

ผลกระทบของปริมาตรแทนที่และสภาวะความชื้นของเศษหินแกรนิตต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์
ต๋าร์และคอนกรีต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of volume fraction and moisture condition of granite waste on properties of
geopolymer mortar and concrete



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 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของปริมาณแทนที่และสภาวะความชื้นของเศษหินแกรนิตต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต
โดย	น.ส.ปภัสรา วรวัฒน์นฤนาท
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.กิม เหนือองคลอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.กิม เหนือองคลอง)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ)

ปัทมา วรวัฒน์นฤนาท : ผลกระทบของปริมาตรแทนที่และสภาวะความชื้นของเศษหินแกรนิตต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต . (Effects of volume fraction and moisture condition of granite waste on properties of geopolymer mortar and concrete) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พิชชา จงงวิวัฒน์สกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.กิม เหนือทอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของมวลรวมละเอียดรีไซเคิลจากเศษแกรนิตต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ถูกผลิตโดยใช้มวลรวมรีไซเคิลจากเศษแกรนิตร้อยละ 0, 25 และ 50 สภาวะของความชื้นในมวลรวมละเอียดถูกควบคุมให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) แห้งในอากาศ (AD) และ อบแห้ง (OD) จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอนุภาคแกรนิตสามารถใช้เป็นมวลรวมละเอียดในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีตได้ ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่มีมวลรวมจากแกรนิตร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 42.9-51.4 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 88.1-121.1 ของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติ 100% นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการต้านทานต่อการกัดของมอร์ตาร์ที่ผสมมวลรวมรีไซเคิลเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงเมื่อใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะ SSD นอกจากนี้จากผลการทดสอบคอนกรีต พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 28 วันของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลจากหินแกรนิตมีค่าอยู่ในช่วง 25.3 ถึง 32.5 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน กำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมรีไซเคิลจากแกรนิตมีการพัฒนาอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) หรืออบแห้ง (OD) ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าไม่มีความแตกต่างที่เด่นชัดสำหรับการต้านทานการหลุดล่อนเมื่อถูกเผาไฟของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมมวลรวมรีไซเคิลจากหินแกรนิตในปริมาณที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตลดลงเมื่อความชื้นในมวลรวมมีเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกันกับในกรณีของมอร์ตาร์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070460121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Geopolymer, Moisture state, Recycled fine aggregate, Granite

Papassara Worawatnalunart : Effects of volume fraction and moisture condition of granite waste on properties of geopolymer mortar and concrete. Advisor: Asst. Prof. PITCHA JONGVIVATSAKUL Co-advisor: Peem Nuaklong, Ph.D.

This research aims to investigate the effect of recycled fine aggregates on properties of geopolymer mortar and concrete. Geopolymer mixtures were prepared with 0, 25, and 50% recycled granite aggregates. The moisture conditions of the fine aggregates were controlled at saturated surface dry (SSD), air dry (AD), and oven dry (OD). The results showed that the granite particle can be used as a fine aggregate in geopolymer mortar and concrete. The mortars containing 50% granite aggregates showed the 28-day compressive strength of 42.9-51.4 MPa, which is 88.1-121.1% of the mortars made with 100% natural river sand. There is no significant change in the acid resistance of the recycled aggregate mortar when compared to the control mixture. However, the setting time of geopolymer mortar is reduced by using SSD aggregate. Test results of concrete showed that the 28-day compressive strength of recycled aggregate concrete ranged between 25.3 and 32.5 MPa which were approximately the same as natural aggregate concrete. The development of flexural strength of recycled aggregate concrete was significant when AD or OD aggregate was used. There were no obvious differences for the fire-induced spalling resistance of the concrete containing different amounts of granite aggregate. However, the setting time of concrete decreases with increasing moisture content in aggregates as observed in the case of mortar

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณทางหุ้นส่วนจำกัด เทพศิลาอุตสาหกรรม ที่สนับสนุนวัสดุ (เศษหินแกรนิต) ที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, ดร.ภีม เหนือคลอง, นายอดิศร ชวนปี, นายกิตติ จันทรประสิทธิ์ ที่ให้เกียรติมาช่วยในการปฏิบัติงานวิจัยและให้คำปรึกษาในงานวิจัย และขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนมาโดยตลอด

ปภัสราร วรรณนันทนาท



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	4
2.1 ถ้ำลอย (Fly ash).....	4
2.2 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer).....	6
2.3 มวลรวมจากหินแกรนิต.....	9
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	14
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	14
3.2 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
3.3 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต.....	15
3.4 ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต.....	18
3.5 รายละเอียดการทดสอบ.....	18

บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	21
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	21
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	23
4.2.1 ความสามารถในการทำงานได้	23
4.2.2 เวลาการก่อตัว.....	25
4.2.3 กำลังรับแรงอัด	27
4.2.4 กำลังรับแรงดัด	30
4.2.5 โพรงและการดูดซึมน้ำ.....	32
4.2.6 ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก	33
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	37
4.3.1 ความสามารถในการทำงานได้	37
4.3.2 เวลาการก่อตัว.....	38
4.3.3 กำลังรับแรงอัด	40
4.3.4 กำลังรับแรงดัด	42
4.3.5 โพรงและการดูดซึมน้ำ.....	44
4.3.6 ความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้.....	46
4.3.6.1 ความเสียหายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ	47
4.3.6.2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ.....	51
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการทดสอบ	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัสดุ.....	58
ก.1 สมบัติของมวลรวม.....	58
ก.2 สมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน	62

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	63
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์คอนกรีต	76
ภาคผนวก ง รูปภาพประกอบงานวิจัย	92
บรรณานุกรม.....	96
บรรณานุกรม.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	102



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (g).....	16
ตารางที่ 3 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ สำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (kg/m^3).....	17
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ.....	20
ตารางที่ 5 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ทดสอบ.....	20
ตารางที่ 6 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม.....	21
ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสาน.....	23
ตารางที่ 8 โพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	33
ตารางที่ 9 โพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	45
ตารางที่ 10 น้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที.....	51
ตารางที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที.....	52
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติแบบกระทุ้งแน่นแห้ง	58
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ	58
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ.....	59
ตารางที่ 15 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเศษแกรนิตแบบกระทุ้งแน่นแห้ง	59
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะของเศษแกรนิต	60
ตารางที่ 17 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษแกรนิต.....	60
ตารางที่ 18 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของส่วนผสม 25GW (ทรายธรรมชาติ 75%+ เศษแกรนิต 25%).....	61
ตารางที่ 19 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของส่วนผสม 50GW (ทรายธรรมชาติ 50%+ เศษแกรนิต 50%).....	62
ตารางที่ 20 ความถ่วงจำเพาะเ้าลอย.....	62

ตารางที่ 21	ข้อมูลดิบของการทดสอบหาค่าการไหลแผ่.....	63
ตารางที่ 22	ข้อมูลดิบของการทดสอบเวลาการก่อตัว.....	63
ตารางที่ 23	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 วัน..	66
ตารางที่ 24	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 14 วัน	67
ตารางที่ 25	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน	68
ตารางที่ 26	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 90 วัน	69
ตารางที่ 27	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงตัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 วัน..	71
ตารางที่ 28	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงตัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 14 วัน	72
ตารางที่ 29	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงตัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน	73
ตารางที่ 30	ข้อมูลดิบของการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำ	74
ตารางที่ 31	ข้อมูลดิบของการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก	75
ตารางที่ 32	ข้อมูลดิบของการทดสอบหาค่าการไหลแผ่.....	76
ตารางที่ 33	ข้อมูลดิบของการทดสอบเวลาการก่อตัว.....	76
ตารางที่ 34	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน.	79
ตารางที่ 35	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน	80
ตารางที่ 36	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 90 วัน	82
ตารางที่ 37	ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงตัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน	83
ตารางที่ 38	ข้อมูลดิบของการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำ	85
ตารางที่ 39	ข้อมูลดิบของการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 30 นาที	86
ตารางที่ 40	ข้อมูลดิบของการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 60 นาที	88

ตารางที่ 41 ข้อมูลดิบของการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 90 นาที 89

ตารางที่ 42 ข้อมูลดิบการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 30 นาที 90

ตารางที่ 43 ข้อมูลดิบการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 60 นาที 91



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 กระบวนการทำงานของโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ [9]	4
รูปที่ 2 ปริมาณเถ้าลอยในช่วงปี ค.ศ. 2002 ถึง 2015 ของประเทศจีน [12]	5
รูปที่ 3 ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอย [8].....	6
รูปที่ 4 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์ [16]	8
รูปที่ 5 อนุภาคของหินฝุ่นแกรนิต [24].....	10
รูปที่ 6 สภาวะความชื้นของมวลรวม.....	12
รูปที่ 7 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [46].....	22
รูปที่ 8 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	24
รูปที่ 9 เวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	26
รูปที่ 10 เวลาที่ตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	26
รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD).....	27
รูปที่ 12 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD)	28
รูปที่ 13 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะอบแห้ง (OD).....	29
รูปที่ 14 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD).....	30
รูปที่ 15 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD)	31
รูปที่ 16 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะอบแห้ง (OD).....	31
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ของ เศษหินแกรนิตของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	32
รูปที่ 18 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกักกรองของกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ มวลรวมในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD).....	34
รูปที่ 19 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกักกรองของกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD)	35

รูปที่ 20 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกีดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ มวลรวมในสภาวะอบแห้ง (OD).....	35
รูปที่ 21 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ก่อนการแช่กรดซัลฟิวริก.....	36
รูปที่ 22 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผ่านการแช่กรดซัลฟิวริก 84 วัน.....	36
รูปที่ 23 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	37
รูปที่ 24 เวลาก่อตัวต้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	39
รูปที่ 25 เวลาก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	39
รูปที่ 26 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน.....	40
รูปที่ 27 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน.....	41
รูปที่ 28 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 90 วัน.....	42
รูปที่ 29 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน.....	43
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ของ เศษหินแกรนิตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	43
รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	45
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	46
รูปที่ 33 อุณหภูมิไฟมาตรฐาน ISO 834 [37].....	47
รูปที่ 34 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 0, 30, 60 และ 90 นาที.....	48
รูปที่ 35 ผิวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 0, 30, 60 และ 90 นาที.....	48
รูปที่ 36 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 90 นาที.....	50
รูปที่ 37 กำลังรับแรงอัดคงค้างของก้อนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 30 นาที.....	52
รูปที่ 38 กำลังรับแรงอัดคงค้างของก้อนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 60 นาที.....	53
รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดคงค้างหลังเผาไฟ 30 นาทีและร้อยละโพรงของจีโอโพลิ เมอร์คอนกรีต.....	54
รูปที่ 40 ทฤษฎีธรรมชาติ (ทรายแม่น้ำ).....	92
รูปที่ 41 เศษแกรนิต.....	92

รูปที่ 42	เก้าอี้	92
รูปที่ 43	การทดสอบเวลาการก่อตัวจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	93
รูปที่ 44	การทดสอบกำลังรับแรงดัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	93
รูปที่ 45	การทดสอบเวลาการก่อตัวจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	94
รูปที่ 46	การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	94
รูปที่ 47	จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังทำการทดสอบเผาไฟที่ 90 นาที	95



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วในประเทศที่กำลังพัฒนา ความต้องการในการใช้คอนกรีตมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความทนทาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและสามารถจัดหาได้ง่าย ในประเทศอินเดียพบว่าคอนกรีตนั้นเป็นวัสดุที่ใช้มากเป็นอันดับ 2 รองจากน้ำ โดยอุตสาหกรรมการก่อสร้างของอินเดียมีการใช้คอนกรีตถึง 450 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี [1] ทำให้วัสดุที่ใช้สำหรับการผสมคอนกรีตซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ หิน และทรายมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน แต่กระบวนการผลิตซีเมนต์นั้นก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากปูนซีเมนต์นั้นได้มาจากกระบวนการเผาวัตถุดิบที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ร่วมกับวัสดุที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เช่น หินปูน, หินดินดาน และดินเหนียว ฯลฯ โดยจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส จากนั้นจะถูกนำมาบดให้ละเอียด [2] ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นี้จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศโดยคิดเป็นร้อยละ 6 ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์สร้างขึ้น [3] ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อนจึงได้มีการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ [4] การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงมาทำปฏิกิริยากับวัสดุพอลิไซลอลานที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก วัสดุพอลิไซลอลานเหล่านี้เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นวัสดุเหลือใช้ จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุพอลิไซลอลานที่ใช้กันทั่วไป เช่น ถ้ำลอย ดินขาวเผา และตะกรันจากเตาถลุง เป็นต้น ซึ่งจีโอโพลิเมอร์นั้นสามารถรับกำลังได้ดี มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีความทนทานเช่นเดียวกับกับการใช้ปูนซีเมนต์ทั่วไป [5]

นอกจากนี้ความต้องการของคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้มวลรวมธรรมชาติลดปริมาณลงไปอย่างรวดเร็วเช่นกัน ซึ่งตรงกันข้ามกับภาคอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดขยะมากขึ้นไม่ว่าจะเป็น ยางรถยนต์ ตะกรัน ทรายหล่อ เศษหินแกรนิต เศษหินอ่อน หรือเศษคอนกรีต ฯลฯ ขยะอุตสาหกรรมเหล่านี้ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมและค่าใช้จ่ายการขนย้ายของเสียเหล่านี้ไปยังแหล่งกำจัดค่อนข้างที่จะสูง จึงได้มีการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ในการผลิตคอนกรีตเพื่อลดของ

เสียที่เกิดขึ้น ของเสียที่ถูกนำมาใช้เหล่านี้ส่งผลให้เกิดประโยชน์ต่องานคอนกรีตคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านของการลดการใช้มวลรวมธรรมชาติซึ่งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

เศษหินแกรนิตเป็นวัสดุที่ได้จากอุตสาหกรรมโรงโม่หิน เป็นเศษวัสดุที่หลงเหลือจากการผลิต ถูกนำมาเป็นส่วนผสมของหินคลุกสำหรับรองพื้นงานถนน หรือเป็นส่วนผสมในการทำอิฐบล็อก โดยส่วนใหญ่ไม่ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากนักและยังเป็นภาระแก่ผู้ประกอบการที่ต้องนำไปกำจัดทิ้ง [6] ในหลายประเทศ เช่น อินเดีย และตุรกี ซึ่งมีพื้นที่อยู่อาศัยและพื้นที่ทางการเกษตรส่วนใหญ่ ตั้งอยู่บนหลุมฝังกลบของเศษหินแกรนิต [1, 7] การนำเศษหินแกรนิตกลับมาใช้นอกจากจะสามารถทดแทนทรายธรรมชาติที่มีน้อยลงไปทุกทีได้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่ผู้ผลิตได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการผลิตวัสดุ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีตโดยใช้เศษหินแกรนิตที่หลงเหลือจากการโม่หินเป็นมวลรวม ละเอียด พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นในมวลรวมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นในมวลรวมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้ถ้ำลอกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

1.3.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์

1.3.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีองค์ประกอบของ Na_2O , H_2O และ SiO_2 เท่ากับ 14.5%, 55.3% และ 30.0% ตามลำดับ

1.3.4 ใช้อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก

1.3.5 ใช้อัตราส่วนสารละลายต่าง ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) ต่อถ้ำลอบสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 0.7 โดยน้ำหนัก

- 1.3.6 ใช้อัตราส่วนสารละลายต่าง ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) ต่อแก้วลอยสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเท่ากับ 0.6 โดยน้ำหนัก
- 1.3.7 ใช้มวลรวมละเอียด 2 ชนิดคือ ททรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิต
- 1.3.8 ใช้อัตราส่วนวัสดุประสาน (แก้วลอย) ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก
- 1.3.9 ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีต
- 1.3.10 ศึกษาคุณสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยศึกษา
- ความสามารถในการทำงานได้ (Flow table)
 - เวลาการก่อตัว
 - กำลังอัด ที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน
 - กำลังดัด ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน
 - โพรงและการดูดซึมน้ำ ที่อายุ 28 วัน
 - ความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก
- 1.3.11 ศึกษาคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยศึกษา
- ความสามารถในการทำงานได้ (Slump flow)
 - เวลาการก่อตัว
 - กำลังอัด ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน
 - กำลังดัด ที่อายุ 28 วัน
 - โพรงและการดูดซึมน้ำ ที่อายุ 28 วัน
 - ความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ ที่อายุ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถใช้วัสดุรีไซเคิลเป็นมวลรวมละเอียดในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต
- 1.4.2 สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 1.4.3 สามารถหาสภาวะความชื้นของมวลรวมที่เหมาะสมซึ่งให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีตมีสมบัติทางกลและความทนทานที่ดีที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 เถ้าลอย (Fly ash)

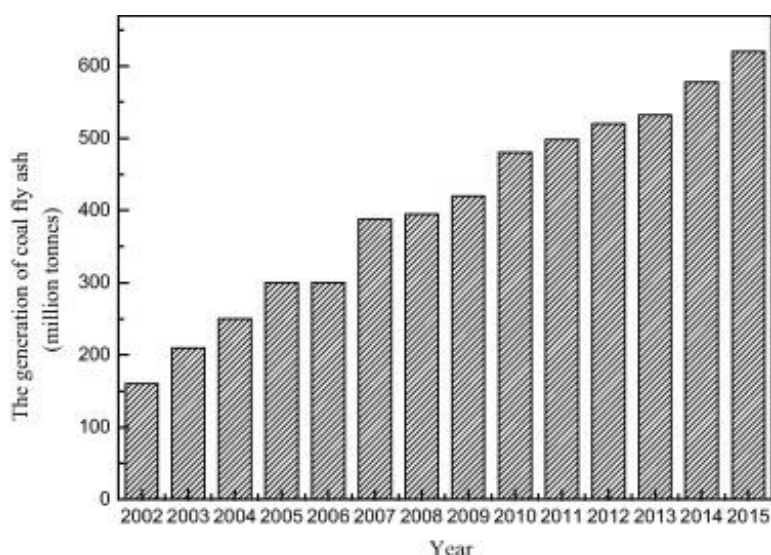
เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน (รูปที่ 1) เริ่มจากการนำถ่านหินที่บดละเอียดมาเผาเพื่อให้พลังงานความร้อนแก่หม้อไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า อนุภาคของเถ้าถ่านหินที่หลงเหลือจากการเผาไหม้สามารถแบ่งได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่หลอมติดกันเป็นก้อนใหญ่ และตกลงสู่ก้นเตาเรียกว่า เถ้าตะกรัน หรือ เถ้าหนัก หรือ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนที่สองเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ถึง 150 ไมครอน เถ้าถ่านหินขนาดเล็กนี้จะถูกพัดลอยตามก๊าซร้อนและจะถูกดักจับโดยเครื่องดักจับเถ้าลอยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) แล้วนำไปเก็บรวบรวมไว้ในไซโลเพื่อไม่ให้เกิดมลภาวะทางอากาศ [8]



รูปที่ 1 กระบวนการทำงานของโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ [9]

ปริมาณเถ้าลอยจากทั่วโลกมีมากถึงหลายร้อยล้านตันต่อปี ยกตัวอย่างเช่นในประเทศไทยมีปริมาณเถ้าลอยจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินถึง 2.16 ล้านตันต่อปี [8] ประเทศตุรกีมีถึง 1.5 ล้านตันต่อปี [10] ประเทศบราซิล 3 ล้านตันต่อปี และในประเทศอินเดียมีเถ้าลอยถึง 131 ล้านตันต่อปี [11] ซึ่งปริมาณเถ้าลอยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงปริมาณเถ้าลอยในช่วงปี ค.ศ. 2002 ถึง 2015 ของประเทศจีนที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [12] แนวโน้ม

ของปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มมากขึ้นเกิดจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ และจำนวนประชากร ทำให้เกิดความต้องการในการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ถ่านหินถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำจึงทำให้ยังคงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ให้ความร้อนในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า

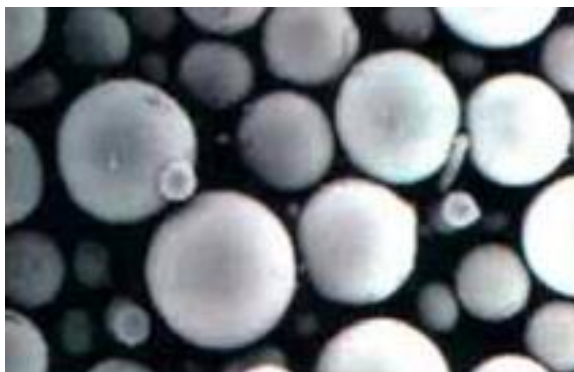


รูปที่ 2 ปริมาณเถ้าลอยในช่วงปี ค.ศ. 2002 ถึง 2015 ของประเทศจีน [12]

ในอดีตเถ้าลอยถือได้ว่าเป็นของเสียไร้ประโยชน์ซึ่งมีปริมาณมากและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี เถ้าลอยเหล่านี้หากไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกวิธีจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมากทั้งมลภาวะทางอากาศและคุณภาพน้ำใต้ดิน [13] กระบวนการจัดการที่ยุ่ยากและซับซ้อนนี้ นอกจากจะไม่ทำให้เกิดประโยชน์แล้วยังเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้มีการคิดค้นนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาในกระบวนการจัดการและสร้างประโยชน์ให้แก่เถ้าลอยที่เหลือใช้เหล่านี้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าเถ้าลอยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้มากมาย ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Koshy และ Singh ได้มีการสังเคราะห์สารซีโอไลต์จากเถ้าลอยมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งพบว่าสารซีโอไลต์ที่ได้จากเถ้าลอยมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยสามารถกำจัดสารพิษและโลหะหนักได้ [14] นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุพอลิซิลานที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ [15] คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะมีคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตดีขึ้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ทั้งในเรื่องของความทนทานต่อการกัดกร่อน เพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความสามารถในเทเข้าแบบได้ เนื่องจากอนุภาค

ของเถ้าลอยเป็นทรงกลมดังรูปที่ 3 จึงทำให้คอนกรีตสามารถไหลไปยังจุดต่าง ๆ ของแบบหล่อได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ล้วน [8]



รูปที่ 3 ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอย [8]

ในปัจจุบันเถ้าลอยได้ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) โดยเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักจะถูกทำให้แตกตัวโดยสารละลายที่เป็นด่างสูงแล้วถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนทำให้เกิดการแข็งตัว [16] สามารถใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีตซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [17]

2.2 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

ปูนซีเมนต์ได้มาจากกระบวนการเผาวัตถุดิบที่มีซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) ร่วมกับวัสดุที่มีแคลเซียมออกไซด์ (Ca) เช่น หินปูน, หินดินดาน และดินเหนียว ฯลฯ กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เริ่มจากการระเบิดภูเขาหินปูน จากนั้นก้อนหินขนาดใหญ่ที่ได้จากการระเบิดภูเขาหินปูนจะถูกย่อยให้เล็กลงและถูกลำเลียงมายังเตาเผาโดยจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส [2] กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในแต่ละขั้นตอนนั้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นปัญหาฝุ่นควันที่เกิดจากการระเบิดภูเขาหินปูน หรือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเผาหินปูนซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน จากการสำรวจพบว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศโดยคิดเป็นร้อยละ 6 ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์สร้างขึ้น [3] ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อนจึงได้มีการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ [4] การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงมาทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก วัสดุปอซโซลานเหล่านี้เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นวัสดุเหลือใช้ โดยวัสดุปอซโซลานที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ เถ้าลอย ดินขาวเผา และตะกรันจากเตาถลุง เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์กับอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเกิดเถ้าลอยพบว่าในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะส่งผลให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ตันซึ่งมีปริมาณมากกว่าในกระบวนการเกิดเถ้าลอยถึง 9 เท่า [16] ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีความแตกต่างกับลักษณะการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างสิ้นเชิง เนื่องจากองค์ประกอบของวัสดุหลักและการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างหลักของจีโอโพลิเมอร์เกิดจาก ซิลิกเกต (Si), อลูมินต (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ขึ้นโดยมีสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเป็นตัวกระตุ้นและมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นกับอัตราส่วนของ Si : Al ของสารตั้งต้น โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เป็นสายโซ่โพลิไซอะเลต (Si-O-Al-O) ดังสมการ 2.1 และ มีลักษณะการยึดเหนี่ยวกัน ดังรูปที่ 4



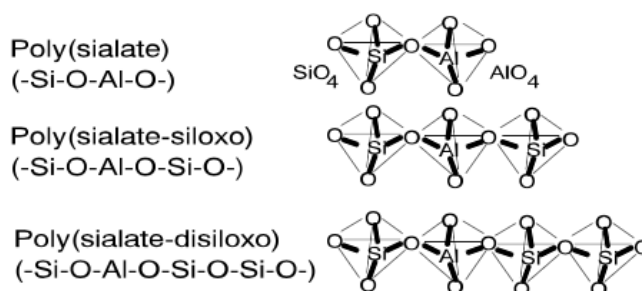
โดย M เป็น ธาตุอัลคาไลน์

- เป็น การยึดเกาะ (bond)

Z เป็น จำนวนโมเลกุลของ Si - O₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

n เป็น จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่

w เป็น จำนวนโมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 4 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์ [16]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าจีโอโพลิเมอร์สามารถก่อตัวได้ในอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก ทนความร้อนสูง มีความสามารถในการตรึงของเสียที่มีพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และให้กำลังอัดได้สูงในระยะเวลาอันสั้น โดยพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึง 1.5 เท่าในอัตราส่วนผสมเดียวกัน [18]

สารจีโอโพลิเมอร์นอกจากจะสามารถนำมาเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานคอนกรีตได้แล้วยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับงานอีกหลากหลายรูปแบบยกตัวอย่างเช่น การนำจีโอโพลิเมอร์มาใช้งานซ่อมแซม จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่ก่อตัวอย่างรวดเร็วและให้กำลังอัดสูงในระยะเวลาอันสั้นจึงสามารถนำมาใช้ในงานซ่อมแซมได้ดี [19] ซึ่งในประเทศญี่ปุ่น ออสเตรเลีย สหรัฐอเมริกา และอีกหลายๆ ประเทศในทวีปยุโรปได้มีการวิจัยและพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ในเชิงอุตสาหกรรมมาเป็นระยะเวลายาวนาน [20]

Sarker, Kelly และ Yao [21] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเผาไฟต่อการแตกร้าว, การหลุดล่อนและความแข็งแรงคงค้างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถในการทนไฟสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต โดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1000 องศาเซลเซียสพบว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตเกิดการหลุดล่อนอย่างมาก ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไม่มีการหลุดล่อนเกิดขึ้น ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

Abdulkareem et al. [22] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงขึ้นต่อพฤติกรรมทางความร้อนและคุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เฟส, มอร์ตาร์และคอนกรีตมวลเบา จากการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 600 – 800 องศาเซลเซียส บริเวณที่เกิดพันธะจะเกิดการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการคายน้ำ

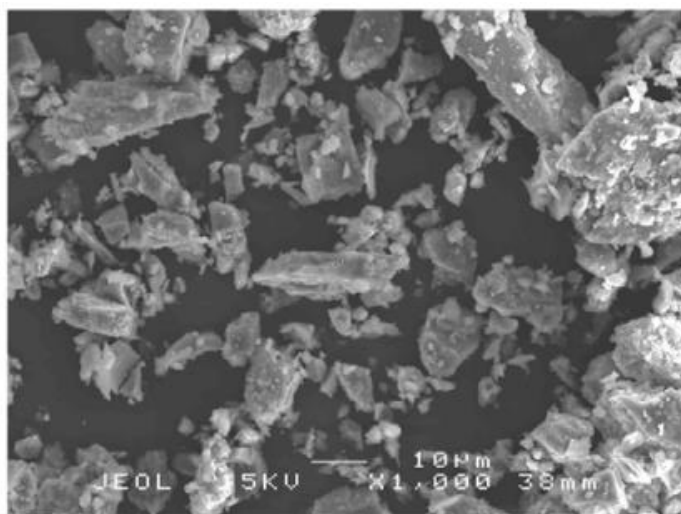
ของโครงสร้างและเกิดการบวมของแก้วลอยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาตลอดจนรอยร้าวเล็ก ๆ เป็นผลมาจากการขยายตัวของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างจีโอโพลีเมอร์เพสต์และมวลรวม

2.3 มวลรวมจากหินแกรนิต

ความต้องการในการใช้คอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันส่งผลให้มวลรวมธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุสำหรับผสมคอนกรีตลดปริมาณลงไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งตรงความกับอุตสาหกรรมที่มีการเจริญเติบโตมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดขยะมากขึ้นไม่ว่าจะเป็น ยางรถยนต์ ตะกรัน ทราaylor หล่อ เศษหินแกรนิต เศษหินอ่อน หรือเศษคอนกรีต ฯลฯ ขยะอุตสาหกรรมเหล่านี้ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมและค่าใช้จ่ายการขนย้ายของเสียเหล่านี้ไปยังแหล่งกำจัดค่อนข้างที่จะสูง จึงได้มีการนำวัสดุเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในการผลิตคอนกรีตเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้น

เศษหินแกรนิตหรือหินฝุ่นแกรนิต เป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมโรงโม่หิน เป็นเศษวัสดุที่หลงเหลือจากกระบวนการผลิต โดยทั่วไปจะถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของหินคลุกสำหรับรองพื้นงานถนน หรือเป็นส่วนผสมในการทำอิฐบล็อก ซึ่งไม่ได้ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากนักและยังเป็นภาระแก่ผู้ประกอบการที่ต้องนำไปกำจัดทิ้ง [6] ในหลาย ๆ ประเทศ เช่น อินเดีย และตุรกี มีพื้นที่อยู่อาศัยและพื้นที่ทางการเกษตรส่วนใหญ่ตั้งอยู่บนหลุมฝังกลบของเศษหินแกรนิต [1, 7] ด้วยข้อจำกัดของพื้นที่ฝังกลบและค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ พยายามหาวิธีในการนำขยะเหล่านี้กลับมาใช้ซ้ำ

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะอนุภาคของหินฝุ่นแกรนิตซึ่งมีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนและเป็นผลึก ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคหินฝุ่นแกรนิตมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งที่มาซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.36 – 2.72 อนุภาคของหินฝุ่นแกรนิตมีขนาดใกล้เคียงกับทรายจากธรรมชาติจึงทำให้หินฝุ่นแกรนิตสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตได้ดี [23]



รูปที่ 5 อนุภาคของหินฝุ่นแกรนิต [24]

Vijayalakshmi, Sekar และ Ganesh[25] ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตที่ผลิตจากขยะอุตสาหกรรมแกรนิต โดยใช้หินฝุ่นแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ 0%, 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% ในส่วนผสมคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าสามารถแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยหินฝุ่นแกรนิตได้ถึง 15% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและทนทานของคอนกรีต

Singh et al. [26] ได้ศึกษาประโยชน์จากเศษวัสดุที่ได้การจากตัดแต่งหินแกรนิตโดยนำมาใช้แทนที่ทรายในส่วนผสมของคอนกรีต จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิต 40% และการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิต 70% มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติ 100% นอกจากนี้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การแทนที่ของเศษแกรนิตด้วยเช่นกัน

Jain, Gupta และ Chaudhary [27] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ Self-compacting คอนกรีตที่ใช้เศษแกรนิตเป็นมวลรวมละเอียด ผลการทดสอบพบว่าเศษแกรนิตสามารถนำมาเป็นส่วนผสมใน Self-compacting คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษแกรนิตร้อยละ 20 ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น และกำลังรับแรงดัดจะสูงที่สุดเมื่อมีการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษแกรนิตร้อยละ 40

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าหินฝุ่นแกรนิตสามารถนำมาแทนที่ทรายธรรมชาติในส่วนผสมของคอนกรีตได้ ซึ่งการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยหินฝุ่นแกรนิตนั้นมีส่วนทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น และในส่วนของความเหมาะสมของปริมาณการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยหินฝุ่นแกรนิต

นั้นขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของหินฝุ่นแกรนิตที่นำมาใช้ อย่างไรก็ตามยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้หินฝุ่นแกรนิตในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต

2.4 ความชื้นมวลรวม

ในมวลรวมจะมีช่องว่างเล็ก ๆ ที่น้ำสามารถไหลเข้าหรือออกได้ ช่องว่างเล็ก ๆ ภายในมวลรวมนี้ทำให้มวลรวมสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปได้ นอกจากนี้ยังสามารถเกาะอยู่บริเวณผิวโดยรอบของมวลรวมได้เช่นเดียวกัน มวลรวมที่กองเก็บในสถานที่ต่างกันจะมีปริมาณน้ำหรือความชื้นแตกต่างกัน ปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลรวมมีผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมที่อยู่ในสภาพแห้งสามารถดูดซึมน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเข้าไปในมวลรวมได้บางส่วนทำให้ปริมาณน้ำที่เหลือในส่วนผสมน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการ

สภาพความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมแบ่งได้ 4 สภาวะ

1. สภาพอบแห้ง (Oven Dry) ในสภาพนี้ไม่มีความชื้นที่ผิว แต่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างข้างในบ้าง แต่ไม่ถึงสภาพอึดตัว ยังคงดูดความชื้นได้เล็กน้อย การเตรียมมวลรวมในสภาพอบแห้งนี้สามารถทำได้โดยนำมวลรวมมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนมวลรวมมีน้ำหนักคงที่

2. สภาพแห้งในอากาศ (Air Dry) ในสภาพนี้ไม่มีความชื้นที่ผิว แต่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างข้างในบ้าง แต่ไม่ถึงสภาพอึดตัว ยังคงดูดความชื้นได้เล็กน้อย

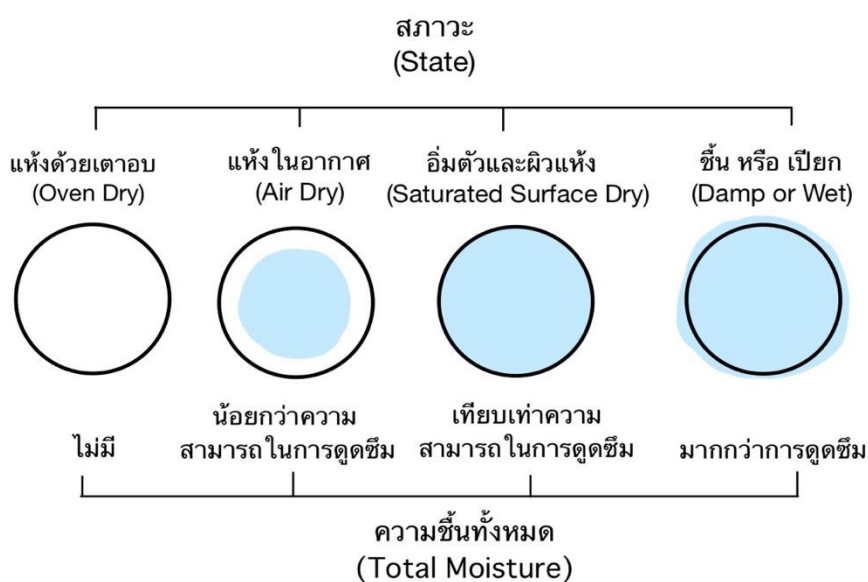
3. สภาพอึดตัวผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry) ในสภาพนี้จะไม่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างของมวลเต็มที่ ในขณะที่ผิวภายนอกมวลรวมจะแห้ง และเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน เพราะจะไม่มี การคายน้ำหรือดูดน้ำจากคอนกรีต สำหรับขั้นตอนในการเตรียมมวลรวมในสภาพอึดตัวผิวแห้งของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบมีความแตกต่างกัน

การเตรียมมวลรวมในสภาวะอึดตัวผิวแห้งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 มวลรวมละเอียดในสภาพอึดตัวผิวแห้ง สามารถทำได้โดยนำมวลรวมละเอียดไปแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผึ่งให้ความร้อนและคลุกเคล้ามวลรวมละเอียดอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งถึงจุดอึดตัวผิวแห้ง

3.2 มวลรวมหยาบในสภาพอึดตัวผิวแห้ง สามารถทำได้โดยนำมวลรวมหยาบไปแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ± 4 ชั่วโมงจากนั้นนำมวลรวมหยาบมาเช็ดผิวให้แห้งจนอยู่ในสภาวะอึดตัวผิวแห้ง

4. สภาพเปียก (Damp or wet) ในสภาพนี้ภายในช่องว่างของมวลจะอึดตัวไปด้วยความชื้น และที่ผิวนอกจะมีน้ำหุ้มอยู่



รูปที่ 6 สภาวะความชื้นของมวลรวม

Poon et al. [28] ศึกษาอิทธิพลของสภาวะความชื้นในมวลรวมหยาบจากธรรมชาติและมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากเศษคอนกรีตที่ส่งผลกระทบต่อค่าการไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทำการทดสอบคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิลในสัดส่วนที่แตกต่างกันโดยแบ่งสภาวะความชื้นของมวลรวมออกเป็นสภาพอบแห้ง (Oven Dry, OD), แห้งในอากาศ (Air Dry, AD) และ อึดตัวผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry, SSD) ผลการทดสอบพบว่า สภาวะความชื้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคอนกรีตสด โดยมวลรวมในสภาวะแห้งด้วยเตาอบมีค่าการไหลแผ่ที่สูงมากในตอนต้นและตกลงอย่างรวดเร็ว ส่วนมวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศและอึดตัวผิวแห้งนั้นมีค่าการไหลแผ่ที่คงที่ และในส่วนของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพบว่าการใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

Mefteh et al. [29] ทำการศึกษาอิทธิพลของความชื้นในมวลรวมรีไซเคิลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตแข็ง โดยแบ่งสภาวะความชื้นของมวลรวมออกเป็นแห้ง (Dry), เปียก (Pre-wetting) และ อึดตัวและผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry) จากผลการทดสอบพบว่ามวลรวมที่อยู่ในสภาวะเปียกและอึดตัวผิวแห้งช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต นอกจากนี้ความชื้นของมวลรวมรีไซเคิลยังส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต มวลรวมที่

อยู่ในสภาวะเปียกและอิมัวผิวแห้งจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเนื่องจากปริมาณน้ำที่อยู่ในมวลรวม

Ji et al. [30] ศึกษาผลกระทบของความชื้นของมวลรวมละเอียดรีไซเคิลต่อความต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีต จากการทดสอบพบว่าความต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิมัวผิวแห้ง (SSD) แทนการใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) และอบแห้ง (OD)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าความชื้นของมวลรวมนั้นส่งผลดีและผลเสียต่อปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตแตกต่างกันไป ความชื้นที่มีมากอาจส่งผลดีต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตแต่ในทางกลับกันก็อาจส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ ดังนั้นการที่จะผลิตคอนกรีตให้ได้คุณภาพจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงสภาวะความชื้นที่เหมาะสมของมวลรวมด้วยเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวข้องกับผลกระทบของความชื้นของมวลรวมนั้นยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของความชื้นมวลรวมที่ส่งผลต่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีตทั้งในแง่ของคุณสมบัติเชิงกลและความทนทาน

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แก้วลอย สารละลายต่าง มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ซึ่งมวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ได้มีการนำเศษหินจากโรงโม่หินมาใช้ทดแทนทรายธรรมชาติเพื่อผลิตวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของส่วนผสมมีดังต่อไปนี้

1. แก้วลอยแคลเซียมสูง (HCF) จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
2. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบ Na_2O , H_2O และ SiO_2 เท่ากับ 14.5%, 55.3% และ 30.0% ตามลำดับ
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ถูกใช้สำหรับจีโอโพลิเมอร์ทุกส่วนผสม
4. มวลรวมละเอียดสำหรับทุกส่วนผสมใช้ทรายแม่น้ำและเศษหินแกรนิตที่มีขนาดคละที่ดีที่สุด โดยมวลรวมละเอียดที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 สถานะ คือ อิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD), แห้งในอากาศ (Air Dry, AD) และ อบแห้ง (Oven Dry, OD)
5. สำหรับการผสมคอนกรีตใช้หินปูนที่มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65 เป็นมวลรวมหยาบ
6. กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นร้อยละ 96 สำหรับเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 3

3.2 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

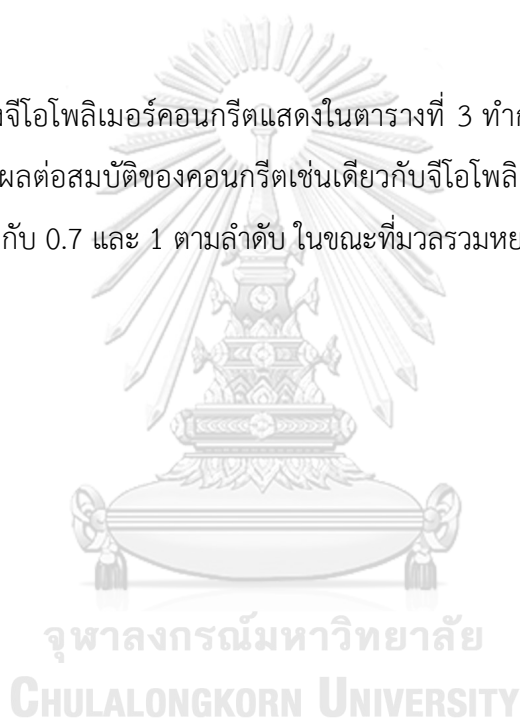
การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเป็นไปตามตารางที่ 1 ผลการทดสอบแสดงในบทที่ หัวข้อ 4.1 ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติที่ทดสอบ	มาตรฐานทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะของแก้วลอย	ASTM C188 [31]
ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด	ASTM C128 [32]
ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ	ASTM C127 [33]

3.3 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต

การผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) เท่ากับ 1 และมีอัตราส่วนปริมาณสารละลายต่างต่อเถ้าลอย (Liquid/Ash, L/A) เท่ากับ 0.7 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งอัตราส่วนผสมเหล่านี้มาจากการทดสอบอัตราส่วนผสมของส่วนผสมควบคุมให้มีค่าการไหลเท่ากับ $110 \pm 5\%$ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [34] สำหรับมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นทรายธรรมชาติที่ถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0, 25 และ 50 โดยน้ำหนัก

ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 ทำการศึกษาปริมาณความชื้นของมวลรวมละเอียดที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และมีอัตราส่วน L/A และ NS/NH เท่ากับ 0.7 และ 1 ตามลำดับ ในขณะที่มวลรวมหยาบใช้หินปูนที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง



ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมต่าง ๆ ที่ใช้ในการผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ (g)

ส่วนผสม	เผ้าลอย	โชนเดียมซิลิเกต	โชนเดียมไฮดรอกไซด์	มวบรวมละเอียด									
				ทรายธรรมชาติ (NA)			ทรายจากหินแกรนิต (GW)						
				SSD	OD	AD	SSD	OD	AD	SSD	AD		
M-0GW-SSD	100	35	35	275	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M-0GW-OD	100	35	35	-	275	-	-	-	-	-	-	-	-
M-0GW-AD	100	35	35	-	-	275	-	-	-	-	-	-	-
M-25GW-SSD	100	35	35	206	-	-	69	-	-	-	-	-	-
M-25GW-OD	100	35	35	-	206	-	-	-	69	-	-	-	-
M-25GW-AD	100	35	35	-	-	206	-	-	-	-	-	-	69
M-50GW-SSD	100	35	35	137.5	-	-	137.5	-	-	-	-	137.5	-
M-50GW-OD	100	35	35	-	137.5	-	-	-	137.5	-	-	-	-
M-50GW-AD	100	35	35	-	-	137.5	-	-	-	-	-	-	137.5

หมายเหตุ M-0GW-SSD คือ ส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้แกรนิต 0% โดยใช้ทรายสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD)

ตารางที่ 3 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ สำหรับการผลิตซีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (kg/m³)

ส่วนผสม	เถ้าลอย	ซีเตียม ซิลิเกต	ซีเตียมไฮ ดรอกไซด์	มวลรวมละเอียด								มวลรวมยาบ หิมปูน	
				ทรายธรรมชาติ (NA)				ทรายจากหินแกรนิต (GW)					
				SSD	OD	AD	SSD	SSD	OD	AD	AD		
C-0GW-SSD	450	135	135	135	500	-	-	-	-	-	-	-	1,150
C-0GW-OD	450	135	135	135	-	500	-	-	-	-	-	-	1,150
C-0GW-AD	450	135	135	135	-	-	500	-	-	-	-	-	1,150
C-25GW-SSD	450	135	135	135	375	-	-	-	125	-	-	-	1,150
C-25GW-OD	450	135	135	135	-	375	-	-	-	125	-	-	1,150
C-25GW-AD	450	135	135	135	-	-	375	-	-	-	125	-	1,150
C-50GW-SSD	450	135	135	135	250	-	-	-	250	-	-	-	1,150
C-50GW-OD	450	135	135	135	-	250	-	-	-	250	-	-	1,150
C-50GW-AD	450	135	135	135	-	-	250	-	-	-	250	-	1,150

หมายเหตุ C-0GW-SSD คือ ส่วนผสมซีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษแกรนิต 0% โดยใช้ทรายสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD)

3.4 ขั้นตอนการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต

ขั้นตอนในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต มีทั้งหมด 6 ขั้นตอน โดยใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 15 นาที ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ใส่ส่วนผสม NH และ ฝัากลอย ลงในโม้ผสม ใช้เวลาในการผสมให้เข้ากัน 5 นาที
- ขั้นตอนที่ 2 เมื่อครบ 5 นาที นำมวลรวมละเอียดที่เตรียมไว้ใส่ลงไปโม้ผสม ในส่วนของ การผสมคอนกรีตในขั้นตอนนี้ให้ใส่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดลงไปผสม แล้วทำการผสมต่ออีก 5 นาที
- ขั้นตอนที่ 3 หลังจากนั้นนำ NS ซึ่งเป็นส่วนผสมสุดท้ายใส่ลงไปโม้ผสม ทำการผสมต่ออีก 5 นาที
- ขั้นตอนที่ 4 หลังจากทำการผสมครบทั้ง 3 ขั้นตอนแล้ว นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแบบหล่อ โดยแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ในแต่ละชั้นทำการกระทุ้งให้แน่น
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการห่อแบบหล่อด้วยพลาสติกหุ้ม แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน
- ขั้นตอนที่ 6 หลังจากทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน แล้วจึงนำมาแกะออกจากแบบหล่อและบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องต่ออีกจนมีอายุครบตามจำนวนวันที่ต้องการแล้ว จึงนำไปทดสอบ

ในแต่ละขั้นตอนของการผสมในโม้บ่มนั้นต้องคอยหมั่นสังเกตบริเวณผิวของโม้ผสมว่ามีส่วนผสมติดค้างอยู่หรือไม่ หากพบว่ามีส่วนผสมติดค้างอยู่ให้ใช้ใบพายปาดส่วนผสมให้เข้ากัน

3.5 รายละเอียดการทดสอบ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณการใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติและศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นในมวลรวมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอโพลีเมอร์เพสต์มอร์ตาร์และคอนกรีต โดยคุณสมบัติทางกลและความทนทานที่ทำการทดสอบนั้นได้แก่ การวัดค่าการไหลแผ่, เวลาการก่อตัว, กำลังอัด, กำลังดัด, กำลังรับแรงดึง, โพรงและการดูดซึมน้ำ, ความสามารถในการทนกรดซัลฟิวริก และความสามารถในการต้านทานสถานะเพลิงไหม้

การทดสอบปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C642 [35] เริ่มจากการนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักหลังอบแห้ง เมื่อชั่งน้ำหนักเสร็จแล้วจึงนำตัวอย่างทั้งหมดไปแช่น้ำต่อเป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นมาเช็ดผิวให้แห้งและทำการชั่งน้ำหนัก อิมตัวผิวแห้ง ต่อจากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดไปต้มในน้ำเดือดต่อเป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำ

ตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ ซึ่งปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.1) และ (3.2)

$$\text{Volume of permeable pore space (\%)} = \left(\frac{W_{\text{air}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{air}} - W_{\text{wat}}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Absorption after immersion (\%)} = \left(\frac{W_{\text{sat}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{sat}}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ W_{air} หมายถึง น้ำหนักของตัวอย่างในขณะที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

W_{wat} หมายถึง น้ำหนักของตัวอย่างในขณะที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

W_{dry} หมายถึง น้ำหนักของตัวอย่างหลังจากอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (กรัม)

W_{sat} หมายถึง น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่น้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง (กรัม)

โครงสร้างของโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีโอกาสที่จะสัมผัสกับกรดซัลฟิวริกได้สูง ยกตัวอย่างเช่นในส่วนของท่อระบายน้ำ และระบบระบายน้ำเสีย เป็นต้น ดังนั้นการทดสอบวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่จะทำให้วัสดุสามารถใช้งานจริงได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริกสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM C267 [36] โดยทำการแช่ตัวอย่างในกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 และวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายเป็นระยะเวลา 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในปัจจุบันการเกิดเพลิงไหม้ในอาคาร บ้านเรือน เป็นสิ่งที่พบเห็นได้บ่อยครั้ง การเกิดเพลิงไหม้ในแต่ละครั้งสร้างความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมาก ดังนั้นความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ของวัสดุจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญในการออกแบบโครงสร้าง การศึกษาความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทำได้โดยวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังผ่านการเผาไฟ 30, 60 และ 90 นาที ที่อุณหภูมิเตาเผาตามมาตรฐาน ISO 834 [37]

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ

คุณสมบัติที่ทดสอบ	ลักษณะและขนาดของตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	มาตรฐานทดสอบ
ค่าการไหลแผ่ (Flow table)	-	-	ASTM C1437 [38]
เวลาการก่อตัว	-	-	ASTM C807 [39]
กำลังอัด	ลูกบาศก์ขนาด 5 cm.	7, 14, 28, 90	ASTM C109 [34]
กำลังดัด	คานหน้าตัด 4×4 cm. ยาว 16 cm.	7, 14, 28	ASTM C348 [40]
โพรงและการดูดซึมน้ำ	ลูกบาศก์ขนาด 5 cm.	28	ASTM C642 [35]
ความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก	ลูกบาศก์ขนาด 5 cm.	28	ASTM C267 [36]

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ทดสอบ

คุณสมบัติที่ทดสอบ	ลักษณะและขนาดของตัวอย่าง	อายุบ่ม (วัน)	มาตรฐานทดสอบ
ค่าการไหลแผ่ (Slump flow)	-	-	ASTM C1611 [41]
เวลาการก่อตัว	-	-	ASTM C403 [42]
กำลังอัด	ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	7, 28, 90	ASTM C39 [43]
กำลังดัด	คานหน้าตัด 10×10 cm. ยาว 50 cm.	28	ASTM C293 [44]
โพรงและการดูดซึมน้ำ	ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28	ASTM C642 [35]
ความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้	ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	28	ISO 834 [37]

บทที่ 4

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

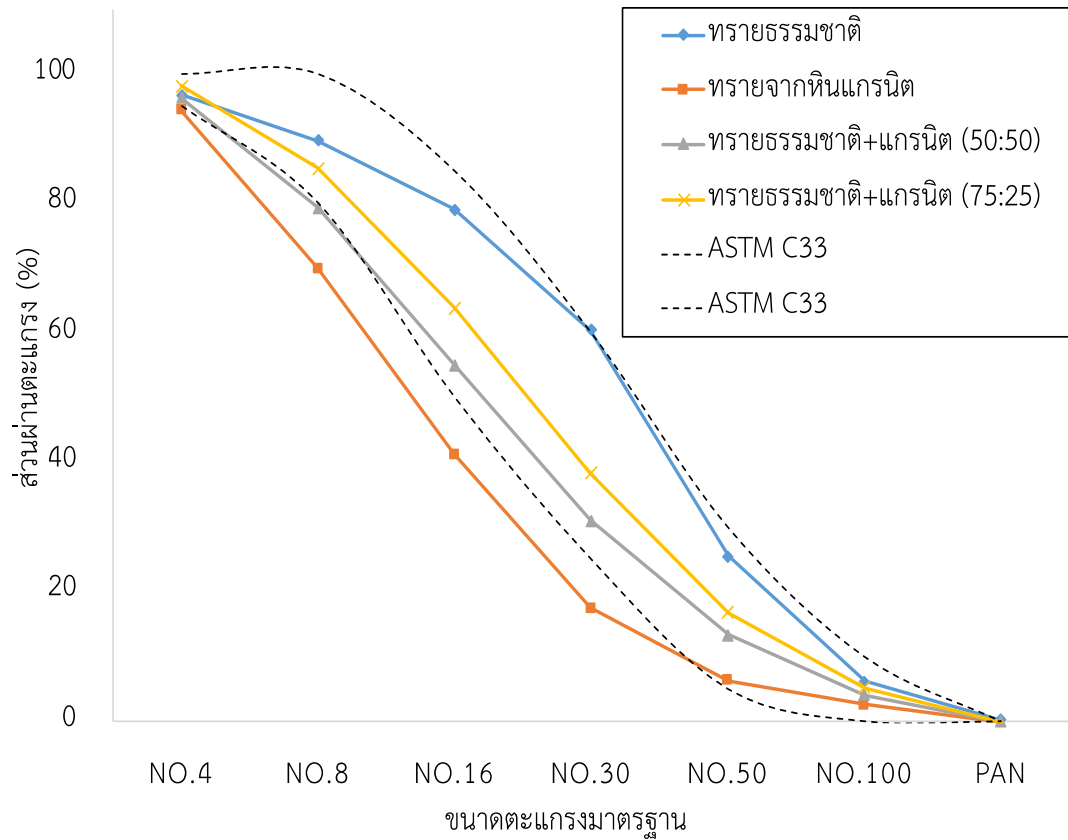
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมแสดงดังตารางที่ 6 จากการทดสอบพบว่าเศษหินแกรนิตมีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าหน่วยน้ำหนักหลังอบแห้งเท่ากับ 2.58 และ 1,593 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับทรายแม่น้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าหน่วยน้ำหนักหลังอบแห้งเท่ากับ 2.51 และ 1,639 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 6 คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม

คุณสมบัติ	หิน	ทรายแม่น้ำ	เศษหินแกรนิต
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.70	2.51	2.58
ค่าหน่วยน้ำหนักอบแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1,621	1,639	1,593
ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.60	0.72	0.87
ค่าโมดูลัสความละเอียด	-	2.42	3.68

จากรูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบการกระจายขนาดของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C136 [45] จากการทดสอบพบว่าเศษหินแกรนิต 100% ไม่อยู่ในเกณฑ์มวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [46] ซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษแกรนิตที่มีค่าสูงถึง 3.68 และมีค่ามากกว่าทรายแม่น้ำ บ่งบอกถึงขนาดอนุภาคของเศษแกรนิตที่ใหญ่และหยาบกว่าทรายแม่น้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายแม่น้ำร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่ามวลรวมผสมมีขนาดละเอียดที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้เป็นส่วนผสมมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

ตารางที่ 8 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสาน จากการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าถ้าลดยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.28 ซึ่งถ้าลดยที่นำมาใช้ในการศึกษานี้จัดเป็นถ้าลดยประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618-15 [47] เนื่องจากมีออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบรวมกันถึงร้อยละ 57.3 นอกจากนี้ยังมีปริมาณออกไซด์ของ CaO สูงถึงร้อยละ 20.7



รูปที่ 7 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [46]

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสาน

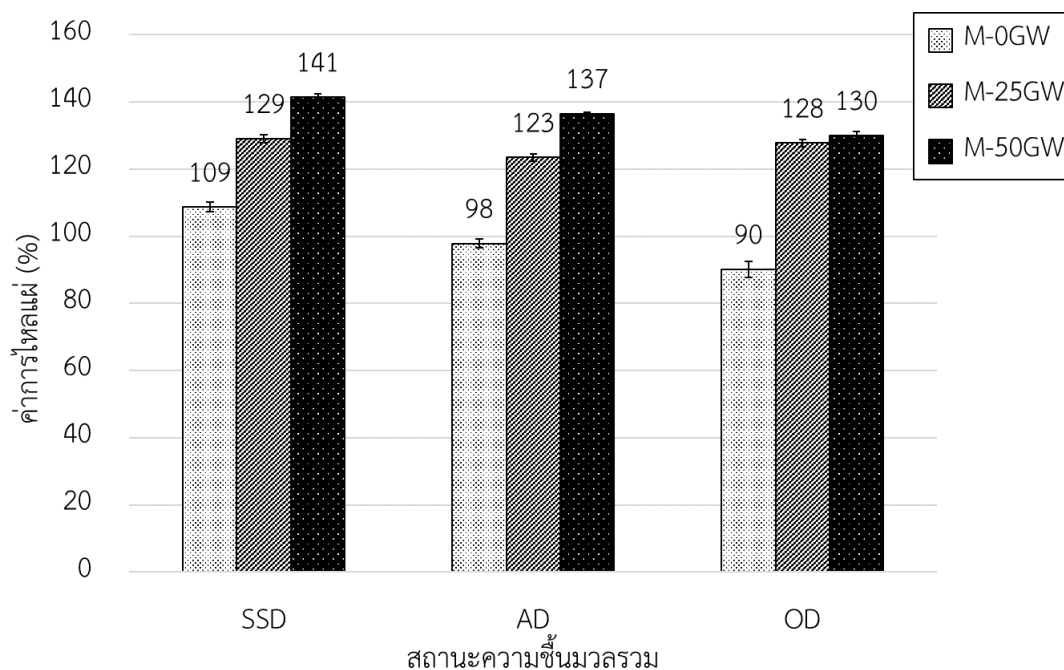
องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
CaO	18.86
SiO ₂	31.50
Al ₂ O ₃	18.60
SO ₃	4.65
Fe ₂ O ₃	14.80
MgO	2.74
K ₂ O	2.08
TiO ₂	0.38
Na ₂ O	2.29
BaO	0.15
P ₂ O ₅	0.24
MnO	0.10
ZnO	0.02
SrO	0.13

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ศึกษา ประกอบด้วย ความสามารถในการทำงานได้, เวลาการก่อตัว, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, โพรง, การดูดซึมน้ำ และความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นดังต่อไปนี้

4.2.1 ความสามารถในการทำงานได้

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยการวัดค่าการไหลผ่านตามมาตรฐาน ASTM C1437 [38] เมื่อแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0, 25, 50 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่ใช้ทรายในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มีค่าเปอร์เซ็นต์การไหลผ่านเท่ากับ 109, 129, 141 ตามลำดับ ส่วนผสมที่ใช้ทรายในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) มีค่าเปอร์เซ็นต์การไหลผ่านอยู่ที่ 98, 123, 137 ตามลำดับ และส่วนผสมที่ใช้ทรายในสภาวะอบแห้ง (OD) มีค่าเปอร์เซ็นต์การไหลผ่านอยู่ที่ 90, 128 และ 130 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณส่วนผสมของเศษหินแกรนิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 50 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่เศษหินแกรนิตมีความหยาบหรือมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าทรายธรรมชาติ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยกว่า ความต้องการน้ำหรือของเหลวเพื่อมาเคลือบผิวของมวลรวมจึงลดลงตามไปด้วย ดังนั้นค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ที่ผสมเศษหินแกรนิตจึงมีค่าสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติร้อยละ 4.65 และ 0.77 ตามลำดับ

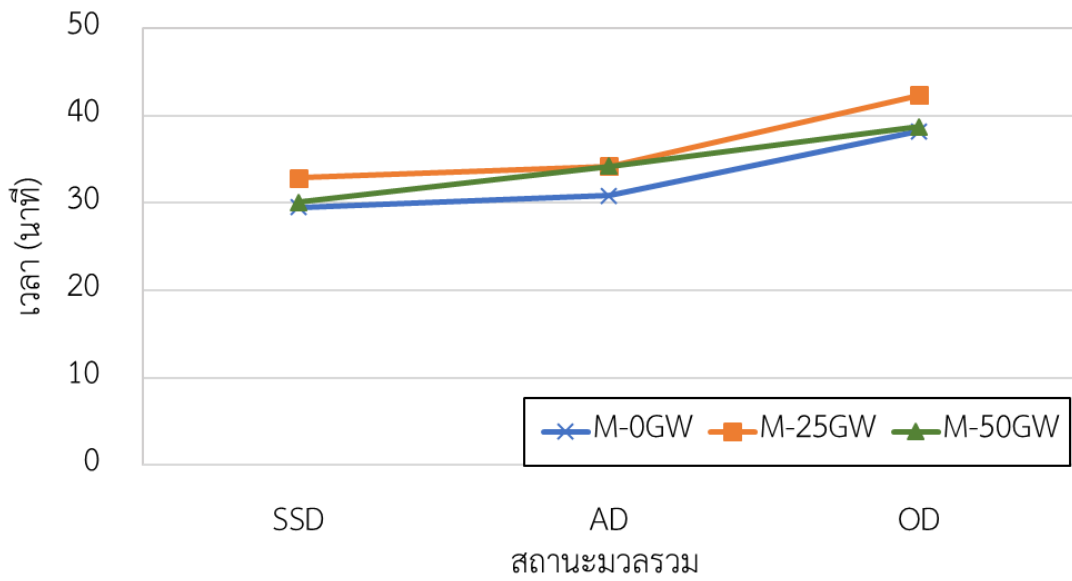
เมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ส่งผลต่อค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าส่วนผสมที่ใช้มวลรวมสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มีความสามารถในการทำงานได้ที่ดีกว่าการใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) และ อบแห้ง (OD) ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสม M-25GW-SSD มีค่าการไหลเท่ากับ 129% ซึ่งมีค่าสูงกว่าส่วนผสม M-25GW-AD และ M-25GW-OD ร้อยละ 4.65 และ 0.77 ตามลำดับ

4.2.2 เวลาการก่อตัว

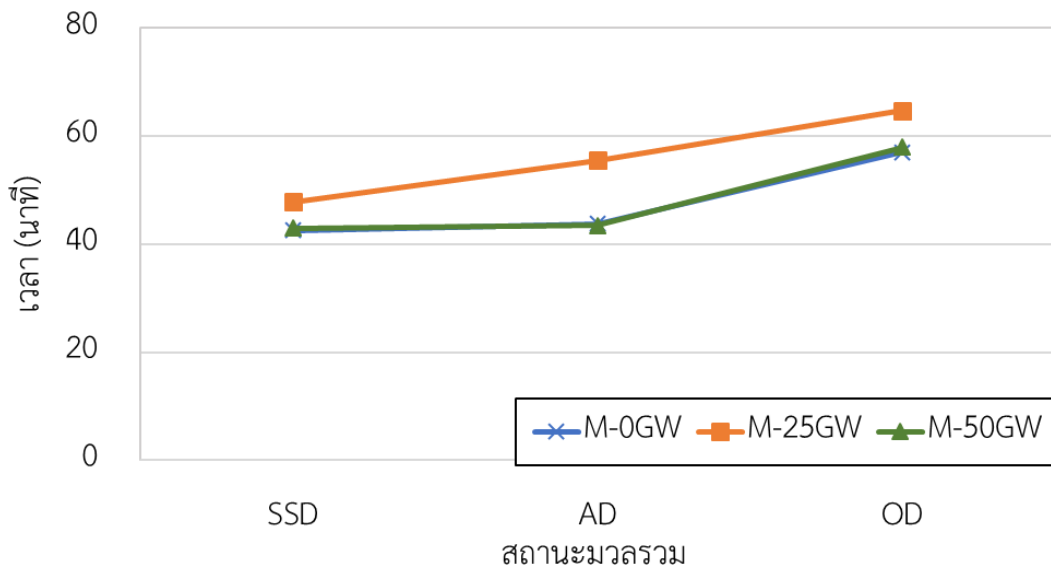
ผลการทดสอบเวลาการก่อตัวต้นและเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 9 และ 10 โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C807 [39] จากผลการทดสอบเวลาการก่อตัวต้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของมวลรวมซึ่งอยู่ในสถานะอิมัวผิวแห้ง (SSD) เวลาการก่อตัวต้นจะเกิดขึ้นเร็วกว่าส่วนผสมที่ใช้มวลรวมซึ่งอยู่ในสถานะแห้ง (AD) และอบแห้ง (OD) ยกตัวอย่างเช่น เวลาการก่อตัวต้นของส่วนผสม M-25GW-SSD เท่ากับ 33 นาที ในขณะที่เวลาการก่อตัวต้นของส่วนผสม M-25GW-AD และ M-25GW-OD เป็น 34 นาทีและ 42 นาทีตามลำดับ นอกจากนี้เวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของมวลรวมซึ่งอยู่ในสถานะอิมัวผิวแห้ง (SSD) ก็จะเกิดขึ้นเร็วกว่าส่วนผสมที่ใช้มวลรวมซึ่งอยู่ในสถานะแห้ง (AD) และอบแห้ง (OD) ด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

ความชื้นของมวลรวมส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายต่างลดลง ความเข้มข้นของ NaOH มีอิทธิพลต่อความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ โดยความเข้มข้นของสารละลายที่ลดลงจากความชื้นของมวลรวมที่อยู่ในสถานะอิมัวผิวแห้งส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เกิดการก่อตัวที่เร็วขึ้น ดังเช่นงานวิจัยของ Rao และ Rao [48] ที่ได้ทำการวิจัยเวลาการก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าเวลาการก่อตัวปลาย (final setting time) ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นั่นก็คือเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ก็จะเกิดขึ้นช้าลง

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่ของเศษแกรนิตพบว่าเวลาการก่อตัวต้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติ 100% จะเกิดขึ้นเร็วกว่าส่วนผสมที่ใช้เศษแกรนิต ยกตัวอย่างเช่น เวลาการก่อตัวต้นของส่วนผสม M-0GW-AD เท่ากับ 31 นาที ซึ่งเกิดเร็วกว่าส่วนผสม M-25GW-AD และ M-50GW-AD ที่มีเวลาการก่อตัวอยู่ที่ 34 นาที ดังรูปที่ 9 และเมื่อพิจารณาเวลาการก่อตัวปลายพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีเศษแกรนิต 25% จะเกิดการก่อตัวปลายที่ช้าที่สุด โดยเวลาการก่อตัวปลายของส่วนผสม M-25GW-AD จะเกิดขึ้นช้ากว่าส่วนผสม M-0GW-AD และ M-50GW-AD อยู่ที่ 11 นาที และ 12 นาทีตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 เวลาการก่อตัวของอีพ็อกซีโพลีเมอร์มอร์ตาร์

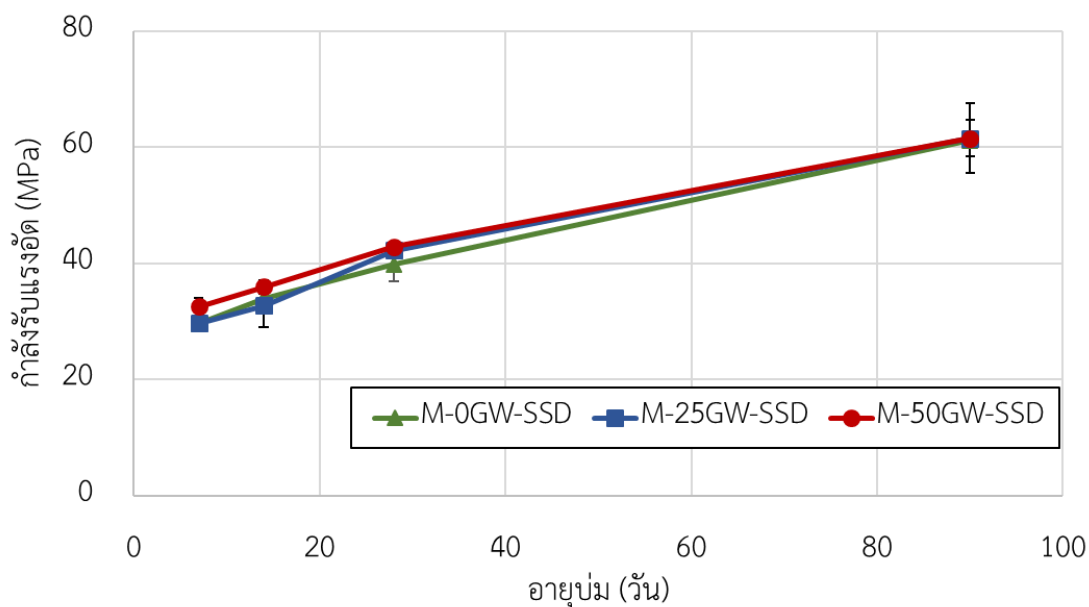


รูปที่ 10 เวลาก่อตัวปลายของอีพ็อกซีโพลีเมอร์มอร์ตาร์

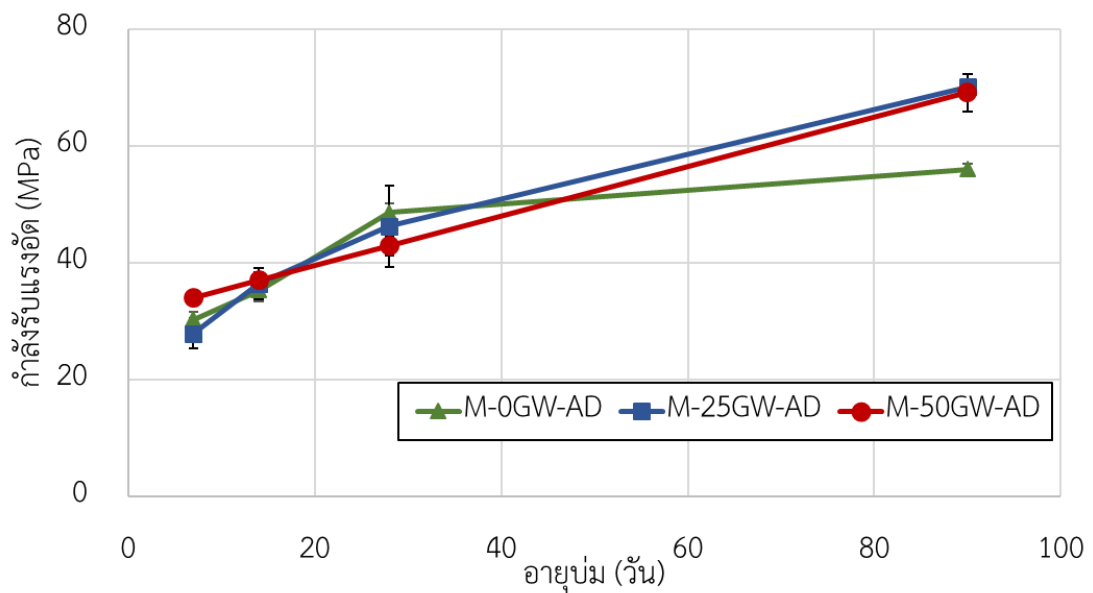
4.2.3 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบผลกระทบของปริมาณการแทนที่เศษหินแกรนิตที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อใช้มวลรวมในสถานะอิมตัวผิวแห้ง สภาวะแห้งในอากาศ และสภาวะอบแห้ง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 11, 12 และ 13 ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตในสถานะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน พบว่าที่ในระยะเวลา 28 วันแรก กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 25 และ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติร้อยละเล็กน้อย โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันของส่วนผสม M-0GW-SSD, M-25GW-SSD และ M-50GW-SSD มีค่าเท่ากับ 39.9, 42.3 และ 42.9 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ดีตัวอย่างมีอายุ 90 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของทั้ง 3 ส่วนผสม (M-0GW-SSD, M-25GW-SSD และ M-50GW-SSD) มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 11

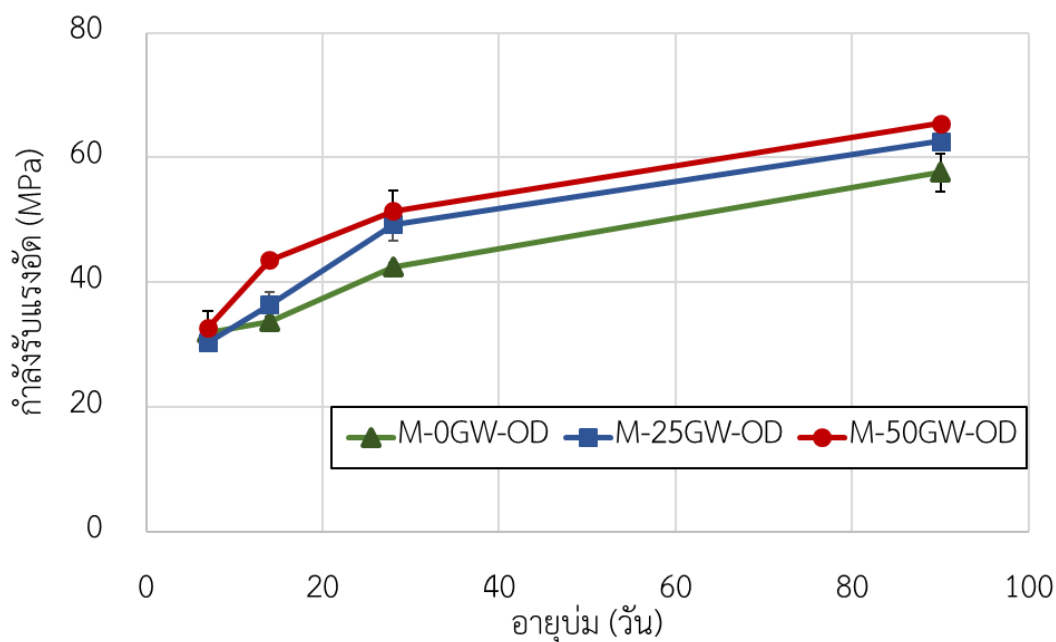


รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสถานะอิมตัวผิวแห้ง (SSD)



รูปที่ 12 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD)

รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิต ร้อยละ 0, 25, 50 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามส่วนผสม M-25GW-AD และ M-50GW-AD มีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน เท่ากับ 70.1 และ 69.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน (M-0GW-AD) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเพียง 56 MPa



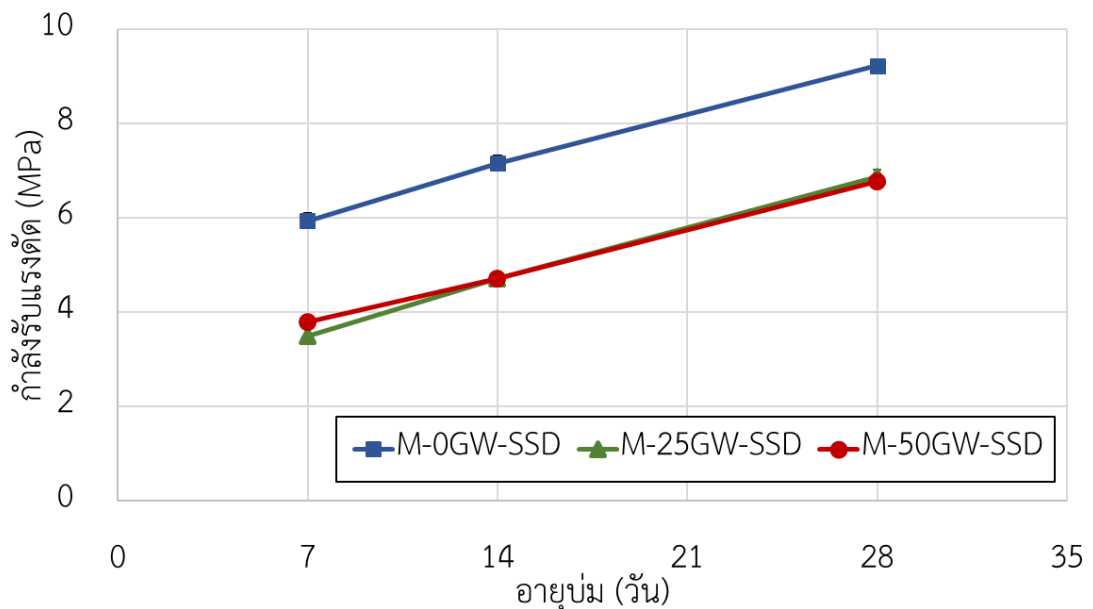
รูปที่ 13 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะอบแห้ง (OD)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมมวลรวมในสภาวะอบแห้ง (OD) หลังจากบ่มเป็น 7, 14, 28 และ 90 วัน แสดงในรูปที่ 13 ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของทั้ง 3 ตัวอย่าง (M-0GW-OD, M-25GW-OD และ M-50GW-OD) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ทว่าส่วนผสมที่ใช้มวลรวมจากเศษแกรนิตจะมีกำลังอัดสูงกว่าการใช้ทรายธรรมชาติหลังจากที่ตัวอย่างมีอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของส่วนผสม M-25GW-OD และ M-50GW-OD มีค่าเท่ากับ 49.3 MPa และ 51.4 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนผสม M-0GW-OD มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 42.5 MPa

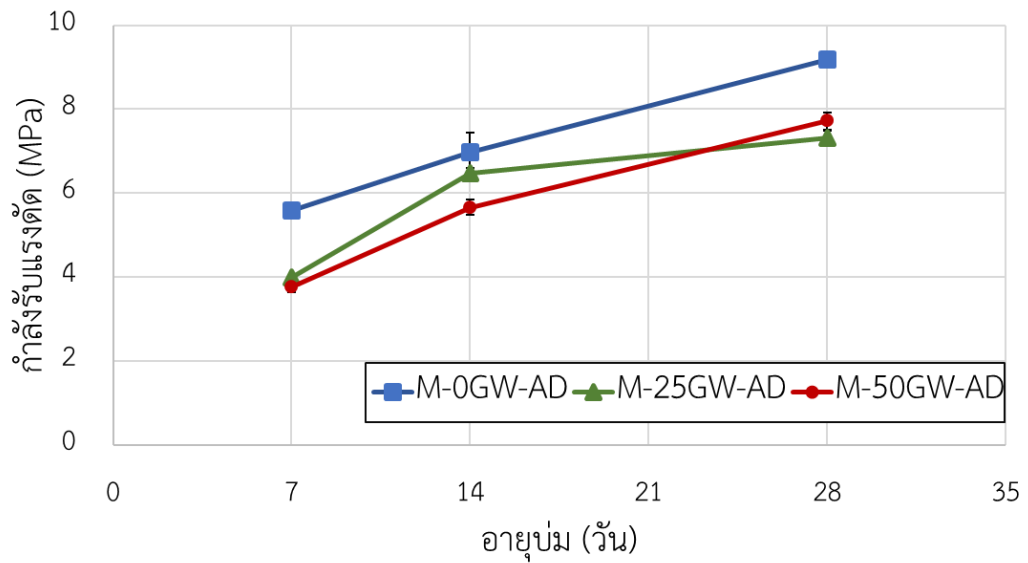
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่ามวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้ง (AD หรือ OD) มีความเหมาะสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มากกว่ามวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) เนื่องจากจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของมวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งนั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่ามวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zhao et al. [49] พบว่ามวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้งส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Interfacial Transition Zone, ITZ) ลดน้อยลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ลดลงไปด้วย

4.2.4 กำลังรับแรงดัด

รูปที่ 14, 15 และ 16 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของมวลรวมละเอียดในสถานะอิมตัวผิวแห้ง (SSD), สภาวะแห้งในอากาศ (AD) และสภาวะอบแห้ง (OD) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตจะส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่ใช้มวลรวม SSD แตกต่างจากในกรณีของกำลังอัด เนื่องจากการเข้มน้ำภายในทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Interfacial Transition Zone, ITZ) ลดลงซึ่งความแข็งแรงของแนวรอยต่อนี้ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่ากำลังอัด

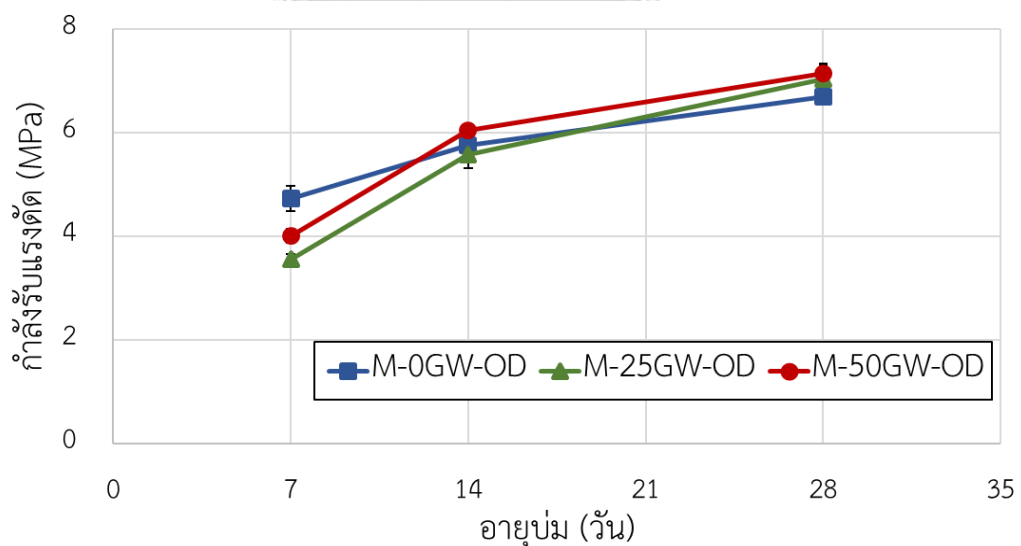


รูปที่ 14 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสถานะอิมตัวผิวแห้ง (SSD)

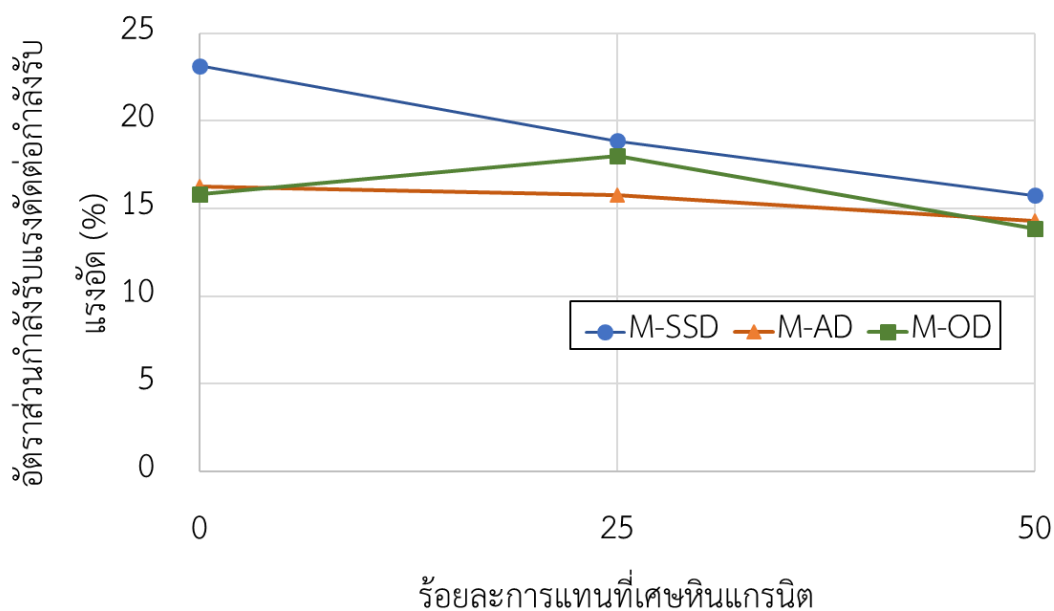


รูปที่ 15 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD)

อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเศษหินแกรนิตมีกำลังรับแรงดัดที่ดีขึ้นเมื่อใช้มวลรวมในสภาพแห้ง (AD หรือ OD) ซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัด ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่มีเศษแกรนิตร้อยละ 50 มีกำลังดัดที่อายุ 28 วัน ร้อยละ 73.6, 84.1 และ 106.7 ของส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน ในสภาวะ SSD, AD และ OD ตามลำดับ



รูปที่ 16 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมในสภาวะอบแห้ง (OD)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงตัดต่อกำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ของเศษหินแกรนิตของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงตัดต่อกำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ของเศษหินแกรนิตของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนกำลังรับแรงตัดต่อกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีเศษหินแกรนิตที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) จะมีค่าน้อยกว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วนที่อยู่ในสภาวะเดียวกัน แต่เมื่อใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้ง (AD และ OD) อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดต่อกำลังรับแรงตัดของทุกส่วนผสมจะมีค่าใกล้เคียงกัน

4.2.5 โพรงและการดูดซึมน้ำ

จากตารางที่ 8 แสดงผลการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมเศษหินแกรนิตที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้งมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วนในสภาวะความชื้นเดียวกัน โดยร้อยละการดูดซึมน้ำของส่วนผสม M-25GW-SSD และ M-50GW-SSD มีค่าเท่ากับ .5.7 และ 5.9 ซึ่งสูงกว่าส่วนผสม M-0GW-SSD ที่มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเพียง 4.7

ตารางที่ 8 โพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

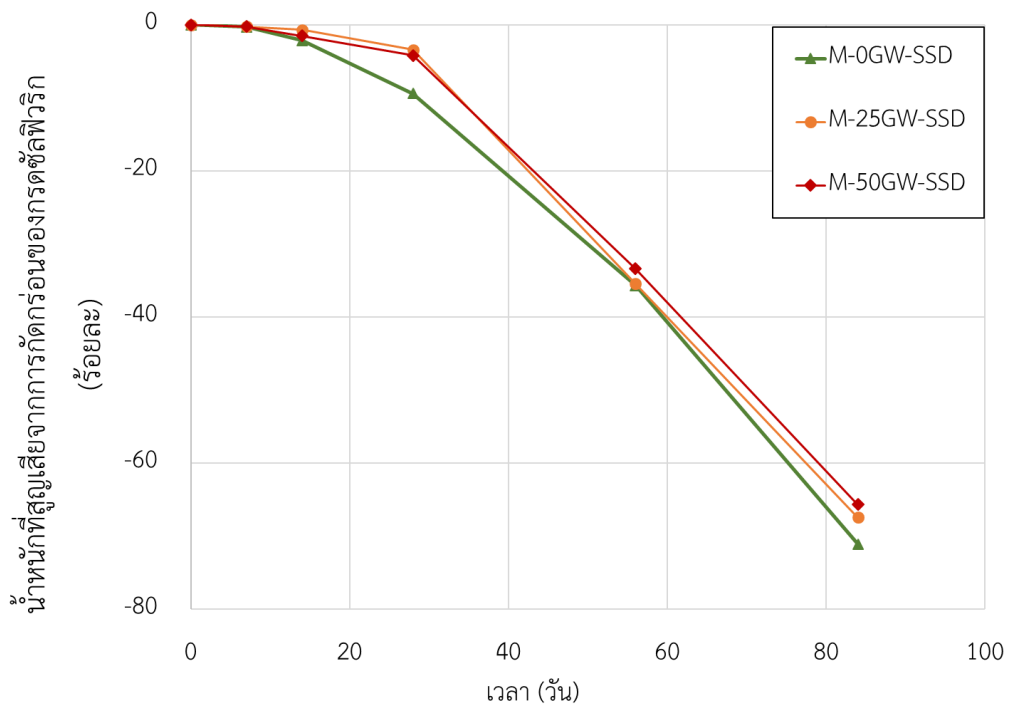
ส่วนผสม	โพรง (%)	การดูดซึมน้ำ (%)
M-0GW-SSD	12.7±0.03	4.7±0.05
M-25GW-SSD	14.1±0.10	5.7±0.05
M-50GW-SSD	14.6±0.21	5.9±0.09
M-0GW-AD	11.5±0.32	4.2±0.06
M-25GW-AD	14.0±0.12	5.5±0.04
M-50GW-AD	10.9±0.14	4.1±0.07
M-0GW-OD	11.2±0.08	4.2±0.05
M-25GW-OD	13.9±0.18	5.5±0.10
M-50GW-OD	13.0±0.03	5.2±0.01

อย่างไรก็ตามค่าโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเศษแกรนิตมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อมวลรวมถูกใช้ในสภาพแห้ง (AD หรือ OD) ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสม M-25GW-SSD มีปริมาณโพรงเท่ากับ 14.1% และมีค่าเท่ากับ 14.0% และ 13.9% สำหรับส่วนผสม M-25GW-AD และ M-25GW-OD ตามลำดับ

4.2.6 ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก

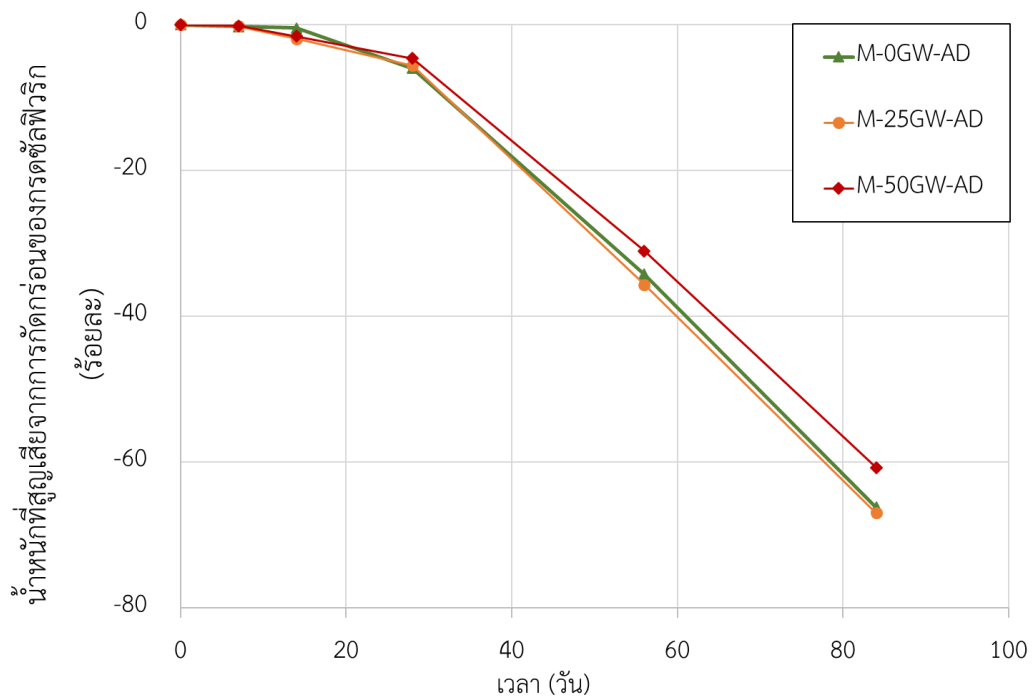
การทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียหลังจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกเป็นระยะเวลา 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียจากการกัดกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 18, 19 และ 20

ผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่เป็นทรายธรรมชาติล้วน ยกตัวอย่างเช่น ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกัดกร่อนของส่วนผสม M-0GW-SSD, M-25GW-SSD และ M-50GW-SSD ที่ 56 วัน มีค่าเท่ากับ 35.68, 35.43 และ 33.42 ตามลำดับ

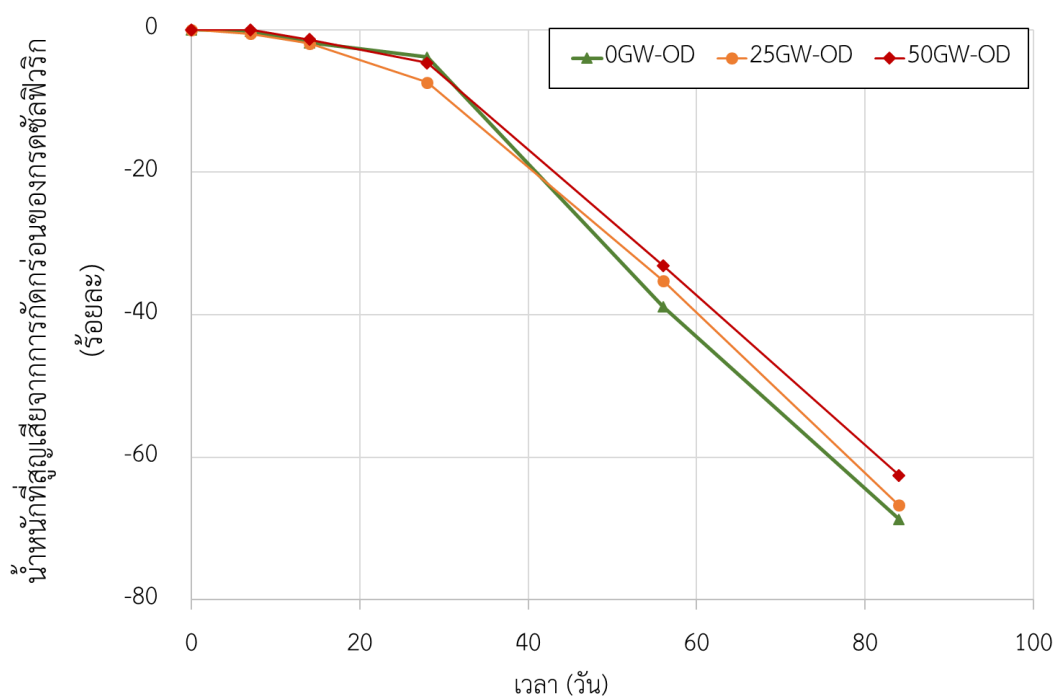


รูปที่ 18 ร้อยละของน้ำหนัที่สูญเสียนจากการกักร้อนของกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้
มวลรวมในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD)

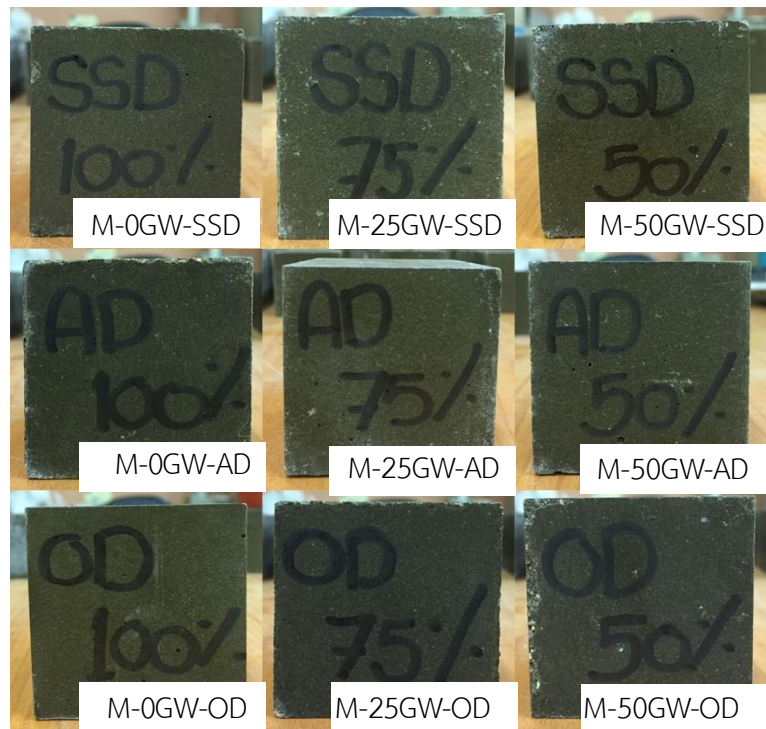
เมื่อพิจารณาสถานะความชื้นของมวลรวมพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของมวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) แห้งในอากาศ (AD) และอบแห้ง (OD) มีความทนทานต่อการกักร้อนของกรดซัลฟิวริกที่ใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น ร้อยละของน้ำหนัที่สูญเสียนจากการกักร้อนของส่วนผสม M-25GW-SSD, M-25GW-AD และ M-25GW-OD ที่ 56 วันมีค่าเท่ากับ 35.43, 35.67 และ 35.21 ตามลำดับ



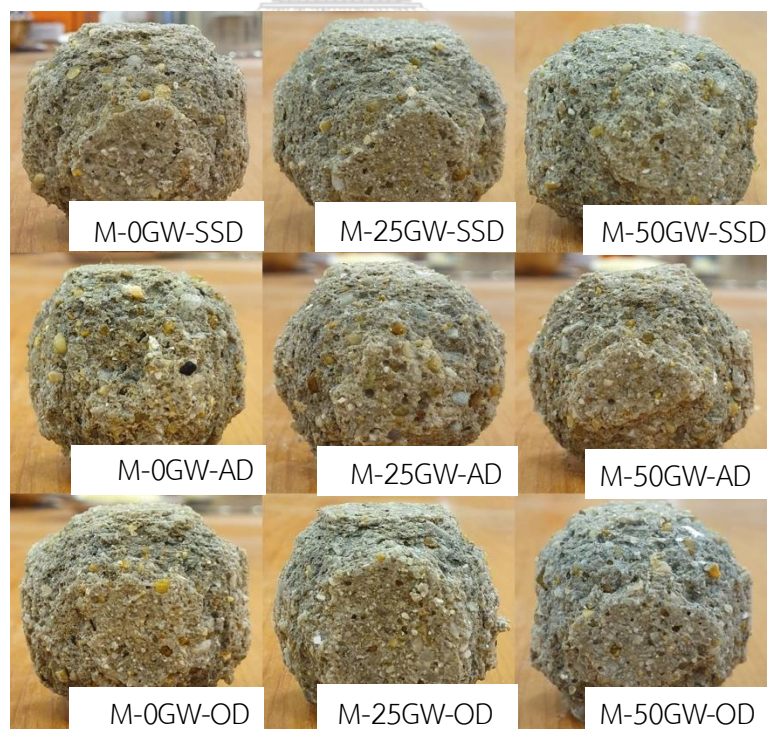
รูปที่ 19 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกักตัวของกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้
มวลรวมในสภาวะแห้งในอากาศ (AD)



รูปที่ 20 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียจากการกักตัวของกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้
มวลรวมในสภาวะอบแห้ง (OD)



รูปที่ 21 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ก่อนการแช่กรดซัลฟิวริก



รูปที่ 22 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผ่านการแช่กรดซัลฟิวริก 84 วัน

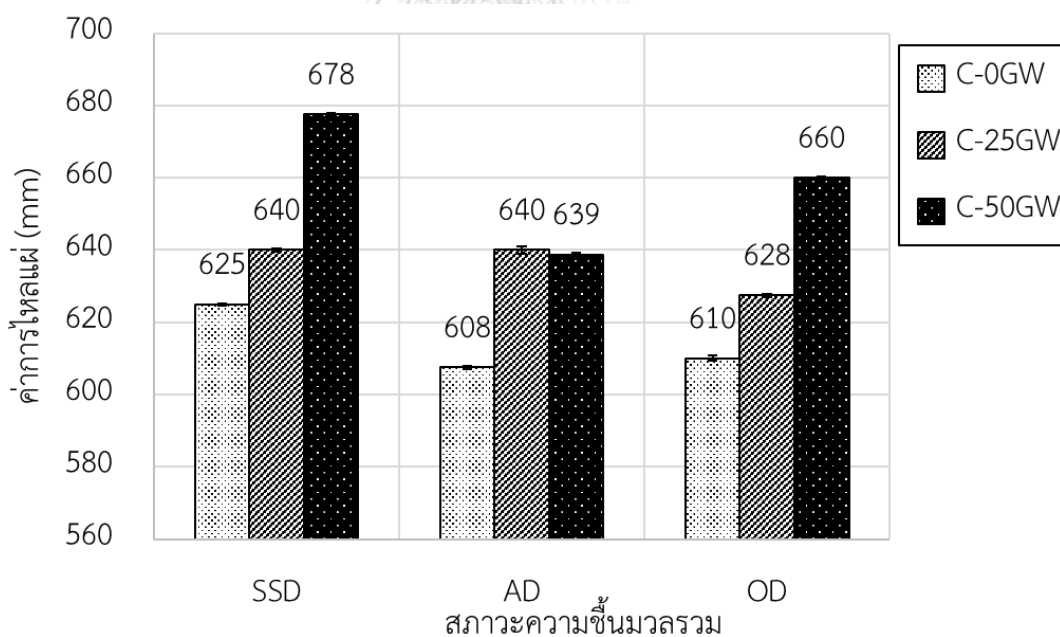
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ความสามารถในการทำงานได้, เวลาการก่อตัว, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, โพรงและการดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อสภาวะเพลิงไหม้ ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 ความสามารถในการทำงานได้

ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยการวัดค่าการไหลผ่านตามมาตรฐาน ASTM C1611 [41] แสดงให้เห็นดังรูปที่ 23

เมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 0, 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมที่ใช้ทรายในสภาวะอิมมัววแห้ง (SSD) มีค่าการไหลผ่านเท่ากับ 625, 640, 678 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนผสมที่ใช้ทรายในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) มีค่าการไหลผ่านเท่ากับ 608, 640, 639 มิลลิเมตร ตามลำดับ และส่วนผสมที่ใช้ทรายในสภาวะอบแห้ง (OD) มีค่าการไหลผ่านเท่ากับ 610, 628 และ 660 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 23 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

จากผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เศษหินแกรนิต โดยความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อมีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตร้อยละ 50

เมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ส่งผลต่อค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตพบว่าจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มีความสามารถในการทำงานได้ดีกว่ามวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) และอบแห้ง (OD) ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-50GW-SSD มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 675 mm ซึ่งดีกว่า จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-50GW-AD และ C-50GW-OD ที่มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 645 mm และ 655 mm ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Patanka et al. [50] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อเนื้อคอนกรีตที่ส่งผลต่อจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต โดยได้ทำการทดสอบความสามารถในการทำงานได้และค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตหลังบ่มด้วยความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของน้ำต่อเนื้อคอนกรีต

จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบที่ได้ทั้งในส่วนของผลกระทบจากการแทนที่เศษหินแกรนิตและผลกระทบจากปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

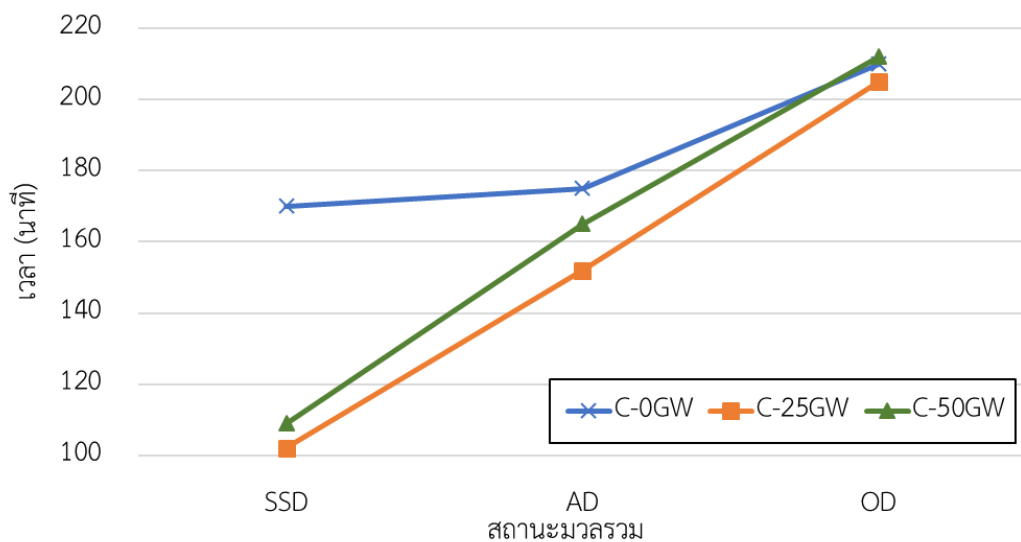
4.3.2 เวลาการก่อตัว

เวลาการก่อตัวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 [42] รูปที่ 24 และ 25 แสดงผลการทดสอบเวลาการก่อตัวต้นและเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตตามลำดับ

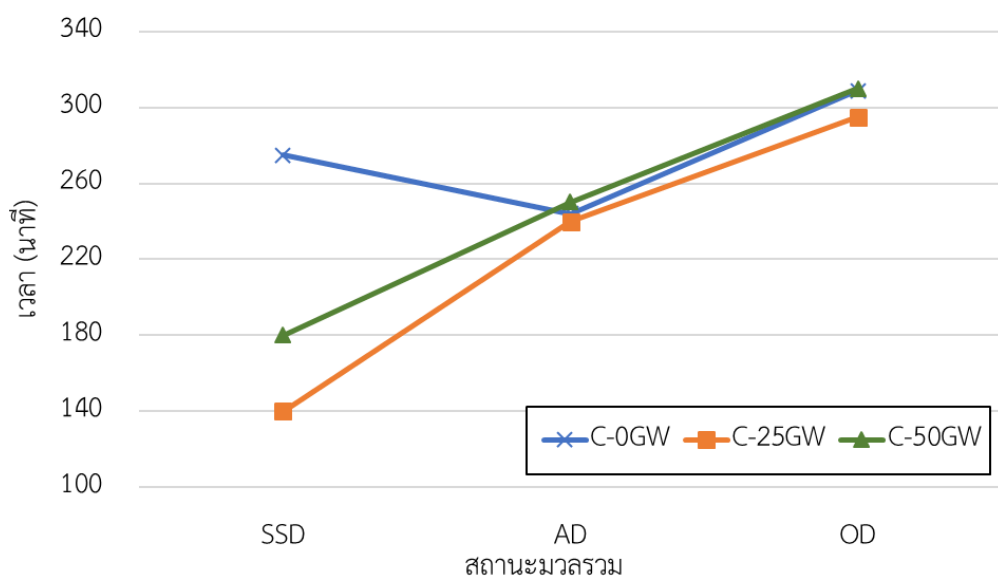
จากผลการทดสอบพบว่าจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) จะเกิดการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายที่เร็วกว่าตัวอย่างที่ใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ (AD) และอบแห้ง (OD) ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-50GW-SSD มีเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 109 นาที ซึ่งเกิดขึ้นเร็วกว่าส่วนผสม C-50GW-AD และ C-50GW-OD ถึง 56 และ 103 นาที ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแกรนิตพบว่า เวลาการก่อตัวต้นและเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษแกรนิตจะเกิดขึ้นเร็วกว่าจีโอโพลี

เมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติ 100% อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใช้มวลรวมที่อยู่ในสถานะแห้งในอากาศและอบแห้ง (AD และ OD) เวลาก่อตัวต้นและเวลาก่อตัวปลายของทั้ง 3 ส่วนผสมจะมีค่าใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น เวลาก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ C-0GW-OD, C-25GW-OD และ C-50GW-OD เท่ากับ 309, 295 และ 308 นาที ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูป 24 และ 25



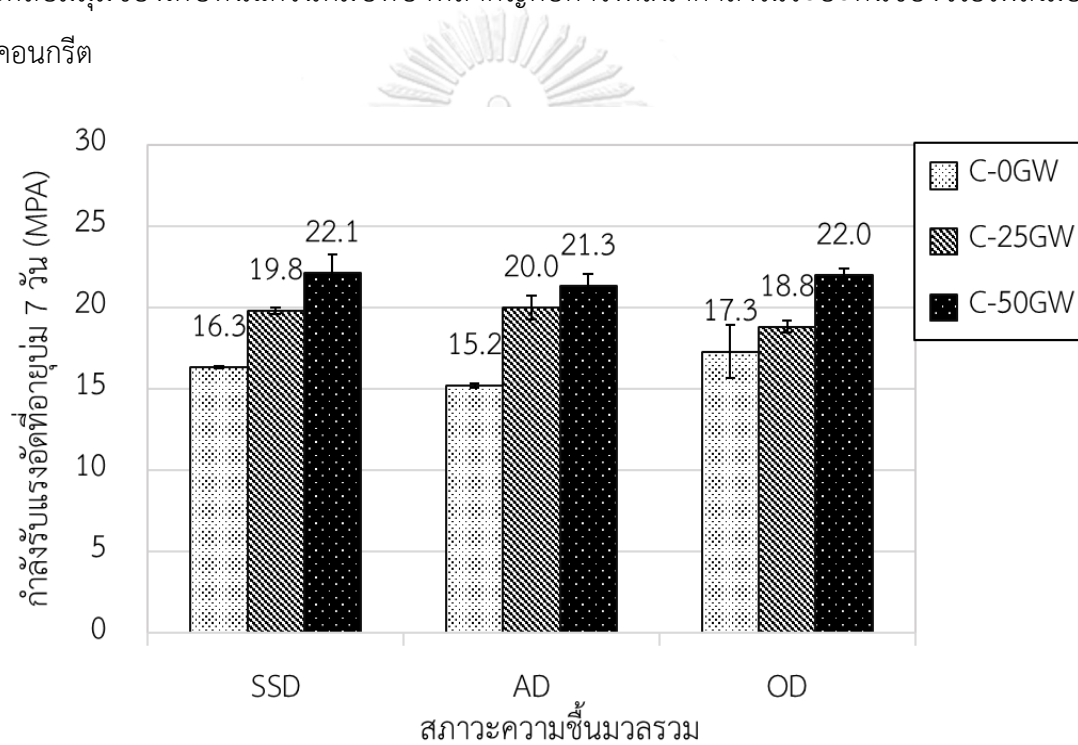
รูปที่ 24 เวลาก่อตัวต้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



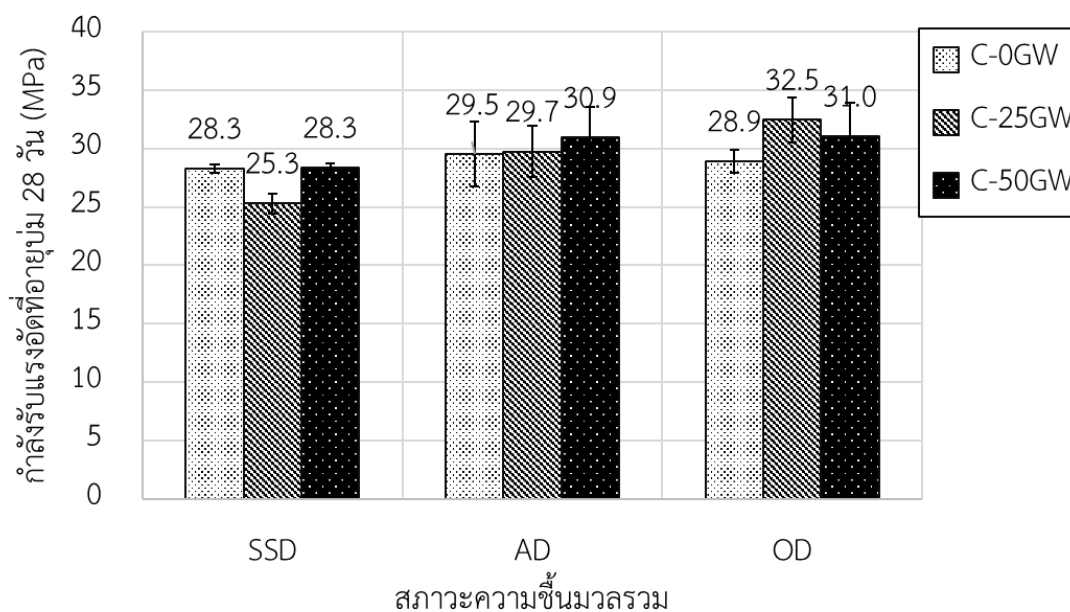
รูปที่ 25 เวลาก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4.3.3 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน แสดงให้เห็นดังรูปที่ 26, 27 และ 28 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตมีค่าสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติล้วน ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน ส่วนผสม C-25GW-AD และ C-50GW-AD มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 20.0 MPa และ 21.3 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าส่วนผสม C-0GW-AD ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเพียง 15.2 MPa ดังแสดงในรูปที่ 26 อาจกล่าวได้ว่าลักษณะที่เป็นเหลี่ยมมุมของเศษหินแกรนิตมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนากำลังในระยะต้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



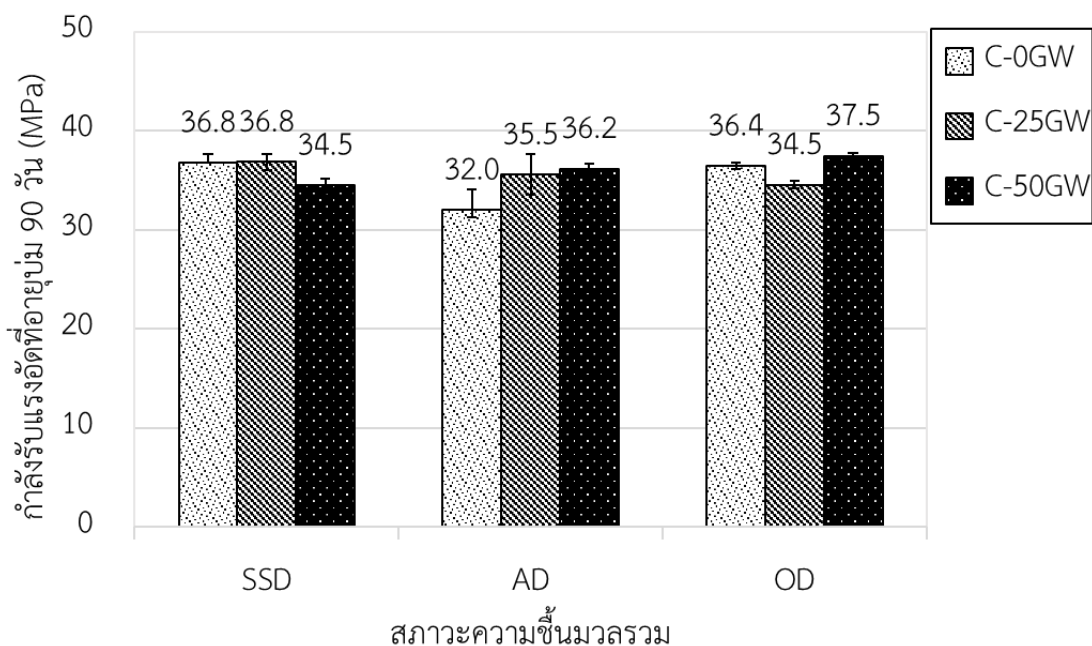
รูปที่ 26 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 27 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาสถานะความขึ้นของมวลรวมพบว่ามวลรวมที่อยู่ในสถานะแห้งในอากาศ (AD) และอบแห้ง (OD) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่ใช้น้ำมวลรวมในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ยกตัวอย่างเช่น ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ส่วนผสม C-50GW-SSD มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 28.3 MPa ในขณะที่ส่วนผสม C-50GW-AD และ C-50GW-OD มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 30.9 MPa และ 36 MPa ตามลำดับ เนื่องจากมวลรวมที่มีความขึ้นสูงอาจก่อให้เกิดการเยิ้ม น้ำภายใน (Internal bleeding) จากน้ำส่วนเกินที่ดูดซึมไว้ภายในมวลรวม ซึ่งถูกบีบให้ออกมารวมกับส่วนผสมอื่น ๆ ในขั้นตอนของการผสมหรืออัดแน่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเศษหินแกรนิตที่ใช้มีความเป็นเหลี่ยมมุมสูง จึงมีโอกาสที่จะเกิดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของน้ำส่วนเกินรอบผิวของมวลรวม เช่นเดียวกับที่พบในมวลรวมหยาบในงานคอนกรีต [51]

อย่างไรก็ตามเมื่อจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีอายุบ่มที่ 90 วัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมจะมีค่าใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-0GW-SSD, C-25GW-SSD และ C-50GW-SSD มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 90 วันเท่ากับ 36.8, 36.8 และ 34.5 MPa



รูปที่ 28 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 90 วัน

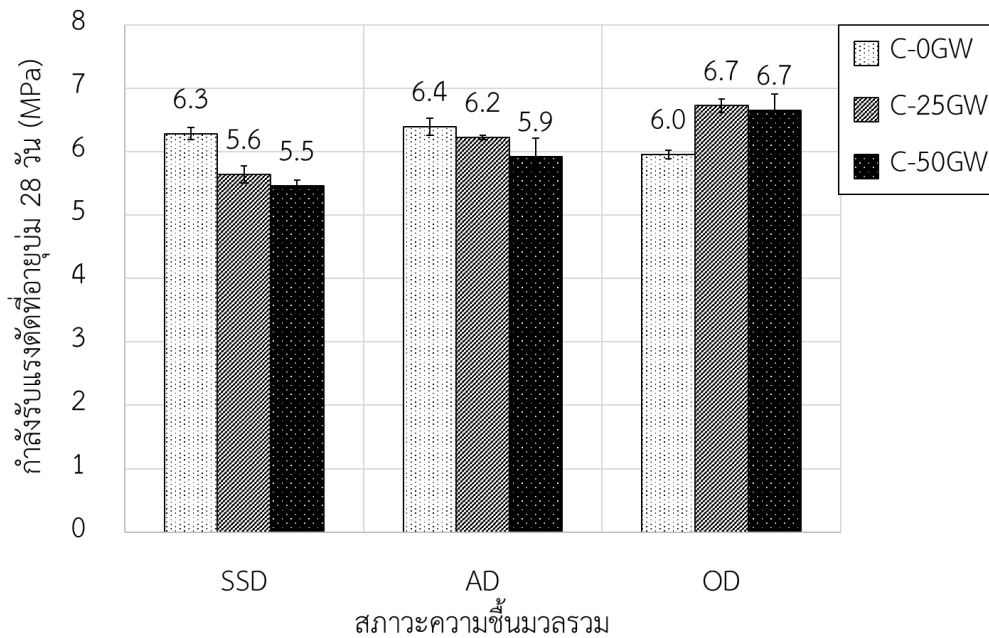
4.3.4 กำลังรับแรงดัด

รูปที่ 29 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตให้ค่ากำลังรับแรงดัดลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) โดยส่วนผสม C-0GW-SSD ให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 6.3 MPa ในขณะที่ส่วนผสม C-25GW-SSD และ C-50GW-SSD ให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 5.5 MPa และ 5.6 MPa ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสมที่เป็นทรายธรรมชาติล้วนในสภาวะเดียวกันถึงร้อยละ 12.7 และ 11.1 ตามลำดับ

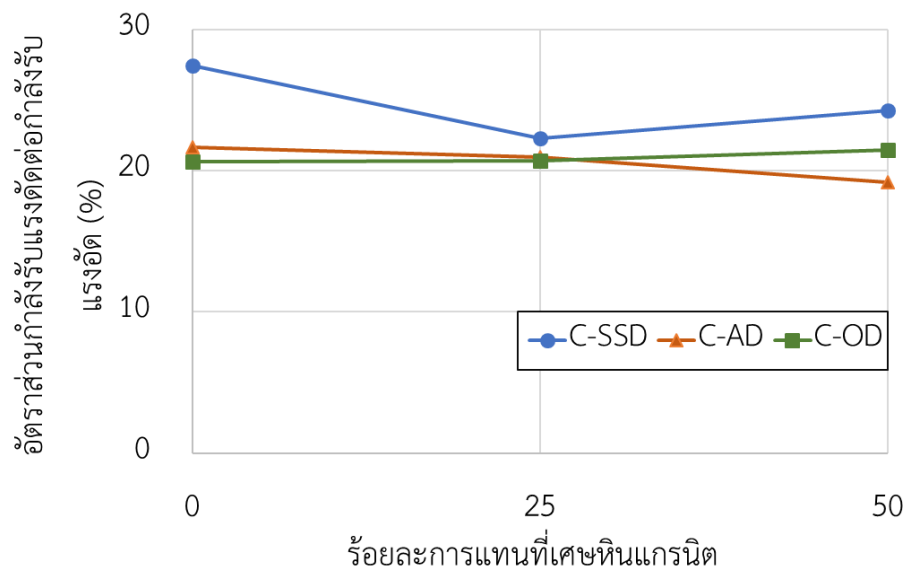
อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผสมเศษหินแกรนิตมีกำลังรับแรงดัดที่ดีขึ้นเมื่อใช้มวลรวมในสภาพแห้ง (AD หรือ OD) ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 5.5 MPa, 5.9 MPa และ 6.7 MPa ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD), แห้งในอากาศ (AD) และอบแห้ง (OD) ตามลำดับ

รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ของเศษหินแกรนิตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตจะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้

ทฤษฎีธรรมชาติล้วนเมื่อใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้ง (AD และ OD) เช่นเดียวกับที่เกิดในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ 29 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดต่อกำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่ของเศษหินแกรนิตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

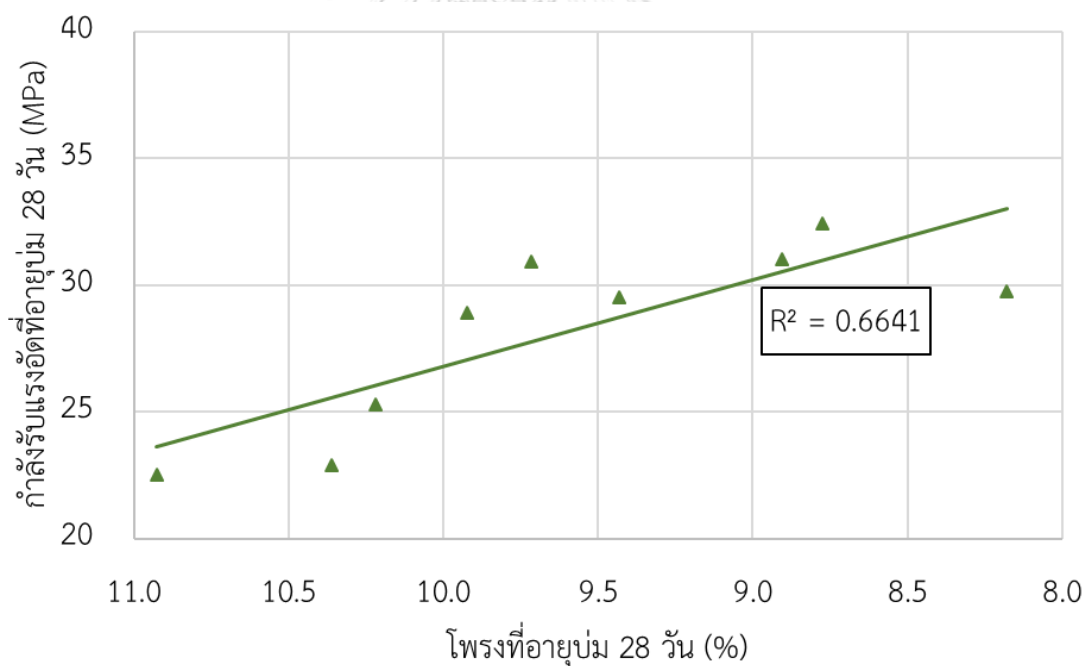
4.3.5 โพรงและการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบร้อยละโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่าร้อยละโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษหินแกรนิตมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติร้อยละเช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ส่วนผสม C-0GW-SSD, C-25GW-SSD และ C-50GW-SSD มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 4.1, 4.1 และ 3.8 ตามลำดับ และมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ และอบแห้ง ส่วนผสม C-0GW-OD, C-25GW-OD และ C-50GW-OD มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 3.9, 3.4 และ 3.6 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 9

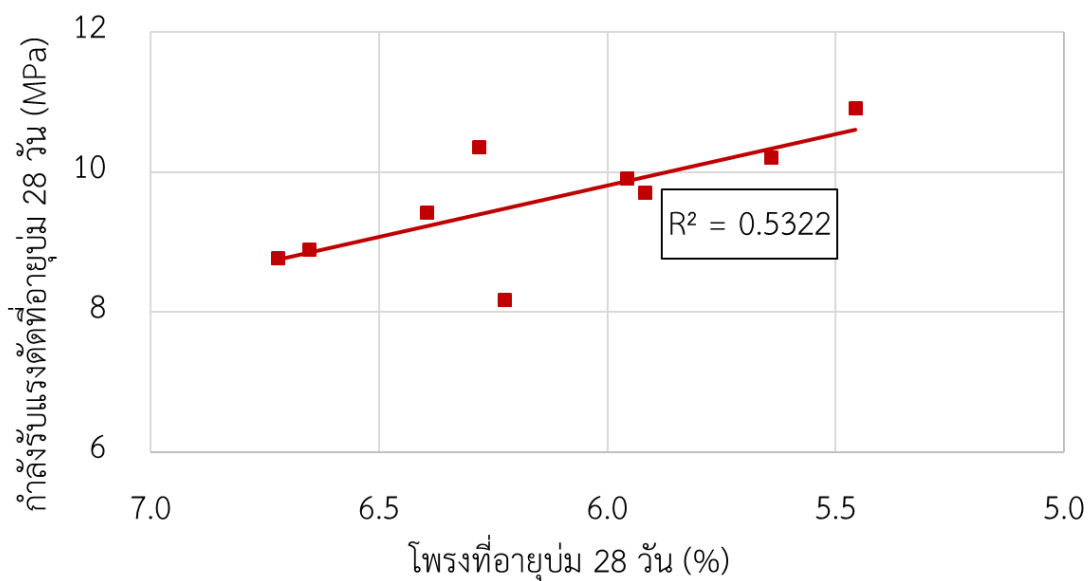
ปริมาณน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นรอบผิวของมวลรวมเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณโพรงของตัวอย่างมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างลดน้อยลง ดังรูปที่ 31 และ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด กับร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณโพรงลดลงกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon et al. [28] ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสภาวะความชื้นมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิลที่ส่งผลต่อ Slump และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้อธิบายไว้ว่าการใช้มวลรวมรีไซเคิลที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ก่อให้เกิดการเยิ้ม (bleeding) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดน้อยลง

ตารางที่ 9 โพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	โพรง (%)	การดูดซึมน้ำ (%)
C-0GW-SSD	10.4±0.02	4.1±0.06
C-25GW-SSD	10.2±0.13	4.1±0.05
C-50GW-SSD	10.9±0.21	3.8±0.16
C-0GW-AD	9.4±0.24	3.7±0.10
C-25GW-AD	8.2±0.21	3.3±0.09
C-50GW-AD	9.7±0.09	3.7±0.09
C-0GW-OD	9.9±0.17	3.9±0.20
C-25GW-OD	8.8±0.18	3.4±0.09
C-50GW-OD	8.9±0.10	3.6±0.11



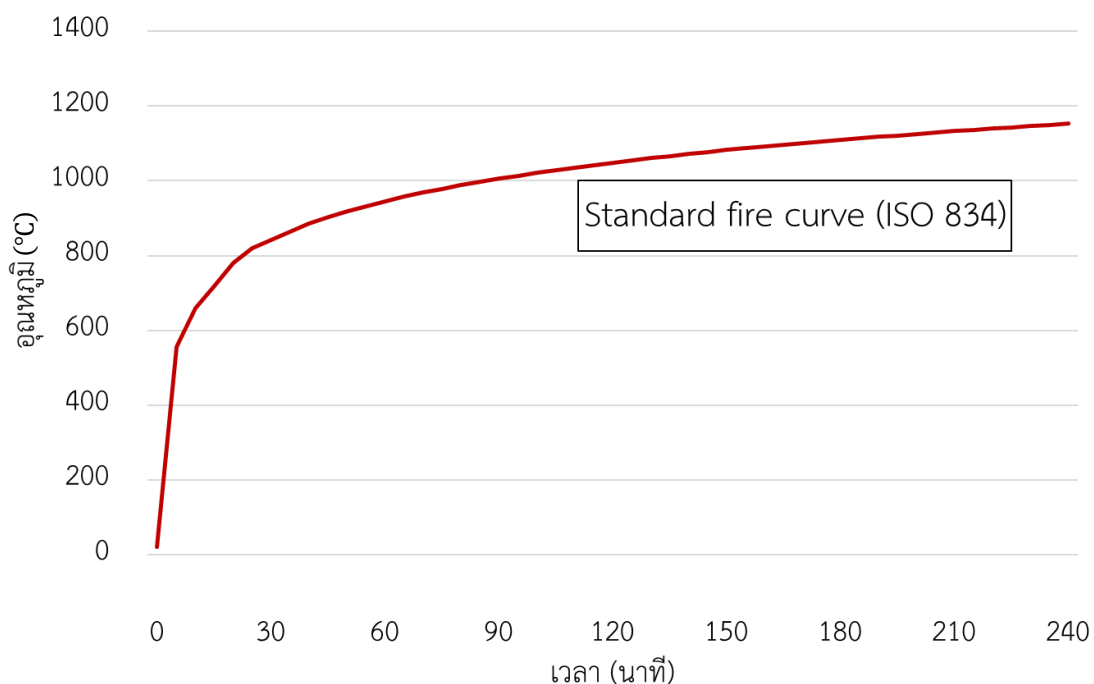
รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและร้อยละโพรงของอีโพลีเมอร์คอนกรีต

4.3.6 ความสามารถในการต้านทานสถานะเพลิงไหม้

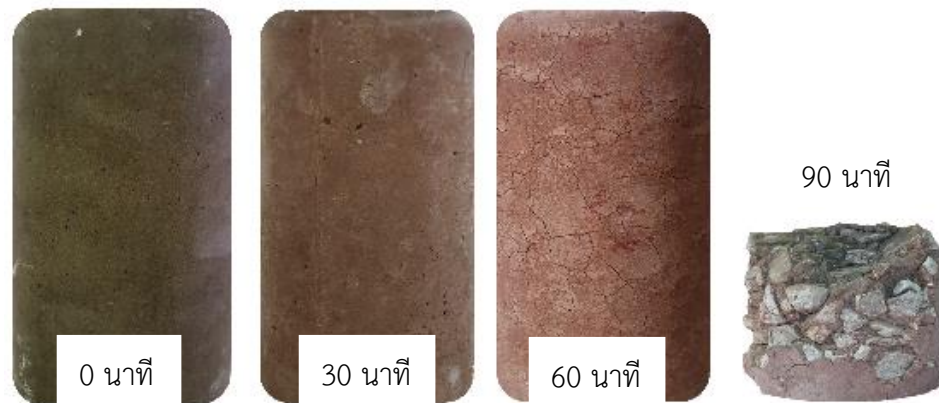
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราการไหม้ไฟของอีโพลีเมอร์คอนกรีตโดยทำการศึกษาความเสียหายและกำลังรับแรงอัดของอีโพลีเมอร์คอนกรีตภายหลังการเผาไฟที่อุณหภูมิตามมาตรฐาน ISO 834 [37] ดังแสดงในรูป 33 เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที



รูปที่ 33 อุณหภูมิไฟมาตรฐาน ISO 834 [37]

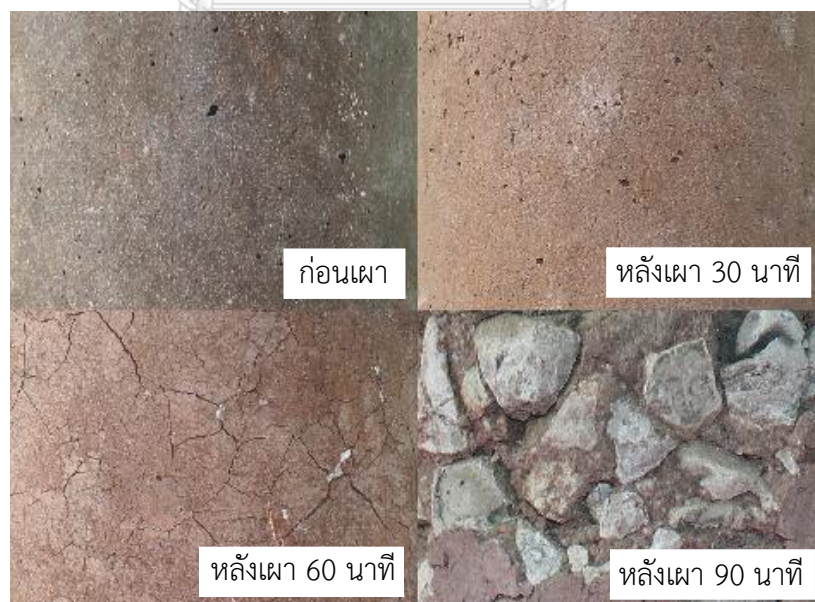
4.3.6.1 ความเสียหายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ

ความเสียหายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟวิเคราะห์ได้จากความเปลี่ยนแปลงและน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ความเปลี่ยนแปลงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนนั้นคือสีของชิ้นตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนไปหลังจากทำการทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 30 นาทีที่จะเห็นได้ว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเริ่มเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีแดง และเห็นเป็นสีแดงได้ชัดเจนขึ้นหลังจากทำการเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 34 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarker et al. [21] ที่ได้ทำการศึกษาความทนไฟของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าผิวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะเปลี่ยนเป็นสีแดงหลังจากถูกเผาที่อุณหภูมิ 800-1000 °C สีของผิวจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เปลี่ยนเป็นสีแดงนี้เกิดจากการเผาไฟที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe_2O_3 ในถ้ำลอย [22]



รูปที่ 34 จีโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 0, 30, 60 และ 90 นาที

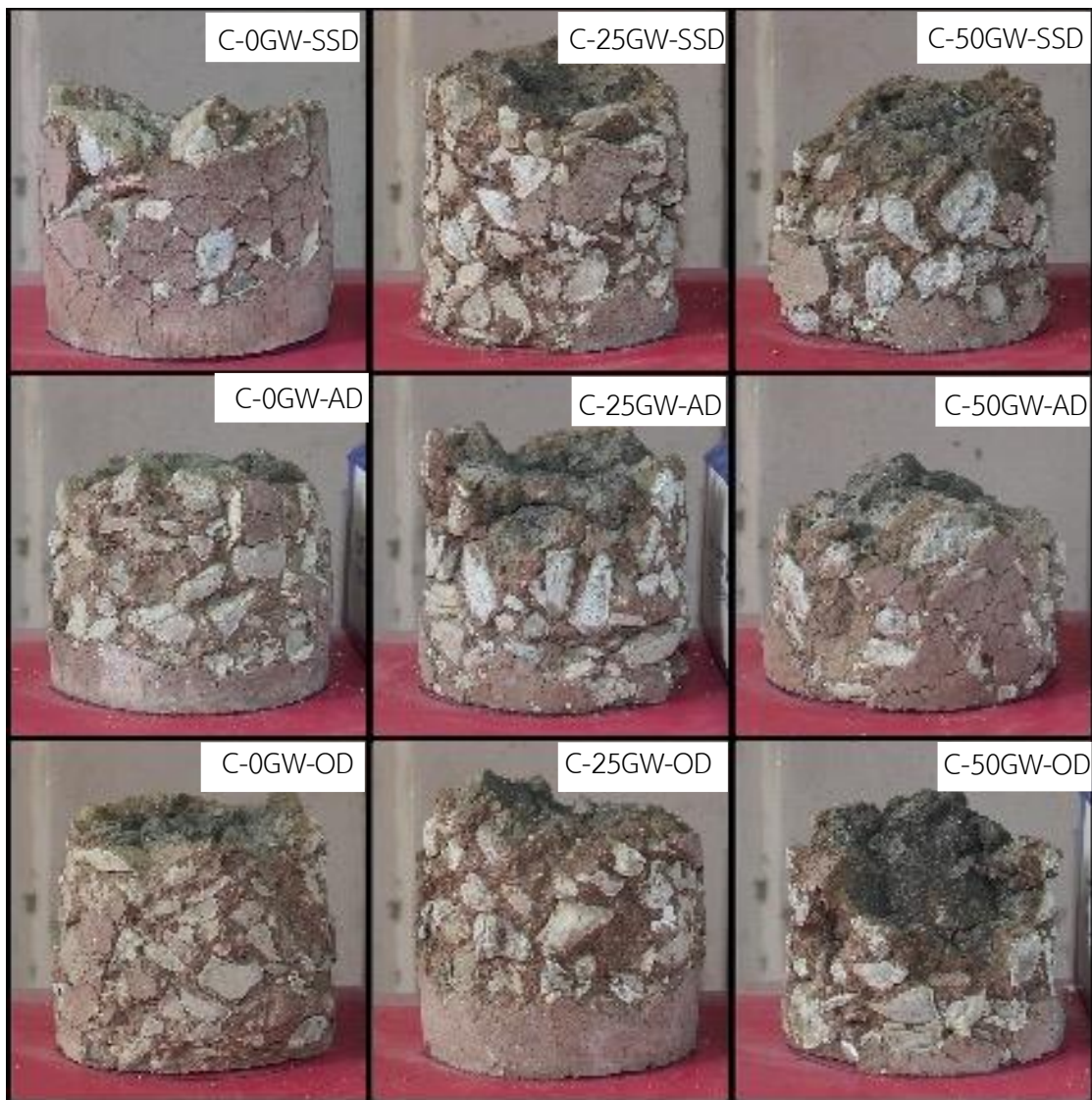
นอกจากนี้ ความเปลี่ยนแปลงของจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่สังเกตได้อีก คือรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวของก้อนจีโพลิเมอร์ รอยแตกร้าวบนผิวของก้อนจีโพลิเมอร์สามารถเห็นได้ชัดเจนหลังจากการเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 35 รอยแตกร้าวบนผิวของจีโพลิเมอร์คอนกรีตนี้เกิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้จีโพลิเมอร์เกิดการขยายตัวและเมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้จีโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการหดตัวส่งผลให้ผิวของจีโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการแตกร้าว [22]



รูปที่ 35 ผิวของตัวอย่างจีโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 0, 30, 60 และ 90 นาที

หลังจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผ่านการเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการเสื่อมสลายออกดังที่แสดงในรูปที่ 36 ซึ่งเกิดจากการที่ก้อนตัวอย่างถูกเผาไฟที่อุณหภูมิสูงทำให้น้ำที่อยู่ภายในก้อนคอนกรีตพยายามระเหยออก ส่งผลให้เกิดแรงดันไอน้ำภายในซึ่งทำให้น้ำคอนกรีตเกิดการหลุดล่อน นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์และมวลรวมเกิดการเสื่อมสลายจนกระทั่งไม่สามารถรักษาเสถียรภาพหรือสามารถคงรูปอยู่ได้ การหลุดล่อนของเนื้อคอนกรีตส่งผลให้น้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดน้อยลง

จากการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษแกรนิตมีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปใกล้เคียงกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติล้วน ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-0GW-SSD และ C-50GW-SSD มีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปหลังการเผาไฟที่ 60 นาทีเท่ากับ 6.9 และ 7.0 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสภาะความชื้นของมวลรวมพบว่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปมีค่าใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น หลังเผาไฟที่ 90 นาที ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของส่วนผสม C-25GW-SSD, C-25GW-AD และ C-25GW-OD เท่ากับ 68.5, 70.3 และ 69.1 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 10 จึงสรุปได้ว่าปริมาตรแกรนิตที่และสภาะความชื้นของมวลรวมละเอียดรีไซเคิลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละของน้ำหนักที่หายไป



รูปที่ 36 จีโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 90 นาที

ตารางที่ 10 น้ำหนักที่หายไปของจีโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟเป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที

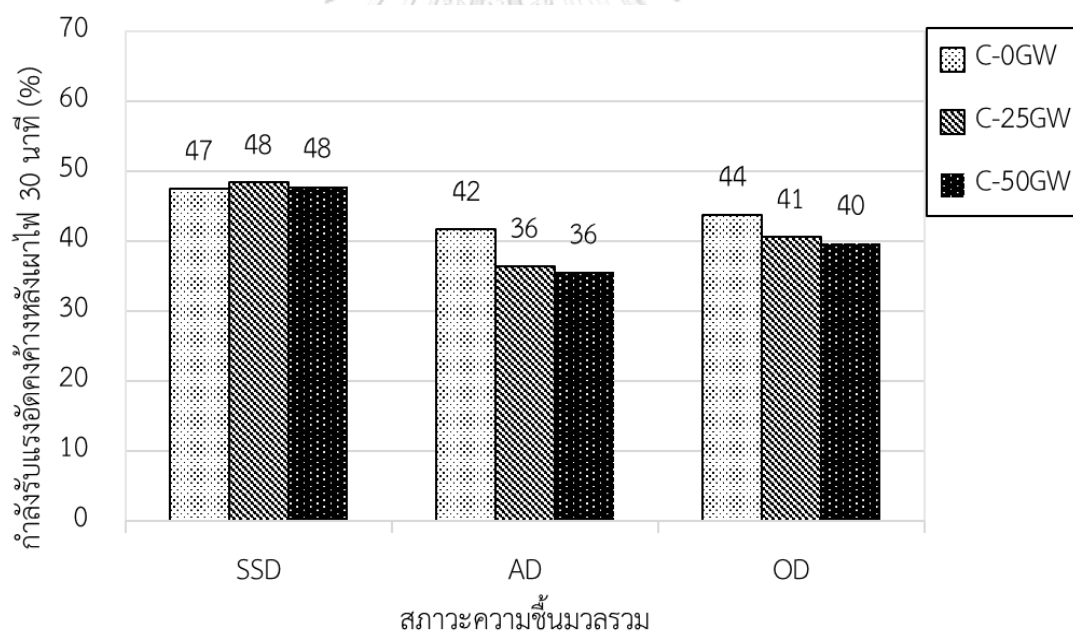
ส่วนผสม	น้ำหนักที่หายไปหลังเผาไฟของจีโพลีเมอร์คอนกรีต (%)		
	หลังเผา 30 นาที	หลังเผา 60 นาที	หลังเผา 90 นาที
C-0GW-SSD	5.0	6.9	72.0
C-25GW-SSD	5.7	7.4	68.5
C-50GW-SSD	5.3	7.0	70.4
C-0GW-AD	4.9	6.3	70.1
C-25GW-AD	5.0	6.2	70.3
C-50GW-AD	4.9	5.9	77.1
C-0GW-OD	4.2	6.9	72.1
C-25GW-OD	5.3	6.7	69.1
C-50GW-OD	4.9	6.7	79.3

4.3.6.2 กำลังรับแรงอัดของจีโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ

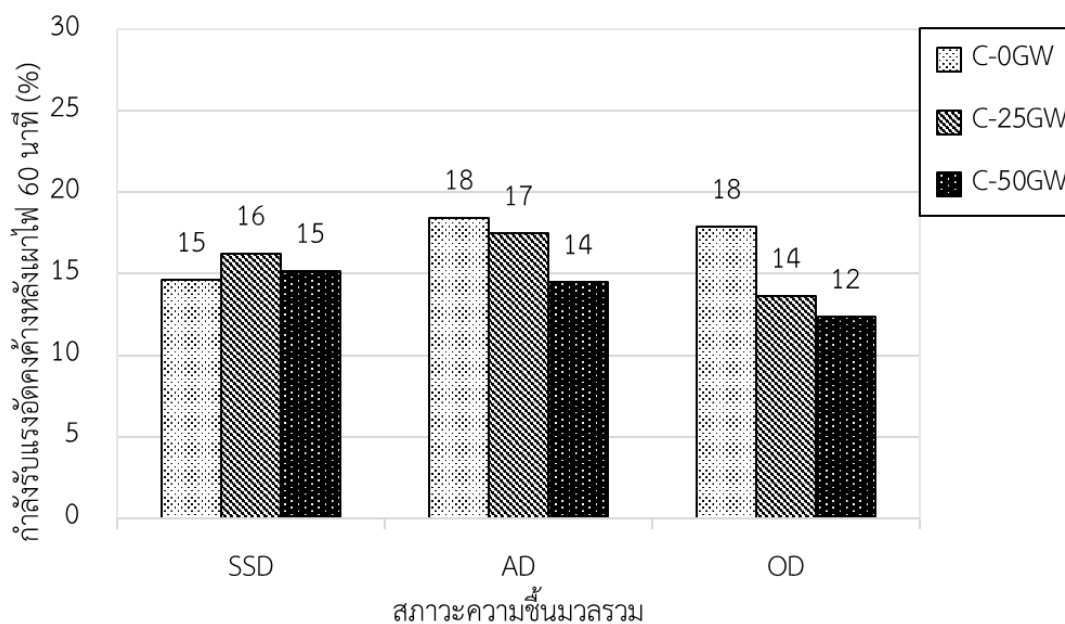
ตารางที่ 11 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟเป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของจีโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับชิ้นตัวอย่างจีโพลีเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผ่านการเผาไฟที่มีอายุบ่ม 28 วันเท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น จีโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-25GW-SSD มีค่ากำลังรับแรงอัดหลังจากการเผาไฟเป็นระยะเวลา 0, 30 และ 60 นาที เท่ากับ 25.30 ± 0.85 , 12.24 ± 0.07 และ 4.11 ± 0.22 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดคงค้างของจีโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-25GW-SSD หลังเผาไฟที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที เหลือเพียงแค่ร้อยละ 44 และ 18 ของกรณีจีโพลีเมอร์คอนกรีตที่ไม่ผ่านการเผาไฟ ดังแสดงในรูปที่ 37 และ

ตารางที่ 11 กำลังรับแรงอัดของจีโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดของจีโพลีเมอร์หลังเผาไฟ (MPa)			
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที
C-0GW-SSD	28.28 ± 0.34	13.43 ± 1.15	4.14 ± 0.09	-
C-25GW-SSD	25.30 ± 0.85	12.24 ± 0.07	4.11 ± 0.22	-
C-50GW-SSD	28.35 ± 0.38	13.57 ± 1.08	4.30 ± 0.18	-
C-0GW-AD	29.51 ± 2.75	12.30 ± 0.09	5.45 ± 0.09	-
C-25GW-AD	29.74 ± 2.18	10.84 ± 0.53	5.20 ± 0.38	-
C-50GW-AD	30.92 ± 2.61	11.00 ± 0.06	4.48 ± 0.06	-
C-0GW-OD	28.90 ± 0.97	12.66 ± 0.71	5.17 ± 0.43	-
C-25GW-OD	32.45 ± 1.92	13.17 ± 0.26	4.43 ± 0.22	-
C-50GW-OD	31.03 ± 2.88	12.32 ± 1.47	3.84 ± 0.30	-



รูปที่ 37 กำลังรับแรงอัดคงค้างของก้อนจีโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 30 นาที

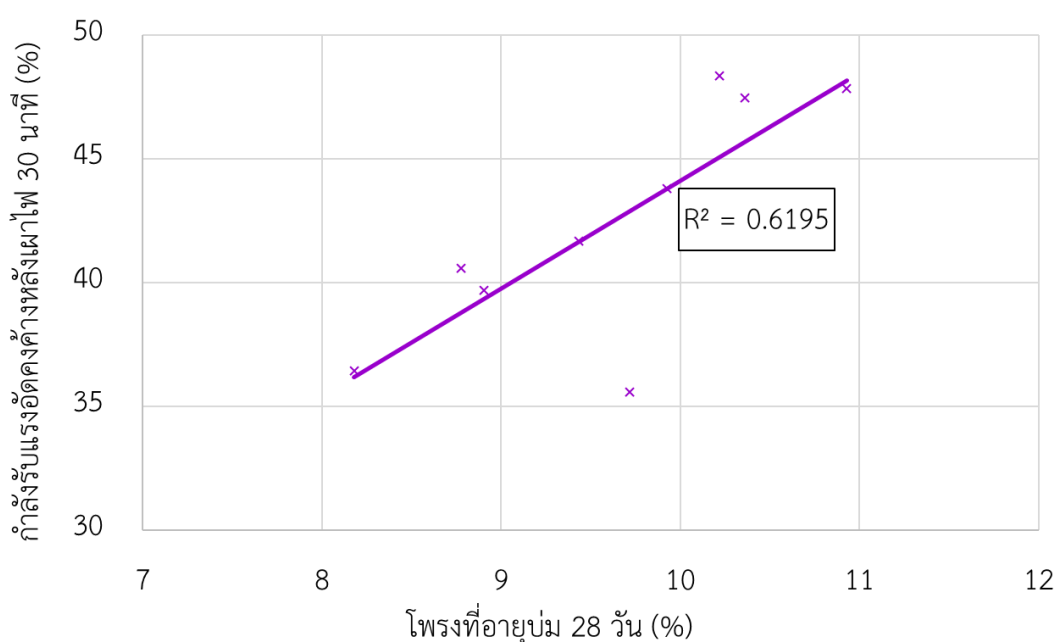


รูปที่ 38 กำลังรับแรงอัดคงค้างของก้อนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 60 นาที

รูปที่ 37 แสดงกำลังอัดคงค้างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 30 นาที จากผลการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีมวลรวมที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มีเปอร์เซ็นต์กำลังอัดคงค้างสูงกว่าส่วนผสมที่มีมวลรวมซึ่งอยู่ในสภาวะแห้ง (AD และ OD) ยกตัวอย่างเช่น เปอร์เซ็นต์กำลังอัดคงค้างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-25GW-SSD เท่ากับ 48 ในขณะที่ส่วนผสม C-25GW-AD และ C-25GW-OD มีค่ากำลังอัดคงค้างอยู่ที่ร้อยละ 36 และ 41 ตามลำดับ เนื่องจากมวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้ง (AD และ OD) มีรูพรุนน้อยกว่าทำให้เมื่อเผาไฟเกิดการแตกร้าวได้มากกว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ดังรูปที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดคงค้างหลังเผาไฟ 30 นาทีและร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากงานวิจัยของ Nuaklong et al. [52] พบว่าการหลุดล่อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นจะลดลงเมื่อตัวอย่างมีปริมาณโพรงที่สูงขึ้น เนื่องจากความดันไอที่เกิดขึ้นสามารถระบายออกทางรูพรุนได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงอย่างไรก็ตามเมื่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตผ่านการเผาไฟที่ 60 นาที พบว่ามวลรวมทั้ง 3 สภาวะ มีร้อยละกำลังอัดคงค้างที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่เศษแกรนิตพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษแกรนิตมีเปอร์เซ็นต์กำลังอัดคงค่าน้อยกว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายธรรมชาติ เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติมีความแข็งกว่าจึงทำให้สามารถรับกำลังอัดหลังเผาไฟได้ดีกว่า ยกตัวอย่างเช่นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสม C-50GW-AD มีค่ากำลังอัดคงค้างร้อยละ 14

ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสม C-25GW-AD และ C-0GW-AD ร้อยละ 28.6 และ 21.4 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 38 จากงานวิจัยของ Sarker, Kelly และ Yao [21] พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์และมวลรวมเกิดการขยายตัวที่แตกต่างกันส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดน้อยลง อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผ่านการเผาไหม้ที่ระยะเวลาานานกว่า 90 นาที ตามมาตรฐาน ISO 834 [37] จะไม่สามารถทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ เนื่องจากตัวอย่างเกิดการแตกดังแสดงในรูปที่ 36



รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดคงค้างหลังเผาไฟ 30 นาทีและร้อยละโพรงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการนำเศษหินแกรนิตที่เหลือจากกระบวนการโม่หินมาแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0, 25 และ 50 โดยน้ำหนักในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของสถานะความชื้นในมวลรวมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต โดยศึกษามวลรวมละเอียดซึ่งอยู่ในสถานะอิมตัวผิวแห้ง (SSD), แห้งในอากาศ (AD) และอบแห้ง (OD)

งานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต การทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ประกอบด้วย ความสามารถในการไหล, เวลาการก่อตัว, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, โพรง, การดูดซึมน้ำ และความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก ในขณะที่การทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ ความสามารถในการไหล, เวลาการก่อตัว, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, โพรง, การดูดซึมน้ำ และความต้านทานต่อสภาวะเพลิงไหม้

จากการทดสอบพบว่า การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่ว่าจะเป็นความสามารถในการทำงานได้ เวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดดีขึ้น โดยความสามารถในการทำงานได้ เวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 90 วันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเศษแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 50 โดยน้ำหนักในสถานะแห้งในอากาศ สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติล้วนในสถานะแห้งในอากาศ ร้อยละ 28.47, 8.82 และ 19.07 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตนั้นส่งผลเชิงลบต่อกำลังรับแรงดัด เปรอร์เซ็นต์โพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเศษแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 50 โดยน้ำหนักในสถานะอิมตัวผิวแห้งมีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติล้วนในสถานะอิมตัวผิวแห้งร้อยละ 26.87 เปรอร์เซ็นต์โพรงของส่วนผสมที่มีเศษแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 50 โดยน้ำหนักในสถานะอิมตัวผิวแห้งเพิ่มขึ้นจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติล้วนในสถานะอิมตัวผิวแห้งร้อยละ 14.47 อย่างไรก็ตามการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากผลการทดสอบที่ได้ออกมาแล้วมีความใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของสภาวะความชื้นในมวลรวม พบว่าการใช้มวลรวมละเอียดที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้น แต่กลับส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากความชื้นของมวลรวมส่งผลให้เกิดการเอนน้ำภายในส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Interfacial Transition Zone, ITZ) ลดลงซึ่งความแข็งแรงของแนวรอยต่อนี้ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่ากำลังอัด อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อใช้มวลรวมซึ่งอยู่ในสภาวะแห้ง (AD และ OD)

การแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตนั้นส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้และกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน ส่วนผสมที่มีเศษแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 50 โดยน้ำหนักในสภาวะแห้งในอากาศ มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายธรรมชาติล้วนในสภาวะแห้งในอากาศร้อยละ 28.64 ในทางตรงกันข้ามการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตกลับส่งผลเสียต่อเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงดัด โพรงการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการต้านทานสภาวะเพลิงไหม้ โดยกำลังรับแรงดัดของส่วนผสมที่มีเศษแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 50 โดยน้ำหนักในสภาวะแห้งในอากาศ ลดลงจากส่วนผสมที่มีทรายธรรมชาติล้วนในสภาวะแห้งในอากาศร้อยละ 7.5

การใช้มวลรวมละเอียดที่อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันกลับส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดน้อยลงซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ อย่างไรก็ตามสภาวะความชื้นในมวลรวม ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการหลุดล่อนและกำลังอัดคงค้างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 60 นาที

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพบว่าเศษหินแกรนิตสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ โดยสามารถแทนที่ได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ จะดีขึ้นเมื่อใช้มวลรวมที่อยู่ในสภาวะแห้ง (AD และ OD)

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้พบว่าเศษหินแกรนิตสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตยังมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษหินแกรนิตในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น



ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบวัสดุ

ก.1 สมบัติของมวลรวม

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติแบบกระทุ้งแน่นแห้ง

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
น้ำหนักถังทรงกระบอก (kg)	4.255
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่น้ำจนเต็ม (kg)	10.03
น้ำหนักน้ำ (kg)	5.775
ปริมาตรถังทรงกระบอก (m ³)	0.00579
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่ทรายธรรมชาติแห้งกระทุ้งแน่น (kg)	13.745
น้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg)	9.49
หน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m ³)	1639

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
ปริมาตรขวดรูปชมพู่ (cm ³)	500.00
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ (g)	141.30
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (g)	638.40
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำและทราย (g)	939.40
น้ำหนักทรายสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (g)	500.20
น้ำหนักทรายสภาวะอบแห้ง (g)	496.60
ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง	2.51
ค่าการดูดซึมน้ำของทราย (%)	0.72

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ

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

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของเศษแกรนิตแบบกระทุ้งแน่นแห้ง

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
น้ำหนักถึงทรงกระบอก (kg)	4.201
น้ำหนักถึงทรงกระบอกที่ใส่น้ำจนเต็ม (kg)	9.958
น้ำหนักน้ำ (kg)	5.757
ปริมาตรถึงทรงกระบอก (m^3)	0.00577
น้ำหนักถึงทรงกระบอกที่ใส่ทรายธรรมชาติแห้งกระทุ้งแน่น (kg)	13.395
น้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg)	9.194
หน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m^3)	1593

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซึมน้ำและค่าความถ่วงจำเพาะของเศษแกรนิต

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
ปริมาตรขวดรูปชมพู่ (cm ³)	500.00
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ (g)	157.50
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (g)	657.18
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำและทราย (g)	963.46
น้ำหนักทรายสภาวะอิมตัวผิวแห้ง (g)	500.13
น้ำหนักทรายสภาวะอบแห้ง (g)	495.84
ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายสภาวะอิมตัวผิวแห้ง	2.58
ค่าการดูดซึมน้ำของทราย (%)	0.87

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษแกรนิต

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

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของส่วนผสม 25GW (ทรายธรรมชาติ 75%+
เศษแกรนิต 25%)

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

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของส่วนผสม 50GW (ทรายธรรมชาติ 50%+ เศษแกรนิต 50%)

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

ก.2 สมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

ตารางที่ 20 ความถ่วงจำเพาะแก้วลอย

รายการทดสอบแก้วลอย	ผลการทดลอง
ระดับน้ำมันก๊าดก่อนการทดลอง (ml)	1.0
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (°C)	20.0
น้ำหนักถาดและแก้วลอยก่อนทดลอง (g)	567.7
น้ำหนักถาดและแก้วลอยที่เหลือ (g)	526.4
น้ำหนักแก้วลอยที่ใช้ในการทดลอง (g)	41.3
ระดับน้ำมันก๊าดหลังการทดลอง (ml)	0.5
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (°C)	21.0
ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (ml)	19.3
ความถ่วงจำเพาะของแก้วลอย	2.28

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 21 ข้อมูลดิบของการทดสอบหาค่าการไหลแผ่

ส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (mm)			
	1	2	3	4
M-0GW-SSD	210	195	207	200
M-0GW-AD	188	195	196	203
M-0GW-OD	182	190	190	187
M-25GW-SSD	227	230	231	240
M-25GW-AD	223	221	224	226
M-25GW-OD	226	227	227	231
M-50GW-SSD	222	228	223	229
M-50GW-AD	236	235	237	238
M-50GW-OD	223	233	227	237

ตารางที่ 22 ข้อมูลดิบของการทดสอบเวลาการก่อตัว

ส่วนผสม	เวลาหลังผสม (นาที)	ระยะเข็มจม (mm)
M-0GW-SSD	20	40
	25	40
	30	30
	35	3
	40	2
	45	1

ส่วนผสม	เวลาหลังผสม (นาที)	ระยะเข็มจม (mm)
M-0GW-AD	20	40
	25	40
	30	39
	35	9
	40	2
	45	1
M-0GW-OD	20	40
	25	40
	30	40
	35	40
	40	37
	45	7
	50	1
M-25GW-SSD	20	38
	25	38
	30	38
	35	36
	40	3
	45	1
M-25GW-AD	20	40
	25	31
	30	30
	35	30
	40	29
	45	6
	50	3
	55	0

ส่วนผสม	เวลาหลังผสม (นาที)	ระยะเข็มจม (mm)
M-25GW-OD	20	40
	25	40
	30	40
	35	40
	40	39
	45	39
	50	7
	55	4
M-50GW-SSD	60	0
	20	39
	25	39
	30	37
	35	6
	40	1
M-50GW-AD	45	0
	20	40
	25	39
	30	39
	35	10
	40	1
	45	0

ส่วนผสม	เวลาหลังผสม (นาที)	ระยะเข็มจม (mm)
M-50GW-OD	20	40
	25	40
	30	40
	35	40
	40	37
	45	12
	50	4
	55	0

ตารางที่ 23 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-0GW-SSD-1	51.30	51.00	50.30	27.29
M-0GW-SSD-2	51.30	50.90	51.60	29.83
M-0GW-SSD-3	51.90	50.60	50.00	31.97
M-0GW-AD-1	50.00	50.00	50.00	29.48
M-0GW-AD-2	49.50	50.00	50.00	32.98
M-0GW-AD-3	51.50	50.00	50.00	28.59
M-0GW-OD-1	51.40	52.30	51.30	31.35
M-0GW-OD-2	51.20	50.80	51.10	31.64
M-0GW-OD-3	51.40	51.40	51.30	32.97
M-25GW-SSD-1	51.80	50.50	51.50	28.19
M-25GW-SSD-2	51.00	50.30	51.10	32.28
M-25GW-SSD-3	51.30	50.90	51.60	27.03
M-25GW-AD-1	52.00	51.00	50.70	27.96
M-25GW-AD-2	51.00	51.30	51.00	26.65
M-25GW-AD-3	51.50	50.80	50.80	29.10

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-25GW-OD-1	51.10	49.20	51.40	31.17
M-25GW-OD-2	52.00	51.80	50.50	30.66
M-25GW-OD-3	49.50	52.80	50.40	29.10
M-50GW-SSD-1	52.00	50.00	50.60	29.99
M-50GW-SSD-2	52.30	50.80	51.00	30.05
M-50GW-SSD-3	50.40	50.20	51.00	34.03
M-50GW-AD-1	51.70	51.80	51.50	34.24
M-50GW-AD-2	52.40	51.40	51.40	34.94
M-50GW-AD-3	51.10	50.50	50.70	32.24
M-50GW-OD-1	51.60	52.20	51.80	23.94
M-50GW-OD-2	51.70	50.70	51.00	30.06
M-50GW-OD-3	50.50	50.50	51.70	35.32

ตารางที่ 24 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 14 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-0GW-SSD-1	51.50	51.90	52.90	33.19
M-0GW-SSD-2	50.40	50.90	52.40	32.34
M-0GW-SSD-3	51.30	50.50	50.30	36.41
M-0GW-AD-1	51.00	50.80	51.00	32.42
M-0GW-AD-2	52.20	53.10	51.60	34.77
M-0GW-AD-3	50.40	50.90	51.50	38.86
M-0GW-OD-1	51.30	50.60	50.00	36.24
M-0GW-OD-2	50.80	50.50	50.70	31.55
M-0GW-OD-3	50.20	50.50	50.20	33.32
M-25GW-SSD-1	52.20	51.10	51.00	32.77
M-25GW-SSD-2	52.00	52.00	52.10	19.98
M-25GW-SSD-3	51.70	50.70	51.40	23.29

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-25GW-AD-1	50.50	52.30	50.40	33.40
M-25GW-AD-2	52.00	50.00	51.50	39.53
M-25GW-AD-3	50.00	50.80	50.70	42.51
M-25GW-OD-1	50.80	51.00	51.00	38.78
M-25GW-OD-2	50.90	51.30	51.60	37.93
M-25GW-OD-3	51.60	50.40	52.90	32.56
M-50GW-SSD-1	50.00	50.80	51.00	30.11
M-50GW-SSD-2	50.00	50.00	50.80	34.83
M-50GW-SSD-3	50.80	51.00	50.00	37.14
M-50GW-AD-1	51.00	51.00	50.20	30.42
M-50GW-AD-2	50.00	50.50	50.60	35.71
M-50GW-AD-3	50.50	52.00	51.00	38.35
M-50GW-OD-1	52.50	50.00	52.50	42.82
M-50GW-OD-2	50.00	50.00	50.00	44.32
M-50GW-OD-3	52.50	50.00	50.00	50.27

ตารางที่ 25 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-0GW-SSD-1	52.40	51.00	50.20	45.81
M-0GW-SSD-2	51.40	50.00	50.40	37.73
M-0GW-SSD-3	51.00	52.00	51.60	36.04
M-0GW-AD-1	52.70	51.00	50.70	51.65
M-0GW-AD-2	51.10	51.80	50.50	47.23
M-0GW-AD-3	50.00	51.00	50.70	47.13
M-0GW-OD-1	50.00	50.50	51.00	43.13
M-0GW-OD-2	51.10	50.70	51.00	41.79
M-0GW-OD-3	51.80	51.20	51.00	47.25

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-25GW-SSD-1	52.40	50.70	50.80	43.47
M-25GW-SSD-2	53.00	49.90	62.00	43.79
M-25GW-SSD-3	51.20	51.00	50.50	39.53
M-25GW-AD-1	50.00	50.00	51.50	39.56
M-25GW-AD-2	50.00	50.00	51.00	29.09
M-25GW-AD-3	51.50	50.00	50.50	53.09
M-25GW-OD-1	52.00	49.60	50.60	42.39
M-25GW-OD-2	52.60	50.40	51.80	51.42
M-25GW-OD-3	53.20	52.00	52.20	47.15
M-50GW-SSD-1	52.90	50.70	51.00	42.29
M-50GW-SSD-2	51.00	50.00	50.70	43.45
M-50GW-SSD-3	50.30	50.50	50.20	38.52
M-50GW-AD-1	50.80	50.50	49.90	39.05
M-50GW-AD-2	50.40	50.50	50.70	44.41
M-50GW-AD-3	50.70	50.00	51.70	41.35
M-50GW-OD-1	50.00	49.80	50.00	38.74
M-50GW-OD-2	50.30	50.50	50.30	35.44
M-50GW-OD-3	49.70	50.00	50.60	36.21

ตารางที่ 26 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุป่ม 90 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-0GW-SSD-1	49.80	49.60	50.40	62.09
M-0GW-SSD-2	49.90	50.70	50.60	60.07
M-0GW-SSD-3	51.00	50.00	50.20	61.30
M-0GW-AD-1	50.40	50.00	51.70	52.64
M-0GW-AD-2	51.30	52.90	51.10	54.97
M-0GW-AD-3	50.50	50.00	50.60	57.04

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
M-0GW-OD-1	50.40	53.00	50.60	51.46
M-0GW-OD-2	51.90	50.20	50.70	54.62
M-0GW-OD-3	51.60	50.50	50.80	60.67
M-25GW-SSD-1	49.50	49.00	50.00	55.50
M-25GW-SSD-2	50.00	50.00	50.10	67.51
M-25GW-SSD-3	51.00	50.00	50.00	42.51
M-25GW-AD-1	51.00	48.50	50.00	69.34
M-25GW-AD-2	50.50	50.00	50.50	70.89
M-25GW-AD-3	50.00	50.00	50.00	46.48
M-25GW-OD-1	50.00	49.50	50.00	61.37
M-25GW-OD-2	50.00	48.00	51.00	63.81
M-25GW-OD-3	51.00	50.00	50.00	73.69
M-50GW-SSD-1	50.70	49.80	50.50	58.42
M-50GW-SSD-2	51.50	50.00	50.30	64.68
M-50GW-SSD-3	50.00	49.70	51.00	50.96
M-50GW-AD-1	50.50	50.50	50.10	65.95
M-50GW-AD-2	50.00	50.40	50.40	57.50
M-50GW-AD-3	53.00	50.40	50.30	72.42
M-50GW-OD-1	50.50	52.20	50.50	64.96
M-50GW-OD-2	52.00	50.50	50.00	65.32
M-50GW-OD-3	50.50	50.50	50.30	66.29

ตารางที่ 27 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังดัด (MPa)
	กว้าง	ลึก	ยาว	
M-0GW-SSD-1	4.00	4.05	12.00	6.24
M-0GW-SSD-2	4.04	4.05	12.00	5.92
M-0GW-SSD-3	4.00	4.04	12.00	5.68
M-0GW-AD-1	4.06	4.00	12.10	5.29
M-0GW-AD-2	4.03	4.00	12.40	5.94
M-0GW-AD-3	4.03	4.04	11.50	5.53
M-0GW-OD-1	4.06	4.03	12.17	4.02
M-0GW-OD-2	4.13	4.10	12.22	4.97
M-0GW-OD-3	4.13	4.02	11.67	4.48
M-25GW-SSD-1	4.05	4.00	12.00	3.49
M-25GW-SSD-2	4.03	4.02	12.00	3.52
M-25GW-SSD-3	3.96	4.12	12.00	4.47
M-25GW-AD-1	4.02	4.05	11.65	4.00
M-25GW-AD-2	4.03	4.12	12.40	4.48
M-25GW-AD-3	4.06	4.09	12.20	3.96
M-25GW-OD-1	4.06	4.05	12.11	3.53
M-25GW-OD-2	4.05	4.06	12.10	3.73
M-25GW-OD-3	4.07	4.10	12.37	3.41
M-50GW-SSD-1	4.05	4.06	12.00	4.87
M-50GW-SSD-2	4.10	4.07	12.00	3.85
M-50GW-SSD-3	4.08	4.17	12.00	3.73
M-50GW-AD-1	4.02	4.05	11.65	4.46
M-50GW-AD-2	4.03	4.12	12.40	3.89
M-50GW-AD-3	4.06	4.09	12.20	3.65
M-50GW-OD-1	4.06	4.05	12.11	3.87
M-50GW-OD-2	4.05	4.06	12.10	4.15
M-50GW-OD-3	4.07	4.10	12.37	3.29

ตารางที่ 28 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุป่ม 14 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังดัด (MPa)
	กว้าง	ลึก	ยาว	
M-0GW-SSD-1	4.02	4.01	12.00	7.48
M-0GW-SSD-2	4.00	4.03	12.00	7.01
M-0GW-SSD-3	3.99	4.01	12.00	6.99
M-0GW-AD-1	4.04	4.03	12.44	8.15
M-0GW-AD-2	4.07	4.05	12.26	7.40
M-0GW-AD-3	4.01	4.07	12.08	6.53
M-0GW-OD-1	4.11	3.91	12.45	5.66
M-0GW-OD-2	4.05	4.11	12.40	5.81
M-0GW-OD-3	4.08	4.04	12.14	5.69
M-25GW-SSD-1	4.05	4.02	12.34	5.49
M-25GW-SSD-2	4.08	4.05	12.13	4.59
M-25GW-SSD-3	4.04	4.04	12.09	4.86
M-25GW-AD-1	4.04	4.07	12.00	6.33
M-25GW-AD-2	4.09	4.05	12.00	6.74
M-25GW-AD-3	4.09	3.98	12.00	6.32
M-25GW-OD-1	4.02	4.03	12.46	5.05
M-25GW-OD-2	4.06	4.07	12.12	5.83
M-25GW-OD-3	4.02	4.07	11.68	5.32
M-50GW-SSD-1	4.05	4.18	11.62	4.59
M-50GW-SSD-2	4.18	4.07	12.15	4.70
M-50GW-SSD-3	4.18	4.10	12.22	4.86
M-50GW-AD-1	4.06	4.06	12.00	6.44
M-50GW-AD-2	4.05	4.05	12.00	5.85
M-50GW-AD-3	4.10	4.10	12.00	5.48
M-50GW-OD-1	4.16	4.08	12.18	6.00
M-50GW-OD-2	4.03	4.09	12.45	5.92
M-50GW-OD-3	4.03	4.05	12.10	6.20

ตารางที่ 29 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังดัด (MPa)
	กว้าง	ลึก	ยาว	
M-0GW-SSD-1	4.01	4.05	11.63	7.81
M-0GW-SSD-2	4.00	4.00	12.10	9.18
M-0GW-SSD-3	4.04	4.08	12.40	9.28
M-0GW-AD-1	4.07	4.05	12.10	9.44
M-0GW-AD-2	4.00	4.03	12.23	9.20
M-0GW-AD-3	4.05	4.02	12.13	8.89
M-0GW-OD-1	4.22	4.00	12.23	6.56
M-0GW-OD-2	4.10	4.12	12.55	7.59
M-0GW-OD-3	4.10	4.06	12.13	6.81
M-25GW-SSD-1	4.03	4.06	12.00	6.57
M-25GW-SSD-2	4.02	4.06	12.00	7.04
M-25GW-SSD-3	4.06	4.01	12.00	7.03
M-25GW-AD-1	4.00	4.02	12.20	6.83
M-25GW-AD-2	4.16	4.16	12.17	7.16
M-25GW-AD-3	4.02	4.08	12.10	7.45
M-25GW-OD-1	4.18	4.13	12.20	6.24
M-25GW-OD-2	4.08	4.03	12.46	7.19
M-25GW-OD-3	4.07	4.06	12.13	6.89
M-50GW-SSD-1	4.10	4.10	12.00	5.69
M-50GW-SSD-2	4.06	4.02	12.00	6.94
M-50GW-SSD-3	4.14	4.07	12.00	6.62
M-50GW-AD-1	4.01	4.05	11.59	6.59
M-50GW-AD-2	4.02	4.05	12.40	7.91
M-50GW-AD-3	4.00	4.02	12.05	7.52
M-50GW-OD-1	4.07	4.10	12.10	6.61
M-50GW-OD-2	4.09	4.05	12.42	7.79
M-50GW-OD-3	4.03	4.08	11.66	7.01

ตารางที่ 30 ข้อมูลดิบของการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำ

ส่วนผสม	น้ำหนักตัวอย่าง (g)				ผลการทดสอบ	
	ที่สถานะ อบแห้ง	ที่สถานะ อิมตัวผิว แห้ง	ชั่งใน อากาศ	ชั่งในน้ำ	โพรง (%)	การดูดซึมน้ำ (%)
M-0GW-SSD-1	266.41	279.20	282.20	156.90	12.60	4.58
M-0GW-SSD-2	262.61	275.63	278.30	154.90	12.71	4.72
M-0GW-SSD-3	275.08	288.81	291.40	162.30	12.64	4.75
M-0GW-AD-1	281.70	293.83	296.50	164.80	11.24	4.13
M-0GW-AD-2	263.89	275.21	277.50	154.60	11.07	4.11
M-0GW-AD-3	271.10	283.28	286.10	162.30	12.12	4.30
M-0GW-OD-1	282.51	294.96	297.50	165.60	11.36	4.22
M-0GW-OD-2	277.44	289.39	291.70	163.00	11.08	4.13
M-0GW-OD-3	275.04	287.36	289.40	160.90	11.18	4.29
M-25GW-SSD-1	267.00	283.40	285.00	159.10	14.30	5.79
M-25GW-SSD-2	270.29	286.75	288.40	160.30	14.14	5.74
M-25GW-SSD-3	275.15	291.55	293.20	163.70	13.94	5.63
M-25GW-AD-1	278.75	295.15	297.20	166.60	14.13	5.56
M-25GW-AD-2	272.82	288.70	290.90	163.50	14.19	5.50
M-25GW-AD-3	272.10	287.66	289.70	162.30	13.81	5.41
M-25GW-OD-1	265.50	281.70	283.10	159.00	14.18	5.75
M-25GW-OD-2	262.93	278.21	279.80	158.10	13.86	5.49
M-25GW-OD-3	264.79	280.02	281.50	158.40	13.57	5.44
M-50GW-SSD-1	274.08	291.64	293.60	165.10	15.19	6.02
M-50GW-SSD-2	263.77	279.85	281.60	158.20	14.45	5.75
M-50GW-SSD-3	271.14	287.75	289.80	163.00	14.72	5.77
M-50GW-AD-1	278.19	289.64	291.70	164.60	10.63	3.95
M-50GW-AD-2	274.76	286.66	288.60	162.20	10.95	4.15
M-50GW-AD-3	276.60	288.58	290.70	163.80	11.11	4.15
M-50GW-OD-1	276.31	291.15	292.80	165.60	12.96	5.10

M-50GW-OD-2	276.29	291.02	292.80	166.20	13.04	5.06
-------------	--------	--------	--------	--------	-------	------

ตารางที่ 31 ข้อมูลดิบของการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก

ส่วนผสม	น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่กรด (g)					
	ก่อนแช่กรด	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	84 วัน
M-0GW-SSD-1	288.3	286.6	281.5	259.1	188.6	86.3
M-0GW-SSD-2	294.3	293.8	289.2	268.7	189.0	88.6
M-0GW-SSD-3	273.1	272.4	266.5	247.0	172.7	72.8
M-0GW-AD-1	287.3	286.2	282.7	273.5	192.1	91.8
M-0GW-AD-2	277.1	276.5	273.0	255.3	182.5	87.5
M-0GW-AD-3	284.3	283.7	279.1	274.6	181.2	94.8
M-0GW-OD-1	278.2	277.3	272.2	268.5	166.0	85.7
M-0GW-OD-2	285.1	284.4	280.0	273.6	173.4	92.7
M-0GW-OD-3	284.1	284.1	279.9	272.6	178.7	86.6
M-25GW-SSD-1	298.4	297.5	293.6	282.7	187.5	96.1
M-25GW-SSD-2	291.0	290.3	286.9	281.2	192.3	96.1
M-25GW-SSD-3	288.1	287.2	282.2	275.0	181.1	90.8
M-25GW-AD-1	287.3	286.5	281.1	272.5	179.7	91.2
M-25GW-AD-2	298.7	297.9	293.1	282.2	199.9	103.1
M-25GW-AD-3	278.3	278.1	273.3	261.0	176.4	90.8
M-25GW-OD-1	281.1	278.9	274.0	257.4	173.8	87.3
M-25GW-OD-2	289.1	288.0	285.4	271.0	193.7	101.1
M-25GW-OD-3	291.3	289.7	285.4	269.4	190.6	98.2
M-50GW-SSD-1	289.7	288.2	284.1	277.6	197.0	100.9
M-50GW-SSD-2	286.5	285.5	282.5	275.1	188.2	100.5
M-50GW-SSD-3	288.1	288.3	284.6	275.3	190.2	95.5
M-50GW-AD-1	289.4	289.5	284.8	273.4	198.1	110.4
M-50GW-AD-2	287.0	286.4	282.1	279.2	201.6	109.3
M-50GW-AD-3	287.5	286.7	283.3	271.3	195.9	119.2
M-50GW-OD-1	296.6	296.2	291.6	282.7	201.2	110.3

M-50GW-OD-2	305.0	305.3	301.7	290.8	201.2	115.2
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 32 ข้อมูลดิบของการทดสอบหาค่าการไหลแผ่

ส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (cm)			
	1	2	3	4
C-0GW-SSD	64.0	63.0	60.0	63.0
C-0GW-AD	60.0	61.0	61.5	60.5
C-0GW-OD	63.0	61.0	60.0	60.0
C-25GW-SSD	64.0	64.0	65.0	63.0
C-25GW-AD	63.0	65.0	67.0	67.0
C-25GW-OD	64.0	62.0	63.0	62.0
C-50GW-SSD	67.0	67.5	68.0	68.5
C-50GW-AD	63.0	64.0	63.5	65.0
C-50GW-OD	67.0	66.0	65.0	66.0

ตารางที่ 33 ข้อมูลดิบของการทดสอบเวลาการก่อตัว

ส่วนผสม	เวลาหลังผสม (นาที)	พื้นที่หวักด (ตารางนิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้าน (ปอนด์/ตารางนิ้ว)
C-0GW-SSD	111	1	142	142
	132	0.5	138	276
	172	0.25	112	448
	192	0.1	102	1020
	227	0.05	68	1360
	257	0.025	72	2880

ส่วนผสม	เวลาหลังผสม (นาที)	พื้นที่หั่วกด (ตารางนิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้าน (ปอนด์/ตารางนิ้ว)
C-0GW-AD	126	0.25	32	128
	144	0.1	18	180
	164	0.05	16	320
	184	0.025	16	640
	194	0.025	24	960
C-0GW-OD	93	1	16	16
	124	0.5	68	136
	155	0.25	74	296
	197	0.1	52	520
	215	0.05	28	560
	267	0.025	24	960
C-25GW-SSD	50	1	16	16
	80	0.5	152	304
	95	0.25	120	480
	109	0.1	92	920
	123	0.05	76	1520
	134	0.025	48	1920
C-25GW-AD	75	1	50	50
	120	0.5	140	280
	135	0.25	104	416
	152	0.1	60	600
	172	0.05	42	840
	195	0.025	24	960

ส่วนผสม	เวลาหลังผสม (นาที)	พื้นที่หั่วกด (ตารางนิ้ว)	แรงกด (ปอนด์)	แรงต้าน (ปอนด์/ ตารางนิ้ว)
C-25GW-OD	87	1	18	18
	132	0.5	76	152
	167	0.25	78	312
	207	0.1	54	540
	227	0.05	34	680
	247	0.025	26	1040
C-50GW-SSD	66	1	116	116
	85	0.5	186	372
	91	0.25	100	400
	107	0.1	52	520
	121	0.05	30	600
	152	0.025	42	1680
C-50GW-AD	91	1	72	72
	106	0.5	54	108
	121	0.25	34	136
	136	0.1	24	240
	151	0.05	28	560
	181	0.025	14	560
C-50GW-OD	85	1	12	12
	102	0.5	48	96
	144	0.25	32	128
	156	0.1	12	120
	167	0.05	16	320
	245	0.025	18	720

ตารางที่ 34 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-0GW-SSD-1	101.1	101.5	100.0	16.4
C-0GW-SSD-2	101.8	102.7	100.0	16.3
C-0GW-SSD-3	99.6	100.4	100.6	21.3
C-0GW-SSD-4	99.3	98.9	98.6	20.2
C-0GW-AD-1	100.0	99.7	100.2	25.0
C-0GW-AD-2	102.0	98.8	101.7	15.1
C-0GW-AD-3	100.0	100.0	100.0	26.3
C-0GW-AD-4	102.2	98.4	101.8	15.4
C-0GW-OD-1	100.0	101.4	100.4	11.7
C-0GW-OD-2	97.5	99.0	101.0	18.9
C-0GW-OD-3	100.0	100.0	101.7	11.7
C-0GW-OD-4	100.2	100.2	100.5	15.7
C-25GW-SSD-1	100.0	100.6	100.5	26.5
C-25GW-SSD-2	100.3	99.2	100.0	20.0
C-25GW-SSD-3	100.0	100.5	100.3	19.6
C-25GW-SSD-4	100.5	100.2	100.8	25.8
C-25GW-AD-1	103.4	101.0	101.1	19.3
C-25GW-AD-2	100.7	100.4	101.1	26.6
C-25GW-AD-3	99.9	99.9	99.9	20.7
C-25GW-AD-4	101.6	101.1	101.6	16.2
C-25GW-OD-1	98.5	100.0	97.0	25.2
C-25GW-OD-2	103.0	100.0	102.0	19.2
C-25GW-OD-3	99.0	98.5	99.0	26.2
C-25GW-OD-4	99.0	96.5	98.5	18.4

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-50GW-SSD-1	100.7	100.4	98.3	22.5
C-50GW-SSD-2	99.0	100.2	101.3	21.7
C-50GW-SSD-3	100.2	99.5	99.6	25.5
C-50GW-SSD-4	98.0	98.5	98.0	28.3
C-50GW-AD-1	98.3	98.6	98.3	21.3
C-50GW-AD-2	101.0	100.3	100.3	18.6
C-50GW-AD-3	98.0	98.0	100.6	16.1
C-50GW-AD-4	100.2	100.2	100.0	17.0
C-50GW-OD-1	100.0	98.5	98.5	22.4
C-50GW-OD-2	103.0	98.0	101.0	21.5
C-50GW-OD-3	98.5	99.5	99.0	12.3
C-50GW-OD-4	100.0	97.5	98.5	27.8

ตารางที่ 35 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-0GW-SSD-1	101.0	101.1	100.5	22.9
C-0GW-SSD-2	100.1	100.1	100.5	27.9
C-0GW-SSD-3	99.7	100.0	100.5	39.1
C-0GW-SSD-4	100.3	100.6	100.1	28.6
C-0GW-AD-1	100.2	100.5	100.5	38.5
C-0GW-AD-2	99.5	100.3	98.6	17.0
C-0GW-AD-3	100.5	100.3	99.7	33.0
C-0GW-AD-4	98.9	98.9	100.6	19.1
C-0GW-OD-1	101.1	103.2	101.4	23.5
C-0GW-OD-2	100.3	100.5	100.0	28.4
C-0GW-OD-3	102.7	100.8	100.0	27.6
C-0GW-OD-4	99.2	98.3	97.8	30.8

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-25GW-SSD-1	99.7	100.3	100.2	25.3
C-25GW-SSD-2	101.3	100.3	100.2	23.0
C-25GW-SSD-3	99.2	99.5	99.9	16.5
C-25GW-SSD-4	100.6	100.5	100.0	22.5
C-25GW-AD-1	99.8	99.8	100.3	38.9
C-25GW-AD-2	99.6	99.8	100.0	42.8
C-25GW-AD-3	100.5	100.7	99.8	15.9
C-25GW-AD-4	100.0	100.0	99.5	34.5
C-25GW-OD-1	100.0	100.2	100.0	47.7
C-25GW-OD-2	100.4	100.4	100.0	21.3
C-25GW-OD-3	100.2	101.7	101.4	34.1
C-25GW-OD-4	101.1	101.1	98.0	26.7
C-50GW-SSD-1	100.2	100.4	100.0	28.7
C-50GW-SSD-2	100.0	99.9	99.3	28.0
C-50GW-SSD-3	100.0	99.0	99.9	23.4
C-50GW-SSD-4	100.5	100.6	100.2	21.6
C-50GW-AD-1	100.3	100.0	100.0	23.3
C-50GW-AD-2	100.5	100.3	99.4	29.9
C-50GW-AD-3	99.5	101.5	102.0	22.7
C-50GW-AD-4	102.0	102.0	100.0	32.0
C-50GW-OD-1	99.5	99.7	100.0	29.0
C-50GW-OD-2	100.9	101.0	99.0	39.0
C-50GW-OD-3	101.3	100.8	99.5	23.0
C-50GW-OD-4	100.0	100.0	100.0	33.1

ตารางที่ 36 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 90 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-0GW-SSD-1	100.0	99.5	100.3	36.8
C-0GW-SSD-2	100.3	100.5	100.7	27.4
C-0GW-SSD-3	101.6	99.0	101.7	26.3
C-0GW-SSD-4	99.8	99.3	0.0	36.8
C-0GW-AD-1	100.4	100.6	99.6	31.3
C-0GW-AD-2	100.1	100.2	100.4	22.2
C-0GW-AD-3	100.6	100.7	99.6	24.6
C-0GW-AD-4	100.4	100.5	99.8	32.7
C-0GW-OD-1	100.5	100.5	99.4	47.3
C-0GW-OD-2	100.0	100.8	99.6	39.1
C-0GW-OD-3	99.4	100.6	100.7	19.7
C-0GW-OD-4	99.9	99.9	100.0	39.6
C-25GW-SSD-1	99.7	100.2	100.9	25.7
C-25GW-SSD-2	99.8	101.4	101.1	28.0
C-25GW-SSD-3	100.2	100.1	100.5	36.8
C-25GW-SSD-4	99.3	100.0	98.1	25.2
C-25GW-AD-1	99.8	100.6	100.4	28.0
C-25GW-AD-2	99.6	100.6	100.4	33.5
C-25GW-AD-3	100.5	100.0	100.2	37.6
C-25GW-AD-4	100.0	100.0	100.4	22.3
C-25GW-OD-1	100.0	100.0	100.0	34.9
C-25GW-OD-2	100.4	100.0	100.2	32.7
C-25GW-OD-3	100.2	101.0	98.8	31.9
C-25GW-OD-4	101.1	100.6	100.7	34.1

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-50GW-SSD-1	100.6	100.2	100.9	35.2
C-50GW-SSD-2	100.2	100.3	100.5	33.8
C-50GW-SSD-3	100.5	101.5	101.7	55.4
C-50GW-SSD-4	100.8	100.1	100.4	20.8
C-50GW-AD-1	100.2	100.4	100.9	27.3
C-50GW-AD-2	101.6	99.0	100.5	26.9
C-50GW-AD-3	100.0	99.8	101.0	25.8
C-50GW-AD-4	99.7	100.3	100.5	36.2
C-50GW-OD-1	99.5	99.5	100.0	51.0
C-50GW-OD-2	100.9	100.7	99.7	25.3
C-50GW-OD-3	101.3	101.4	99.1	21.8
C-50GW-OD-4	100.7	100.7	100.1	51.7

ตารางที่ 37 ข้อมูลดิบของการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (cm)			กำลังดัด (MPa)
	กว้าง	ลึก	ยาว	
C-0GW-SSD-1	10.50	9.84	30.00	4.95
C-0GW-SSD-2	10.16	10.14	29.80	6.46
C-0GW-SSD-3	10.30	10.02	29.80	6.15
C-0GW-SSD-4	10.23	10.02	29.80	6.23
C-0GW-AD-1	10.40	10.14	30.20	6.61
C-0GW-AD-2	10.43	10.10	30.00	6.43
C-0GW-AD-3	10.20	9.97	29.20	4.87
C-0GW-AD-4	10.13	10.47	29.00	6.15

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (cm)			กำลังตัด (MPa)
	กว้าง	ลึก	ยาว	
C-0GW-OD-1	10.30	9.73	29.80	6.03
C-0GW-OD-2	10.30	10.40	29.60	4.81
C-0GW-OD-3	10.30	10.06	29.60	5.89
C-0GW-OD-4	10.20	10.25	29.80	5.52
C-25GW-SSD-1	10.11	10.14	30.00	7.56
C-25GW-SSD-2	10.20	10.13	30.00	5.78
C-25GW-SSD-3	10.05	10.06	30.20	5.51
C-25GW-SSD-4	10.42	10.00	30.40	6.61
C-25GW-AD-1	10.27	9.97	29.60	5.46
C-25GW-AD-2	10.44	9.93	29.80	6.26
C-25GW-AD-3	10.27	9.83	29.60	6.19
C-25GW-AD-4	10.50	10.33	30.80	5.87
C-25GW-OD-1	10.33	10.29	29.00	6.83
C-25GW-OD-2	10.20	10.05	29.40	6.05
C-25GW-OD-3	10.53	10.16	29.80	5.69
C-25GW-OD-4	10.18	9.98	30.00	6.62
C-50GW-SSD-1	10.50	10.00	29.80	6.06
C-50GW-SSD-2	10.24	10.20	30.20	5.92
C-50GW-SSD-3	10.14	10.22	29.60	5.55
C-50GW-SSD-4	10.30	10.00	29.80	5.36
C-50GW-AD-1	10.05	9.97	30.40	4.84
C-50GW-AD-2	10.43	10.10	30.80	5.54
C-50GW-AD-3	10.07	9.96	30.20	5.34
C-50GW-AD-4	10.27	9.88	29.80	6.30
C-50GW-OD-1	10.44	9.77	28.90	5.63
C-50GW-OD-2	10.26	10.14	28.80	5.62
C-50GW-OD-3	10.47	10.11	29.20	5.62
C-50GW-OD-4	10.25	10.15	30.80	6.65

ตารางที่ 38 ข้อมูลดิบของการทดสอบโพรงและการดูดซึมน้ำ

ส่วนผสม	น้ำหนักตัวอย่าง (kg)				ผลการทดสอบ	
	ที่สภาวะ อบแห้ง	ที่สภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง	ชั่งใน อากาศ	ชั่งในน้ำ	โพรง (%)	การดูดซึมน้ำ (%)
C-0GW-SSD-1	3.88	4.03	4.04	2.36	9.71	3.85
C-0GW-SSD-2	4.51	4.69	4.70	2.73	9.70	3.88
C-0GW-SSD-3	4.25	4.41	4.43	2.58	9.65	3.67
C-0GW-SSD-4	3.77	3.93	3.94	2.28	10.36	4.15
C-0GW-AD-1	4.15	4.31	4.32	2.54	9.55	3.76
C-0GW-AD-2	4.81	4.99	5.00	2.95	9.17	3.59
C-0GW-AD-3	4.25	4.41	4.42	2.61	9.58	3.61
C-0GW-AD-4	4.36	4.53	4.54	2.70	9.80	3.76
C-0GW-OD-1	4.48	4.63	4.63	2.73	8.25	3.33
C-0GW-OD-2	4.06	4.22	4.21	2.48	8.80	3.68
C-0GW-OD-3	3.94	4.09	4.10	2.41	9.92	3.86
C-0GW-OD-4	4.37	4.52	4.52	2.67	8.14	3.28
C-25GW-SSD-1	4.11	4.27	4.28	2.49	9.52	3.80
C-25GW-SSD-2	3.98	4.14	4.15	2.42	10.22	4.08
C-25GW-SSD-3	4.46	4.63	4.64	2.70	9.51	3.78
C-25GW-SSD-4	4.04	4.19	4.19	2.43	8.48	3.51
C-25GW-AD-1	3.92	4.05	4.05	2.38	8.18	3.33
C-25GW-AD-2	4.58	4.72	4.72	2.77	7.34	3.03
C-25GW-AD-3	4.40	4.54	4.54	2.66	7.76	3.17
C-25GW-AD-4	4.50	4.62	4.62	2.73	6.77	2.75
C-25GW-OD-1	3.84	3.97	3.98	2.35	8.95	3.45
C-25GW-OD-2	4.03	4.18	4.19	2.48	9.54	3.66
C-25GW-OD-3	4.17	4.31	4.32	2.55	8.69	3.34
C-25GW-OD-4	3.59	3.72	3.72	2.19	8.69	3.36

ส่วนผสม	น้ำหนักตัวอย่าง (kg)				ผลการทดสอบ	
	ที่สภาวะ อบแห้ง	ที่สภาวะ อิมัลชันแห้ง	ชั่งใน อากาศ	ชั่งในน้ำ	โพรง (%)	การดูดซึมน้ำ (%)
C-50GW-SSD-1	1.00	4.37	4.51	4.52	2.65	3.26
C-50GW-SSD-2	2.00	4.11	4.27	4.28	2.71	3.84
C-50GW-SSD-3	3.00	4.22	4.36	4.36	2.54	3.24
C-50GW-SSD-4	4.00	4.31	4.47	4.47	2.63	3.67
C-50GW-AD-1	1.00	3.70	3.84	3.85	2.27	3.75
C-50GW-AD-2	2.00	4.37	4.55	4.57	2.69	4.04
C-50GW-AD-3	3.00	4.04	4.20	4.22	2.48	3.88
C-50GW-AD-4	4.00	4.38	4.55	4.56	2.70	3.72
C-50GW-OD-1	1.00	4.21	4.37	4.37	2.57	3.55
C-50GW-OD-2	2.00	4.61	4.80	4.80	2.83	3.86
C-50GW-OD-3	3.00	3.84	4.00	4.00	2.36	3.88
C-50GW-OD-4	4.00	4.10	4.27	4.27	2.51	3.99

ตารางที่ 39 ข้อมูลดิบของการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 30 นาที

ส่วนผสม	น้ำหนักก่อนเผา (kg)	น้ำหนักหลังเผา (kg)
C-0GW-SSD-1	3.815	3.620
C-0GW-SSD-2	3.800	3.620
C-0GW-SSD-3	3.920	3.720
C-25GW-SSD-1	3.865	3.635
C-25GW-SSD-2	3.995	3.775
C-25GW-SSD-3	3.915	3.695
C-50GW-SSD-1	3.850	3.635
C-50GW-SSD-2	3.935	3.730
C-50GW-SSD-3	3.965	3.760

ส่วนผสม	น้ำหนักก่อนเผา (kg)	น้ำหนักหลังเผา (kg)
C-0GW-AD-1	3.820	3.640
C-0GW-AD-2	3.850	3.655
C-0GW-AD-3	3.830	3.645
C-25GW-AD-1	3.845	3.660
C-25GW-AD-2	3.790	3.605
C-25GW-AD-3	3.760	3.560
C-50GW-AD-1	3.900	3.705
C-50GW-AD-2	3.805	3.620
C-50GW-AD-3	3.780	3.600
C-0GW-OD-1	3.755	3.600
C-0GW-OD-2	3.905	3.735
C-0GW-OD-3	3.790	3.600
C-25GW-OD-1	3.800	3.690
C-25GW-OD-2	3.935	3.735
C-25GW-OD-3	3.810	3.600
C-50GW-OD-1	3.890	3.690
C-50GW-OD-2	3.820	3.635
C-50GW-OD-3	3.765	3.585

ตารางที่ 40 ข้อมูลดิบของการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 60 นาที

ส่วนผสม	น้ำหนักก่อนเผา (kg)	น้ำหนักหลังเผา (kg)
C-0GW-SSD-1	3.820	3.560
C-0GW-SSD-2	3.825	3.565
C-0GW-SSD-3	3.795	3.530
C-25GW-SSD-1	3.875	3.585
C-25GW-SSD-2	3.950	3.655
C-25GW-SSD-3	3.895	3.610
C-50GW-SSD-1	3.850	3.580
C-50GW-SSD-2	3.915	3.640
C-50GW-SSD-3	3.900	3.630
C-0GW-AD-1	3.785	3.545
C-0GW-AD-2	3.825	3.585
C-0GW-AD-3	3.820	3.585
C-25GW-AD-1	3.795	3.580
C-25GW-AD-2	3.910	3.565
C-25GW-AD-3	3.815	3.660
C-50GW-AD-1	3.825	3.575
C-50GW-AD-2	3.795	3.585
C-50GW-AD-3	3.760	3.545
C-0GW-OD-1	3.780	3.505
C-0GW-OD-2	3.825	3.530
C-0GW-OD-3	3.735	3.490
C-25GW-OD-1	3.795	3.545
C-25GW-OD-2	3.890	3.630
C-25GW-OD-3	3.765	3.510
C-50GW-OD-1	3.730	3.480
C-50GW-OD-2	3.770	3.515
C-50GW-OD-3	3.740	3.495

ตารางที่ 41 ข้อมูลดิบของการทดสอบน้ำหนักที่หายไปของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 90 นาที

ส่วนผสม	น้ำหนักก่อนเผา (kg)	น้ำหนักหลังเผา (kg)
C-0GW-SSD-1	3.820	1.145
C-0GW-SSD-2	3.795	1.065
C-0GW-SSD-3	3.785	0.985
C-25GW-SSD-1	3.910	1.115
C-25GW-SSD-2	3.875	1.335
C-25GW-SSD-3	3.855	1.565
C-50GW-SSD-1	3.865	1.025
C-50GW-SSD-2	3.880	1.155
C-50GW-SSD-3	3.890	1.270
C-0GW-AD-1	3.880	2.275
C-0GW-AD-2	3.795	3.350
C-0GW-AD-3	3.775	1.130
C-25GW-AD-1	3.890	1.825
C-25GW-AD-2	3.815	1.785
C-25GW-AD-3	3.810	1.130
C-50GW-AD-1	3.890	1.310
C-50GW-AD-2	3.765	0.775
C-50GW-AD-3	3.885	0.560
C-0GW-OD-1	3.750	1.125
C-0GW-OD-2	3.795	1.620
C-0GW-OD-3	3.765	0.970
C-25GW-OD-1	3.825	0.835
C-25GW-OD-2	3.830	1.470
C-25GW-OD-3	3.770	1.225
C-50GW-OD-1	3.815	0.760
C-50GW-OD-2	3.740	0.800
C-50GW-OD-3	3.900	1.300

ตารางที่ 42 ข้อมูลดิบการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 30 นาที

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-0GW-SSD-1	100.0	101.0	99.0	11.5
C-0GW-SSD-2	99.5	99.8	99.7	9.4
C-0GW-SSD-3	102.0	100.9	101.5	13.4
C-0GW-AD-1	99.6	100.6	100.5	12.9
C-0GW-AD-2	101.0	101.0	99.5	9.8
C-0GW-AD-3	100.0	101.6	99.0	11.7
C-0GW-OD-1	99.6	99.7	100.0	13.4
C-0GW-OD-2	99.2	102.0	102.2	12.0
C-0GW-OD-3	98.9	100.6	100.8	10.9
C-25GW-SSD-1	99.7	100.3	100.3	12.2
C-25GW-SSD-2	101.1	100.2	100.7	14.6
C-25GW-SSD-3	99.7	100.0	100.5	13.8
C-25GW-AD-1	100.3	100.4	99.8	10.8
C-25GW-AD-2	99.6	99.4	99.6	9.8
C-25GW-AD-3	100.0	98.9	99.4	9.3
C-25GW-OD-1	99.5	99.2	100.0	13.6
C-25GW-OD-2	99.7	101.3	101.5	13.6
C-25GW-OD-3	99.6	99.9	99.7	12.8
C-50GW-SSD-1	99.7	100.3	100.3	12.2
C-50GW-SSD-2	99.2	100.2	100.7	14.6
C-50GW-SSD-3	101.9	100.0	100.5	13.8
C-50GW-AD-1	101.0	100.4	99.8	10.8
C-50GW-AD-2	99.4	99.4	99.6	9.8
C-50GW-AD-3	99.8	98.9	99.4	9.3
C-50GW-OD-1	101.6	99.2	100.0	13.6
C-50GW-OD-2	99.6	101.3	101.5	13.6
C-50GW-OD-3	100.0	99.9	99.7	12.8

ตารางที่ 43 ข้อมูลผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังเผาไฟ 60 นาที

ส่วนผสม	ความยาวด้าน (mm)			กำลังอัด (MPa)
	1	2	3	
C-0GW-SSD-1	99.5	100.6	100.6	3.9
C-0GW-SSD-2	99.8	100.3	100.4	4.1
C-0GW-SSD-3	100.0	100.1	100.1	3.8
C-0GW-AD-1	98.7	98.8	100.5	5.3
C-0GW-AD-2	100.0	100.6	100.9	5.6
C-0GW-AD-3	100.2	100.4	100.8	5.4
C-0GW-OD-1	99.5	99.5	99.2	3.9
C-0GW-OD-2	100.6	100.5	100.8	5.3
C-0GW-OD-3	100.0	100.2	100.4	5.0
C-25GW-SSD-1	99.8	99.7	98.8	3.7
C-25GW-SSD-2	101.2	101.6	99.5	4.3
C-25GW-SSD-3	99.2	99.3	100.0	4.3
C-25GW-AD-1	100.2	100.1	100.0	5.9
C-25GW-AD-2	100.4	100.2	100.0	5.2
C-25GW-AD-3	100.2	100.4	100.8	4.6
C-25GW-OD-1	100.0	100.1	100.1	5.1
C-25GW-OD-2	101.0	101.6	101.6	4.5
C-25GW-OD-3	100.0	100.5	100.1	4.4
C-50GW-SSD-1	100.0	100.0	100.0	4.3
C-50GW-SSD-2	99.8	100.4	100.5	4.6
C-50GW-SSD-3	100.0	100.2	100.3	4.0
C-50GW-AD-1	100.8	99.3	100.0	4.6
C-50GW-AD-2	101.0	100.8	99.9	4.4
C-50GW-AD-3	99.3	100.0	100.3	4.5
C-50GW-OD-1	100.0	100.1	100.4	3.5
C-50GW-OD-2	99.5	100.4	100.0	4.4
C-50GW-OD-3	100.7	100.4	100.3	3.6

ภาคผนวก ง
รูปภาพประกอบงานวิจัย



รูปที่ 40 ทรายธรรมชาติ (ทรายแม่น้ำ)



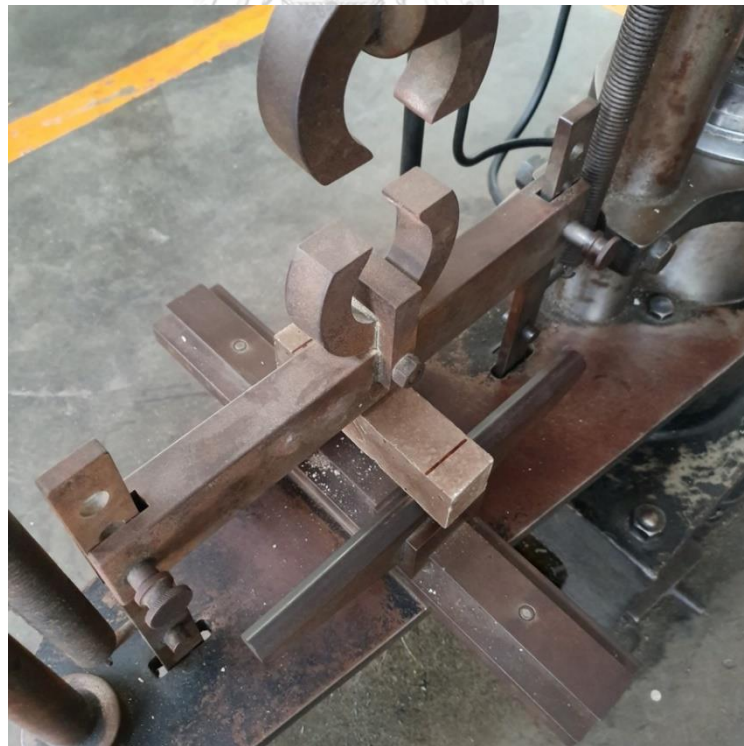
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 41 เศษแกรนิต
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 42 ใ้ลลอย



รูปที่ 43 การทดสอบเวลาการก่อดำงีโพลีเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ 44 การทดสอบกำลังรับแรงดัดงีโพลีเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ 45 การทดสอบเวลาการก่อตัวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 46 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 47 จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตหลังทำการทดสอบเผาไฟที่ 90 นาที

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- [1] Sharma, N.K., et al., 2017. Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. **Construction and Building Materials 151**: 158-163.
- [2] ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551. วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer). **Journal of Thailand Concrete Association 3**: 3-6.
- [3] Valipour, M., et al., 2014. Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. **Journal of Cleaner Production 65**: 418-423.
- [4] Nuaklong, P., Sata, V., and Chindaprasirt, P., 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. **Journal of Cleaner Production 112**: 2300-2307.
- [5] Zhuang, X.Y., et al., 2016. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. **Journal of Cleaner Production 125**: 253-267.
- [6] รัฐศวรรธน์ กิ่งแก้ว, et al., 2558. การใช้หินฝุ่นแทนทรายในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ. วารสารเทคโนโลยีภาคใต้ 2: 55-61.
- [7] Binici, H., et al., 2008. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. **Journal of materials processing technology 208**(1-3): 299-308.
- [8] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2544. ฝ้าลอยลิกไนต์ในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม. (ม.ป.ท.).
- [9] สมดุลแหล่งพลังงานไฟฟ้า. 2557. ระบบการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย. **Balance Energy** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.balanceenergythai.com> [28 กุมภาพันธ์ 2562]
- [10] Bicer, A., 2018. Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites. **Thermal Science and Engineering Progress 8**: 78-82.
- [11] Mushtaq, F., et al., 2019. Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment. **Journal of environmental management 240**: 27-46.
- [12] Ding, J., et al., 2017. Research and industrialization progress of recovering alumina from fly ash: A concise review. **Waste Management 60**: 375-387.

- [13] Cheerarot, R. and Jaturapitakkul, C., 2004. A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. **Waste Management** 24(7): 701-709.
- [14] Koshy, N. and Singh, D., 2016. Fly ash zeolites for water treatment applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 4(2): 1460-1472.
- [15] Aydın, S., et al., 2007. Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. **Building and Environment** 42(2): 717-721.
- [16] Davidovits, J., 2015. Geopolymer Chemistry and Applications. 4-th edition. J. Davidovits.-Saint-Quentin, France.
- [17] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V., 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement and concrete composites** 29(3): 224-229.
- [18] Aleem, M.A. and Arumairaj, P., 2012. Geopolymer concrete—a review. **International journal of engineering sciences & emerging technologies** 1(2): 118-122.
- [19] Songpiriyakij, S., et al., 2011. Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste. **Materials & Design** 32(5): 3021-3028.
- [20] Ryu, G.S., et al., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials** 47: 409-418.
- [21] Sarker, P.K., Kelly, S., and Yao, Z., 2014. Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. **Materials & Design** 63: 584-592.
- [22] Abdulkareem, O.A., et al., 2014. Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. **Construction and building materials** 50: 377-387.
- [23] Singh, S., Nagar, R., and Agrawal, V., 2016. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. **Journal of Cleaner Production** 126: 74-87.

- [24] Hunger, M. and Brouwers, H., 2008. Natural stone waste powders applied to SCC mix design. **Restoration of Buildings and Monuments** 14(2): 131.
- [25] Vijayalakshmi, M. and Sekar, A., 2013. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction and Building Materials** 46: 1-7.
- [26] Singh, S., et al. *Utilization of granite cutting waste in concrete as partial replacement of sand*. in *Conference paper: UKIERI Concrete Congress– Concrete Research Driving Profit and Sustainability, Jalandhar, India*. 2015.
- [27] Jain, A., Gupta, R., and Chaudhary, S., 2019. Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials** 221: 539-552.
- [28] Poon, C., et al., 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and concrete research** 34(1): 31-36.
- [29] Mefteh, H., et al., 2013. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of cleaner production** 54: 282-288.
- [30] Ji, T., et al., 2013. Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete. **Construction and Building Materials** 44: 726-733.
- [31] American Society for Testing and Materials. 1995. ASTM C188-95. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
- [32] American Society for Testing and Materials. 2001. ASTM C128-01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- [33] American Society for Testing and Materials. 2001. ASTM C127-01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.

- [34] American Society for Testing and Materials. 2016. ASTM C109/C109M-16a. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- [35] American Society for Testing and Materials. 2013. ASTM C642-13. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- [36] American Society for Testing and Materials. 2012. ASTM C267-01. Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes.
- [37] British standards institute. 1999. ISO 834: Part 1. Elements of Building Construction: General Requirements for Fire Resistance Testing.
- [38] American Society for Testing and Materials. 2015. ASTM C1437-15. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.
- [39] American Society for Testing and Materials. 1999. ASTM C807-99. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle.
- [40] American Society for Testing and Materials. 2002. ASTM C348-02. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
- [41] American Society for Testing and Materials. 2014. ASTM C1611/C1611M-14. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.
- [42] American Society for Testing and Materials. 1999. ASTM C403/C403M-99. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.
- [43] American Society for Testing and Materials. 2020. ASTM C39 / C39M-20. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [44] American Society for Testing and Materials. 2002. ASTM C293-02. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading).

- [45] American Society for Testing and Materials. 2001. ASTM C136-01. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- [46] American Society for Testing and Materials. 2008. ASTM C33 / C33M-08. Standard Specification for Concrete Aggregates.
- [47] American Society for Testing and Materials. 2015. ASTM C618-15. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [48] Rao, G.M. and Rao, T.G., 2015. Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. **Arabian Journal for Science and Engineering** 40(11): 3067-3074.
- [49] Zhao, Z., et al., 2015. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials** 81: 179-186.
- [50] Patankar, S.V., Jamkar, S.S., and Ghugal, Y.M., 2013. Effect of water-to-geopolymer binder ratio on the production of fly ash based geopolymer concrete. **Int. J. Adv. Technol. Civ. Eng** 2(1): 79-83.
- [51] Singh, B., 2013. Bleeding in concrete. **Int. J. Civil Eng. Technol.(IJCIET)** 4(2): 247-249.
- [52] Nuaklong, P., et al., 2020. Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete. **Journal of Cleaner Production** 252: 119797.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวปัทสรา วรรณนันทนาท
วัน เดือน ปี เกิด	16 พฤษภาคม 2537
สถานที่เกิด	สงขลา
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (กำลังศึกษาอยู่)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY