

สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีเถ้าลอย ขยะพลาสติกรีไซเคิล และ กราฟีนนาโนเฟลทเลตเป็นส่วนประกอบ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING FLY ASH, RECYCLED PLASTIC
WASTE AND GRAPHENE NANOPATELETS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2021
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีแก้วลอย ขยะพลาสติกรีไซเคิล และ กราฟีนนาโนเพลทเลตเป็นส่วนประกอบ
โดย	นายพัฒนวิทย์ ตรีบันพุกษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชนะชัย ทองโฉม)	

CHULALONGKORN UNIVERSITY

พัฒนวิทย์ ตรีชนพฤกษ์ : สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีเถ้าลอย ขยะพลาสติกรีไซเคิล และ กราฟีนนาโนเพลทเลตเป็นส่วนประกอบ. (MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING FLY ASH, RECYCLED PLASTIC WASTE AND GRAPHENE NANOPATELETS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณขยะพลาสติกรีไซเคิล เถ้าลอย และ กราฟีนนาโนเพลทเลต (GNP) ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยใช้ขยะพลาสติกรีไซเคิลแทนที่มวลรวมหยาบในปริมาณ 0%, 15%, 30%, 45% และ 60% โดยปริมาตร ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0%, 20%, 40%, 60% และ 80% โดยปริมาตร และใช้ GNP เป็นสารเติมแต่งเพื่อลดผลกระทบจากการใช้ขยะพลาสติกรีไซเคิล ในปริมาณ 0%, 0.075%, 0.15%, 0.225% และ 0.30% โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งการทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุบ่ม 3, 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขยะพลาสติกรีไซเคิลสามารถนำมาใช้แทนที่ในมวลรวมหยาบและเถ้าลอยสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ โดยการแทนที่ของขยะพลาสติกรีไซเคิลและเถ้าลอยส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสาร GNP เข้าไปในส่วนผสมสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของคอนกรีตให้เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมมีปริมาณของขยะพลาสติกรีไซเคิล 15% โดยปริมาตร มีปริมาณของเถ้าลอย 20% โดยปริมาตร และมี GNP 0.225% โดยน้ำหนัก ให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วันสูงที่สุด โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น 10.1% กำลังรับแรงดึงแยกมีค่าเพิ่มขึ้น 27.3% กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น 27.7% และโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น 13.8% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6272110621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Graphene nanoplatelets, Plastic aggregate, Fly ash, Concrete

Pattanawit Trabanpruek : MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING FLY ASH, RECYCLED PLASTIC WASTE AND GRAPHENE NANOPLATELETS. Advisor: Assoc. Prof. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D.

This research aims to investigate the effect of recycled plastic waste, fly ash, and graphene nanoplatelet (GNP) on the mechanical properties of concrete. In this research, the recycled plastic waste was used to replace coarse aggregate at 0%, 15%, 30%, 45% and 60% by volume. Fly ash was used to replace cement at 0%, 20%, 40%, 60% and 80% by volume. Graphene nanoplatelet (GNP) was added as an additive at 0%, 0.075%, 0.15%, 0.225% and 0.30% by weight of binder to reduce the negative effects of utilizing recycled plastic waste. The investigated properties consisted of the compressive strength, split tensile strength, flexural strength, and modulus of elasticity of concrete at 3, 7, and 28 days of curing. The results showed that recycled plastic waste and fly ash can be used to replace natural coarse aggregate and cement, respectively. However, the strength of concrete decreased with the increase in replacement ratios. Conversely, GNP enhanced the mechanical properties of concrete. The addition of 0.225% of GNP to the mixture contained 15% of recycled plastic waste and 20% of fly ash increased the compressive strength, split tensile strength, flexural strength, and the modulus of elasticity of concrete at 28 days of curing by 10.1%, 27.3%, 27.7%, and 13.8%, respectively, compared to the control mixture.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม โดยหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม สัญญาเลขที่ B16F630071 ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, ดร.กิม เหนือคลอง, Dr. Musa Adamu, นายกานต์ธิปก ฮามคำไพ, นายอดิศร ชวนปี และนายสมพงษ์ ขำแจ้ง ที่ให้เกียรติมาช่วยในการปฏิบัติงานวิจัยและให้คำปรึกษาในงานวิจัย และขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนมาโดยตลอด

พัฒนวิทย์ ตระบันพฤกษ์



สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	4
2.1 กราฟีนนาโนเพลทเลต (Graphene nanoplatelets; GNP).....	4
2.2 ขยะพลาสติก (Plastic waste).....	8
2.3 เถ้าลอย (Fly ash).....	12
บทที่ 3	20
ระเบียบวิธีวิจัย.....	20

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
3.1.1 ปูนซีเมนต์.....	20
3.1.2 ใยล้อย.....	21
3.1.3 มวลรวมจากธรรมชาติ.....	21
3.1.4 ขยะพลาสติกกรีซไคเคิล.....	23
3.1.5 กราฟีนนาโนเพลทเลต.....	24
3.1.6 สารลดน้ำพิเศษ.....	25
3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต.....	25
3.3 ขั้นตอนการเตรียมและการหล่อคอนกรีต.....	28
3.4 รายละเอียดการทดสอบ.....	28
3.4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength).....	28
3.4.2 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (Splitting tensile strength).....	28
3.4.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural strength).....	29
3.4.4 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity).....	29
บทที่ 4.....	30
ผลการทดสอบและการอภิปราย.....	30
4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength).....	30
4.2 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (Splitting tensile strength).....	37
4.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural strength).....	46
4.4 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity).....	52
บทที่ 5.....	58
สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59

ภาคผนวก ก	60
ผลการทดสอบวัสดุ	60
ภาคผนวก ข	64
ผลการทดสอบของคอนกรีต	64
ภาคผนวก ค	82
รูปภาพประกอบงานวิจัย	82
บรรณานุกรม	86
ประวัติผู้เขียน	92



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ปริมาณวัสดุส่วนผสมของคอนกรีต (Devi et al., 2020).....	6
ตารางที่ 2 สัดส่วนส่วนผสมของส่วนผสมคอนกรีตแต่ละชนิด (Steyn et al., 2021).....	9
ตารางที่ 3 ระดับปริมาณเปอร์เซ็นต์การใช้เถ้าลอย	13
ตารางที่ 4 ประเภทของเถ้าลอยและองค์ประกอบตามมาตรฐาน ASTM	14
ตารางที่ 5 สัดส่วนส่วนผสมของคอนกรีต (Siddique, 2004).....	14
ตารางที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Siddique, 2004).....	15
ตารางที่ 7 ผลลัพธ์กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (Siddique, 2004)	16
ตารางที่ 8 ผลลัพธ์กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Siddique, 2004).....	18
ตารางที่ 9 ผลลัพธ์โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Siddique, 2004).....	19
ตารางที่ 10 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์.....	20
ตารางที่ 11 คุณสมบัติของเถ้าลอย.....	21
ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ GNP	25
ตารางที่ 13 สัดส่วนผสมของคอนกรีต.....	26
ตารางที่ 14 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีต.....	27
ตารางที่ 15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	31
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต.....	38
ตารางที่ 17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต	46
ตารางที่ 18 ผลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	52
ตารางที่ 19 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของทรายธรรมชาติแบบกระทุ้งแน่นแห้ง	60
ตารางที่ 20 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ	60
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ	61

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของหินแกรนิตแบบกระทุ้งแน่นแห้ง.....	61
ตารางที่ 23 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของหินแกรนิต	62
ตารางที่ 24 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของหินแกรนิต	62
ตารางที่ 25 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย	63
ตารางที่ 26 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วัน.....	64
ตารางที่ 27 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	66
ตารางที่ 28 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	68
ตารางที่ 29 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วัน	70
ตารางที่ 30 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน	72
ตารางที่ 31 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน	74
ตารางที่ 32 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	76
ตารางที่ 33 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน	78
ตารางที่ 34 ข้อมูลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน	80

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 Graphene ในรูปแบบโครงสร้างต่างๆ (Chintalapudi et al., 2020).....	4
รูปที่ 2 แบบจำลองแผนผังโครงสร้างโมเลกุลของกราฟีนในรูปแบบต่างๆ (Pannem et al., 2020)...	5
รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020).....	6
รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020).....	7
รูปที่ 5 กำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020).....	7
รูปที่ 6 เปอร์เซ็นต์กำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020).....	8
รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ที่แตกต่างกัน (Steyn et al., 2021).....	10
รูปที่ 8 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน (Steyn et al., 2021).....	11
รูปที่ 9 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน (Steyn et al., 2021).....	11
รูปที่ 10 ขั้นตอนการผลิตเถ้าลอย (Thomas, 2007).....	12
รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004).....	15
รูปที่ 12 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004)	17
รูปที่ 13 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004).....	18
รูปที่ 14 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004).	19
รูปที่ 15 ขนาดอนุภาคของมวลรวมละเอียด.....	22
รูปที่ 16 ขนาดอนุภาคของมวลรวมหยาบ	22
รูปที่ 17 ขยะพลาสติกกรี๊ไซเคิล	23
รูปที่ 18 ขนาดอนุภาคของมวลรวมพลาสติก	23
รูปที่ 19 Graphene nanoplatelets (GNP)	24
รูปที่ 20 โครงสร้างจุลภาคของกราฟีนนาโนเพลทเลต.....	24

รูปที่ 21 กราฟ 3 มิติแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วัน	32
รูปที่ 22 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	34
รูปที่ 23 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	36
รูปที่ 24 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วัน	39
รูปที่ 25 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน	41
รูปที่ 26 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน....	43
รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงแยกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	45
รูปที่ 28 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	47
รูปที่ 29 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	48
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน	51
รูปที่ 31 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน ..	53
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน	57
รูปที่ 33 โครงสร้างขนาดจุลภาคของแก้วลอย	82
รูปที่ 34 โครงสร้างขนาดจุลภาคของคอนกรีตที่มีมวลรวมรีไซเคิลและสาร GNP เป็นส่วนประกอบ .	82
รูปที่ 35 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสาร GNP ด้วยวิธี EDS.....	83
รูปที่ 36 การเตรียมการกระจายตัวของสาร GNP	83
รูปที่ 37 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	84
รูปที่ 38 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต.....	84
รูปที่ 39 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต	85
รูปที่ 40 การทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่อำนวยความสะดวกให้แก่มวลมนุษย์เกือบทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้มาจากกระบวนการทางปิโตรเคมี (Petrochemical) ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมก่อสร้างยานยนต์และอากาศยาน เป็นต้น ล้วนแต่ต้องใช้พลาสติกเป็นองค์ประกอบไม่มากนักน้อย อันเนื่องมาจากคุณสมบัติที่ตอบสนองความต้องการการใช้งาน ทำให้ทิศทางการใช้งานพลาสติกในอนาคตมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อปริมาณพลาสติกการใช้มีมาก ปริมาณพลาสติกเหลือใช้ก็มีมากเช่นกัน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกในที่สุด จึงทำให้ปัจจุบันมีขยะพลาสติก (Plastic waste) ปริมาณสูงถึง 6.5 พันล้านตันเหลือใช้ทุกปีทั่วโลกและวิธีการกำจัดขยะพลาสติก ได้แก่ การฝังกลบและการเผา โดยวิธีการฝังกลบเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด (Saikia et al., 2012) แต่ขยะพลาสติกบางประเภทมีการปล่อยสารพิษซึ่งก่อให้เกิดภัยคุกคามต่อสิ่งแวดล้อมจึงทำให้การทิ้งขยะพลาสติกเหล่านี้ลงในหลุมฝังกลบยังไม่ใช่วิธีแก้ปัญหาที่ยั่งยืน อีกทั้งการกำจัดด้วยวิธีนี้ยังใช้เวลานานมากในการย่อยสลาย (Ling et al., 2020) ส่วนการกำจัดขยะพลาสติกด้วยการเผาไหม้ แม้จะเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกได้สูง แต่โดยทั่วไปแล้วจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน และสารเคมีอื่นๆที่เป็นพิษออกมาด้วย จึงทำให้ต้องเสียต้นทุนในการบำบัดมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นการรีไซเคิล (Recycle) หรือการนำขยะพลาสติกเหลือใช้เหล่านี้กลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุก่อสร้าง อาจช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันได้

ขยะพลาสติกถูกนำมาใช้ในวัสดุก่อสร้างเพื่อแทนที่ในมวลรวมหยาบหรือละเอียด จากงานวิจัยหลายฉบับพบว่าการใช้รีไซเคิลขยะพลาสติกด้วยการนำมาแทนที่บางส่วนของวัสดุในคอนกรีตเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีขยะพลาสติกเป็นส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้นในบริเวณหลังการแตกร้าวและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขยะพลาสติกยังสามารถช่วยในด้านการเป็นฉนวนกันความร้อนและลดความเปราะของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีขยะพลาสติกเป็นส่วนผสมจะมีความแข็งแรงและประสิทธิภาพความทนทานของคอนกรีตลดลง

ดังนั้นเพื่อไม่ให้ผลเสียของขยะพลาสติกในส่วนผสมของคอนกรีต ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและประสิทธิภาพความทนทานของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้จึงมีการเติมสารกราฟีนนาโนเพลทเลต (Graphene nanoplatelets; GNP) เพื่อลดผลกระทบของขยะพลาสติกในคอนกรีต โดยเหตุผล

ที่เลือกใช้สาร GNP เนื่องจากในงานวิจัยหลายฉบับแสดงให้เห็นว่าสาร GNP สามารถใช้เป็นส่วนผสมขนาดนาโน (nano-size) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสาร GNP ถูกเติมลงไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีตในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อันเนื่องมาจากสาร GNP นั้นมีราคาต้นทุนที่สูง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตเมื่อมีการเติมสาร GNP เข้าไป จึงนำเถ้าลอยเข้ามาใช้เพื่อแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคอนกรีตที่ใช้ขี้เถ้าพลาสติกแทนที่มวลรวมหยาบ ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ และมีการเติมสารกราฟีนนาโนเพลทเลต (GNP) เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการใช้ขี้เถ้าพลาสติก ให้มีความยั่งยืนและเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณขี้เถ้าพลาสติกกรีซเคิลและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของปริมาณกราฟีนนาโนเพลทเลตต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วยขอบเขตดังต่อไปนี้

1.3.1 ใช้ขี้เถ้าพลาสติกกรีซเคิลขนาด 9.5 มม. และ 12.7 มม. ในการแทนที่บางส่วนของมวลรวมหยาบ โดยมีปริมาตรการแทนที่ตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% และ 60% โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ

1.3.2 ใช้เถ้าลอยประเภท C (Class C fly ash) ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 (2019) แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ โดยมีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0%, 20%, 40%, 60% และ 80% โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์

1.3.3 ใช้สาร Graphene nanoplatelets (GNP) ที่มีขนาดตั้งแต่ 2 - 10 นาโนเมตร ใส่เพิ่มในวัสดุซีเมนต์ โดยเปอร์เซ็นต์การใส่เพิ่มอยู่ระหว่าง 0%, 0.075%, 0.15%, 0.225% และ 0.30% โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน

1.3.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตโดยศึกษา

- กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน
- กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน
- กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน
- โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 28 วัน

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุและคอนกรีตโดยศึกษา Scanning electron microscope (SEM), Field emission scanning electron microscope (FESEM), Particle-size distribution (PSD) และ X-ray diffractometer (XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถใช้ขยะพลาสติกมารีไซเคิลเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีต
- 1.4.2 สามารถใช้เถ้าลอยมาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต
- 1.4.3 สามารถผลิตคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

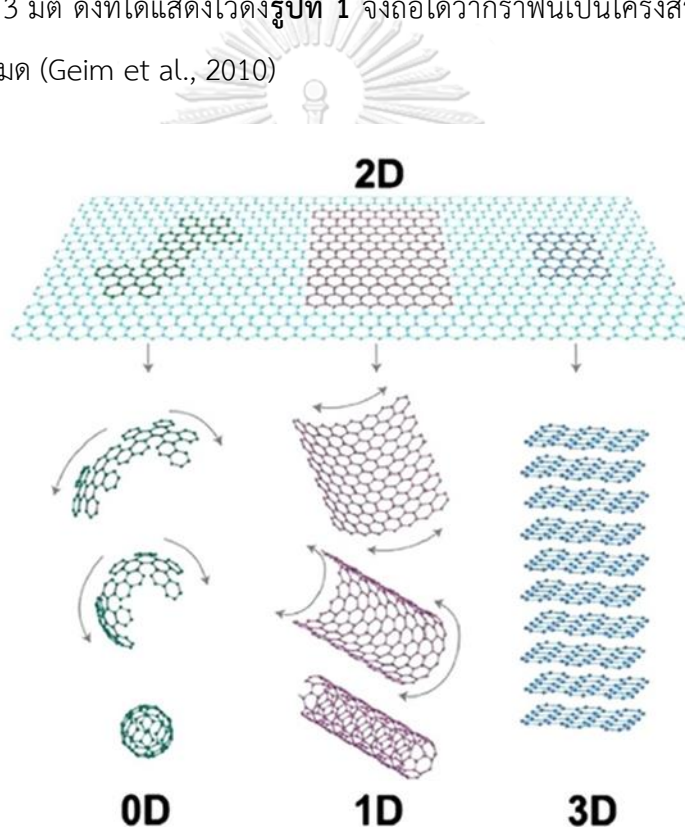


บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 กราฟีนนาโนเพลตเลต (Graphene nanoplatelets; GNP)

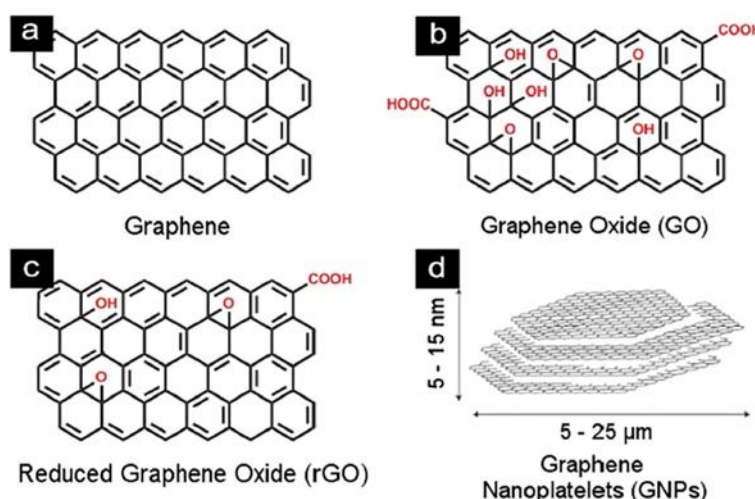
กราฟีน (Graphene) เป็นโครงสร้างหลักในวัสดุกราไฟท์ (Graphitic materials) โดยกราฟีนจะอยู่ในรูปแบบของอะตอมคาร์บอนเดี่ยวแบบแบนที่อัดแน่นไปด้วยโครงข่ายรังผึ้ง 2 มิติ ที่เชื่อมกันด้วยโครงข่ายอะตอมคาร์บอนหกเหลี่ยมไฮบริด SP^2 (Dreyer et al., 2014) ซึ่งสามารถย่อเป็นฟูลเลอร์รีน (fullerenes) ไร้มิติ หรือรีดเป็นท่อนาโน (nanotubes) 1 มิติ หรือซ้อนกันเป็นกราไฟท์ (Graphite) 3 มิติ ดังที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1 จึงถือได้ว่ากราฟีนเป็นโครงสร้างหลักของกราไฟท์ (Graphitic) ทั้งหมด (Geim et al., 2010)



รูปที่ 1 Graphene ในรูปแบบโครงสร้างต่างๆ (Chintalapudi et al., 2020)

กราฟีนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนหลายกลุ่ม เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอนิล (Carbonyl) ฟีนอล (Phenol) และแลคโตน (Lactone) นับตั้งแต่มีการค้นพบกราฟีนและอนุพันธ์ของกราฟีน เช่น กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide; GO) และกราฟีนนาโนเพลตเลต (Graphene nanoplatelets; GNP) ที่ประกอบด้วยแผ่นกราฟีนซ้อนกันหลายชั้นและมีความหนาน้อยกว่า 100 นาโนเมตร (Chuah et al., 2014) ก็สร้างความสนใจให้กับเหล่านักวิจัยเป็นอย่างมาก โดยรูปที่ 2

แสดงแบบจำลองแผนผังโครงสร้างโมเลกุลของกราฟีนในรูปแบบต่างๆ โดยในแต่ละชั้นของกราฟีนนั้น ถูกยึดเข้าด้วยกันโดยแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waal) จึงทำให้มีความสามารถในการกระจายตัว ซึ่งส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นในสารละลายที่เป็นน้ำที่มีระยะห่างระหว่างชั้นตั้งแต่ 0.335 นาโนเมตร ถึง 0.625 นาโนเมตร (Geim et al., 2010)



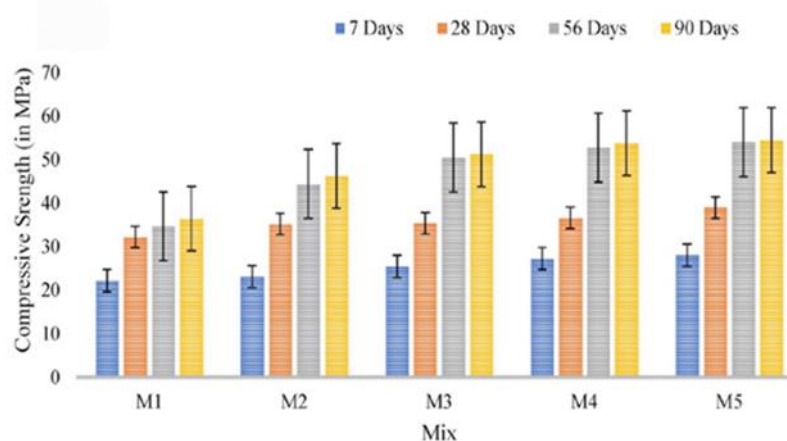
รูปที่ 2 แบบจำลองแผนผังโครงสร้างโมเลกุลของกราฟีนในรูปแบบต่างๆ (Pannem et al., 2020)

ปูนซีเมนต์ถือได้ว่าเป็นวัสดุยึดเกาะชั้นพื้นฐานที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดยมีข้อเสียหลักคือมีความเปราะและมีกำลังรับแรงดึงแยกที่ต่ำ โดยภายหลังข้อเสียเหล่านี้ได้แก้ไขด้วยการเสริมเหล็กเข้าไป แต่ทั้งนี้เมื่อมีการนำวัสดุขนาดนาโน (Nanomaterials) มาใช้ในปูนซีเมนต์ได้ช่วยเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ เช่น คุณสมบัติด้านความเหนียวและความทนทาน โดยการปรับปรุงส่วนประกอบที่ระดับนาโนของคอนกรีตที่มีการเสริมสาร GNP นั้นได้มีส่วนช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติทางกล การนำความร้อนและไฟฟ้า ทั้งนี้นักวิจัยหลายคนได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและความทนทานของวัสดุที่มีการเสริมสารในระดับนาโนของซีเมนต์เพสต์ และได้ผลลัพธ์ว่าดีกว่าซีเมนต์เพสต์ทั่วไป โดยในปี ค.ศ. 2020 Devi et al. (2020) ได้ศึกษาวิจัยถึงผลกระทบของ GNP ที่มีต่อวัสดุคอนกรีต โดยได้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100 mm × 100 mm × 100 mm เพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm เพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต และมีเพิ่มปริมาณสาร GNP ตั้งแต่ 0% ถึง 0.08% โดยน้ำหนักและสัดส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

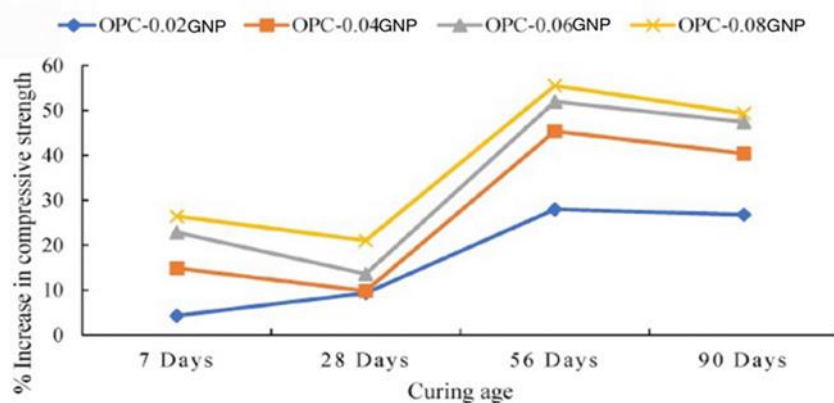
ตารางที่ 1 ปริมาณวัสดุส่วนผสมของคอนกรีต (Devi et al., 2020)

ลำดับที่	รายละเอียด	ปูนซีเมนต์ (kg/m ³)	GNP (g)	น้ำ (kg/m ³)	มวลรวม ละเอียด (kg/m ³)	มวลรวม หยาบ (kg/m ³)	สารผสม เพิ่ม (ml)
Mix 1	OPC0GNP	384	0	173	715	1113	192
Mix 2	OPC0.02GNP	384	76.8	173	715	1113	192
Mix 3	OPC0.04GNP	384	153.6	173	715	1113	192
Mix 4	OPC0.06GNP	384	230.4	173	715	1113	192
Mix 5	OPC0.08GNP	384	307.2	173	715	1113	192

รูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน จากผลการวิจัยจะเห็นได้ถึงกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นควบคู่ไปกับปริมาณสาร GNP ที่ใส่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตในช่วงอายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน โดยส่วนผสมที่มีการเติมสาร GNP เข้าไป 0.08% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดหลังจากอายุการบ่ม 90 วัน โดยมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 49% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม (OPC0GNP) และในส่วนผสมที่มีการเติมสาร GNP เข้าไป 0.02% โดยน้ำหนัก พบว่ามีกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 90 วัน เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 26% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

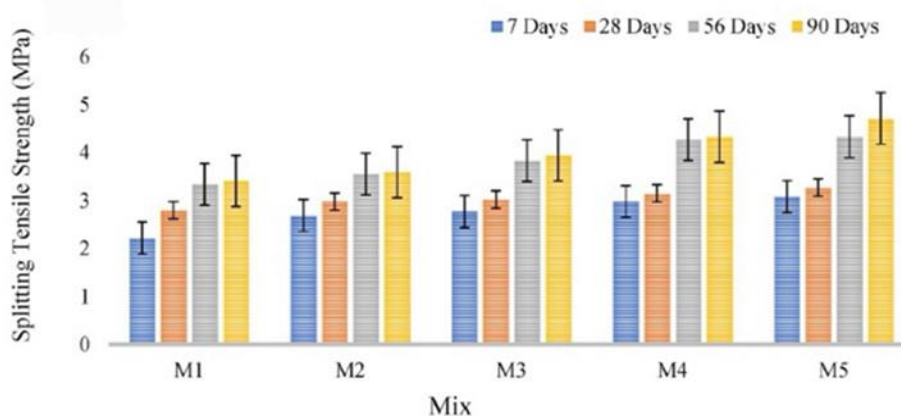


รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020)

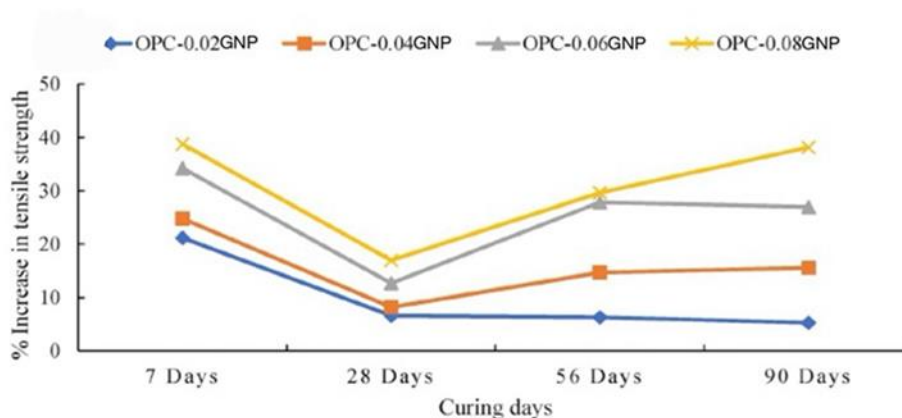


รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020)

ผลกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 จะสังเกตได้ว่า Mix 5 ที่มีการเติมสาร GNP เข้าไป 0.08% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงดึงแยกสูงที่สุดหลังจากอายุการบ่ม 90 วัน โดยมีกำลังรับแรงดึงแยกเพิ่มขึ้น 38% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม และส่วนผสมที่มีการเติมสาร GNP เข้าไป 0.02% โดยน้ำหนัก พบว่ามีกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 90 วัน เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด โดยมีกำลังรับแรงดึงแยกเพิ่มขึ้นเพียง 5% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเติมสาร GNP ที่มีส่วนช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5 กำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020)



รูปที่ 6 เปอร์เซนต์กำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 90 วัน (Devi et al., 2020)

2.2 ขยะพลาสติก (Plastic waste)

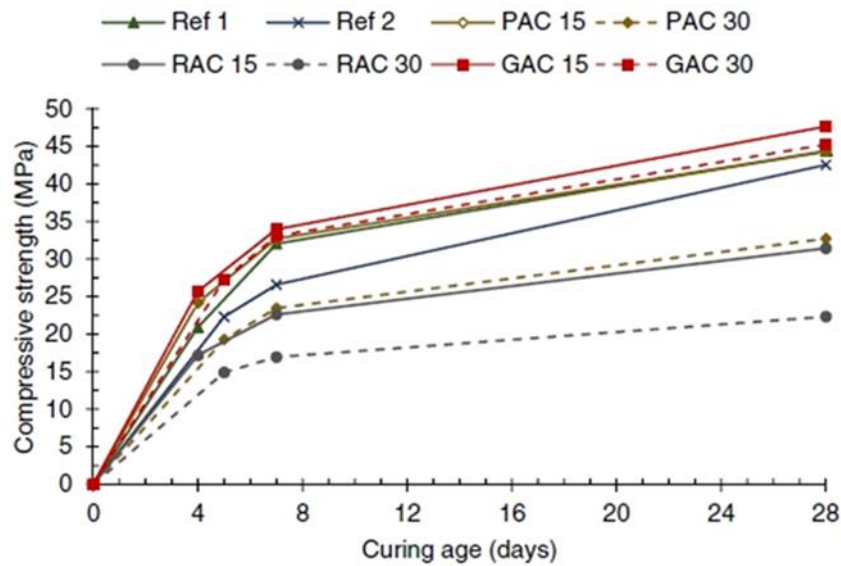
เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติกที่โดดเด่นหลายด้านจึงทำให้มีปริมาณการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกเป็นจำนวนมาก ประกอบกับพลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้เวลายาวนานในการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในงานวิจัยด้านคอนกรีตจึงมักนิยมนำขยะพลาสติกมาใช้แทนที่บางส่วนของมวลรวมหยาบหรือละเอียด จากงานวิจัยหลายฉบับพบว่าการใช้เศษขยะพลาสติกด้วยการนำมาแทนที่บางส่วนของวัสดุในคอนกรีต เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ใช้ขยะพลาสติกแทนที่ในมวลรวมหยาบทำให้คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตดีขึ้น และแสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลังการแตกร้าวและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ดีขึ้น นอกจากนี้ขยะพลาสติกยังสามารถช่วยในด้านการเป็นฉนวนกันความร้อนและลดความเปราะของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rashad, 2016)

โดยในปี ค.ศ. 2021 Steyn และคณะ (2021) ได้ศึกษาผลของการแทนที่ทรายละเอียดบางส่วนด้วยขยะพลาสติก ยาง และแก้วในคอนกรีต พวกเขาได้ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100 mm × 100 mm × 100 mm เพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm เพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกและโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยองค์ประกอบและสัดส่วนส่วนผสมของส่วนผสมคอนกรีตแต่ละชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนส่วนผสมของส่วนผสมคอนกรีตแต่ละชนิด (Steyn et al., 2021)

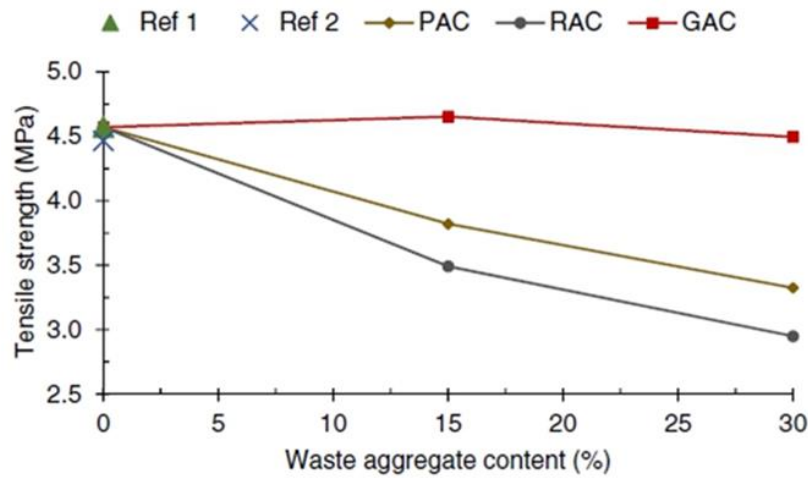
ชื่อ ส่วนผสม	ชนิดของ วัสดุ ทดแทน	น้ำ (kg/m ³)	ปูนซีเมนต์ (kg/m ³)	มวลรวม หยาบ (kg/m ³)	มวลรวม ละเอียด (kg/m ³)	วัสดุเหลือใช้ (kg/m ³)
Ref 1	-	224	448	937	757	0
Ref 2	-	217	433	937	788	0
PAC 15	ขยะ	224	448	937	644	36
PAC 30	พลาสติก	224	448	937	530	73
RAC 15	ยาง	224	448	937	644	41
RAC 30		224	448	937	543	81
GAC 15	แก้ว	224	448	937	644	110
GAC 30		224	448	937	530	221

จากผลการทดสอบในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าส่วนผสม GAC 15 ที่มีการแทนที่ของแก้ว 15% โดยปริมาตร มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดในอายุการบ่ม 28 วัน และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสม GAC 30 ที่มีการแทนที่ของแก้ว 30% โดยปริมาตร ซึ่งมีส่วนผสมของแก้วมากกว่า จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อคอนกรีตการมีแทนที่ด้วยวัสดุแก้วเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เช่นเดียวกับส่วนผสม PAC 15 ที่มีการแทนที่ของพลาสติก 15% โดยปริมาตร ที่มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุม Ref 1 ที่อายุบ่ม 28 วัน และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของขยะพลาสติกขึ้นมาเป็น 30% โดยปริมาตร ในส่วนผสม PAC 30 ก็ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญดังที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 7



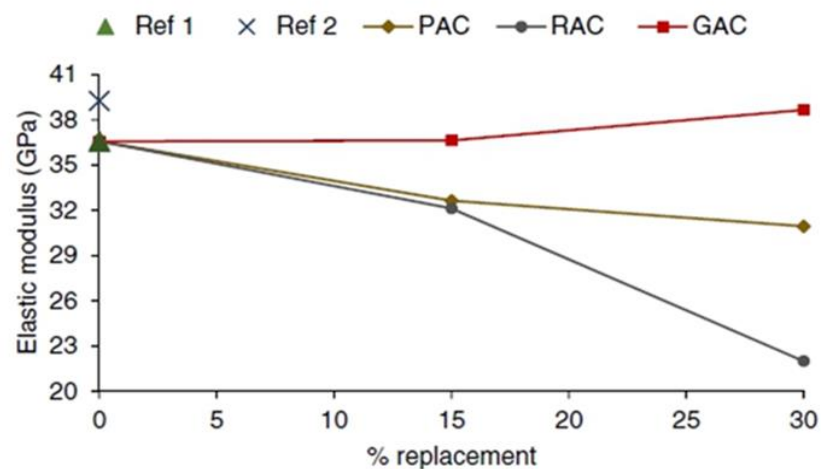
รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ที่แตกต่างกัน (Steyn et al., 2021)

สำหรับในส่วนของการรับแรงดึงแยกของคอนกรีตได้ทดสอบที่อายุบ่ม 28 วัน โดยจากรูปที่ 8 แสดงถึงกำลังรับแรงดึงแยกเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่างที่ได้ทำการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยวัสดุต่างๆ จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตทั้งหมดลดลง เมื่อปริมาณการแทนที่ของยางและขยะพลาสติกเพิ่มขึ้น ยกเว้นในตัวอย่างคอนกรีต GAC 15 ที่แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงดึงแยกที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งส่วนผสมคอนกรีต PAC 15 นั้นค่ากำลังรับแรงดึงแยกที่น้อยกว่าส่วนผสมควบคุม และยังมีค่ากำลังรับแรงดึงแยกลดลง เมื่อมีปริมาณของขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากตัวอย่างคอนกรีต PAC 30 ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกสูง ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลง ซึ่งอาจเป็นเหตุผลทำให้มีการพบเห็นรอยแตกร้าวที่ชัดเจนในชุดตัวอย่างคอนกรีต PAC แต่อย่างไรก็ตามในชุดตัวอย่างคอนกรีต PAC ที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกได้มีการแสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้นในบริเวณหลังจากการแตกร้าว เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม Ref 1



รูปที่ 8 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน (Steyn et al., 2021)

จากนั้นได้ทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างสอดคล้องกับวัสดุส่วนผสมของคอนกรีต ดังนั้นจึงสามารถคาดเดาผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้กระจกที่มีความแข็งแรงจะมีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มากกว่า ในส่วนของขยะพลาสติกและยางที่มีความเปราะมากกว่า ก็จะส่งผลให้คอนกรีตมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่น้อยลงมา ซึ่งจะเห็นได้จากผลลัพธ์ที่แสดงดังรูปที่ 9 โดยส่วนผสมคอนกรีต GAC 30 มีโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น 5.7% ในส่วนของส่วนผสมคอนกรีต PAC 30 มีโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง 15.4% และส่วนผสมคอนกรีต RAC 30 มีโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง 39.8% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม Ref 1

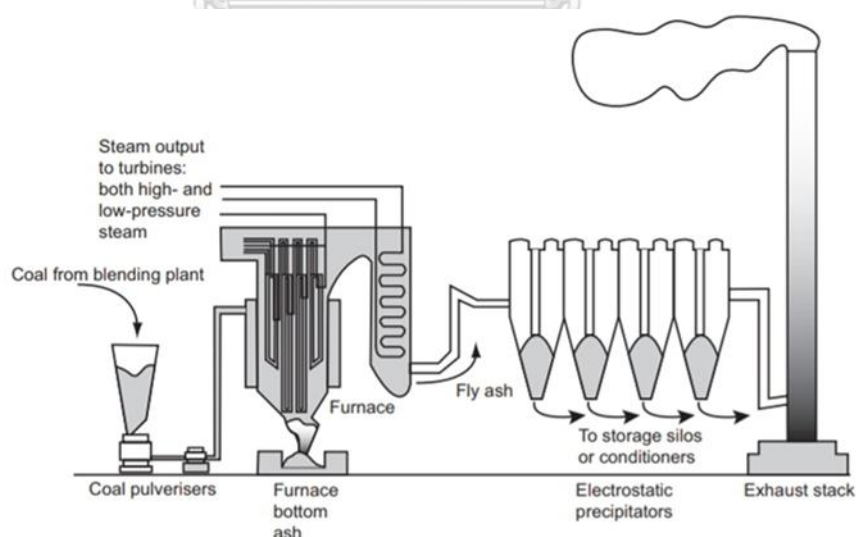


รูปที่ 9 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน (Steyn et al., 2021)

โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้นมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัด อย่างเช่น คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูง จะส่งผลให้มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงตามไปด้วย (Saikia et al., 2014) โดยตัวอย่างคอนกรีต GAC และ PAC ได้แสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามแนวคิดนี้ แต่อย่างไรก็ตาม ตัวอย่าง PAC 15 มีโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม Ref 1 ถึงแม้ว่ากำลังรับแรงอัดจะใกล้เคียงกันก็ตาม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นผลดีสำหรับการใช้งานในบางประเภท เนื่องจากทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเสีรูปได้มากขึ้นก่อนที่จะพังทลาย จากการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าขยะพลาสติกมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้ดีหากถูกแทนที่ด้วยปริมาณที่ไม่สูงเกินไป อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางกลที่ดี และช่วยให้สามารถใช้งานคอนกรีตได้อย่างหลากหลาย

2.3 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า โดยลักษณะเฉพาะของเถ้าลอยคือสารตกค้างที่ยังไม่ได้เผา ซึ่งถูกนำออกไปจากโซนการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำโดยก๊าซไอเสีย จากนั้นรวมตัวกันด้วยคุณสมบัติทางกลหรือแยกจากกันด้วยไฟฟ้าสถิตในดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 10 โดยถ่านหินที่ไม่ผ่านการเผาไหม้ที่หนักกว่าจะตกลงไปที่ด้านล่างของเตาเผาและเรียกสารนั้นว่าเถ้าก้น (Bottom ash) โดยทั่วไปเถ้าก้นเตาไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับในงานคอนกรีต แต่นิยมใช้ในการผลิตบล็อกก่ออิฐคอนกรีต



รูปที่ 10 ขั้นตอนการผลิตเถ้าลอย (Thomas, 2007)

เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino-silicate) แบบไร้รูปร่าง ที่แบ่งออกโดยปริมาณแคลเซียมที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำจะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ต่างๆ และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (Calcium-aluminate hydrates) ทั้งนี้เถ้าลอยบางชนิดที่มีแคลเซียมในปริมาณสูง จะแสดงพฤติกรรมคล้ายปูนซีเมนต์ โดยจะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อผลิตไฮดรตในกรณีที่ไม่มีแหล่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเหล่านี้มีประโยชน์ต่อกอนกรีตในการเพิ่มปริมาณของสารยึดประสาน ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาวและลดการซึมผ่านของน้ำ กลไกทั้งสองนี้ช่วยเพิ่มความทนทานของคอนกรีต (Helmuth, 1987) ดังนั้นด้วยประโยชน์ข้างต้นที่เกิดขึ้น จึงทำให้นิยมนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุซีเมนต์เสริมในคอนกรีต โดยระดับปริมาณการใช้เถ้าลอยในวัสดุคอนกรีตได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับปริมาณเปอร์เซ็นต์การใช้เถ้าลอย

ปริมาณเถ้าลอย (% โดยปริมาตร)	ประเภท
< 15	ต่ำ
15 - 30	ปานกลาง
30 - 50	สูง
> 50	สูงมาก

ในอดีตเถ้าลอยถูกใช้ในงานคอนกรีตตั้งแต่ 15% ถึง 30% โดยปริมาตร ทั้งนี้ปริมาณที่ใช้อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์และสภาพภูมิอากาศ ในส่วนของการแทนที่เถ้าลอยในระดับที่สูงขึ้น (30% ถึง 50%) นิยมนำมาใช้ในงานโครงสร้างขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น งานฐานรากและเขื่อน เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าลอยในระดับปริมาณสูง (40% ถึง 60%) สามารถทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางกลที่ดีและมีความทนทานสูง โดยมาตรฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับเถ้าลอยในอเมริกา คือ มาตรฐาน ASTM C618-19 (2019) และ AASHTO M 295-19 (2019) และตามมาตรฐานข้างต้นมารถแบ่งเถ้าลอยออกได้เป็น 2 ประเภทตามแหล่งกำเนิดและองค์ประกอบตามที่ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประเภทของเถ้าลอยและองค์ประกอบตามมาตรฐาน ASTM

ประเภท	คำอธิบายใน ASTM C 618-19	ข้อกำหนดทางเคมี
F	เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) เถ้าลอยประเภทนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิก (Pozzolanic)	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$
C	เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) เถ้าลอยประเภทนี้นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิก (Pozzolanic) แล้วยังมีคุณสมบัติในการช่วยประสาน	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$

จากการวิจัยของ Siddique (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของเถ้าลอยในคอนกรีต โดยในงานวิจัยได้ทำการออกแบบส่วนผสมควบคุม M-1 ซึ่งได้ทำการออกแบบตามมาตรฐานของอินเดีย IS: 10262-1982 (1998) และส่วนผสมคอนกรีตที่เหลืออีก 3 ตัวอย่าง ถูกออกแบบโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยประเภท F ตั้งแต่ 40% 45% และ 50% โดยปริมาตร โดยสัดส่วนของส่วนผสมในงานวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5

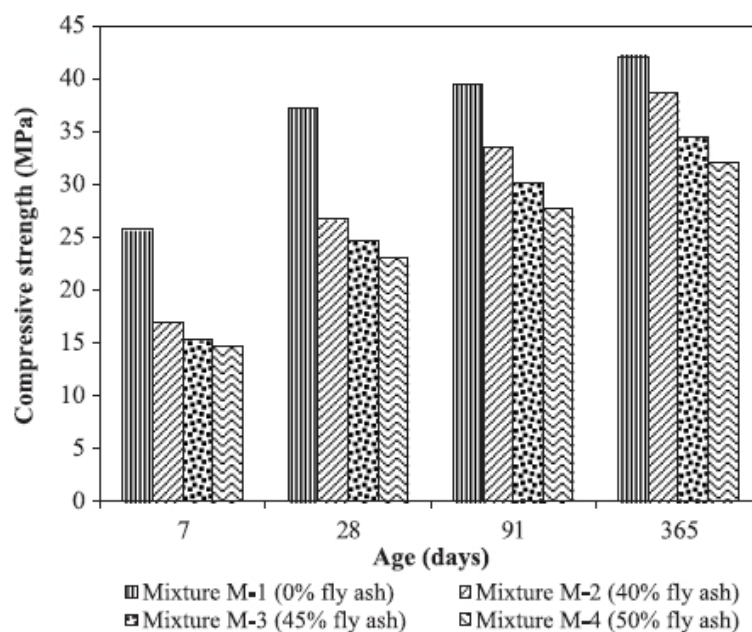
ตารางที่ 5 สัดส่วนส่วนผสมของคอนกรีต (Siddique, 2004)

ส่วนผสม	M-1	M-2	M-3	M-4
เถ้าลอย (%)	0	40	45	50
ปูนซีเมนต์ (kg/m^3)	400	240	220	200
เถ้าลอย (kg/m^3)	0	160	180	200
น้ำ (kg/m^3)	164	160	164	160
มวลรวมละเอียด (kg/m^3)	616	614	610	616
มวลรวมหยาบ (kg/m^3)	1228	1224	1226	1225
Superplasticizer (L/m^3)	2.2	2.5	2.6	2.7

ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบครั้งนี้ ประกอบไปด้วยตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 150 mm × 150 mm × 150 mm เพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด ทรงปริซึมสี่เหลี่ยม ขนาด 100 mm × 100 mm × 500 mm เพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด และทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ความสูง 300 mm เพื่อใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกและ โมดูลัสความยืดหยุ่น อายุบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน โดยผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 6 และ รูปที่ 11

ตารางที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Siddique, 2004)

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (MPa)			
	7 วัน	28 วัน	91 วัน	365 วัน
M-1 (0% fly ash)	25.7	37.2	39.5	42.1
M-2 (40% fly ash)	17	26.7	33.5	38.6
M-3 (45% fly ash)	15.3	24.7	30.1	34.4
M-4 (50% fly ash)	14.7	23.1	27.7	32.1

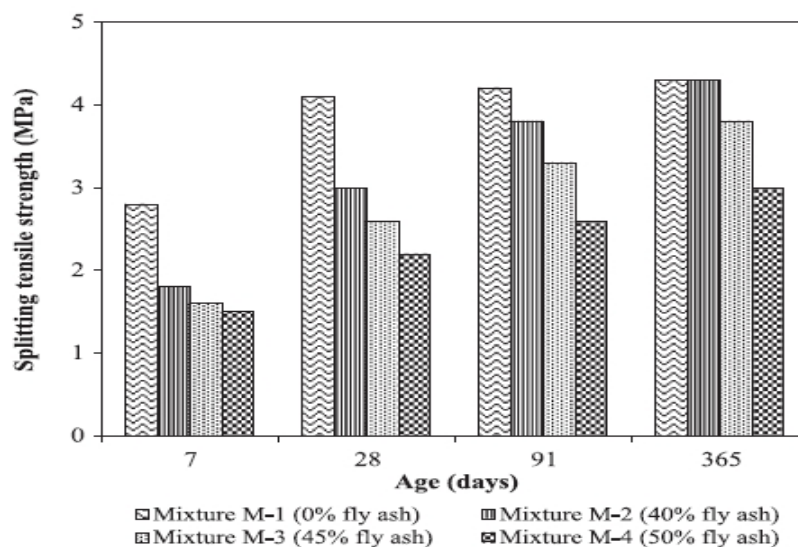


รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004)

จากตารางที่ 7 และรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนผสมควบคุม M-1 (เถ้าลอย 0% โดยปริมาตร) มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 37.2 MPa ในขณะที่ส่วนผสม M-2 (เถ้าลอย 40% โดยปริมาตร) มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 26.7 MPa ส่วนผสม M-3 (เถ้าลอย 45% โดยปริมาตร) มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 24.7 MPa และส่วนผสม M-4 (เถ้าลอย 50% โดยปริมาตร) มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 23.1 MPa โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ลดลง 28% 34% และ 38% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมควบคุม M-1 (เถ้าลอย 0% โดยปริมาตร) และเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุการบ่มเกิน 28 วัน จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นจากอายุการบ่ม 28 วันเป็น 91 วันอยู่ระหว่าง 20% ถึง 26% ในขณะที่กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจากอายุการบ่ม 28 วันเป็น 365 วันอยู่ระหว่าง 39% ถึง 45% โดยกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของคอนกรีตเถ้าลอยปริมาณสูงเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) ของเถ้าลอย ทั้งนี้ถึงแม้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง แต่ผลลัพธ์ของกำลังรับแรงอัดในส่วนผสม M-4 (เถ้าลอย 50% โดยปริมาตร) ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาใช้สำหรับงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วไปและอื่นๆได้เป็นอย่างดี ในส่วนของผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน ซึ่งแสดงในตารางที่ 7 และในรูปที่ 12

ตารางที่ 7 ผลลัพธ์กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (Siddique, 2004)

ส่วนผสม	กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (MPa)			
	7 วัน	28 วัน	91 วัน	365 วัน
M-1 (0% fly ash)	2.8	4.1	4.2	4.3
M-2 (40% fly ash)	1.8	3.0	3.8	4.3
M-3 (45% fly ash)	1.6	2.6	3.3	3.8
M-4 (50% fly ash)	1.5	2.2	2.3	3.0



รูปที่ 12 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004)

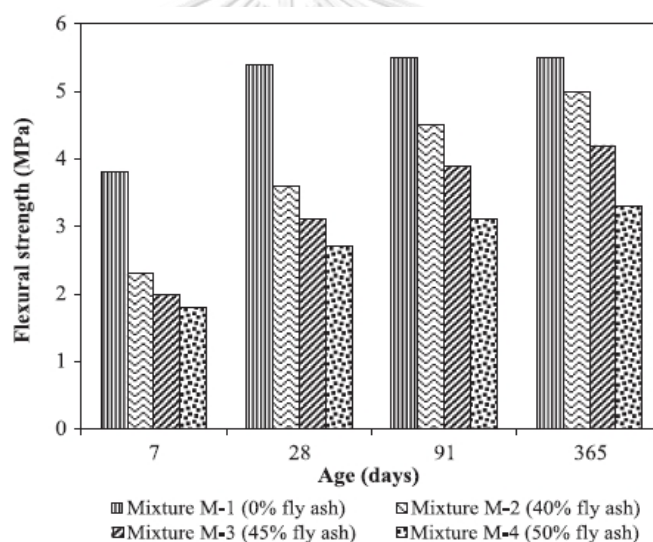
ผลลัพธ์ของกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าลอยเป็นวัสดุผสมมีคล้ายคลึงกันกับกรณีของกำลังรับแรงอัดที่ผ่านมา โดยกำลังรับแรงดึงแยกในคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงดึงแยกของส่วนผสมควบคุม M-1 (เถ้าลอย 0% โดยปริมาตร) มีค่าเท่ากับ 4.1 MPa ในขณะที่ส่วนผสม M-2 (เถ้าลอย 40% โดยปริมาตร) มีกำลังรับแรงดึงแยก 3.0 MPa ส่วนผสม M-3 (เถ้าลอย 45% โดยปริมาตร) มีกำลังรับแรงดึงแยกเท่ากับ 2.6 MPa และส่วนผสม M-4 (เถ้าลอย 50% โดยปริมาตร) มีกำลังรับแรงดึงแยกเท่ากับ 2.2 MPa โดยกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตนั้นได้ลดลง 27% 37% และ 46% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดึงแยกของส่วนผสมควบคุม M-1 (เถ้าลอย 0% โดยปริมาตร) แต่อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงดึงแยกนั้นได้เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 365 วัน ของส่วนผสมควบคุม M-1 (เถ้าลอย 0% โดยปริมาตร) มีค่าเพิ่มขึ้น 5% ส่วนผสม M-2 (เถ้าลอย 40% โดยปริมาตร) มีค่าเพิ่มขึ้น 43% ส่วนผสม M-3 (เถ้าลอย 45% โดยปริมาตร) มีค่าเพิ่มขึ้น 46% และส่วนผสม M-4 (เถ้าลอย 50% โดยปริมาตร) มีค่าเพิ่มขึ้น 36% เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน แสดงใน **ตารางที่ 8** และใน **รูปที่ 13** ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดที่ได้นั้นมีความคล้ายคลึงกับผลลัพธ์ของกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยก กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มเช่นเดียวกัน จะเห็นได้จากผลการทดสอบว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังจากอายุการบ่ม 28 วัน โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจากอายุการบ่ม 28 วันมาเป็น 91 วัน มี

ค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 15% ถึง 25% และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจากอายุการบ่ม 28 วันมาเป็น 365 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 26% ถึง 39% ขึ้นอยู่กับปริมาณของเถ้าลอย

ตารางที่ 8 ผลลัพธ์กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Siddique, 2004)

ส่วนผสม	กำลังรับแรงดัด (MPa)			
	7 วัน	28 วัน	91 วัน	365 วัน
M-1 (0% fly ash)	3.8	5.4	5.5	5.6
M-2 (40% fly ash)	2.3	3.6	4.5	5.0
M-3 (45% fly ash)	2.0	3.1	3.9	4.2
M-4 (50% fly ash)	1.8	2.7	3.1	3.3



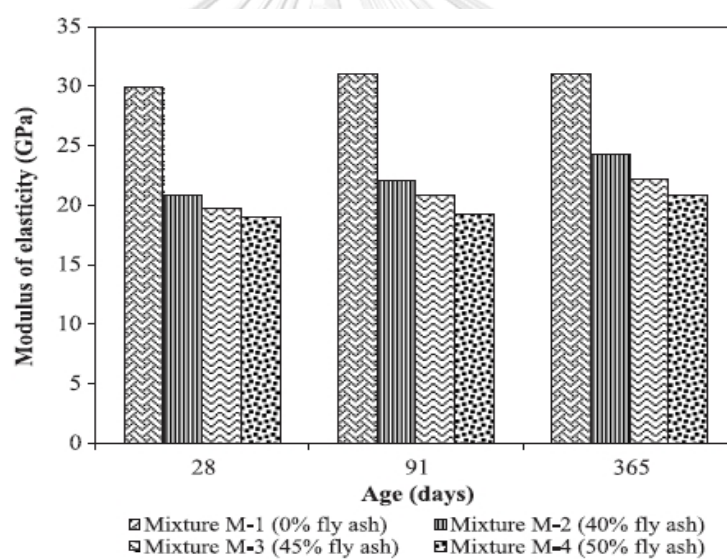
รูปที่ 13 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7, 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004)

ผลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28, 91 และ 365 วัน ได้แสดงในตารางที่ 9 และในรูปที่ 14 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยในสัดส่วนที่มากขึ้นทำให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม M-1 (เถ้าลอย 0% โดยปริมาตร) โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนผสมควบคุม M-1 (เถ้าลอย 0% โดยปริมาตร) มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 29.9 GPa ในขณะที่ส่วนผสม M-2 (เถ้าลอย 40% โดยปริมาตร) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 20.9 GPa ส่วนผสม M-3 (เถ้าลอย 45% โดยปริมาตร) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 19.8 GPa และส่วนผสม M-4 (เถ้าลอย 50% โดยปริมาตร) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 19.0 GPa

โดยจากงานวิจัยฉบับนี้สามารถสรุปได้ว่าความแข็งแรงของคอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าลอย 40%, 45% และ 50% โดยปริมาตร แม้จะมีอายุการบ่มเพียงแค่ 28 วัน ก็มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีตได้

ตารางที่ 9 ผลลัพธ์โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Siddique, 2004)

ส่วนผสม	โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)		
	28 วัน	91 วัน	365 วัน
M-1 (0% fly ash)	29.9	31.0	31.0
M-2 (40% fly ash)	20.9	22.1	24.3
M-3 (45% fly ash)	19.8	20.9	22.2
M-4 (50% fly ash)	19.0	19.2	20.9



รูปที่ 14 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28, 91 และ 365 วัน (Siddique, 2004)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์

งานวิจัยนี้ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) Type I ตามมาตรฐาน ASTM C150M-20 (2020) ที่มีความถ่วงจำเพาะ 3.15 โดยคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ (%)
SiO ₂	17.8
Al ₂ O ₃	4.29
Fe ₂ O ₃	2.97
CaO	61.1
MgO	0.87
Na ₂ O	0.34
K ₂ O	0.26
TiO ₂	0.22
P ₂ O ₅	-
MnO	-
SO ₃	4.14
LOI	1.9

3.1.2 เถ้าลอย

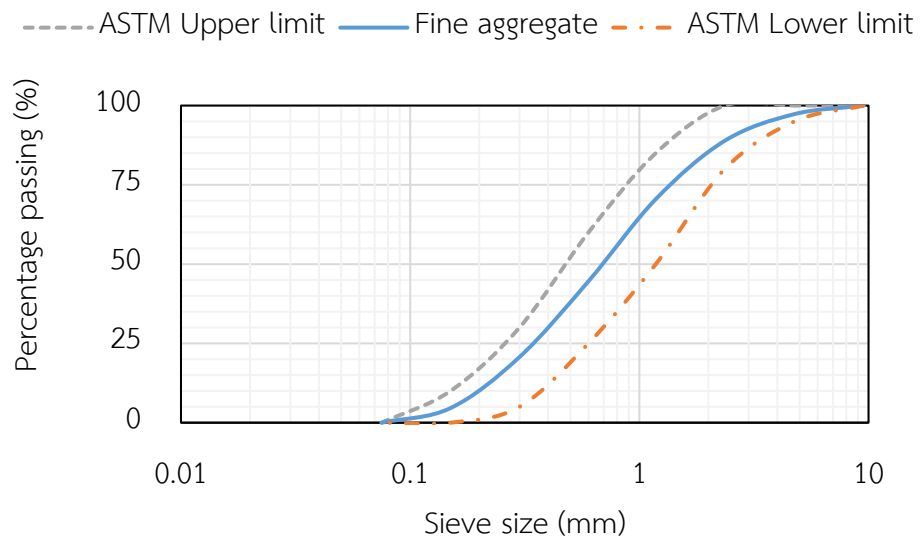
งานวิจัยนี้ใช้เถ้าลอยประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 (2019) ที่มีอนุภาคอยู่ในรูปทรงกลมและมีความถ่วงจำเพาะ 2.54 ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยได้ใช้วิธีการ X-ray fluorescence (XRF) ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของเถ้าลอย

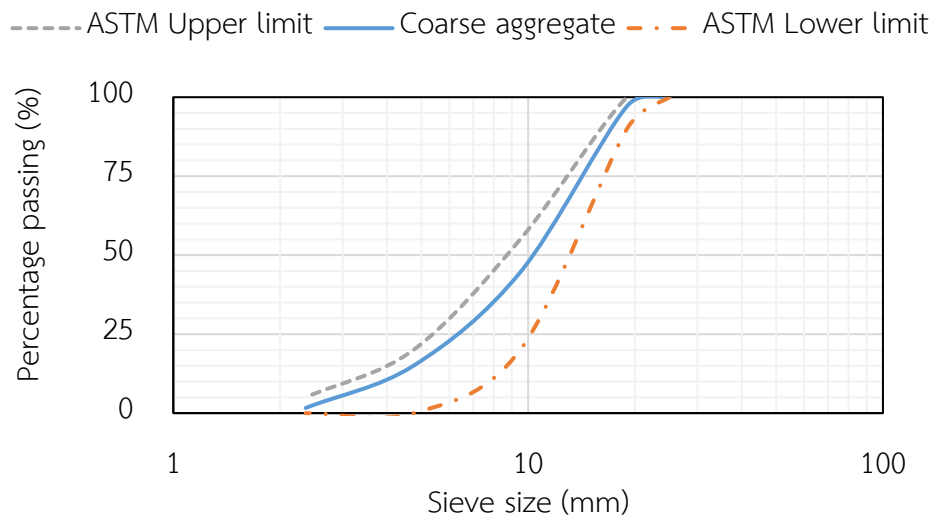
องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (%)
SiO ₂	42.4
Al ₂ O ₃	21.3
Fe ₂ O ₃	13.2
CaO	15.7
MgO	2.3
Na ₂ O	0.9
K ₂ O	2.0
TiO ₂	0.5
P ₂ O ₅	0.2
MnO	0.1
SO ₃	1.0
LOI	0.4

3.1.3 มวลรวมจากธรรมชาติ

งานวิจัยนี้ใช้ทรายและหินจากธรรมชาติในรูปแบบผิวแห้งอิมตัว ที่มีขนาดคละตามข้อกำหนด ASTM C33-03 (2003) มาใช้เป็นมวลรวม โดยมวลรวมละเอียดมีความถ่วงจำเพาะ 2.64 และมวลรวมหยาบมีความถ่วงจำเพาะ 2.67 ทั้งนี้การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของทรายและหินได้มีการทำตามมาตรฐาน ASTM C136 (2019) ดังที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16



รูปที่ 15 ขนาดอนุภาคของมวลรวมละเอียด



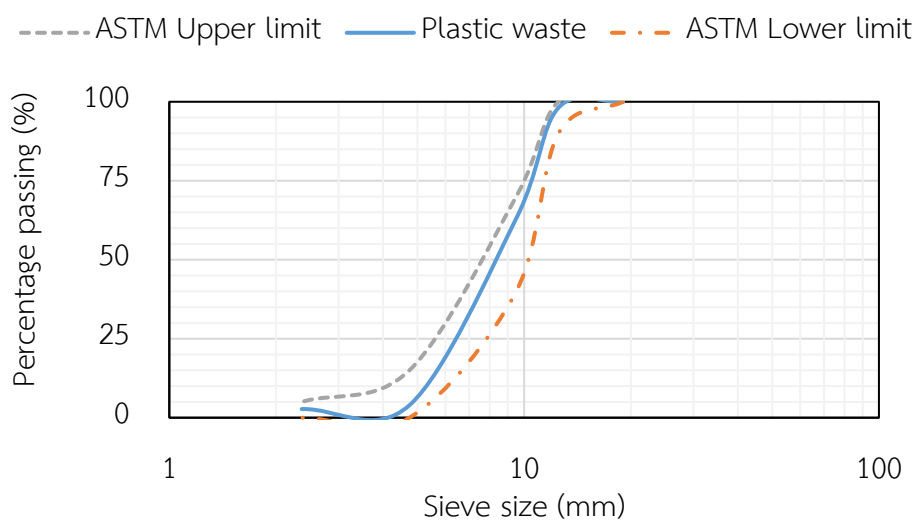
รูปที่ 16 ขนาดอนุภาคของมวลรวมหยาบ

3.1.4 ขยะพลาสติกกรีไฮเซล

งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้ขยะพลาสติกกรีไฮเซล 2 ขนาด ที่มีความถ่วงจำเพาะ 0.9 จากบริษัท แกรนด์สยามคอมโพสิต จำกัด ดังที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 17 ถูกนำมาใช้แทนที่มวลรวมหยาบบางส่วน โดยขยะพลาสติกกรีไฮเซลสีดำเข้มมีขนาด 9.5 มม. และสีขาวขุ่นมีขนาด 12.7 มม. ตามลำดับ ซึ่งขยะพลาสติกกรีไฮเซลทั้งสองขนาดถูกผสมในสัดส่วน 1:1 ซึ่งมีขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 18 แล้วนำไปใช้แทนที่มวลรวมหยาบตามธรรมชาติ



รูปที่ 17 ขยะพลาสติกกรีไฮเซล



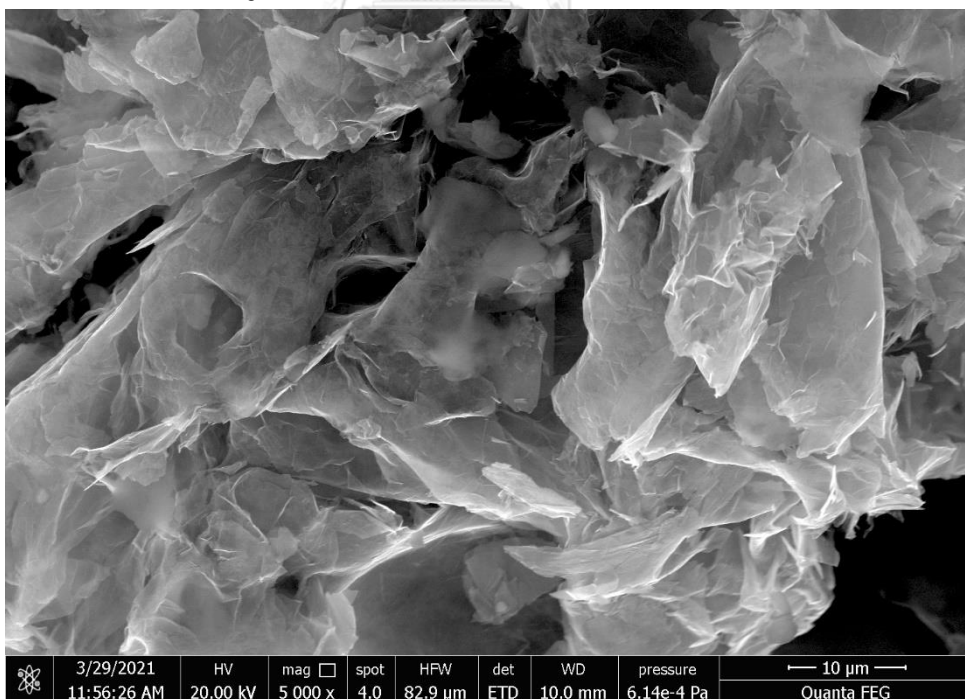
รูปที่ 18 ขนาดอนุภาคของมวลรวมพลาสติก

3.1.5 กราฟีนนาโนเพลทเลต

งานวิจัยนี้ใช้กราฟีนนาโนเพลทเลต (Graphene nanoplatelets; GNP) จากประเทศแคนาดา ที่อยู่ในรูปของผงสีดำ โดยลักษณะและโครงสร้างจุลภาคของกราฟีนนาโนเพลทเลตได้แสดงไว้ดังรูปที่ 19 และรูปที่ 20 และคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ GNP ได้แสดงไว้ในตารางที่ 12



รูปที่ 19 Graphene nanoplatelets (GNP)



รูปที่ 20 โครงสร้างจุลภาคของกราฟีนนาโนเพลทเลต

ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ GNP

คุณสมบัติ	GNP
Diameter (μm)	2 – 7
Thickness (nm)	2 – 10
Specific surface area (m^2/g)	16.48
Electrical conductivity (S/m)	80000
Carbon content (%)	95
Apparent density (g/ml)	0.06 – 0.09
Water content (wt.%)	< 2
Weighted residual (wt.%)	0.2
Concentration (%)	0.25
Uniformity	0.52

3.1.6 สารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำที่ใช้เป็นสารลดน้ำพิเศษที่ประสิทธิภาพสูง (Superplasticizers) มีชื่อทางการค้าว่า Sika ViscoCrete-10 TH โดยสารลดน้ำพิเศษอยู่ในรูปแบบของเหลวสีน้ำตาลอ่อนปราศจากคลอไรด์ที่มีค่า pH 4.97 และมีความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ทั้งนี้ได้มีการใช้สารลดน้ำพิเศษพิเศษร่วมกับการผสมน้ำเพื่อกระจายสาร GNP โดยสารลดน้ำพิเศษจะถูกใส่ที่ 1% โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์และแก้าลอย

3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมควบคุม คือ คอนกรีตปกติที่ไม่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกกรีซเคิล แก้วลอย และ GNP ได้รับการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 (2002) สำหรับส่วนผสมที่เหล็จะใช้แก้วลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 0%, 20%, 40%, 60% และ 80% โดยปริมาตร ขยะพลาสติกกรีซเคิลถูกใช้เพื่อแทนที่มวลรวมหยาบที่ 0%, 15%, 30%, 45% และ 60% โดยปริมาตร และสาร GNP ถูกใส่เพิ่มที่ 0%, 0.075%, 0.15%, 0.225% และ 0.30% โดยน้ำหนัก โดยได้ทำการใช้ซอฟต์แวร์ Design Expert Version 10 เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนผสมของคอนกรีตด้วย Response Surface Methodology (RSM) จากการวิเคราะห์ได้คอนกรีตทั้งหมด 19 ส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 13 โดยส่วนผสมแต่ละส่วนผสมได้มีการตั้งชื่อตามปริมาณของขยะพลาสติกกรีซเคิล (P), แก้วลอย (F) และสาร GNP (G)

ตัวอย่างเช่น ส่วนผสม P30-F40-G0.15 หมายถึง ส่วนผสมที่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกรีไซเคิล 30% โดยปริมาตร ฝัากลอย 40% โดยปริมาตร และสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก โดยในส่วนของ ส่วนผสมทั้ง 19 ส่วนผสม ประกอบไปด้วยจุดในแนวแกน 14 จุด และจุดศูนย์กลาง 5 จุด ซึ่งจุด ศูนย์กลางได้มีการทำซ้ำของส่วนผสมเพื่อเพิ่มความแม่นยำและเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง โดยส่วนผสม P30-F40-G0.15 เป็นจุดศูนย์กลางของส่วนผสมในการศึกษานี้ ปริมาณวัสดุ สำหรับการผสมคอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 13 สัดส่วนส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	พลาสติก (%)	ฝัากลอย (%)	GNP (%)
ควบคุม	0	0	0
P30-F40-G0.15	30	40	0.15
P0-F40-G0.15	0	40	0.15
P45-F60-G0.075	45	60	0.075
P30-F40-G0.30	30	40	0.30
P60-F40-G0.15	60	40	0.15
P15-F20-G0.225	15	20	0.225
P45-F20-G0.225	45	20	0.225
P30-F0-G0.15	30	0	0.15
P45-F20-G0.075	45	20	0.075
P15-F60-G0.225	15	60	0.225
P15-F60-G0.075	15	60	0.075
P45-F60-G0.225	45	60	0.225
P15-F20-G0.075	15	20	0.075
P30-F80-G0.15	30	80	0.15
P30-F40-G0	30	40	0

ตารางที่ 14 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ (kg/m ³)	เถ้าลอย (kg/m ³)	น้ำ (kg/m ³)	มวลรวมละเอียด (kg/m ³)	มวลรวมหยาบ (kg/m ³)	ขยะพลาสติกกรี ไซเติล (kg/m ³)	GNP (kg/m ³)	Superplasticizers (kg/m ³)
ควบคุม	420.7	0	159.4	653.9	1176.9	0	0	4.2
P30-F40-G0.15	252.4	122.9	159.4	653.9	823.9	43.7	0.6	3.8
P0-F40-G0.15	252.4	122.9	159.4	653.9	1176.9	0	0.6	3.8
P45-F60-G0.075	168.3	184.3	159.4	653.9	647.3	65.5	0.3	3.5
P30-F40-G0.30	252.4	122.9	159.4	653.9	823.9	43.7	1.1	3.8
P60-F40-G0.15	252.4	122.9	159.4	653.9	470.8	87.4	0.6	3.8
P15-F20-G0.225	336.6	61.4	159.4	653.9	1000.4	21.8	0.9	4.0
P45-F20-G0.225	336.6	61.4	159.4	653.9	647.3	65.5	0.9	4.0
P30-F0-G0.15	420.7	0	159.4	653.9	823.9	43.7	0.6	4.2
P45-F20-G0.075	336.6	61.4	159.4	653.9	647.3	65.5	0.3	4.0
P15-F60-G0.225	168.3	184.3	159.4	653.9	1000.4	21.8	0.8	3.5
P15-F60-G0.075	168.3	184.3	159.4	653.9	1000.4	21.8	0.3	3.5
P45-F60-G0.225	168.3	184.3	159.4	653.9	647.3	65.5	0.8	3.5
P15-F20-G0.075	336.6	61.4	159.4	653.9	1000.4	21.8	0.3	4.0
P30-F80-G0.15	84.2	245.8	159.4	653.9	823.9	43.7	0.5	3.3
P30-F40-G0	252.4	122.9	159.4	653.9	823.9	43.7	0	3.8

3.3 ขั้นตอนการเตรียมและการหล่อคอนกรีต

ขนาดของแบบหล่อคอนกรีตประกอบด้วยทรงลูกบาศก์ขนาด 100 มม. × 100 มม. × 100 มม. ปริซึมสี่เหลี่ยมขนาด 100 มม. × 100 มม. × 350 มม. และทรงกระบอก 2 ขนาด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. × ความสูง 200 มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. × ความสูง 300 มม. ทั้งนี้คอนกรีตที่ผสมเสร็จจะถูกเทลงในแบบหล่อคอนกรีตเหล็กตามขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่กำหนดไว้ข้างต้น โดยได้ทำตามมาตรฐาน ASTM C192 / 192M (2019) แบบหล่อคอนกรีตได้รับการทำความสะอาด ลี้ออย่างแน่นหนาและทาน้ำมันเรียบบริเวณก่อนทำการหล่อ แบบหล่อคอนกรีตถูกเติมโดยการแบ่งเทสามชั้น โดยแต่ละชั้นจะถูกบดอัดให้แน่นโดยใช้การสั่นสะเทือนคอนกรีตก่อนที่จะเทชั้นถัดไป หลังจากเติมแบบหล่อคอนกรีตจนเต็มเรียบบริเวณแล้วพื้นผิวด้านบนจะถูกปาดออกเพื่อนำคอนกรีตส่วนเกินออกและเพื่อให้ได้พื้นผิวที่เรียบเนียน หลังจากนั้น 24 ชั่วโมง ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกนำออกจากแบบหล่อคอนกรีตและนำไปบ่มในน้ำตามอายุการบ่ม

3.4 รายละเอียดการทดสอบ

3.4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน BS 12390-3 (2009) โดยใช้คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100 มม. × 100 มม. × 100 มม. จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละส่วนผสม ทั้งนี้การทดสอบดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) 3000 KN สำหรับส่วนผสมแต่ละตัวอย่างนั้นกำลังรับแรงอัดจะถูกทำการทดสอบหลังจากระยะเวลาการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน แล้วทำการเฉลี่ยผลลัพธ์ในแต่ละกรณี

3.4.2 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (Splitting tensile strength)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 12390-6 (2009) โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และความสูง 200 มม. จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละส่วนผสม สำหรับส่วนผสมแต่ละตัวอย่างนั้นกำลังรับแรงดึงแยกจะถูกทำการทดสอบหลังจากระยะเวลาการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน แล้วทำการเฉลี่ยผลลัพธ์ในแต่ละกรณี

3.4.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural strength)

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C78M (2021) โดยใช้ตัวอย่างปริซึมสี่เหลี่ยมขนาด 100 มม. × 100 มม. × 350 มม. จำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละส่วนผสม สำหรับส่วนผสมแต่ละตัวอย่างนั้นกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจะถูกทำการทดสอบหลังจากระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน แล้วทำการเฉลี่ยผลลัพธ์ในแต่ละกรณี

3.4.4 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity)

การทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้น ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469M (2014) โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. และความสูง 300 มม. จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละส่วนผสม สำหรับส่วนผสมแต่ละตัวอย่างนั้นโมดูลัสความยืดหยุ่นจะถูกทำการทดสอบหลังจากระยะเวลาการบ่ม 28 วัน แล้วทำการเฉลี่ยผลลัพธ์ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้นได้แสดงไว้ในสมการที่ 1

$$E_c = \frac{(\sigma_c - \sigma_1)}{(\epsilon_c - 0.00005)} \quad (1)$$

โดยที่ E_c หมายถึง โมดูลัสความยืดหยุ่น

σ_c หมายถึง ความเค้นที่สอดคล้องกับ 40% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด

σ_1 หมายถึง ความเค้นที่เทียบเท่ากับค่าความเครียดตามยาวที่ 0.00005

ϵ_c หมายถึง ค่าความเครียดตามยาวที่เทียบเท่ากับ σ_2

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปราย

คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีซเคลิ์ เถ้าลอย และสาร Graphene nanoplatelets (GNP) ที่ศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ ประกอบไปด้วย กำลังรับอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 12390-3 (2009) กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS EN 12390-6 (2009) กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C78M (2021) และโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469M (2014) โดยผลการทดสอบที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุบ่ม 3, 7 และ 28 วัน แสดงในตารางที่ 15 และได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 21 ในส่วนของสีแดงบนกราฟ 3 มิติ แสดงถึงค่ากำลังรับแรงอัดที่สูง ในขณะที่สีเขียวแสดงถึงค่ากำลังรับแรงอัดปานกลาง และสีน้ำเงินแสดงถึงค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ

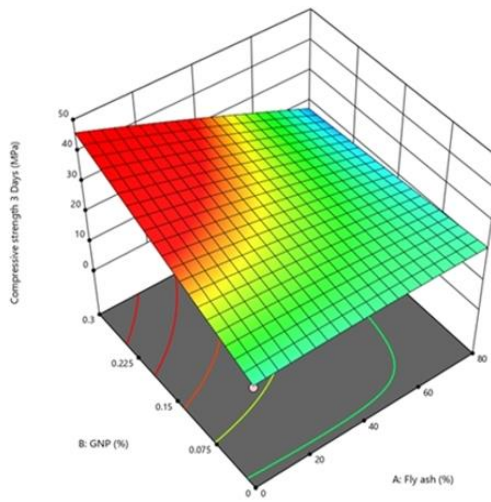
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีซเคลิ์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด และคอนกรีตที่มีขยะพลาสติกกรีซเคลิ์ 60% โดยปริมาตร มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เมื่อมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีซเคลิ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากส่วนผสม P0-F40-G0.15, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P60-F40-G0.15 ที่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร และสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนักเท่ากัน แต่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีซเคลิ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วันพบว่า กำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P0-F40-G0.15 ที่อายุการบ่ม 3 วันมีค่า 26.5 MPa กำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่อายุการบ่ม 3 วันมีค่า 20.6 MPa และกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P60-F40-G0.15 ที่อายุการบ่ม 3 วันมีค่า 16.3 MPa ซึ่งจะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F40-G0.15 ลดลง 22.3% และส่วนผสม P60-F40-G0.15 ลดลง 38.5% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P0-F40-G0.15 ที่ไม่มีมีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีซเคลิ์ โดยสาเหตุที่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง สาเหตุหนึ่งเกิดจากผลกระทบเชิงลบจากการแทนที่มวลรวมหยาบตามธรรมชาติด้วยขยะพลาสติกกรีซเคลิ์ โดยจาก

งานวิจัยของ Subramani และ Pugal (2015) ที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของขยะพลาสติกในคอนกรีต ซึ่งพบว่าขยะพลาสติกมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่ามวลรวมตามธรรมชาติ จึงทำให้มีน้ำเหลืออยู่ในเนื้อคอนกรีตมากกว่า ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนภายในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง

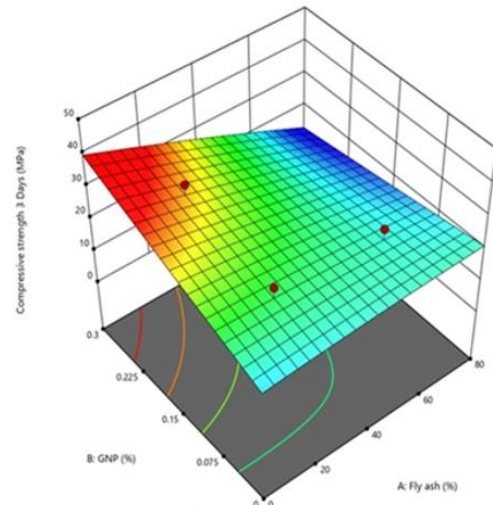
ตารางที่ 15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (MPa)		
	อายุการบ่ม 3 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
ควบคุม	20.8±0.3	27.6±0.7	37.8±1.7
P0-F40-G0.15	26.5±4.5	31.3±0.9	40.1±2.4
P30-F40-G0.30	22.6±2.1	27.6±0.8	35.2±1.5
P45-F20-G0.225	23.6±2.9	27.6±1.0	34.3±1.5
P15-F20-G0.075	26.5±3.0	31.6±0.9	37.1±1.1
P30-F40-G0	16.3±0.3	19.5±0.5	26.8±1.4
P45-F20-G0.075	26.7±1.6	31.5±0.5	36.1±1.5
P30-F80-G0.15	15.4±1.2	18.8±0.8	25.5±1.6
P15-F20-G0.225	33.1±1.1	35.3±1.8	41.6±0.6
P30-F40-G0.15	20.6±0.6	23.7±1.2	31.1±1.1
P45-F60-G0.225	18.1±0.7	24.5±0.5	30.3±0.6
P30-F0-G0.15	22.3±1.3	33.1±1.6	39.2±1.1
P60-F40-G0.15	16.3±1.1	22.5±1.2	26.9±1.5
P15-F60-G0.075	24.1±3.2	33.5±1.2	36.3±0.3
P45-F60-G0.075	20.3±2.8	24.8±1.3	30.1±1.5
P15-F60-G0.225	17.8±0.9	30.9±1.4	36.7±1.7

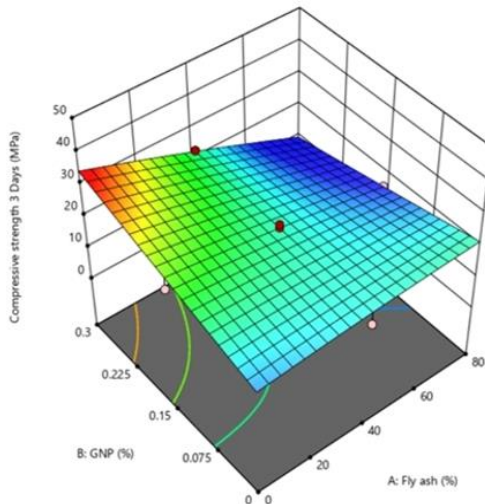
หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ±ข้อผิดพลาดมาตรฐาน (SE) ที่ได้มาจากสามเท่าของตัวอย่างส่วนผสม



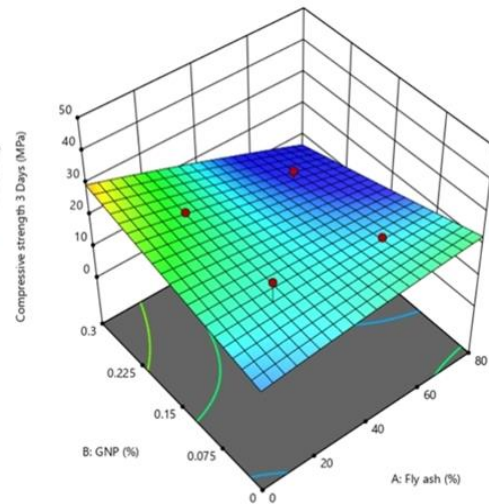
(น) Plastic waste 0%



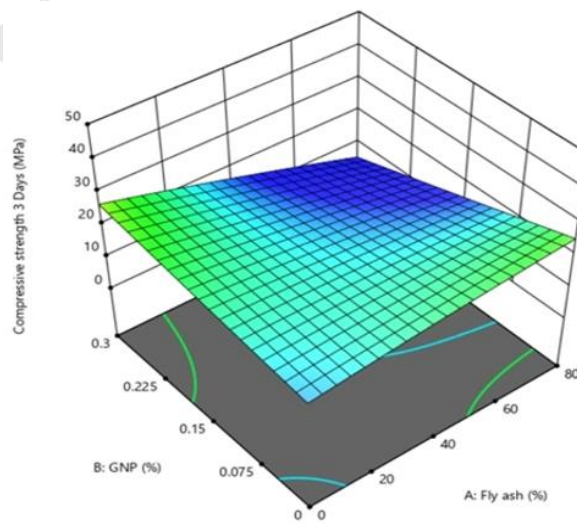
(ญ) Plastic waste 15%



(ค) Plastic waste 30%



(ง) Plastic waste 45%

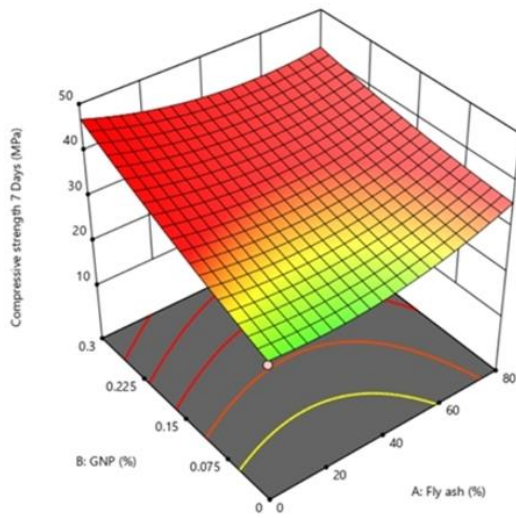


(จ) Plastic waste 60%

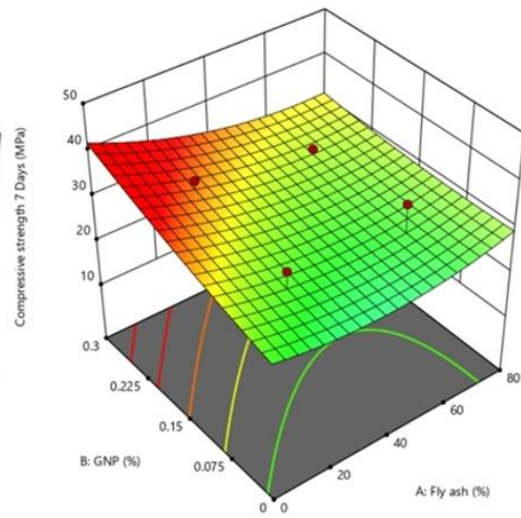
รูปที่ 21 กราฟ 3 มิติแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการป่ม 3 วัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซลมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้จาก **รูปที่ 22** ว่ากราฟ 3 มิติของคอนกรีตที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล มีพื้นที่สีแดงเกือบทั้งหมดและมีพื้นที่สีเขียวเพียงบางส่วน และจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เมื่อมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จาก **รูปที่ 22** ว่าพื้นที่สีแดงของกราฟ 3 มิติค่อยๆลดลง โดยมีพื้นที่สีเขียวเพิ่มมากขึ้น จนเมื่อมีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร จะเห็นกราฟ 3 มิติที่มีพื้นที่สีน้ำเงินเข้มและมีพื้นที่สีแดงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ต่ำ

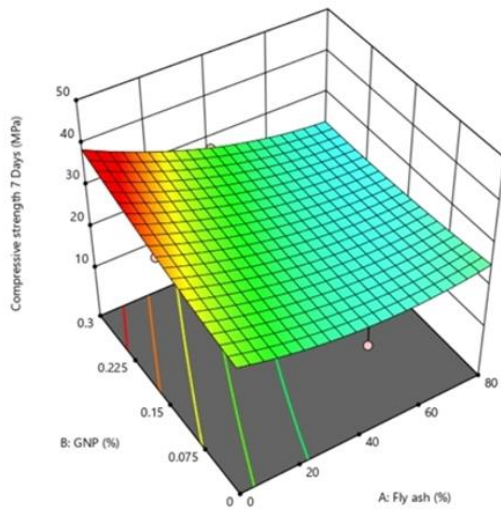
เช่นเดียวกันกับกรณีของเถ้าลอย จากกราฟ 3 มิติใน **รูปที่ 22** จะเห็นได้ว่าเมื่อเถ้าลอยมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้จาก ส่วนผสม P30-F80-G0.15, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P30-F0-G0.15 ใน **ตารางที่ 15** ที่มีส่วนประกอบของสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก และขยะพลาสติกกรีไฮเซล 30% โดยปริมาตรเท่ากัน แต่มีปริมาณของเถ้าลอยที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P30-F80-G0.15 มีปริมาณของเถ้าลอย 80% โดยปริมาตร ส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีปริมาณเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร และส่วนผสม P30-F0-G0.15 ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย โดยจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วันพบว่า กำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F80-G0.15 ที่อายุการบ่ม 7 วันมีค่า 18.8 MPa กำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่อายุการบ่ม 7 วันมีค่า 23.7 MPa และกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F0-G0.15 ที่อายุการบ่ม 7 วันมีค่า 33.1 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F80-G0.15 ที่มีปริมาณของเถ้าลอย 80% โดยปริมาตร ลดลง 43.2% และค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณของเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร ลดลง 28.4% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P30-F0-G0.15 ที่ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย ซึ่งสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นลดลง เนื่องจากเมื่อใช้เถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อยลงในช่วงต้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate) ที่น้อยลง อันเป็นองค์ประกอบหลักในการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุน้อย (Malhotra, 2002) โดยส่วนผสม P30-F80-G0.15 ที่มีปริมาณของเถ้าลอยสูงถึง 80% โดยปริมาตร ส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำที่สุด โดยมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง 31.9% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม



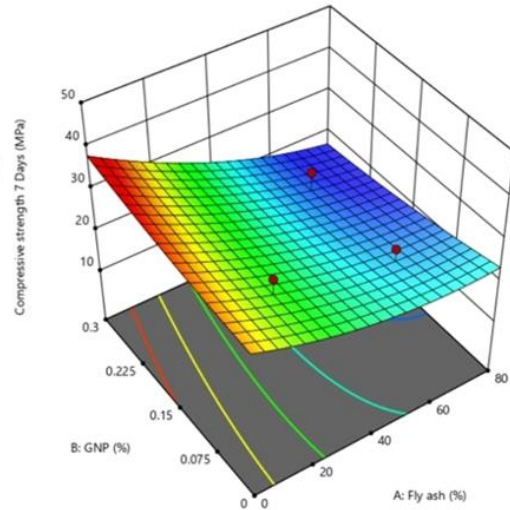
(ก) Plastic waste 0%



(ข) Plastic waste 15%

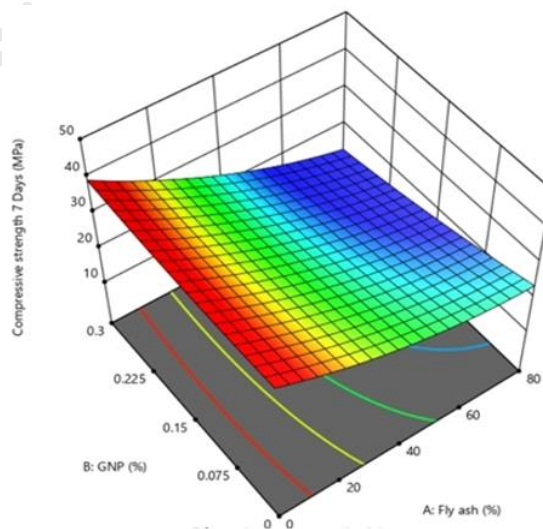


(ค) Plastic waste 30%



(ง) Plastic waste 45%

C

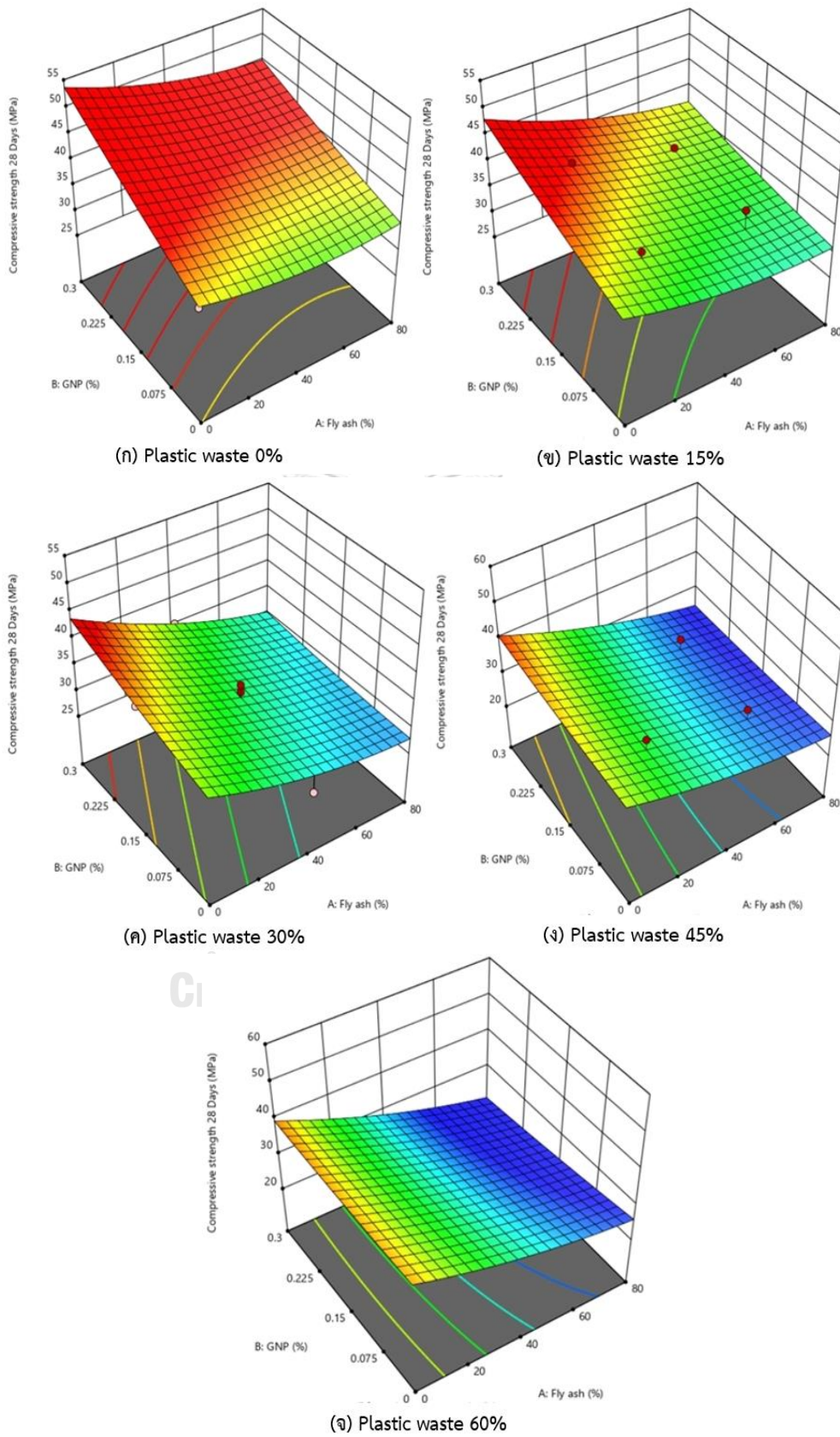


(จ) Plastic waste 60%

รูปที่ 22 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน

เช่นเดียวกันกับคอนกรีตที่อายุ 3 และ 7 วัน จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีซไคเคิลเพิ่มขึ้น หรือเมื่อคอนกรีตมีปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงในช่วงต้นของอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 23

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มสาร GNP เข้าไปในคอนกรีตพบว่าสามารถช่วยให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะเห็นได้จากส่วนผสม P30-F40-G0.30, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P30-F40-G0 ในตารางที่ 15 ที่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีซไคเคิล 30% โดยปริมาตร และเถ้าลอย 40% โดยปริมาตรเท่ากัน แต่มีปริมาณของสาร GNP ที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P30-F40-G0.30 มีปริมาณสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก ส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีปริมาณสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก และส่วนผสม P30-F40-G0 ไม่มีการเติมสาร GNP ลงไปเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันพบว่า กำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F40-G0.30 มีค่า 35.2 MPa กำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีค่า 31.1 MPa และกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีค่า 26.8 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของสาร GNP เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 16% และส่วนผสม P30-F40-G0.30 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 31.3% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P30-F40-G0 ที่ไม่มีการเติมสาร GNP ลงไปเป็นส่วนประกอบ โดยปัจจัยที่มีส่วนในการช่วยให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น มีผลมาจากสาร GNP ที่มีส่วนในการช่วยส่งเสริมอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ในคอนกรีต ทำให้สามารถผลิตแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate) หรือ C-S-H ได้มากขึ้น ซึ่งเมื่อมีการผลิต C-S-H ที่มากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น (Jiang et al., 2021) จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น โดยส่วนผสม P15-F20-G0.225 ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงที่สุด มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น 10.1% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม



รูปที่ 23 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.2 กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (Splitting tensile strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 12390-6 (2009) ที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน แสดงในตารางที่ 16 และได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ เช่นเดียวกับกรณีของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยในส่วนของสี่แดงบนกราฟ 3 มิติ แสดงถึงค่ากำลังรับแรงดึงแยกที่สูง ในขณะที่สีเขียวแสดงถึงค่ากำลังรับแรงดึงแยกปานกลาง และสีน้ำเงินแสดงถึงค่ากำลังรับแรงดึงแยกที่ต่ำ

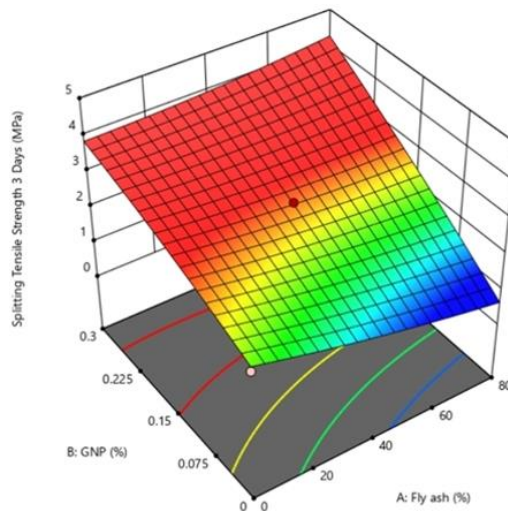
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซลมีค่ากำลังรับแรงดึงแยกสูงที่สุด และคอนกรีตที่มีขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร มีค่ากำลังรับแรงดึงแยกน้อยที่สุด โดยจะเห็นได้จากกราฟ 3 มิติ ที่แสดงในรูปที่ 24 ว่ากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลงเมื่อมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากส่วนผสม P0-F40-G0.15, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P60-F40-G0.15 ที่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร และสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนักเท่ากัน แต่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซลที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วันพบว่ากำลังรับแรงดึงแยกของส่วนผสม P0-F40-G0.15 มีค่า 2.8 MPa กำลังรับแรงดึงแยกของส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีค่า 1.9 MPa และกำลังรับแรงดึงแยกของส่วนผสม P60-F40-G0.15 มีค่า 1.5 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงดึงแยกของส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 30% โดยปริมาตร ลดลง 32.1% และส่วนผสม P60-F40-G0.15 ที่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร ลดลง 46.4% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P0-F40-G0.15 ที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล โดยจากงานวิจัยของ Almeshal และคณะ (2020) ที่ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของขยะพลาสติกในคอนกรีต ซึ่งพบว่าขยะพลาสติกมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เรียบและลื่นกว่ามวลรวมหยาบตามธรรมชาติ จึงส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างขยะพลาสติกและซีเมนต์เพสต์ด้อยลง ทำให้กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลง โดยส่วนผสม P30-F80-G0.15 มีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตต่ำที่สุด ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลง 47.6% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

นอกจากนี้กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตยังลดลงในช่วงต้นอายุการบ่ม เมื่อคอนกรีตมีปริมาณของเถ้าลอยที่สูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟ 3 มิติ ในรูปที่ 24 ว่าพื้นที่สีน้ำเงินที่เพิ่มขึ้นเกิดจากปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อมีปริมาณ GNP ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

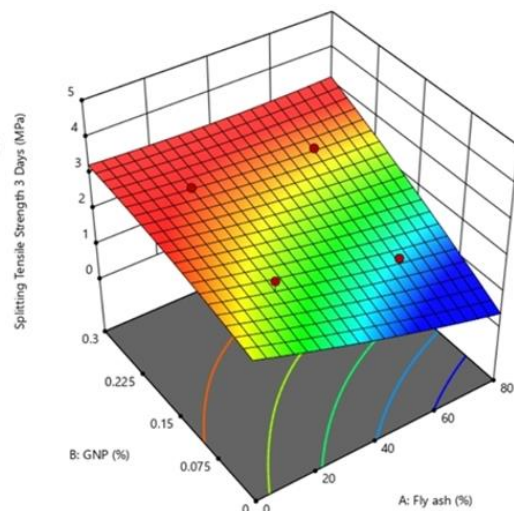
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต

ส่วนผสม	กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต (MPa)		
	อายุการบ่ม 3 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
ควบคุม	2.1±0.1	2.4±0.1	3.3±0.1
P0-F40-G0.15	2.8±0.3	3.0±0.5	3.9±0.1
P30-F40-G0.30	2.3±0.2	2.8±0.2	3.7±0.1
P45-F20-G0.225	2.3±0.1	2.8±0.1	3.1±0.2
P15-F20-G0.075	2.6±0.1	3.1±0.1	3.5±0.3
P30-F40-G0	1.4±0.1	1.8±0.1	2.2±0.1
P45-F20-G0.075	2.6±0.1	2.8±0.1	3.0±0.1
P30-F80-G0.15	1.1±0.1	1.4±0.1	2.3±0.1
P15-F20-G0.225	3.0±0.1	3.5±0.1	4.2±0.2
P30-F40-G0.15	1.9±0.1	2.3±0.1	3.2±0.1
P45-F60-G0.225	1.9±0.1	2.3±0.2	3.0±0.2
P30-F0-G0.15	3.0±0.2	3.2±0.3	4.0±0.2
P60-F40-G0.15	1.5±0.1	1.6±0.1	2.3±0.1
P15-F60-G0.075	1.6±0.2	2.6±0.2	2.9±0.1
P45-F60-G0.075	1.3±0.1	1.7±0.1	2.0±0.2
P15-F60-G0.225	2.7±0.2	3.0±0.1	3.3±0.2

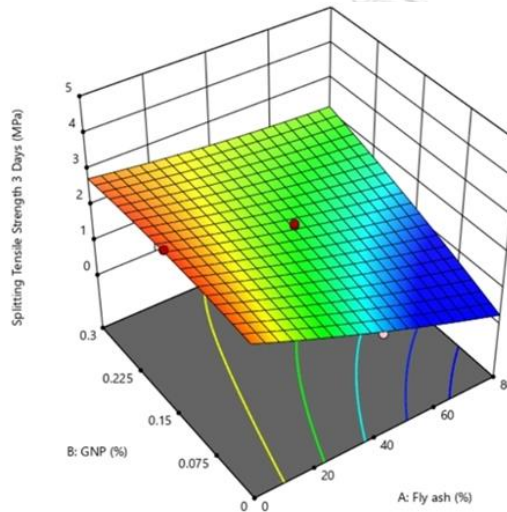
หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ±ข้อผิดพลาดมาตรฐาน (SE) ที่ได้มาจากสามเท่าของตัวอย่างส่วนผสม



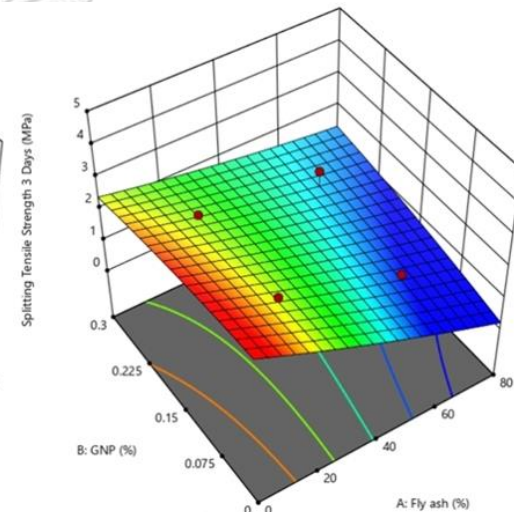
(น) Plastic waste 0%



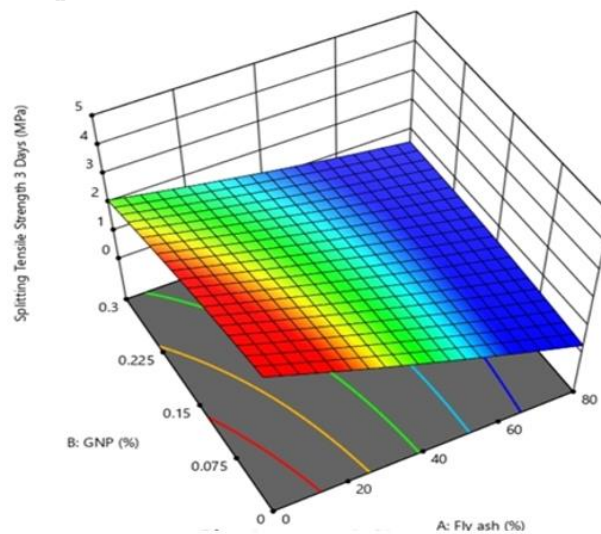
(ข) Plastic waste 15%



(ค) Plastic waste 30%



(ง) Plastic waste 45%

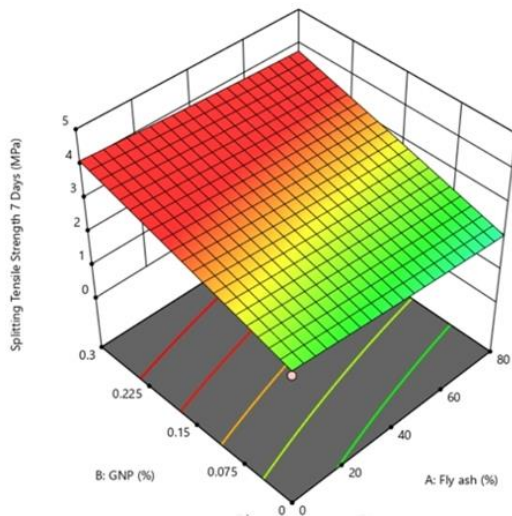


(จ) Plastic waste 60%

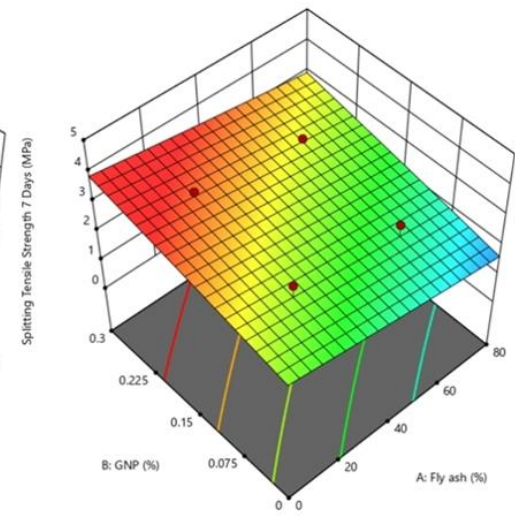
รูปที่ 24 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลงเมื่อมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีซเคลิ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จาก**รูปที่ 25** ว่าพื้นที่สีแดงของกราฟ 3 มิติแนวโน้มลดลง โดยมีพื้นที่สีเขียวเพิ่มมากขึ้น จนเมื่อมีปริมาณขยะพลาสติกกรีซเคลิ์ 60% โดยปริมาตร จะเห็นว่ากราฟ 3 มิติพื้นที่สีเขียวและสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งแสดงถึงค่ากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่ต่ำ

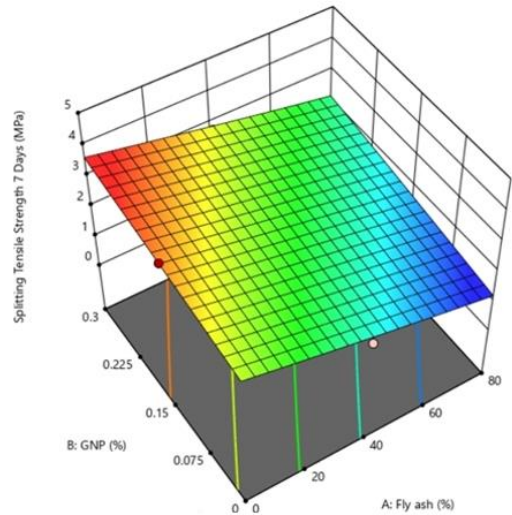
จากการทดสอบเมื่อคอนกรีตมีปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้จากส่วนผสม P30-F80-G0.15, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P30-F0-G0.15 ใน**ตารางที่ 16** ที่มีส่วนประกอบของสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก และขยะพลาสติกกรีซเคลิ์ 30% โดยปริมาตรเท่ากัน แต่มีปริมาณของเถ้าลอยที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P30-F80-G0.15 มีปริมาณของเถ้าลอย 80% โดยปริมาตร และมีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วันอยู่ที่ 1.4 MPa ส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีปริมาณของเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร และมีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วันอยู่ที่ 2.3 MPa และส่วนผสม P30-F0-G0.15 ที่ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย และมีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วันอยู่ที่ 3.2 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนผสม P30-F80-G0.15 ที่มีปริมาณเถ้าลอย 80% โดยปริมาตร มีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลง 56.3% และส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร มีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลง 28.1% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P30-F0-G0.15 ที่ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย โดยสาเหตุที่ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตในช่วงต้นอายุการบ่มลดลง เกิดจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ของเถ้าลอยจะเกิดหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้การผลิตแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate) ช้าลง (Halstead, 1986) โดยแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต หรือ C-S-H เป็นองค์ประกอบสำคัญในการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีต เมื่อการผลิต C-S-H ช้าลงหรือลดลงจึงส่งผลให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง โดยส่วนผสม P30-F80-G0.15 ที่มีปริมาณของเถ้าลอยสูงถึง 80% โดยปริมาตร ส่งผลให้มีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตต่ำที่สุด โดยมีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลง 41.7% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม



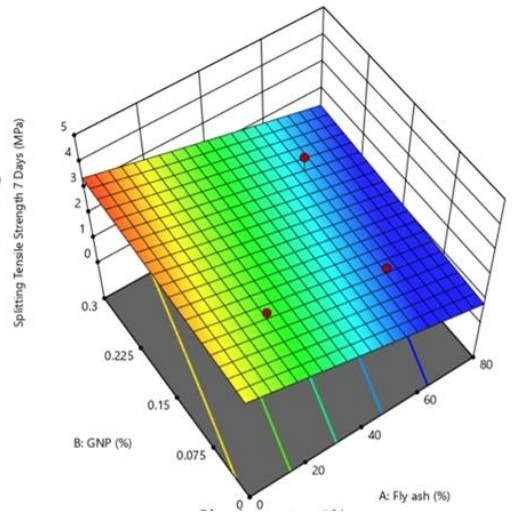
(น) Plastic waste 0%



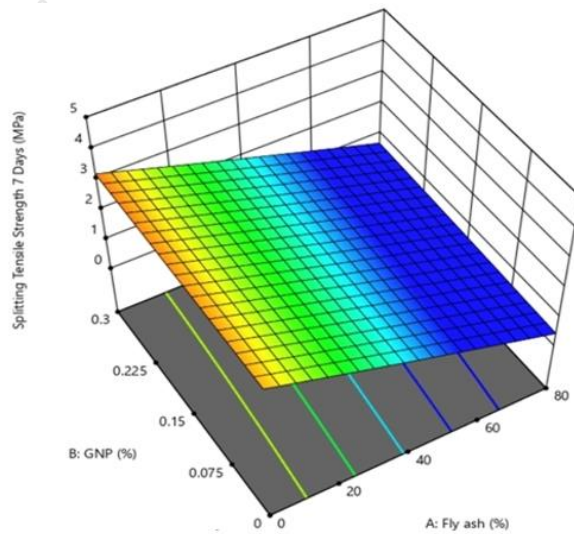
(ข) Plastic waste 15%



(ค) Plastic waste 30%



(ง) Plastic waste 45%

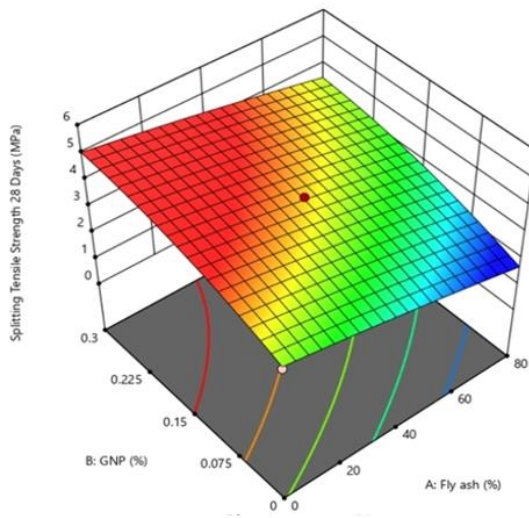


(จ) Plastic waste 60%

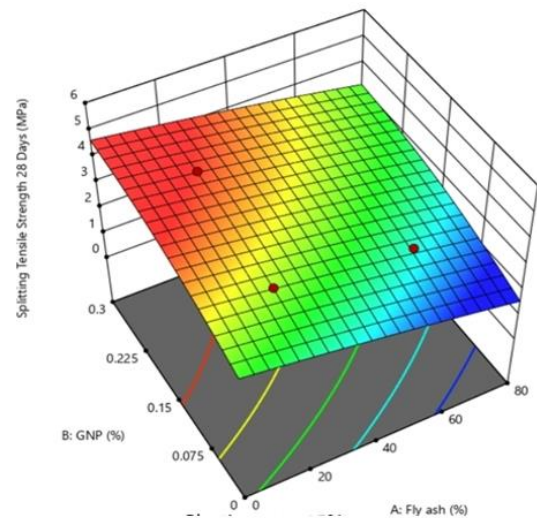
รูปที่ 25 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 28 วัน เป็นไปในทิศทางเดียวกับกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 3 วัน และ 7 วัน พบว่ากำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตลดลง เมื่อปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซลในคอนกรีตเพิ่มขึ้น หรือเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กำลังรับแรงดึงแยกในช่วงต้นอายุการบ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้จาก**รูปที่ 26**

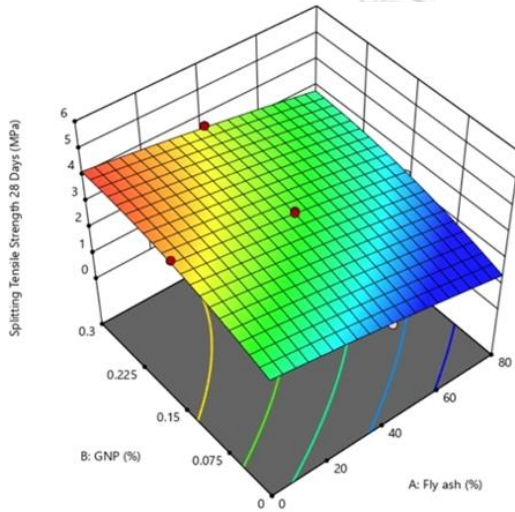
อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตมีปริมาณสาร GNP เพิ่มขึ้น ก็สามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดึงแยกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยจะเห็นได้จากส่วนผสม P30-F40-G0.30, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P30-F40-G0 ใน**ตารางที่ 16** ที่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล 30% โดยปริมาตร และเถ้าลอย 40% โดยปริมาตรเท่ากัน แต่มีปริมาณของสาร GNP ที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P30-F40-G0.30 มีปริมาณสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก และมีกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ที่ 3.7 MPa ส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีปริมาณสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก และมีกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ที่ 3.2 MPa และส่วนผสม P30-F40-G0 ที่ไม่มีการเติมสาร GNP เข้าไปเป็นส่วนประกอบ และมีกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ที่ 2.2 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนผสม P30-F40-G0.30 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 68.2% และส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 45.5% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P30-F40-G0 ที่ไม่มีการเติมสาร GNP เข้าไปเป็นส่วนประกอบ โดยผลจากสาร GNP มีส่วนในการช่วยให้กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสาร GNP ที่มีส่วนในการช่วยส่งเสริมอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ในคอนกรีต ทำให้สามารถผลิตแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate) หรือ C-S-H ที่มีความหนาแน่นสูงกว่า C-S-H ปกติ ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงที่มากกว่าคอนกรีตทั่วไป (Jiang et al., 2021) โดยส่วนผสม P15-F20-G0.225 ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันสูงที่สุด มีกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น 27.3% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม



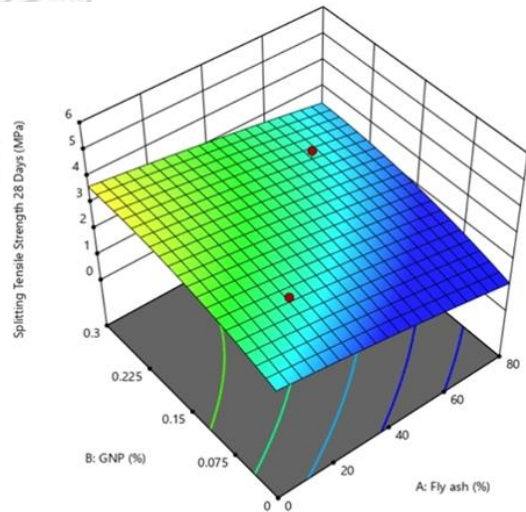
(น) Plastic waste 0%



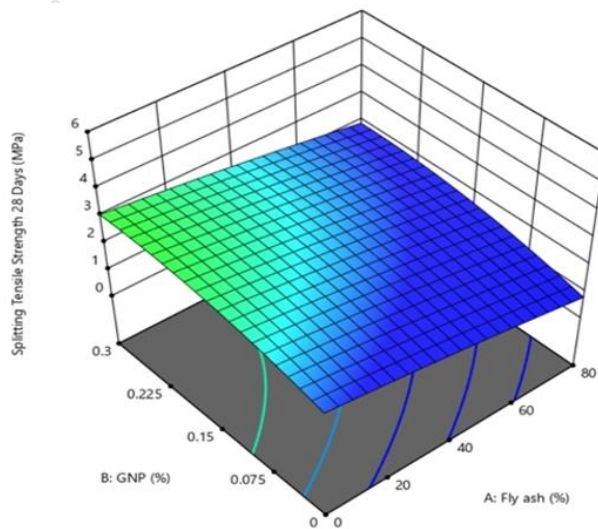
(จ) Plastic waste 15%



(ค) Plastic waste 30%



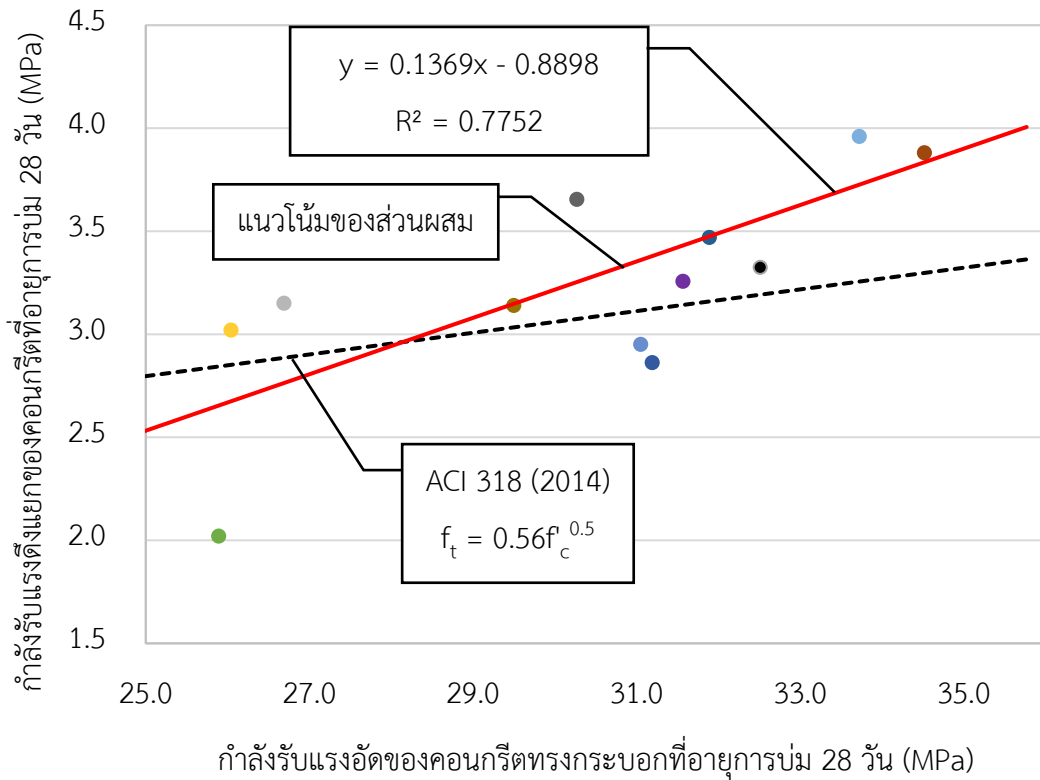
(ง) Plastic waste 45%



(ฉ) Plastic waste 60%

รูปที่ 26 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

นอกจากนี้ในรูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดิ่งแยกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งได้ทำการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดจากตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100 มม. เป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 200 มม. โดยอ้างอิงจากสมการมาตรฐาน BS EN 206-1 (2000) ที่ได้ระบุสมการการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตไว้ว่า $f_{c, \text{cyl}100 \times 200} = 0.86f_{c, \text{cube}100}$ (Zabih et al., 2014) ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 27 ว่ากำลังรับแรงดิ่งแยกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน โดยจากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดิ่งแยกของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ros และคณะ (2013) ที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) และพบว่ากำลังรับแรงดิ่งแยกของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้น โดยส่วนผสม P15-F20-G0.225 มีกำลังรับแรงดิ่งแยกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันสูงที่สุด โดยมีกำลังรับแรงดิ่งแยกของคอนกรีตอยู่ที่ 4.2 MPa และมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอยู่ที่ 41.6 MPa และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการจากมาตรฐาน ACI 318 (2014) พบว่าส่วนผสมส่วนใหญ่มีกำลังรับแรงดิ่งแยกสูงกว่าที่กำหนดโดย ACI 318 (2014) ในขณะที่ส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงดิ่งแยกต่ำกว่าที่มาตรฐาน ACI 318 (2014) กำหนดอาจเกิดมาจากการแทนที่ของขยะพลาสติกและเถ้าลอยในปริมาณสูง



- ส่วนผสมควบคุม ● P15-F20-G0.225 ● P15-F60-G0.225 ● P45-F60-G0.075
- P0-F40-G0.15 ● P30-F40-G0.30 ● P45-F20-G0.225 ● P15-F20-G0.075
- P30-F40-G0 ● P45-F20-G0.075 ● P30-F80-G0.15 ● P30-F40-G0.15
- P45-F60-G0.225 ● P30-F0-G0.15 ● P60-F40-G0.15 ● P15-F60-G0.075

รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงแยกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
ที่อายุการบ่ม 28 วัน

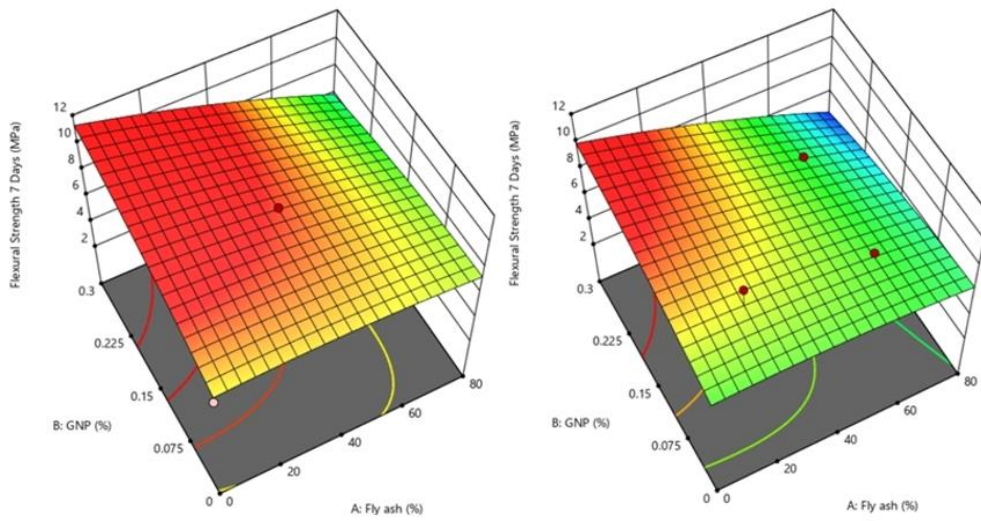
4.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C78M (2021) ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน แสดงไว้ดังตารางที่ 17 ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ (รูปที่ 28 และรูปที่ 29) เช่นเดียวกับกรณีของกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดแยกของคอนกรีต โดยในส่วนของพื้นที่สีแดงที่แสดงบนกราฟ 3 มิติ หมายถึงกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่สูง ในขณะที่พื้นที่สีเขียว หมายถึงคอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดปานกลาง และส่วนของพื้นที่สีน้ำเงิน หมายถึงกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ต่ำ

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

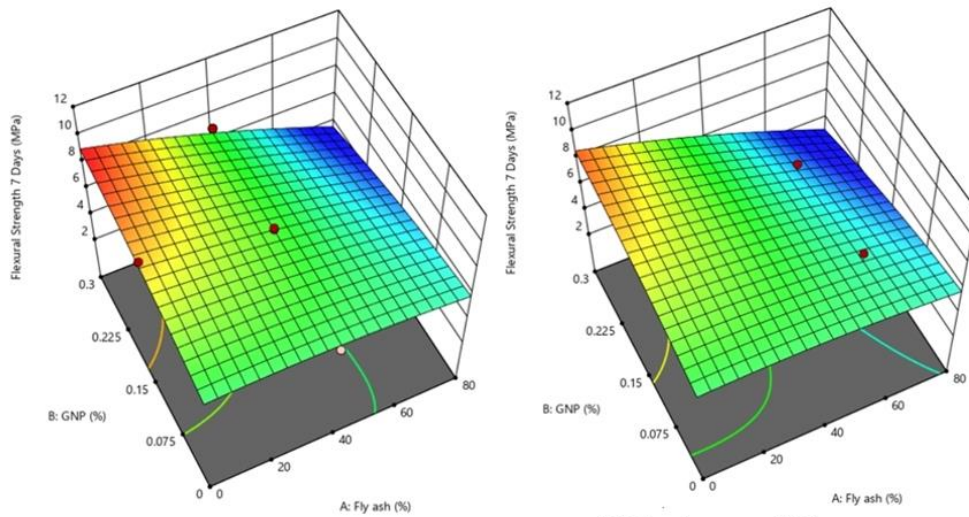
ส่วนผสม	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (MPa)	
	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
ควบคุม	7.3±0.1	8.3±0.1
P0-F40-G0.15	8.8±0.2	9.8±0.4
P30-F40-G0.30	7.0±0.8	8.2±0.1
P45-F20-G0.225	7.2±0.2	7.9±0.2
P15-F20-G0.075	8.9±0.5	8.5±0.2
P30-F40-G0	6.0±0.1	7.1±0.1
P45-F20-G0.075	6.9±0.2	7.9±0.2
P30-F80-G0.15	4.5±0.1	7.6±0.2
P15-F20-G0.225	8.0±0.2	10.6±0.3
P30-F40-G0.15	6.6±0.3	8.0±0.2
P45-F60-G0.225	5.8±0.2	8.3±0.2
P30-F0-G0.15	8.5±0.1	8.8±0.2
P60-F40-G0.15	6.6±0.1	7.6±0.2
P15-F60-G0.075	7.1±0.2	8.3±0.4
P45-F60-G0.075	6.7±0.1	7.1±0.5
P15-F60-G0.225	6.7±0.2	7.7±0.4

หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ±ข้อผิดพลาดมาตรฐาน (SE) ที่ได้มาจากสามเท่าของตัวอย่างส่วนผสม



(น) Plastic waste 0%

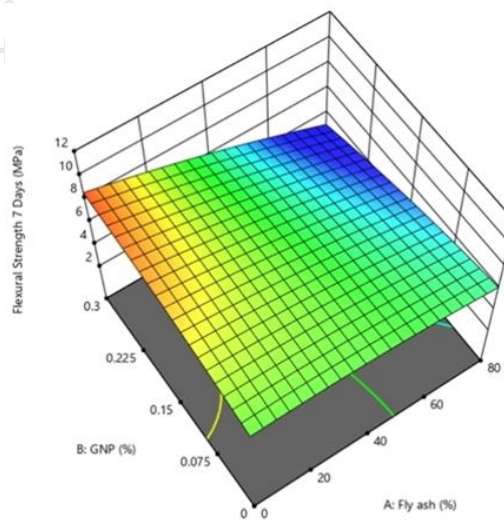
(ข) Plastic waste 15%



(ค) Plastic waste 30%

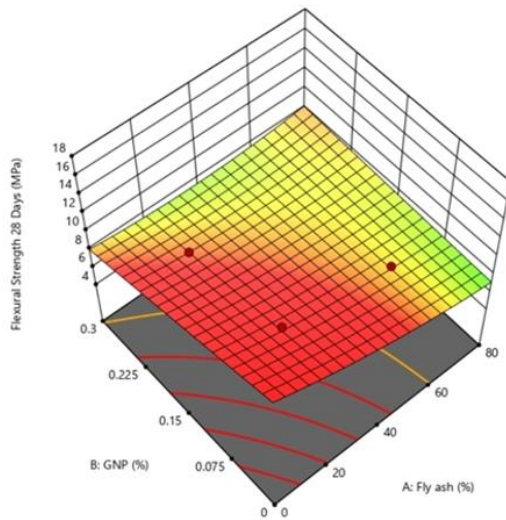
(ง) Plastic waste 45%

CH

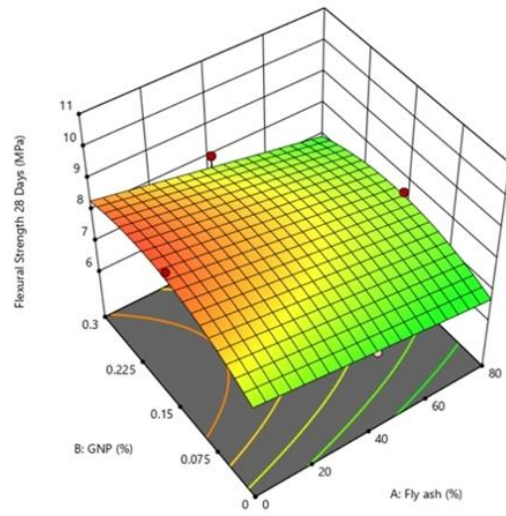


(จ) Plastic waste 60%

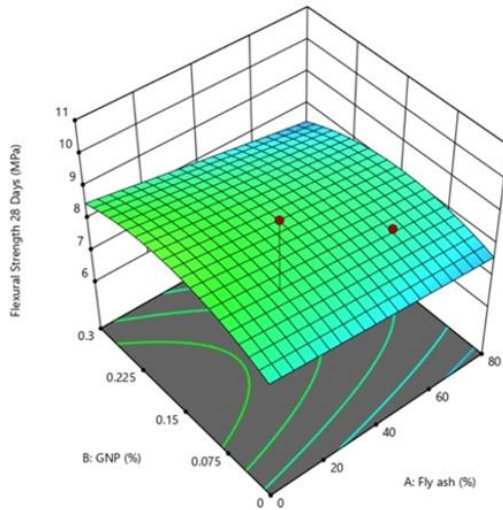
รูปที่ 28 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน



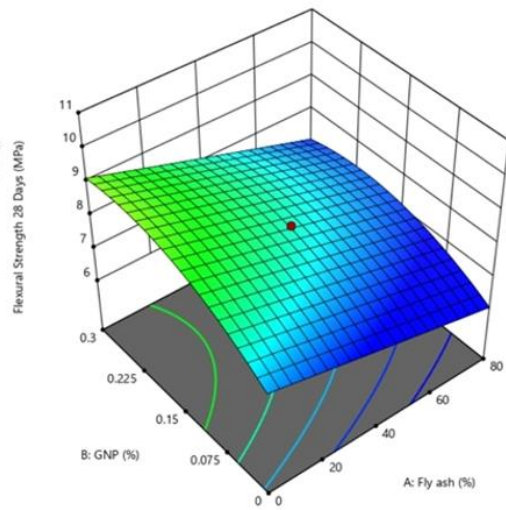
(น) Plastic waste 0%



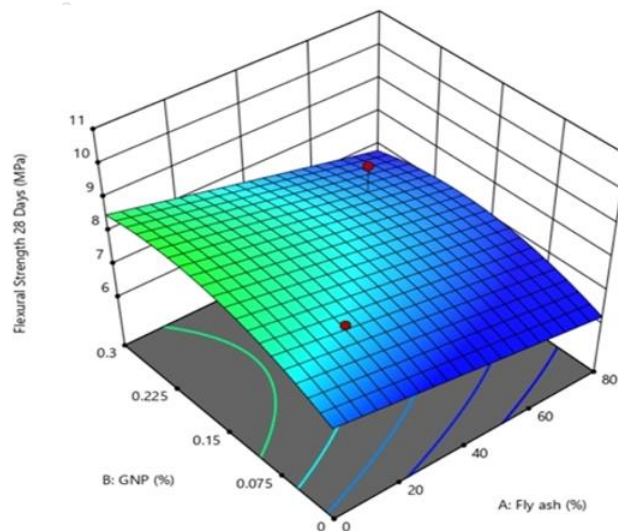
(ข) Plastic waste 15%



(ค) Plastic waste 30%



(ง) Plastic waste 45%



(จ) Plastic waste 60%

รูปที่ 29 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

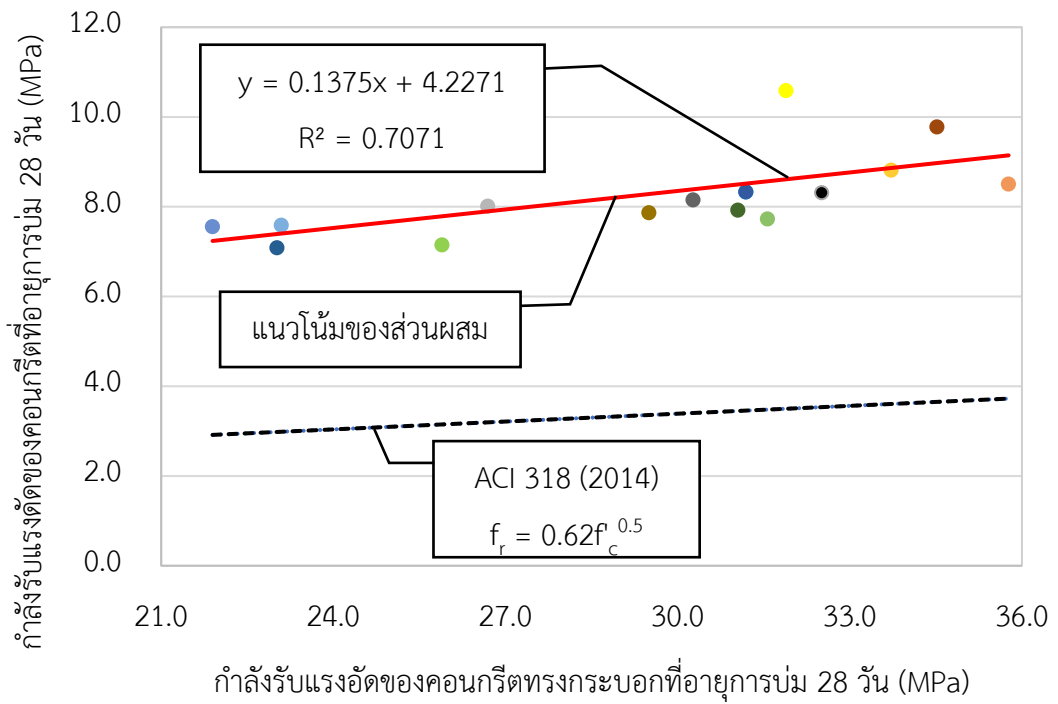
จากการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร มีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตต่ำที่สุด โดยจะเห็นได้จากพื้นที่กราฟ 3 มิติ ในรูปที่ 28 และรูปที่ 29 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสีเขียวและสีน้ำเงินเข้ม และเมื่อคอนกรีตมีปริมาณขยะพลาสติกเป็นส่วนประกอบลดลง ก็ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล มีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตสูงที่สุด โดยจะเห็นได้จากพื้นที่กราฟ 3 มิติส่วนใหญ่เป็นสีแดงเข้มและมีพื้นที่สีเขียวเพียงเล็กน้อย โดยส่วนผสม P0-F40-G0.15 ที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล มีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วันเพิ่มขึ้น 33.3% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P60-F40-G0.15 ที่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร โดยสาเหตุที่ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง เกิดจากผลกระทบเชิงลบของขยะพลาสติกกรีไฮเซลที่นำมาใช้แทนที่บางส่วนของมวลรวมหยาบตามธรรมชาติ ส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น จึงทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงที่ลดลง (Subramani & Pugal, 2015) และอีกสาเหตุที่ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง ก็คือการประสานที่ไม่ดีระหว่างขยะพลาสติกกรีไฮเซลและซีเมนต์เพสต์ อันมีสาเหตุมาจากผิวสัมผัสที่เรียบและลื่นกว่ามวลรวมหยาบตามธรรมชาติของขยะพลาสติกกรีไฮเซล (Almeshal et al., 2020)

นอกจากนี้อีกสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลกับกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตคือเถ้าลอย โดยเมื่อคอนกรีตมีปริมาณเถ้าลอยที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟ 3 มิติที่แสดงในรูปที่ 28 และรูปที่ 29 ว่าพื้นที่สีแดงในกราฟจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวและสีเงินตามลำดับ เมื่อคอนกรีตมีปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มสาร GNP เข้าไปในคอนกรีตช่วยให้ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นมาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะเห็นได้จากส่วนผสม P30-F40-G0, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P30-F40-G0.30 ในตารางที่ 17 ว่าคอนกรีตมีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล 30% โดยปริมาตร และเถ้าลอย 40% โดยปริมาตรเท่ากัน แต่มีปริมาณของสาร GNP ที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันเพิ่มขึ้น 12.7% และส่วนผสม P30-F40-G0.30 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันเพิ่มขึ้น 15.5% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P30-F40-G0 ที่ไม่มีการเติมสาร GNP เข้าไปเป็นส่วนประกอบ โดยปัจจัยที่มีส่วนในการช่วยให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสาร GNP มีส่วนในการช่วยป้องกันหรือยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวได้ (Jiang et al., 2021) โดยส่วนผสม P15-F20-G0.075 ซึ่งมีกำลังรับแรงดัด

ของคอนกรีตสูงที่สุด มีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น 27.7% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

นอกจากนี้รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุการบ่ม 28 วัน และได้ทำการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตามสมการมาตรฐาน BS EN 206-1 (2000) ที่ได้ระบุสมการการปรับแก้กำลังรับแรงอัดไว้ว่า $f_{c, cyl100 \times 200} = 0.86f_{c, cube100}$ โดยจากสมการข้างต้นเป็นสมการการปรับแก้กำลังรับแรงอัดจากตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100 มม. เป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 200 มม. (Zabihi et al., 2014) ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 30 ว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการมาตรฐาน ACI 318 (2014) พบว่าส่วนผสมทั้งหมดมีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันสูงกว่ามาตรฐานที่ ACI 318 (2014) กำหนด จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนผสมของงานวิจัยฉบับนี้สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงดัดได้สูงและมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง



- ส่วนผสมควบคุม ● P15-F20-G0.075 ● P45-F60-G0.075 ● P15-F60-G0.075
- P0-F40-G0.15 ● P30-F40-G0.30 ● P45-F20-G0.225 ● P30-F40-G0
- P45-F20-G0.075 ● P30-F80-G0.15 ● P15-F20-G0.225 ● P30-F40-G0.15
- P30-F0-G0.15 ● P60-F40-G0.15 ● P15-F60-G0.225 ● P15-F60-G0.075

รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

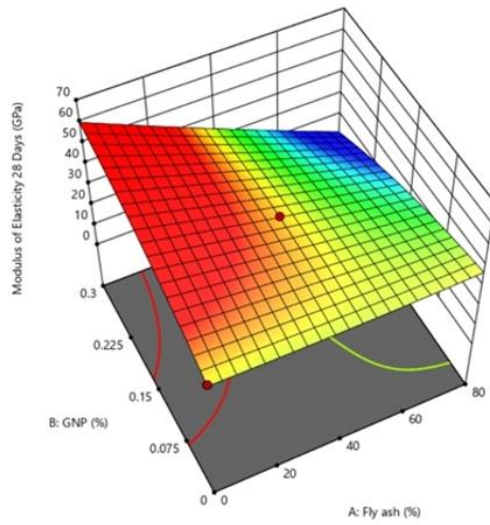
4.4 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity)

ผลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469M (2014) ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงไว้ดังตารางที่ 18 ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ ในรูปที่ 31 โดยในส่วนของพื้นที่สีแดงของกราฟ 3 มิติ แสดงถึงโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่สูง ในขณะที่พื้นที่สีเขียว แสดงถึงคอนกรีตมีโมดูลัสความยืดหยุ่นปานกลาง และในส่วนของพื้นที่สีน้ำเงิน แสดงถึงโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ต่ำ

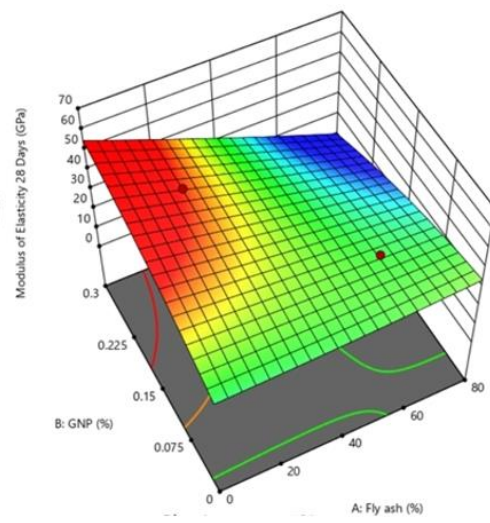
ตารางที่ 18 ผลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต

ส่วนผสม	โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (GPa)
	อายุการบ่ม 28 วัน
ควบคุม	37.8±0.3
P0-F40-G0.15	39.3±0.4
P30-F40-G0.30	29.5±0.2
P45-F20-G0.225	36.6±0.6
P15-F20-G0.075	35.9±0.3
P30-F40-G0	23.3±0.7
P45-F20-G0.075	32.4±0.4
P30-F80-G0.15	22.4±0.6
P15-F20-G0.225	43.0±0.5
P30-F40-G0.15	26.8±0.3
P45-F60-G0.225	23.3±0.6
P30-F0-G0.15	37.6±0.2
P60-F40-G0.15	21.4±0.6
P15-F60-G0.075	34.2±0.2
P45-F60-G0.075	29.8±0.5
P15-F60-G0.225	24.7±0.5

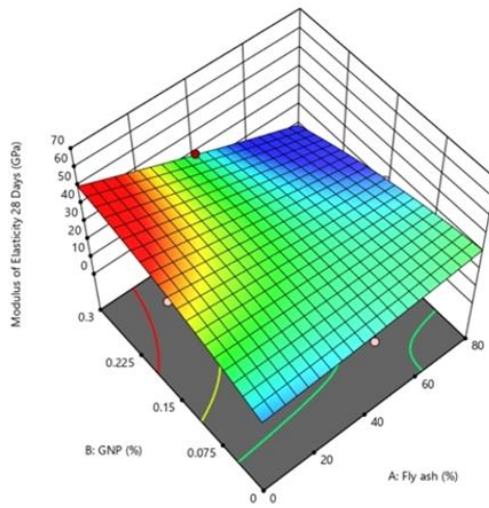
หมายเหตุ: ข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ±ข้อผิดพลาดมาตรฐาน (SE) ที่ได้มาจากสามเท่าของตัวอย่างส่วนผสม



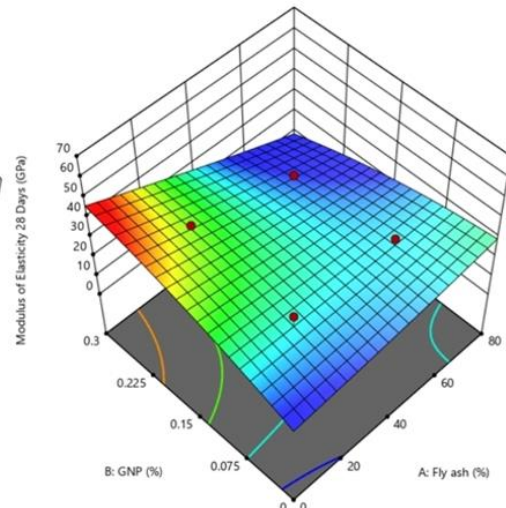
(ก) Plastic waste 0%



(ข) Plastic waste 15%

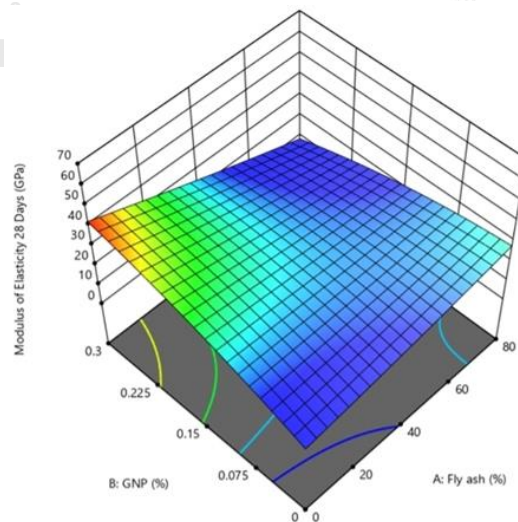


(ค) Plastic waste 30%



(ง) Plastic waste 45%

C1



(จ) Plastic waste 60%

รูปที่ 31 กราฟ 3 มิติ แสดงผลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง เมื่อคอนกรีตมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซลเพิ่มมากขึ้น โดยจะสังเกตได้จากกราฟ 3 มิติที่แสดงไว้ดังรูปที่ 31 ว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล มีพื้นที่ของกราฟ 3 มิติส่วนใหญ่เป็นสีแดงและมีพื้นที่สีน้ำเงินเพียงเล็กน้อย จึงทำให้มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตสูงที่สุด แต่ในทางกลับกันคอนกรีตที่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร มีพื้นที่กราฟ 3 มิติส่วนใหญ่เป็นสีน้ำเงินเข้มและมีพื้นที่สีแดงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ต่ำ นอกจากนี้จะเห็นได้จากผลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตในตารางที่ 18 ว่าเมื่อคอนกรีตมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง โดยสังเกตได้จากส่วนผสม P0-F40-G0.15, P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P60-F40-G0.15 ว่าคอนกรีตมีปริมาณของเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร และมีปริมาณของสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนักเท่ากัน แต่มีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซลที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P0-F40-G0.15 ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล และมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 39.3 GPa ส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 30% โดยปริมาตร และมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 29.7 GPa และส่วนผสม P60-F40-G0.15 ที่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร มีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 21.4 GPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง เมื่อคอนกรีตมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซลเพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม P60-F40-G0.15 ที่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 60% โดยปริมาตร มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง 45.5% และส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณขยะพลาสติกกรีไฮเซล 30% โดยปริมาตร มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง 24.4% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P0-F40-G0.15 ที่ไม่มีส่วนประกอบของขยะพลาสติกกรีไฮเซล

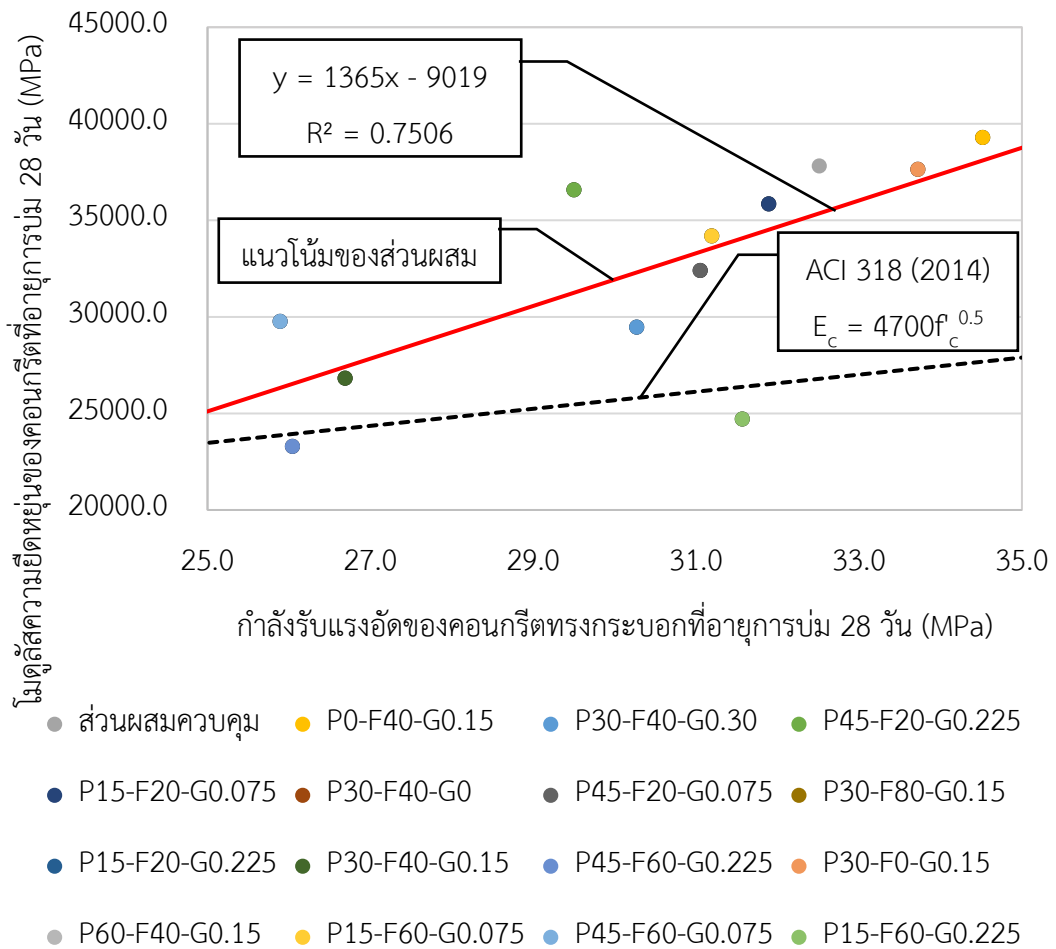
นอกจากนี้ปริมาณของเถ้าลอยก็ส่งผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยเมื่อคอนกรีตมีปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้น ก็ส่งผลทำให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง โดยจะสังเกตได้จากส่วนผสม P30-F0-G0.15 ส่วนผสม P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P30-F80-G0.15 ในตารางที่ 18 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไฮเซล 30% โดยปริมาตร และมีปริมาณของสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนักเท่ากัน แต่มีปริมาณของเถ้าลอยที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P30-F0-G0.15 ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย และมีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 37.6 GPa ส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีปริมาณเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร และมีโมดูลัสความยืดหยุ่นของ

คอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 26.8 GPa และส่วนผสม P30-F80-G0.15 มีปริมาณเถ้าลอย 80% โดยปริมาตร และมีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 22.4 GPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง เมื่อคอนกรีตมีปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้น โดยส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง 28.7% และส่วนผสม P30-F80-G0.15 ที่มีปริมาณเถ้าลอย 80% โดยปริมาตร มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง 40.4% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P30-F0-G0.15 ที่ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าลอย

เมื่อมีการเพิ่มสาร GNP เข้าไปหรือคอนกรีตมีปริมาณของสาร GNP เพิ่มขึ้น ก็ส่งผลทำให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะสังเกตได้จากส่วนผสม P30-F40-G0 ส่วนผสม P30-F40-G0.15 และส่วนผสม P30-F40-G0.30 ในตารางที่ 18 ซึ่งส่วนผสมดังกล่าวมีปริมาณของขยะพลาสติกกรีซไคล 30% โดยปริมาตร และมีปริมาณของเถ้าลอย 40% โดยปริมาตร เท่ากัน แต่มีปริมาณของสาร GNP ที่แตกต่างกัน โดยส่วนผสม P30-F40-G0 ไม่มีการเติมสาร GNP เข้าไปเป็นส่วนประกอบ และมีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 23.3 GPa ส่วนผสม P30-F40-G0.15 มีปริมาณสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก และมีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 26.8 GPa และส่วนผสม P30-F40-G0.30 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก มีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วันอยู่ที่ 29.5 GPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตมีปริมาณของสาร GNP เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม P30-F40-G0.15 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.15% โดยน้ำหนัก มีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 15% และส่วนผสม P30-F40-G0.30 ที่มีปริมาณสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก มีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 26.6% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม P30-F40-G0 ที่ไม่มีการเติมสาร GNP เข้าไปเป็นส่วนประกอบ

นอกจากนี้รูปที่ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยได้ทำการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100 มม. เป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ความสูง 200 มม. และทำการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดตามสมการมาตรฐาน BS EN 206-1 (2000) ที่ได้รับอนุสมการการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตขนาดดังกล่าวไว้ว่า $f_{c, \text{cyl}100 \times 200} = 0.86 f_{c, \text{cube}100}$ (Zabih et al., 2014) ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 32 ว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ก็ส่งผลให้

โมดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tomosawa และคณะ (1997) ซึ่งได้ทำการสรุปไว้ว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้จากส่วนผสม P15-F20-G0.225 ที่มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงที่สุด โดยมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ที่ 41.6 MPa และเนื่องจากโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ส่วนผสม P15-F20-G0.225 มีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตสูงที่สุดด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่อายุการบ่ม 28 วันมีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตอยู่ที่ 43.0 GPa และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการจากมาตรฐาน ACI 318 (2014) พบว่าจากการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนผสมส่วนใหญ่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าที่มาตรฐาน ACI 318 (2014) กำหนด ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำส่วนผสมคอนกรีตของงานวิจัยฉบับนี้ไปใช้ในงานก่อสร้าง ดังนั้นจากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ของขยะพลาสติกรีไซเคิลและแก้วลอย โดยมีการเติมสาร GNP เข้าไปเพื่อลดผลกระทบเชิงของขยะพลาสติกและแก้วลอย มีประสิทธิภาพที่เพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยจากการทดสอบทั้งหมดข้างต้น เพื่อเป็นการพัฒนาคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมให้มีความยั่งยืน จึงได้ทำการสรุปว่าส่วนผสม P15-F20-G0.225 เป็นส่วนผสมที่ดีที่สุดในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากมีกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วันสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณขยะพลาสติกรีไซเคิลและถั่วลอยที่เหมาะสมที่จะใช้ร่วมกัน ได้แก่ 15% และ 20% โดยปริมาตรตามลำดับ และปริมาณ GNP ที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.225% โดยน้ำหนัก เพราะหากมีการเติมสาร GNP มากจนเกินไป ถึงแม้จะมีส่วนในการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตให้ดีขึ้น แต่เป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตคอนกรีต เนื่องจากราคาที่สูงของสาร GNP เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณการใช้ขยะพลาสติกกรีซไคเคลแทนที่มวลรวมหยาบตั้งแต่ 0%, 15%, 30%, 45% และ 60% โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 0%, 20%, 40%, 60% และ 80% โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ และศึกษาผลกระทบการใช้สาร Graphene nanoplatelets (GNP) ตั้งแต่ 0%, 0.075%, 0.15%, 0.225% และ 0.30% โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยการทดสอบคุณสมบัติทางกลประกอบไปด้วย กำลังรับอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS 12390-3 (2009) กำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต ตามมาตรฐาน BS EN 12390-6 (2009) กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C78M (2021) และโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469M (2014)

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต พบว่าเมื่อนำขยะพลาสติกกรีซไคเคลมาใช้ในการแทนที่มวลรวมหยาบตามธรรมชาติ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น และการนำเถ้าลอยมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลงในช่วงต้นของอายุการบ่ม อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมสาร GNP เข้าไปสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยส่วนผสมที่มีปริมาณของขยะพลาสติกกรีซไคเคล 15% โดยปริมาตร มีปริมาณของเถ้าลอย 20% โดยปริมาตร และมีการเติมสาร GNP 0.225% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน เพิ่มขึ้น 10.1%, 27.3% และ 27.7% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

จากการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต พบว่าปริมาณของขยะพลาสติกกรีซไคเคลส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง และการแทนที่ของเถ้าลอย ส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงในช่วงต้นของอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดที่ลดลงของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมสาร GNP เข้าไปสามารถช่วยให้คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยส่วนผสมที่ไม่มีการเติมสาร GNP มีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ที่ 23.3 GPa แต่ในส่วนผสมที่มีการเติมสาร GNP 0.30% โดยน้ำหนัก มีโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ที่ 29.5 GPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น 26.6% เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการเติมสาร GNP

จากการทดสอบทั้งหมดพบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณของขยะพลาสติกกรีไซเคิล 15% โดยปริมาตร มีปริมาณของเถ้าลอย 20% โดยปริมาตร และมี GNP 0.225% โดยน้ำหนัก ให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแยก กำลังรับแรงดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุการบ่ม 28 วันสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลเพียงด้านเดียว ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาคอนกรีตหรือวัสดุก่อสร้างให้มีความยั่งยืน จึงควรมีการศึกษาวิจัยถึงคุณสมบัติด้านความทนทานหรือคุณสมบัติด้านอื่นๆเพิ่มเติม และควรมีการศึกษาวิจัยโครงสร้างจุลภาคของวัสดุและคอนกรีต เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบที่แน่ชัดขึ้นจากการแทนที่ของวัสดุต่างๆ และยังช่วยเพิ่มโอกาสในการปรับปรุงแก้ไขถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ของวัสดุที่นำมาใช้ หรือควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ถึงราคาต้นทุนการผลิตและความคุ้มค่าต่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 19 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
หน่วยน้ำหนักของทรายกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m^3)	1639.0

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของทรายธรรมชาติ

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

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบโมดูลัสความละเอียดของทรายธรรมชาติ

การวิเคราะห์ขนาดทรายธรรมชาติด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง (เบอร์)	น้ำหนัก ตะแกรง (g)	น้ำหนัก ตะแกรง และทราย (g)	น้ำหนัก ทรายที่ค้ำ (g)	ร้อยละ ทรายค้ำ ตะแกรง (%)	ร้อยละ ทรายค้ำ ตะแกรง สะสม (%)	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง (%)
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 22 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของหินแกรนิตแบบกระทุ้งแน่นแห้ง

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
น้ำหนักถังทรงกระบอก (kg)	4.201
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่น้ำจนเต็ม (kg)	9.958
น้ำหนักน้ำ (kg)	5.757
ปริมาตรถังทรงกระบอก (m ³)	0.00577
น้ำหนักถังทรงกระบอกที่ใส่หินแกรนิตแห้งกระทุ้งแน่น (kg)	13.395
น้ำหนักของหินแกรนิตกระทุ้งแน่นแห้ง (kg)	9.194
หน่วยน้ำหนักของหินแกรนิตกระทุ้งแน่นแห้ง (kg/m ³)	1593.0

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของหินแกรนิต

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
ปริมาตรขวดรูปชมพู่ (cm ³)	500.00
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ (g)	157.50
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (g)	657.18
น้ำหนักขวดรูปชมพู่ที่เติมน้ำและหินแกรนิต (g)	963.46
น้ำหนักหินแกรนิตสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (g)	500.13
น้ำหนักหินแกรนิตสภาวะอบแห้ง (g)	495.84
ความถ่วงจำเพาะของหินแกรนิตสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.58
การดูดซึมน้ำของหินแกรนิต (%)	0.87

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของหินแกรนิต

การวิเคราะห์ขนาดหินแกรนิตด้วยตะแกรงร่อน						
ขนาด ตะแกรง (เบอร์)	น้ำหนัก ตะแกรง (g)	น้ำหนัก ตะแกรง และ หินแกรนิต (g)	น้ำหนัก หินแกรนิต ที่ค้าง (g)	ร้อยละ หินแกรนิต ค้างตะแกรง (%)	ร้อยละ หินแกรนิต ค้ำตะแกรง สะสม (%)	ส่วนที่ ผ่าน ตะแกรง (%)
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 25 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

รายการทดลอง	ผลการทดลอง
ระดับน้ำมันก๊าดก่อนก่อนทดสอบ (ml)	1.0
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (°C)	20.0
น้ำหนักถาดและเถ้าลอยก่อนการทดลอง (g)	567.7
น้ำหนักถาดและเถ้าลอยที่เหลือ (g)	526.4
น้ำหนักเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลอง (g)	41.3
ระดับน้ำมันก๊าดหลังการทดลอง (g)	0.5
อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งที่ 2 (°C)	21.0
ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (ml)	19.3
ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย	2.54

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบของคอนกรีต

ตารางที่ 26 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)				กำลังรับแรงอัด (MPa)
		1	2	3	4	
ควบคุม	1	100.9	101.6	99.2	100.9	21.31
	2	100.0	100.4	99.6	100.2	20.35
	3	101.1	100.7	100.3	101.0	20.80
P30-F40-G0.15	1	100.1	100.0	101.3	100.6	19.30
	2	100.9	100.2	101.1	100.9	25.46
	3	100.0	100.0	100.1	100.0	34.66
P0-F40-G0.15	1	99.4	100.2	101.1	100.2	26.71
	2	100.5	100.6	100.1	99.7	21.76
	3	101.4	100.5	101.7	100.9	19.45
P45-F60-G0.075	1	100.8	101.1	99.9	100.5	19.18
	2	101.1	99.0	100.0	101.0	22.63
	3	99.9	98.6	100.2	100.0	29.08
P30-F40-G0.30	1	100.1	101.3	100.3	100.9	21.31
	2	100.2	100.1	99.8	99.9	31.66
	3	100.9	100.3	100.6	100.0	26.49
P60-F40-G0.15	1	99.7	101.9	100.4	101.6	16.40
	2	100.8	99.8	100.7	100.6	16.74
	3	101.5	101.0	101.6	98.9	15.82
P15-F20-G0.225	1	100.8	101.1	99.5	101.6	23.88
	2	100.8	100.2	100.1	100.8	29.50
	3	99.0	100.4	99.4	100.4	26.85
P45-F20-G0.225	1	101.3	100.5	100.9	101.2	13.30
	2	100.5	101.9	100.7	101.4	17.58
	3	101.2	102.4	100.0	102.2	15.43

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)				กำลังรับแรงอัด (MPa)
		1	2	3	4	
P30-F0-G0.15	1	100.1	99.7	99.9	100.0	33.49
	2	100.5	100.8	100.2	100.0	30.95
	3	98.1	99.0	98.4	99.5	34.64
P45-F20-G0.075	1	100.4	100.0	99.1	100.7	20.23
	2	100.0	99.7	100.5	100.6	21.78
	3	100.6	100.7	99.8	100.3	19.72
P15-F60-G0.225	1	100.0	100.0	100.3	100.1	16.68
	2	100.0	99.6	100.1	100.0	19.19
	3	100.7	101.0	100.5	100.0	18.31
P15-F60-G0.075	1	101.2	100.0	101.0	101.0	19.83
	2	100.0	100.0	99.9	100.1	24.45
	3	99.2	100.0	101.6	100.0	22.70
P45-F60-G0.225	1	99.3	100.7	100.2	99.9	14.95
	2	98.9	100.9	100.8	100.6	15.49
	3	100.1	100.9	100.0	100.2	18.53
P15-F20-G0.075	1	100.4	100.9	100.8	100.1	20.40
	2	98.9	99.9	100.4	100.0	21.39
	3	100.5	100.6	101.1	100.3	30.34
P30-F80-G0.15	1	102.0	100.0	101.4	99.5	25.22
	2	100.4	100.0	100.1	100.9	20.19
	3	100.2	101.6	101.9	100.1	15.56
P30-F40-G0	1	99.2	100.3	100.5	100.0	18.05
	2	100.2	99.7	100.0	100.2	19.29
	3	99.6	100.0	99.5	100.0	16.14

ตารางที่ 27 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)				กำลังรับแรงอัด (MPa)
		1	2	3	4	
ควบคุม	1	101.6	102.2	99.9	103.0	28.33
	2	100.7	100.1	100.4	100.8	26.31
	3	99.5	100.9	99.3	100.7	28.28
P30-F40-G0.15	1	100.2	100.6	101.4	101.0	33.00
	2	100.1	101.1	101.5	100.9	30.81
	3	99.8	100.0	100.2	99.9	30.16
P0-F40-G0.15	1	101.1	100.8	101.5	100.9	28.74
	2	98.3	99.6	98.1	99.6	26.03
	3	99.8	100.0	101.1	100.3	28.13
P45-F60-G0.075	1	102.1	100.3	101.5	102.5	26.09
	2	100.0	99.6	99.9	99.5	29.37
	3	101.0	100.5	100.2	101.1	27.31
P30-F40-G0.30	1	100.1	102.4	102.7	100.2	31.62
	2	99.5	100.1	100.0	99.9	33.17
	3	100.7	100.5	100.9	99.9	30.02
P60-F40-G0.15	1	100.0	100.3	100.2	100.0	20.48
	2	100.2	100.5	100.9	100.6	18.88
	3	100.2	100.3	100.5	100.5	19.26
P15-F20-G0.225	1	100.5	101.5	100.3	101.7	30.56
	2	99.9	100.8	100.1	100.4	31.91
	3	100.0	100.0	100.1	100.2	32.16
P45-F20-G0.225	1	98.9	100.0	100.3	100.1	20.21
	2	100.0	102.6	102.0	100.3	17.38
	3	99.7	100.0	100.2	100.3	18.80
P30-F0-G0.15	1	100.6	99.4	100.8	99.8	38.56
	2	100.0	100.9	101.3	101.0	34.79
	3	100.0	100.0	100.1	99.4	32.49

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)				กำลังรับแรงอัด (MPa)
		1	2	3	4	
P45-F20-G0.075	1	99.6	100.1	100.0	99.9	24.34
	2	98.2	100.5	98.6	100.0	25.42
	3	100.1	99.7	99.9	100.0	21.27
P15-F60-G0.225	1	99.1	100.1	100.9	100.4	25.17
	2	100.5	99.4	100.0	100.2	23.57
	3	98.8	100.5	100.1	99.4	24.75
P15-F60-G0.075	1	100.0	100.1	100.5	100.0	32.78
	2	100.0	99.9	100.3	100.5	35.76
	3	101.1	101.0	100.5	100.2	30.36
P45-F60-G0.225	1	99.2	99.9	100.0	100.0	23.13
	2	100.1	102.0	102.5	102.5	24.21
	3	100.4	100.1	100.0	100.3	20.28
P15-F20-G0.075	1	98.0	98.5	98.0	99.0	33.33
	2	100.2	100.4	100.0	100.1	35.69
	3	100.0	99.9	99.3	100.0	31.57
P30-F80-G0.15	1	100.0	99.0	99.9	100.2	27.03
	2	100.5	100.6	100.2	100.3	24.50
	3	100.6	100.2	100.9	100.6	22.72
P30-F40-G0	1	100.2	100.3	100.5	100.5	28.29
	2	100.5	101.5	100.3	101.7	32.88
	3	99.9	100.8	100.1	100.4	31.47

ตารางที่ 28 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)				กำลังรับแรงอัด (MPa)
		1	2	3	4	
ควบคุม	1	101.2	100.0	101.0	101.0	34.75
	2	100.7	101.0	100.5	100.0	38.01
	3	100.0	99.6	100.1	100.0	40.66
P30-F40-G0.15	1	100.0	100.0	100.3	100.1	35.48
	2	100.6	100.7	99.8	100.3	42.97
	3	100.0	99.7	100.5	100.6	41.97
P0-F40-G0.15	1	100.4	100.0	99.1	100.7	33.34
	2	98.1	99.0	98.4	99.5	38.23
	3	100.5	100.8	100.2	100.0	34.03
P45-F60-G0.075	1	100.1	99.7	99.9	100.0	37.08
	2	101.2	102.4	100.0	102.2	33.64
	3	100.5	101.9	100.7	101.4	32.19
P30-F40-G0.30	1	101.3	100.5	100.9	101.2	38.41
	2	99.0	100.4	99.4	100.4	37.82
	3	100.8	100.2	100.1	100.8	35.02
P60-F40-G0.15	1	100.8	101.1	99.5	101.6	26.65
	2	101.5	101.0	101.6	98.9	24.44
	3	100.8	99.8	100.7	100.6	29.21
P15-F20-G0.225	1	99.7	101.9	100.4	101.6	36.44
	2	100.9	100.3	100.6	100.0	33.32
	3	100.2	100.1	99.8	99.9	38.56
P45-F20-G0.225	1	100.1	101.3	100.3	100.9	28.32
	2	99.9	98.6	100.2	100.0	23.00
	3	101.1	99.0	100.0	101.0	25.06
P30-F0-G0.15	1	100.8	101.1	99.9	100.5	42.38
	2	99.2	100.0	101.6	100.0	41.94
	3	100.0	100.0	99.9	100.1	40.45

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)				กำลังรับแรงอัด (MPa)
		1	2	3	4	
P45-F20-G0.075	1	101.1	101.5	100	101.4	33.07
	2	101.8	102.7	100	101.3	30.61
	3	99.6	100.4	100.6	100.8	29.43
P15-F60-G0.225	1	99.3	98.9	98.6	98.2	31.27
	2	101.0	101.1	100.5	102.1	29.36
	3	100.1	100.1	100.5	100.8	30.22
P15-F60-G0.075	1	99.7	100.0	100.5	100.0	41.41
	2	100.3	100.6	100.1	100.2	38.60
	3	100.0	99.5	100.3	100.0	37.63
P45-F60-G0.225	1	100.3	100.5	100.7	100.3	29.10
	2	101.6	99.0	101.7	100.0	23.96
	3	99.5	99.3	99.8	100.0	27.51
P15-F20-G0.075	1	100.0	100.6	100.5	100.3	36.25
	2	100.3	99.2	100.0	100.5	36.75
	3	100.0	100.5	100.3	99.5	35.81
P30-F80-G0.15	1	100.5	100.2	100.8	100.0	31.73
	2	99.7	100.3	100.2	100.0	27.07
	3	101.3	100.3	100.2	101.4	31.53
P30-F40-G0	1	99.2	99.5	99.9	99.9	39.71
	2	100.6	100.5	100.0	100.5	36.58
	3	99.7	100.2	100.9	100.3	33.83

ตารางที่ 29 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 3 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	กำลังรับแรงดึงแยก (MPa)
ควบคุม	1	103.0	202.9	1.96
	2	100.8	199.9	2.16
	3	100.7	200.6	2.06
P30-F40-G0.15	1	101.0	200.0	3.10
	2	100.9	200.0	2.27
	3	99.9	200.9	3.07
P0-F40-G0.15	1	100.9	201.5	1.98
	2	99.6	201.0	2.45
	3	100.3	199.7	2.37
P45-F60-G0.075	1	102.5	200.1	2.37
	2	99.5	203	2.21
	3	101.1	200.5	2.32
P30-F40-G0.30	1	100.2	201.2	2.52
	2	99.9	200.6	2.58
	3	99.9	201.8	2.55
P60-F40-G0.15	1	100.0	200.5	1.35
	2	100.6	199.6	1.33
	3	100.5	202.0	1.39
P15-F20-G0.225	1	101.7	200.7	2.61
	2	100.4	200.6	2.39
	3	100.2	200.2	2.64
P45-F20-G0.225	1	100.1	199.8	1.11
	2	100.3	203.5	0.89
	3	100.3	200.7	1.20
P30-F0-G0.15	1	99.8	200.7	2.93
	2	101.0	201.8	2.80
	3	99.4	201.6	3.14

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	กำลังรับแรงดึงแยก (MPa)
P45-F20-G0.075	1	99.9	200.0	1.90
	2	100.0	201.0	1.89
	3	100.0	199.2	1.92
P15-F60-G0.225	1	100.4	200.5	2.19
	2	100.2	200.7	1.86
	3	99.4	202.2	1.79
P15-F60-G0.075	1	100.0	200.5	2.68
	2	100.5	200.7	3.18
	3	100.2	201.5	3.00
P45-F60-G0.225	1	100.0	200.8	1.47
	2	102.5	200.0	1.63
	3	100.3	198.7	1.32
P15-F20-G0.075	1	99.0	199.1	1.49
	2	100.1	199.1	1.47
	3	100.0	198.9	1.95
P30-F80-G0.15	1	100.2	198.4	1.26
	2	100.3	199.0	1.48
	3	100.6	199.5	1.19
P30-F40-G0	1	100.5	200.0	3.01
	2	101.7	195.7	2.83
	3	100.4	198.8	2.30

ตารางที่ 30 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	กำลังรับแรงดึงแยก (MPa)
ควบคุม	1	103.0	200.0	2.17
	2	100.8	202.4	2.42
	3	100.7	196.0	2.62
P30-F40-G0.15	1	101.0	201.3	2.38
	2	100.9	201.1	3.99
	3	99.9	200.9	2.65
P0-F40-G0.15	1	100.9	201.2	3.12
	2	99.6	199.7	2.82
	3	100.3	203.3	2.37
P45-F60-G0.075	1	102.5	200.6	2.66
	2	99.5	199.7	2.77
	3	101.1	200.9	2.82
P30-F40-G0.30	1	100.2	202.1	2.96
	2	99.9	201.9	3.22
	3	99.9	199.3	3.05
P60-F40-G0.15	1	100.0	201.8	1.91
	2	100.6	200.5	1.88
	3	100.5	200.1	1.47
P15-F20-G0.225	1	101.7	200.7	3.01
	2	100.4	199.0	2.67
	3	100.2	200.5	2.66
P45-F20-G0.225	1	100.1	199.8	1.39
	2	100.3	199.1	1.33
	3	100.3	204.1	1.35
P30-F0-G0.15	1	99.8	200.4	3.33
	2	101.0	200.8	3.74
	3	99.4	201.6	3.33

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	กำลังรับแรงดึงแยก (MPa)
P45-F20-G0.075	1	99.9	201.8	2.12
	2	100.0	201.0	2.55
	3	100.0	202.5	2.24
P15-F60-G0.225	1	100.4	200.4	2.67
	2	100.2	202.0	2.21
	3	99.4	203.1	2.01
P15-F60-G0.075	1	100.0	202.6	2.75
	2	100.5	201.1	3.33
	3	100.2	199.7	3.63
P45-F60-G0.225	1	100.0	201.1	1.65
	2	102.5	204.0	1.83
	3	100.3	202.7	1.45
P15-F20-G0.075	1	99.0	202.0	2.30
	2	100.1	201.3	2.61
	3	100.0	201.9	2.89
P30-F80-G0.15	1	100.2	202.0	1.85
	2	100.3	201.9	1.53
	3	100.6	202.3	1.68
P30-F40-G0	1	100.5	201.0	3.17
	2	101.7	202.3	2.98
	3	100.4	201.1	2.75

ตารางที่ 31 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	กำลังรับแรงดึงแยก (MPa)
ควบคุม	1	101.0	202.9	3.32
	2	100.0	201.4	3.23
	3	100.0	202.7	3.42
P30-F40-G0.15	1	100.1	203.4	4.08
	2	100.3	204.0	3.67
	3	100.6	201.0	3.89
P0-F40-G0.15	1	100.7	202.5	3.46
	2	99.5	201.5	3.59
	3	100.0	203.7	3.91
P45-F60-G0.075	1	100.0	203.5	3.45
	2	102.2	203.9	2.90
	3	101.4	200.1	3.07
P30-F40-G0.30	1	101.2	200.4	3.13
	2	100.4	204.4	3.97
	3	100.8	200.3	3.31
P60-F40-G0.15	1	101.6	202.9	2.38
	2	98.9	203.6	2.14
	3	100.6	203.0	1.95
P15-F20-G0.225	1	101.6	201.8	2.99
	2	100.0	202.3	2.83
	3	99.9	200.8	3.04
P45-F20-G0.225	1	100.9	200.0	2.09
	2	100.0	202.0	2.21
	3	101.0	201.8	2.69
P30-F0-G0.15	1	100.5	202.9	4.07
	2	100.0	199.9	4.01
	3	100.1	200.6	4.60

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	กำลังรับแรงดึงแยก (MPa)
P45-F20-G0.075	1	101.4	200.0	3.37
	2	101.3	200.0	2.98
	3	100.8	200.9	3.10
P15-F60-G0.225	1	98.2	201.5	3.11
	2	102.1	201.0	2.73
	3	100.8	199.7	3.22
P15-F60-G0.075	1	100.0	200.1	4.26
	2	100.2	200.3	3.59
	3	100.0	200.5	4.03
P45-F60-G0.225	1	100.3	201.2	2.44
	2	100.0	200.6	2.38
	3	100.0	201.8	2.01
P15-F20-G0.075	1	100.3	200.5	2.70
	2	100.5	199.6	3.06
	3	99.5	202.0	2.83
P30-F80-G0.15	1	100.0	200.7	1.67
	2	100.0	200.6	1.96
	3	101.4	200.2	2.43
P30-F40-G0	1	99.9	199.8	3.30
	2	100.5	203.5	3.49
	3	100.3	200.7	2.98

ตารางที่ 32 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)		ความยาว (mm)	กำลังรับแรงดัด (MPa)
		1	2		
ควบคุม	1	102.2	99.9	351.9	7.28
	2	100.1	100.4	350.4	7.38
	3	100.9	99.3	351.3	7.33
P30-F40-G0.15	1	100.6	101.4	350.4	8.45
	2	101.1	101.5	350.5	9.24
	3	100.0	100.2	350.2	8.84
P0-F40-G0.15	1	100.8	101.5	350.5	8.17
	2	99.6	98.1	351.1	7.24
	3	100.0	101.1	350.1	5.49
P45-F60-G0.075	1	100.3	101.5	350.5	7.55
	2	99.6	99.9	351.9	7.21
	3	100.5	100.2	350.2	6.87
P30-F40-G0.30	1	102.4	102.7	350.7	7.97
	2	100.1	100.0	350.1	9.79
	3	100.5	100.9	350.9	8.88
P60-F40-G0.15	1	100.3	100.2	350.2	5.87
	2	100.5	100.9	350.9	6.21
	3	100.3	100.5	350.5	6.04
P15-F20-G0.225	1	101.5	100.3	350.3	7.24
	2	100.8	100.1	350.1	6.94
	3	100.0	100.1	350.1	6.52
P45-F20-G0.225	1	100.0	100.3	350.3	4.67
	2	102.6	102.0	350.6	4.36
	3	100.0	100.2	350.2	4.52
P30-F0-G0.15	1	99.4	100.8	350.8	7.69
	2	100.9	101.3	350.3	8.17
	3	100.0	100.1	350.1	8.17

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)		ความยาว (mm)	กำลังรับแรงดัด (MPa)
		1	2		
P45-F20-G0.075	1	100.1	100.0	350.1	6.14
	2	100.5	98.6	351.6	6.91
	3	99.7	99.9	351.9	6.86
P15-F60-G0.225	1	100.1	100.9	350.9	5.63
	2	99.4	100.0	350.4	6.11
	3	100.5	100.1	350.1	5.56
P15-F60-G0.075	1	100.1	100.5	350.5	8.38
	2	99.9	100.3	350.3	8.52
	3	101.0	100.5	350.5	8.62
P45-F60-G0.225	1	99.9	100.0	350.9	6.40
	2	102.0	102.5	350.5	6.78
	3	100.1	100.0	350.1	6.59
P15-F20-G0.075	1	98.5	98.0	351.5	6.98
	2	100.4	100.0	350.4	7.45
	3	99.9	99.3	351.3	6.94
P30-F80-G0.15	1	99.0	99.9	351.9	6.87
	2	100.6	100.2	350.2	6.49
	3	100.2	100.9	350.9	6.68
P30-F40-G0	1	100.3	100.5	350.5	6.52
	2	101.5	100.3	350.3	6.97
	3	100.8	100.1	350.1	6.49

ตารางที่ 33 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)		ความยาว (mm)	กำลังรับแรงดัด (MPa)
		1	2		
ควบคุม	1	100.0	101.0	350.1	8.38
	2	101.0	100.5	350.5	8.24
	3	99.6	100.1	351.6	8.31
P30-F40-G0.15	1	100.0	100.3	350.1	10.51
	2	100.7	99.8	351.7	9.27
	3	99.7	100.5	351.7	9.55
P0-F40-G0.15	1	100.0	99.1	351.1	8.24
	2	99.0	98.4	351.1	8.17
	3	100.8	100.2	350.8	8.04
P45-F60-G0.075	1	99.7	99.9	351.7	8.03
	2	102.4	100.0	350.4	7.49
	3	101.9	100.7	350.9	8.07
P30-F40-G0.30	1	100.5	100.9	350.5	10.30
	2	100.4	99.4	350.4	10.47
	3	100.2	100.1	350.2	10.99
P60-F40-G0.15	1	101.1	99.5	351.1	7.00
	2	101.0	101.6	350.1	6.97
	3	99.8	100.7	351.8	7.28
P15-F20-G0.225	1	101.9	100.4	350.9	7.73
	2	100.3	100.6	350.3	7.73
	3	100.1	99.8	351.1	8.31
P45-F20-G0.225	1	101.3	100.3	350.3	7.55
	2	98.6	100.2	351.6	7.21
	3	99.0	100.0	351.1	7.90
P30-F0-G0.15	1	101.1	99.9	351.1	8.41
	2	100.0	101.6	350.1	8.07
	3	100.0	99.9	351.1	9.03

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด (mm)		ความยาว (mm)	กำลังรับแรงดัด (MPa)
		1	2		
P45-F20-G0.075	1	101.5	100	350.5	7.71
	2	102.7	100	350.7	8.02
	3	100.4	100.6	350.4	8.30
P15-F60-G0.225	1	98.9	98.6	351.9	8.62
	2	101.1	100.5	350.1	8.07
	3	100.1	100.5	350.1	8.27
P15-F60-G0.075	1	100.0	100.5	350.1	8.41
	2	100.6	100.1	350.6	9.10
	3	99.5	100.3	351.5	8.93
P45-F60-G0.225	1	100.5	100.7	350.5	7.51
	2	99.0	101.7	351.1	7.99
	3	99.3	99.8	351.3	7.26
P15-F20-G0.075	1	100.6	100.5	350.6	7.57
	2	99.2	100.0	351.2	8.84
	3	100.5	100.3	350.5	8.57
P30-F80-G0.15	1	100.2	100.8	350.2	6.52
	2	100.3	100.2	350.3	6.45
	3	100.3	100.2	350.3	7.90
P30-F40-G0	1	99.5	99.9	351.5	6.97
	2	100.5	100.0	350.5	8.24
	3	100.2	100.9	350.2	7.97

ตารางที่ 34 ข้อมูลการทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน

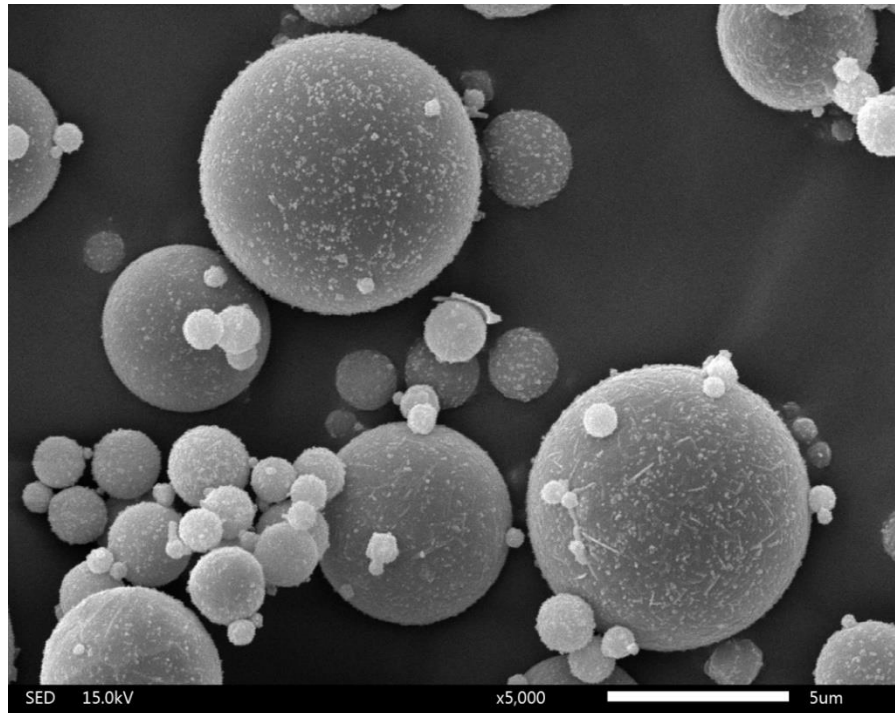
ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)
ควบคุม	1	151.0	302.9	37.48
	2	150.0	301.4	38.14
P30-F40-G0.15	1	150.1	303.4	39.82
	2	150.3	304.0	38.74
P0-F40-G0.15	1	150.7	302.5	29.75
	2	149.5	301.5	29.18
P45-F60-G0.075	1	150.0	303.5	37.31
	2	152.2	303.9	35.84
P30-F40-G0.30	1	151.2	300.4	36.22
	2	150.4	304.4	35.47
P60-F40-G0.15	1	151.6	302.9	24.10
	2	149.9	303.6	22.47
P15-F20-G0.225	1	151.6	301.8	32.89
	2	150.0	302.3	31.90
P45-F20-G0.225	1	150.9	300.0	23.21
	2	150.0	302.0	21.66
P30-F0-G0.15	1	150.5	302.9	43.61
	2	150.0	299.9	42.42
P45-F20-G0.075	1	151.4	300.0	27.21
	2	151.3	300.0	26.42
P15-F60-G0.225	1	148.2	301.5	24.07
	2	152.1	301.0	22.51
P15-F60-G0.075	1	150.0	300.1	37.85
	2	150.2	300.3	37.41
P45-F60-G0.225	1	150.3	301.2	22.11
	2	150.0	300.6	20.62

ส่วนผสม	หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความสูง (mm)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (MPa)
P15-F20-G0.075	1	150.3	300.5	34.42
	2	150.5	299.6	33.95
P30-F80-G0.15	1	100.0	300.7	30.42
	2	150.0	300.6	29.10
P30-F40-G0	1	149.9	299.8	25.32
	2	150.5	303.5	24.08

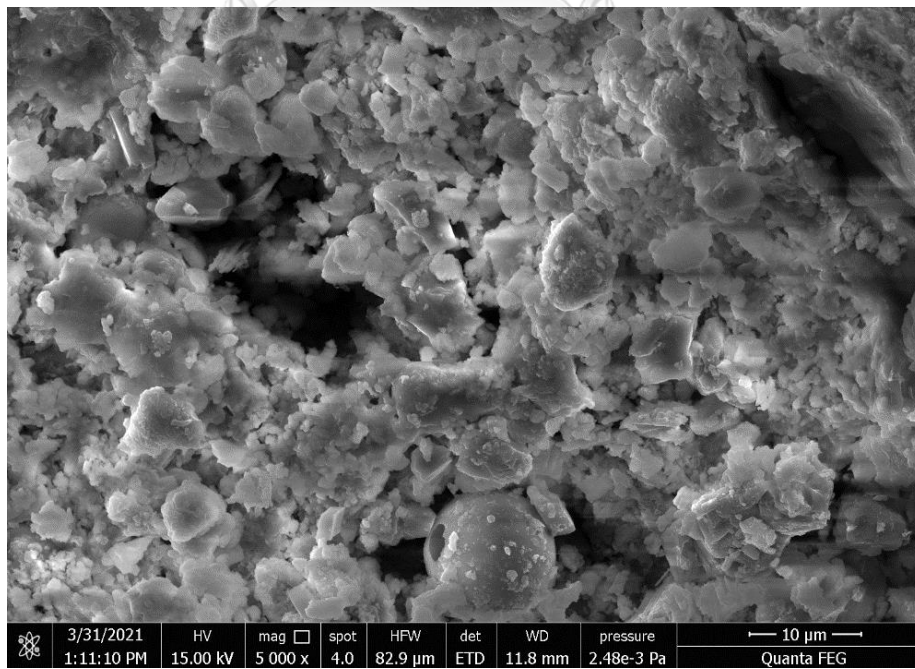


ภาคผนวก ค

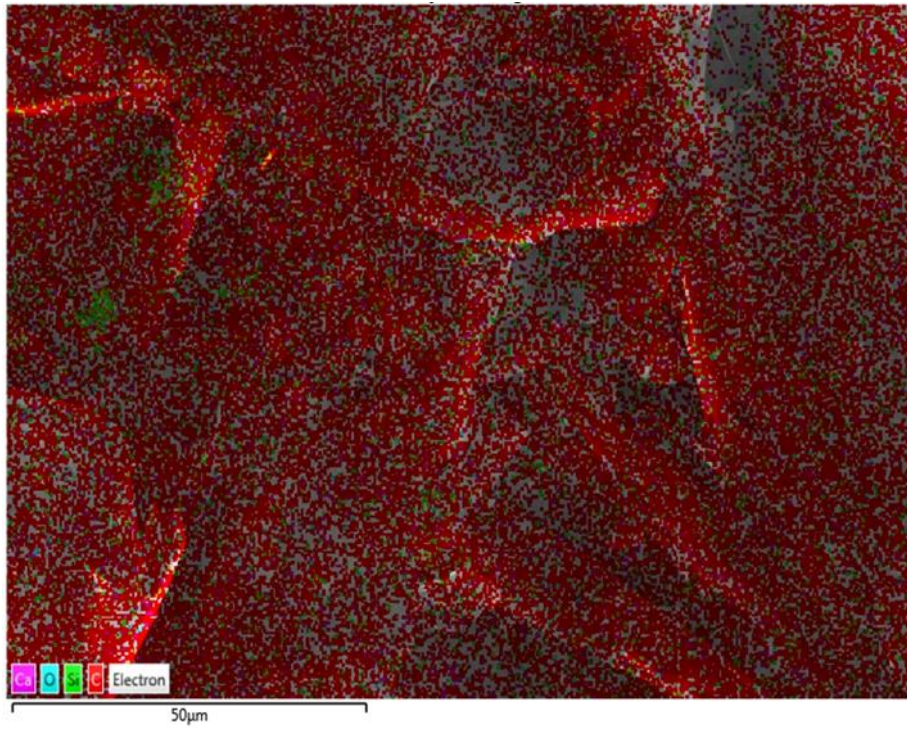
รูปภาพประกอบงานวิจัย



รูปที่ 33 โครงสร้างขนาดจุลภาคของเถ้าลอย



รูปที่ 34 โครงสร้างขนาดจุลภาคของคอนกรีตที่มีมวลรวมรีไซเคิลและสาร GNP เป็นส่วนประกอบ



รูปที่ 35 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสาร GNP ด้วยวิธี EDS



รูปที่ 36 การเตรียมการกระจายตัวของสาร GNP



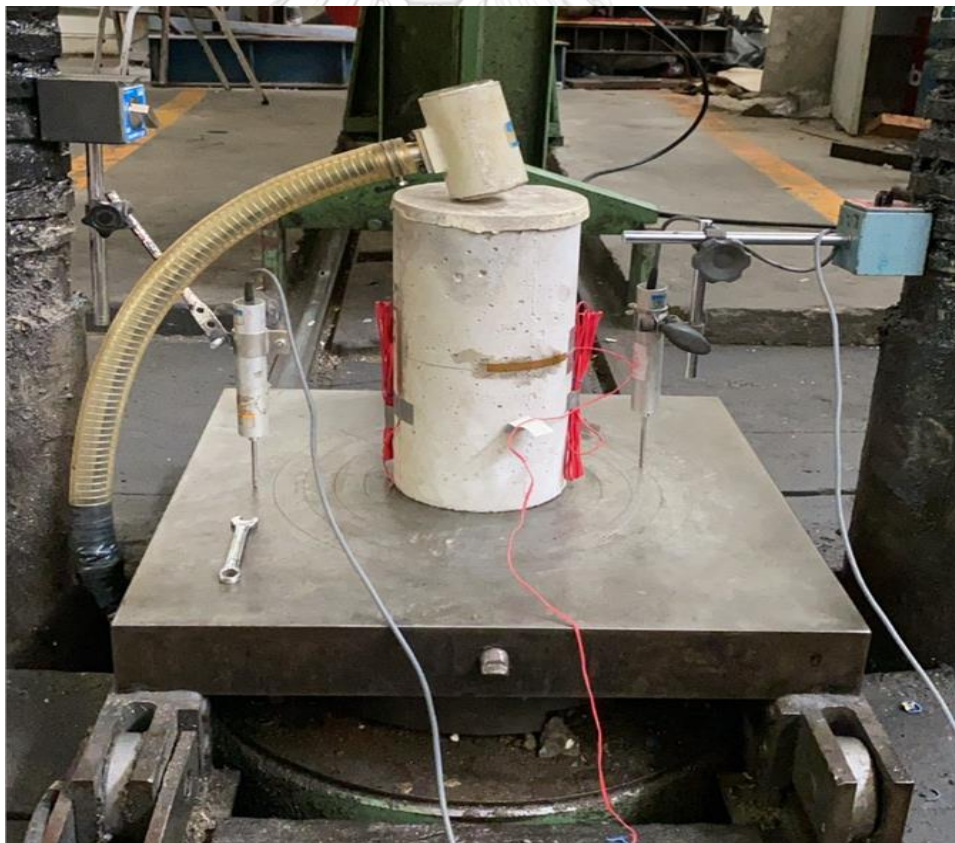
รูปที่ 37 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



รูปที่ 38 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต



รูปที่ 39 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต



รูปที่ 40 การทดสอบโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต

บรรณานุกรม

- AASHTO M 295-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. (2019). In *Annual book of American Association of State Highway and Transportation Officials standards 2019*. Washington, DC, USA.
- ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete. (2002). In *Annual book of American Concrete Institute standards 2002*. Farmington Hills, MI, USA.
- ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete. (2014). In *Annual book of American Concrete Institute standards 2014*. Farmington Hills, MI, USA.
- Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Mohamed, A. M. J. J. o. M. R., & Technology. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *9*(3), 4631-4643.
- ASTM C33-03: Standard Specifications for Concrete Aggregates. (2001). In *Annual book of American Society for Testing and Materials standards 2001*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C78/C78M-21: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. (2021). In *Annual book of American Society for Testing and Materials standards 2021*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. (2019). In *Annual book of American Society for Testing and Materials standards 2019*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C150/C150M-20: Standard Specification for Portland Cement. (2020). In *Annual book of American Society for Testing and Materials standards 2020*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C192/C192M-19: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. (2019). In *Annual book of American Society for Testing and Materials standards 2019*. West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM C469/C469M-14: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. (2014). In *Annual book of American Society for Testing and Materials standards 2014*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. (2019). In *Annual book of American Society for Testing and Materials standards 2019*. West Conshohocken, PA, USA.
- Babafemi, A. J., Šavija, B., Paul, S. C., & Anggraini, V. J. S. (2018). Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: a review. *10*(11), 3875.
- BS EN 206-1:2000 Concrete - Specification, performance, production and conformity. (2000). In *Annual book of British Standards for Testing hardened concrete 2000*. London, UK.
- BS EN 12390-3:2009 Compressive strength of test specimens. (2009). In *Annual book of British Standards for Testing hardened concrete 2009*. London, UK.
- BS EN 12390-6:2009: Tensile splitting strength of test specimens. (2009). In *Annual book of British Standards for Testing hardened concrete 2009*. London, UK.
- Chen, D., Feng, H., & Li, J. J. C. r. (2012). Graphene oxide: preparation, functionalization, and electrochemical applications. *112*(11), 6027-6053.
- Chintalapudi, K., Pannem, R. M. R. J. C., & Materials, B. (2020). An intense review on the performance of Graphene Oxide and reduced Graphene Oxide in an admixed cement system. *259*, 120598.
- Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., Duan, W. H. J. C., & Materials, B. (2014). Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. *73*, 113-124.
- Devi, S., & Khan, R. J. J. o. B. E. (2020). Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. *27*, 101007.
- Dreyer, D. R., Todd, A. D., & Bielawski, C. W. J. C. S. R. (2014). Harnessing the chemistry of graphene oxide. *43*(15), 5288-5301.
- Ferrándiz-Mas, V., García-Alcocel, E. J. C., & Materials, B. (2013). Durability of expanded polystyrene mortars. *46*, 175-182.

- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2010). The rise of graphene. In *Nanoscience and technology: a collection of reviews from nature journals* (pp. 11-19): World Scientific.
- Ghazanlou, S. I., Jalaly, M., Sadeghzadeh, S., Korayem, A. H. J. C., & Materials, B. (2020). High-performance cement containing nanosized Fe₃O₄-decorated graphene oxide. *260*, 120454.
- Gong, K., Pan, Z., Korayem, A. H., Qiu, L., Li, D., Collins, F., . . . Duan, W. H. J. J. o. M. i. C. E. (2015). Reinforcing effects of graphene oxide on portland cement paste. *27(2)*, A4014010.
- Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R. K. J. J. o. C. P. (2016). Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *112*, 702-711.
- Halstead, W. J. J. N. S. o. H. P. (1986). Use of fly ash in concrete. (127).
- Helmuth, R. (1987). *Fly ash in cement and concrete*.
- IS 10262-1982: Standards Specification for Concrete Mix Design. (1998). In *Annual book of Bureau of Indian Standards 1998*. New Delhi, India.
- Jiang, Z., Sevim, O., Ozbulut, O. E. J. C., & Materials, B. (2021). Mechanical properties of graphene nanoplatelets-reinforced concrete prepared with different dispersion techniques. *303*, 124472.
- Li, X., Ling, T.-C., Mo, K. H. J. C., & Materials, B. (2020). Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete—A review. *240*, 117869.
- Li, X., Liu, Y. M., Li, W. G., Li, C. Y., Sanjayan, J. G., Duan, W. H., . . . Materials, B. (2017). Effects of graphene oxide agglomerates on workability, hydration, microstructure and compressive strength of cement paste. *145*, 402-410.
- Limbachiya, M., Meddah, M. S., Ouchagour, Y. J. C., & Materials, B. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *27(1)*, 439-449.
- Lu, J.-X., Yan, X., He, P., & Poon, C. S. J. J. o. c. p. (2019). Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *234*, 1102-1112.

- Lv, S., Ma, Y., Qiu, C., Sun, T., Liu, J., Zhou, Q. J. C., & materials, b. (2013). Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *49*, 121-127.
- Malhotra, V. J. C. I. (2002). High-performance high-volume fly ash concrete. *24*(7), 30-34.
- Marceau, M. L., Gajda, J., VanGeem, M. J. P. R., & Serial, D. (2002). Use of fly ash in concrete: Normal and high volume ranges. (2604).
- Meng, W., & Khayat, K. H. J. C. P. B. E. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers. *107*, 113-122.
- Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A. H., Li, G., Zhu, J. W., . . . Composites, C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. *58*, 140-147.
- Park, S., Lee, K.-S., Bozoklu, G., Cai, W., Nguyen, S. T., & Ruoff, R. S. J. A. n. (2008). Graphene oxide papers modified by divalent ions—enhancing mechanical properties via chemical cross-linking. *2*(3), 572-578.
- Rashad, A. M. J. I. J. o. S. B. E. (2016). A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials. *5*(1), 46-82.
- Ros, S., & Shima, H. J. C. I. P. (2013). Relationship between splitting tensile strength and compressive strength of concrete at early age with different types of cements and curing temperature histories. *35*, 427-432.
- Saikia, N., De Brito, J. J. C., & Materials, B. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *34*, 385-401.
- Saikia, N., de Brito, J. J. C., & materials, b. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *52*, 236-244.
- Siddique, R. J. C., & Research, C. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *34*(3), 487-493.
- Song, W., Zou, D., Liu, T., Teng, J., Li, L. J. C., & Materials, B. (2019). Effects of recycled CRT glass fine aggregate size and content on mechanical and damping properties of concrete. *202*, 332-340.

- Steyn, Z., Babafemi, A., Fataar, H., Combrinck, R. J. C., & Materials, B. (2021). Concrete containing waste recycled glass, plastic and rubber as sand replacement. *269*, 121242.
- Subramani, T., Pugal, V. J. I. J. o. A. o. I. i. E., & Management. (2015). Experimental study on plastic waste as a coarse aggregate for structural concrete. *4(5)*, 144-152.
- Thomas, B. S., Gupta, R. C. J. R., & Reviews, S. E. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *54*, 1323-1333.
- Thomas, M. (2007). *Optimizing the use of fly ash in concrete* (Vol. 5420): Portland Cement Association Skokie, IL.
- Tomosawa, F., & Noguchi, T. (1993). *Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete*. Paper presented at the Proceedings of the Third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete.
- Xiao, J., Fan, Y., & Tawana, M. J. S. C. (2013). Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures. *14(2)*, 168-175.
- Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., Sivakugan, N. J. C., & Materials, B. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *93*, 180-188.
- Zabihi, N., Eren, Ö. J. R. j. o. a. s., engineering, & technology. (2014). Compressive strength conversion factors of concrete as affected by specimen shape and size. *7(20)*, 4251-4257.
- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. J. A. m. (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *22(35)*, 3906-3924.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พัฒนวิทย์ ตรีบันพฤกษ์
วัน เดือน ปี เกิด	11 พฤษภาคม 2540
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (กำลังศึกษาอยู่)
ที่อยู่ปัจจุบัน	99/219 หมู่บ้านแสงตะวันลากูน่า ตำบล ท่าซึก อำเภอ เมือง จังหวัด นครศรีธรรมราช 80000

