	2.251	4.400
C-PP50-3	4.175	3.990	4.290	2.155	4.332

ตารางที่ 26 ข้อมูลดิบขนาดตัวอย่างที่ใช้หาอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ตัวอย่าง	หนา (mm.)	Diameter (mm.)			
		1	2	3	4
C-PP0-1	45	100	99	101	100
C-PP0-2	53	101	99	101	98
C-PP0-3	46.7	101	100	99	100
C-PP10-1	47	100	101	99.5	100
C-PP10-2	50	101	100.5	101	100
C-PP10-3	46.6	99.5	101	100.5	100
C-PP30-1	53	101	101	101.5	100.5
C-PP30-2	42.5	99.8	101.5	99.9	101.5
C-PP30-3	54.5	100	102	101.5	102
C-PP50-1	48.2	101.5	101	101.3	101
C-PP50-2	47.3	102	102.2	100.8	102
C-PP50-3	48	101	101.5	99.8	100.6

ตารางที่ 27 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตตั้งแต่ 0-30 นาที

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g.)					
	0 min	1 min	5 min	10 min	20 min	30 min
C-PP0-1	812.7	816.1	819.6	821.8	824.4	826.8
C-PP0-2	979.0	981.3	983.5	985.3	987.3	988.6
C-PP0-3	793.1	796.1	799.3	801.5	804.0	806.2
C-PP10-1	796.8	800.9	804.7	807.2	810.9	813.6
C-PP10-2	858.3	862.8	867.2	870.4	874.2	877.1
C-PP10-3	820.4	822.6	824.6	825.9	828.2	829.7
C-PP30-1	862.1	866.1	870.2	873.8	877.6	880.6
C-PP30-2	687.9	692.2	695.8	699.2	702.4	704.8

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g.)					
	0 min	1 min	5 min	10 min	20 min	30 min
C-PP30-3	894.1	897.4	900.8	903.9	906.7	908.6
C-PP50-1	748.3	752.2	755.9	759.0	762.2	764.1
C-PP50-2	736.9	741.2	744.9	747.5	750.1	751.8
C-PP50-3	719.7	723.1	726.6	729.7	732.8	734.9

ตารางที่ 28 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g.)					
	1 hr.	2 hr.	3 hr.	4 hr.	5 hr.	6 hr.
C-PP0-1	831.4	837.2	841.8	845.0	848.2	850.3
C-PP0-2	992.1	996.4	999.9	1002.6	1005.6	1007.6
C-PP0-3	810.5	816.3	820.6	824.1	827.9	830.4
C-PP10-1	819.1	825.8	830.7	834.2	837.5	839.5
C-PP10-2	882.7	889.6	894.6	898.6	902.3	904.7
C-PP10-3	833.0	838.6	842.5	846.2	849.6	852.1
C-PP30-1	885.6	892.0	895.3	898.3	900.9	903.4
C-PP30-2	709.5	714.8	717.8	720.6	722.8	724.9
C-PP30-3	912.5	916.8	919.5	922.1	923.8	925.8
C-PP50-1	768.2	773.7	776.5	779.4	781.5	783.2
C-PP50-2	755.2	760.3	763.1	765.7	767.5	769.3
C-PP50-3	738.7	743.4	746.1	748.9	750.8	752.7

ตารางที่ 29 ข้อมูลดิบความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของส่วนผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

ตัวอย่าง	น้ำหนัก ก่อนแช่ (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 7 วัน (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 14 วัน (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 28 วัน (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 56 วัน (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 84 วัน (kg.)
C-PP0-1	2.560	2.511	2.464	2.409	2.194	1.955
C-PP0-2	2.470	2.423	2.386	2.332	2.123	1.935
C-PP0-3	2.375	2.343	2.230	2.253	2.071	1.931
C-PP10-1	2.185	2.125	2.065	2.021	1.843	1.694
C-PP10-2	2.645	2.585	2.516	2.460	2.236	2.064
C-PP10-3	2.190	2.125	2.068	2.021	1.841	1.689
C-PP30-1	2.230	2.175	2.124	2.083	1.915	1.731
C-PP30-2	2.320	2.262	2.207	2.162	1.988	1.806
C-PP30-3	2.255	2.218	2.161	2.117	1.944	1.793
C-PP50-1	2.505	2.453	2.398	2.349	2.185	1.946
C-PP50-2	2.330	2.283	2.233	2.188	2.050	1.925
C-PP50-3	2.005	1.967	1.919	1.875	1.754	1.630

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 30 ข้อมูลค่าการไหลผ่านของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตัวอย่าง	ค่าการยุบตัว (cm.)
GPC-PP0	69.7
GPC-PP10	71.0
GPD-PP30	70.8
GPC-PP50	62.3

ตารางที่ 31 ข้อมูลดีเบรยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสม PP

เวลา (min.)	พื้นที่หัวกด (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
30	1	130	130
-	0.5	-	-
59	0.25	96	384
70	0.1	54	540
80	0.05	46	920
90	0.025	30	1200

ตารางที่ 32 ข้อมูลติบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม PP 10 %

เวลา (min.)	พื้นที่ห้วงก (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
-	1	-	-
36	0.5	128	256
56	0.25	132	528
76	0.1	110	1100
96	0.05	62	1240
111	0.025	44	1760

ตารางที่ 33 ข้อมูลติบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม PP 30 %

เวลา (min.)	พื้นที่ห้วงก (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
26	1	50	50
46	0.5	140	280
67	0.25	168	672
88	0.1	86	860
108	0.05	72	1440
128	0.025	48	1920

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 34 ข้อมูลติบระยะเวลาการก่อตัวของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม PP 50 %

เวลา (min.)	พื้นที่ห้วงก (ตร.นิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้านทาน (ปอนด์/ตร.นิ้ว)
32	1	158	158
-	0.5	-	-
54	0.25	158	632
69	0.1	116	1160
84	0.05	122	2440
101	0.025	68	2720

ตารางที่ 35 ข้อมูลดิบหาหน่วยน้ำหนักของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตัวอย่าง	ปริมาตร ทรงกระบอก (m ³)	น้ำหนัก เฉลี่ย (kg)
GPC-PP0	0.0016	3.795
GPC-PP10	0.0016	3.689
GPC-PP30	0.0016	3.414
GPC-PP50	0.0016	3.124

ตารางที่ 36 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	กำลังอัดที่ 7 วัน (MPa.)		
	1	2	3
GPC-PP0	21.48	26.39	14.20
GPC-PP10	20.66	18.18	17.99
GPC-PP30	16.23	11.66	16.21
GPC-PP50	6.52	11.22	12.02

ตารางที่ 37 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	กำลังอัดที่ 28 วัน (MPa.)		
	1	2	3
GPC-PP0	24.99	40.02	39.02
GPC-PP10	34.87	24.69	25.91
GPC-PP30	16.53	17.93	23.50
GPC-PP50	14.35	17.94	18.37

ตารางที่ 38 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 90 วัน

ตัวอย่าง	กำลังอัดที่ 90 วัน (MPa.)		
	1	2	3
GPC-PP0	41.41	35.05	32.58
GPC-PP10	31.53	29.83	27.35
GPC-PP30	20.51	25.20	25.57
GPC-PP50	13.47	21.81	16.45

ตารางที่ 39 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	b (mm.)	h (mm.)	L (mm.)	W (kg.)	L _u (mm.)	Density (kg/m ³)	Peak Load (kg.)	Avg. Peak Load (kg.)
GPC-PP0-1	100	100	360	8.65	300	2402.8	1650	1650.0
GPC-PP0-2	100	100	360	9.29	300	2579.2	1800	
GPC-PP0-3	100	100	360	8.89	300	2468.1	1500	
GPC-PP10-1	100	100	355	8.35	300	2352.1	1300	1413.3
GPC-PP10-2	100	100	350	8.17	300	2332.9	1650	
GPC-PP10-3	100	100	355	8.15	300	2294.4	1290	
GPC-PP30-1	100	100	355	8.12	300	2285.9	1350	1230.0
GPC-PP30-2	100	100	350	7.57	300	2161.4	1190	
GPC-PP30-3	100	100	350	7.64	300	2181.4	1150	
GPC-PP50-1	100	100	353	7.08	300	2004.2	1000	1103.3
GPC-PP50-2	100	100	355	7.38	300	2077.5	1080	
GPC-PP50-3	100	100	350	7.28	300	2067.1	1230	

ตารางที่ 40 ข้อมูลดิบกำลังรับแรงดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	แรงกระทำ (N.)	d (mm.)	L (mm.)	Splitting tensile Strength (MPa)
GPC-PP0-1	57200	100	200	1.82
GPC-PP0-2	48200	100	200	1.53
GPC-PP0-3	64100	100	200	2.04
GPC-PP10-1	42800	100	200	1.36
GPC-PP10-2	55600	100	200	1.77
GPC-PP10-3	57400	100	200	1.83
GPC-PP30-1	36800	100	200	1.17
GPC-PP30-2	35800	100	200	1.14
GPC-PP30-3	41200	100	200	1.31
GPC-PP50-1	48100	100	200	1.53
GPC-PP50-2	32600	100	200	1.04
GPC-PP50-3	38800	100	200	1.24

ตารางที่ 41 ข้อมูลดิบโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตัวอย่าง	น้ำหนักปกติ (kg.)	น้ำหนักหลังอบ (kg.)	น้ำหนักหลังแช่น้ำ (kg.)	น้ำหนักซังในน้ำ (kg.)	น้ำหนักซังในอากาศ (kg.)
GPC-PP0-1	3.560	3.375	3.570	2.112	3.600
GPC-PP0-2	4.365	4.145	4.375	2.583	4.420
GPC-PP0-3	3.715	3.530	3.725	2.207	3.760
GPC-PP10-1	3.615	3.420	3.625	2.091	3.660
GPC-PP10-2	2.990	2.825	3.000	1.729	3.025
GPC-PP10-3	3.030	2.870	3.040	1.752	3.070
GPC-PP30-1	3.775	3.560	3.810	2.052	3.840
GPC-PP30-2	2.595	2.450	2.615	1.405	2.635
GPC-PP30-3	3.555	3.345	3.585	1.922	3.610
GPC-PP50-1	2.615	2.450	2.645	1.307	2.690
GPC-PP50-2	2.870	2.705	2.900	1.523	2.945
GPC-PP50-3	3.025	2.850	3.055	1.541	3.110

ตารางที่ 42 ข้อมูลดิบขนาดตัวอย่างที่ใช้หาอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตัวอย่าง	หนา (mm.)	Diameter (mm.)			
		1	2	3	4
GPC-PP0-1	50.5	101.0	101.6	100.5	100.5
GPC-PP0-2	45.5	100.5	101.0	100.0	100.5
GPC-PP0-3	49	100.5	100.0	100.5	101.0
GPC-PP10-1	50	101.0	101.0	100.5	100.0
GPC-PP10-2	45.6	99.5	100.0	100.0	100.5
GPC-PP10-3	50.8	101.0	100.0	101.0	101.0
GPC-PP30-1	45	100.5	100.5	100.0	100.5
GPC-PP30-2	52	101.5	100.5	101.0	101.5
GPC-PP30-3	52.5	101.0	101.5	101.0	100.5
GPC-PP50-1	51	100.0	100.5	101.0	101.0
GPC-PP50-2	45	102.0	103.0	103.0	102.5
GPC-PP50-3	54	102.0	102.5	103.0	103.0

ตารางที่ 43 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตั้งแต่ 0-30 นาที

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g.)					
	0 min.	1 min.	5 min.	10 min.	20 min.	30 min.
GPC-PP0-1	916.1	920.6	925.8	930.2	934.6	938.6
GPC-PP0-2	825.2	832.0	839.3	844.7	850.1	853.3
GPC-PP0-3	874.2	879.3	886.0	891.4	897.2	901.0
GPC-PP10-1	870.3	877.1	884.5	890.0	896.6	901.2
GPC-PP10-2	755.5	760.7	769.1	775.3	782.1	786.9
GPC-PP10-3	872	878.3	886.2	891.8	898.4	903.0
GPC-PP30-1	730.2	735.4	742.2	747.1	753.3	757.5
GPC-PP30-2	820.4	826.8	834.5	839.4	846.3	850.6

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g.)					
	0 min.	1 min.	5 min.	10 min.	20 min.	30 min.
GPC-PP30-3	820.2	826.3	833.6	838.6	844.4	848.6
GPC-PP50-1	720.3	728.3	736.2	741.4	747.9	752.6
GPC-PP50-2	661.5	668.5	676.2	681.2	688.0	692.2
GPC-PP50-3	705.2	712.8	720.3	726.1	733.0	737.8

ตารางที่ 44 ข้อมูลดิบอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g.)					
	1 hr.	2 hr.	3 hr.	4 hr.	5 hr.	6 hr.
GPC-PP0-1	944.5	951.4	955.5	957.2	958.1	958.8
GPC-PP0-2	857.5	860.5	861.8	862.4	862.8	863.2
GPC-PP0-3	906.7	911.2	913.1	914.3	914.8	915.3
GPC-PP10-1	907.7	910.5	912.2	913.3	913.8	914.7
GPC-PP10-2	794.0	797.7	799.6	800.4	801.1	802.0
GPC-PP10-3	909.9	913.0	914.6	915.1	915.9	916.5
GPC-PP30-1	764.3	768.0	769.1	769.7	770.2	770.7
GPC-PP30-2	859.3	863.0	864.6	865.5	866.0	866.4
GPC-PP30-3	857.0	866.0	867.9	868.8	869.6	870.1
GPC-PP50-1	759.6	761.8	762.3	762.5	762.9	763.3
GPC-PP50-2	697.1	699.2	700.2	700.8	701.4	702.7
GPC-PP50-3	748.0	755.4	756.5	757.3	757.9	758.3

ตารางที่ 45 ข้อมูลดิบความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริกของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตัวอย่าง	น้ำหนัก ก่อนแช่ (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 7 วัน (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 14 วัน (kg.)	น้ำหนักหลัง แช่ 28 วัน (kg.)	นน.หลังแช่ 56 วัน (kg.)	นน.หลังแช่ 84 วัน (kg.)
GPC-PP0-1	2.795	2.791	2.785	2.776	2.769	2.748
GPC-PP0-2	2.435	2.435	2.432	2.428	2.415	2.397
GPC-PP0-3	2.430	2.428	2.422	2.416	2.404	2.388
GPC-PP10-1	2.330	2.328	2.323	2.319	2.312	2.297
GPC-PP10-2	2.430	2.424	2.420	2.415	2.410	2.399
GPC-PP10-3	2.395	2.392	2.386	2.381	2.374	2.361
GPC-PP30-1	2.340	2.335	2.331	2.327	2.316	2.308
GPC-PP30-2	2.385	2.374	2.372	2.368	2.363	2.348
GPC-PP30-3	2.225	2.215	2.214	2.213	2.200	2.195
GPC-PP50-1	2.085	2.081	2.079	2.075	2.063	2.054
GPC-PP50-2	2.310	2.309	2.304	2.298	2.295	2.281
GPC-PP50-3	2.040	2.036	2.031	2.028	2.025	2.014

ภาคผนวก ค.
รูปภาพประกอบงานวิจัย



รูปที่ 41 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 42 ทรายธรรมชาติ



รูปที่ 43 มวลรวมหยาบ



รูปที่ 44 ตัวอย่างส่วนผสมที่เป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ถูกผ่าแยกเพื่อดูการกระจายตัวของ
พลาสติก



รูปที่ 45 ตัวอย่างส่วนผสมที่เป็นจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ถูกทำการผ่าแยกเพื่อดูการกระจายตัวของพลาสติก



รูปที่ 46 เตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบแช่กรดซัลฟิวริก



รูปที่ 47 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงดัด



รูปที่ 48 ตัวอย่าง C-PP0 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน



รูปที่ 49 ตัวอย่าง C-PP50 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน



รูปที่ 50 ตัวอย่าง GPC-PP0 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน



รูปที่ 51 ตัวอย่าง GPC-PP50 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 7 วัน



รูปที่ 52 ตัวอย่าง C-PP0 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน



รูปที่ 53 ตัวอย่าง C-PP50 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน



รูปที่ 54 ตัวอย่าง GPC-PP0 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน



รูปที่ 55 ตัวอย่าง GPC-PP50 หลังแช่กรดซัลฟิวริกได้ 84 วัน



รูปที่ 56 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

บรรณานุกรม

- Akinyele, J. O., SALIM, R. W., & OYETI, G. (2014). Use Of Recycled Polypropylene Grains As Partial Replacement Of Fine Aggregate In Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures and Technologies*, 6(4), 184-190.
- Aleem, A., & Arumairaj, P. D. (2012). Geopolymer Concretea Review. *International journal of engineering sciences & emerging technologies*, 1(2), 118-122.
- ASTM-C33. (2008). Standard Specification for Concrete Aggregates. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C33)*.
- ASTM-C39. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens *American Society for Testing and Materials. (ASTM C39)*.
- ASTM-C78. (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). *american Society for Testing and Materials. (ASTM C78)*.
- ASTM-C127. (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. *american Society for Testing and Materials. (ASTM C127-88)*.
- ASTM-C128. (2015). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C128-15)*.
- ASTM-C131. (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine¹. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C131)*.
- ASTM-C136. (2001). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C136-06)*.
- ASTM-C267. (2012). Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C267)*.
- ASTM-C403. (2008). Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C403)*.

- ASTM-C496. (2011). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C496).*
- ASTM-C618. (2005). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C618).*
- ASTM-C642. (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C642).*
- ASTM-C1585. (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes. *American Society for Testing and Materials. (ASTM C1585-13).*
- ASTM-c1611. (2005). Standard Test Method for Slump Flow of Self Consolidating Concrete. *american Society for Testing and Materials. (ASTM C1611).*
- Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H., & Baradan, B. (2007). Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment* 42(2), 717-721.
- Brahim, S., Saidi, M., Aboutaleb, D., & Maallem, M. (2013). The use of Plastic Waste as Fine Aggregate in the Self-Compacting Mortars: Effect on Physical and Mechanical Properties. *Construction and Building Materials*, 43, 436-442.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., & Lachemi, M. (2009). Characteristics of Mortar and Concrete Containing Fine Aggregate Manufactured From Recycled Waste Polyethylene Terephthalate Bottles. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829-2835.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *In First international conference on alkaline cements and concretes*, 1, 131-149.
- Davidovits, J. (2015). False Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement/Concrete published in Scientific Papers. *Geopolymer Chemistry and Applications*, 4.
- Guo, X., Shi, H., & A.Dick, W. (2010). Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147.
- Jahidul, M., & Shahjalal, M. (2021). Effect of Polypropylene Plastic on Concrete Properties as a Partial

- Replacement of Stone and Brick Aggregate *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00627.
- Koshy, N., & Singh, D. N. (2016). Fly ash Zeolites for Water Treatment Applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 14601472.
- Lloyd, N. A., & Rangan, B. V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. *In Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 1493-1504.
- Nantachai, C., Juthamas, L., & Arun, L. (2020). Effect of Replacement of Fine Aggregate with HDPE Recycled Plastic Particles on Fresh Properties of Self-Compacting Concrete. *National Convention on Civil Engineering*, 25, MAT11.
- Neville. (2011). *Properties of concrete 5*. London: Longman.
- Palomo, M.W.Grutzeck, & M.T.Blanco. (1999). Alkali-Activated Fly ashes: a Cement for the Future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly ash Geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.
- Songpiriyakij, S., Pulngern, T., Pungpremrakul, P., & Jaturapitakkul, C. (2011). Anchorage of Steel Bars in Concrete by Geopolymer Paste. *Materials & Design*, 32(5), 3021-3028.
- Thiwakorn, S. (2013). Influence of Compaction on the Compressive Strength of Geopolymer Fly ash Sediment. (*Master of Engineering Thesis*). Civil Engineering School of Engineering Suranaree University of Technology, Thailand.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., & Wang, H. (2016). Fly ash-Based Geopolymer: Clean Production, Properties and Applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2018). รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย. ส่วนขยะมูลฝอยชุมชน กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 6-8.
- สถาบันพลาสติก. (2013). Life of Plastic In Focus Benefit Based On Creativity. *Plastics Foresight* 09-02, 21-23.
- อุบลลักษณ์. (2017). การพัฒนาวัสดุอิโพลิเมอร์. *TCA e-magazine*, 1.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายธิตี กางโหลน
วัน เดือน ปี เกิด	15 มิ.ย. 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย (กำลังศึกษาอยู่)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY