



อิทธิพลการเติมกราฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

โดย

นายศุภโชติ สาแหรก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2567

INFLUENCE OF GRAPHENE OXIDE ADDITIONS ON THE
MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

BY

SUPACHOD SARAK



A THESIS OR DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE OF
ENGINEERING
CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2024

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายศุภโชค โสภะ

เรื่อง

อิทธิพลการเติมกราฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

เมื่อ วันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ. 2568

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโถม)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิม เหนือคลอง)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์)

คณบดี



(ศาสตราจารย์ ดร.สัญญา มิตรเอม)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลการเติมกราฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต
ชื่อผู้เขียน	นายศุภโชค โสภณ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโฉม
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

วัสดุผสมที่เป็นซีเมนต์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อประโยชน์สูงสุดโครงสร้างพื้นฐานทางประกอบด้วยเขื่อน ท่อใต้ดิน เขื่อน และตีกระฟ้า แม้ว่าส่วนผสมในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์จะถูกนำมาใช้กับโครงสร้างพื้นฐานที่หลากหลาย หลังการปฏิวัติด้านวัสดุศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยี สารเติมแต่งขนาดโมเลกุลได้ดึงดูดนักวิทยาศาสตร์ และวิศวกร เนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์คอมโพสิต ด้วยเหตุนี้จึงมีคุณสมบัติสำคัญที่สามารถทำให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์มีความหนาแน่นขึ้น เพื่อปรับปรุง และเพิ่มคุณสมบัติทางกล โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกราฟีนออกไซด์ต่อกลไกทางกลของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงดัด และศึกษาพฤติกรรมหลังจากสัมผัสอุณหภูมิสูงของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ในการทดสอบนี้ได้เพิ่ม กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละที่แตกต่างกันคือ 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ จากการศึกษพบว่า คอนกรีตที่ส่วนผสมแกรฟีนออกไซด์มากที่สุด ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดสูงสุดเป็นนัยสำคัญ และทดสอบพฤติกรรมทางเคมีด้วยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแกรฟีนที่ช่วยเพิ่มสร้างโครงให้แข็งแรง และคุณสมบัติที่สูงขึ้นของคอนกรีต

คำสำคัญ: แกรฟีนออกไซด์, วัสดุนาโน, โครงสร้างจุลภาค, คอนกรีต, กำลังรับแรงอัด

Thesis Title	INFLUENCE OF GRAPHENE OXIDE ADDITIONS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE
Author	Mr. Supachod Sarak
Degree	Master of Engineering (Civil Engineering)
Major Field/Faculty/University	Civil engineer Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Chanachai Thongchom
Academic Year	2024

ABSTRACT

Cementitious composite materials are widely used in major infrastructure applications, including dams, underground pipelines, and high-rise buildings. Although cement-based concrete has been commonly utilized in various structural foundations, its inherent brittleness and limited tensile strength remain a challenge. With recent advancements in materials science and nanotechnology, nano-sized additives have drawn significant interest from scientists and engineers due to their ability to modify the microstructure of cement composites. These nanomaterials can densify the cement matrix and enhance its mechanical properties. This research aims to investigate the influence of graphene oxide on the mechanical properties of concrete, including compressive strength, split tensile strength, and flexural strength. In addition, the behavior of graphene oxide-reinforced concrete after exposure to high temperatures was studied. Graphene oxide was added in varying amounts of 0.04%, 0.08%, and 0.12% by weight of cement. The results indicated that the concrete containing the highest percentage of graphene oxide exhibited significantly improved compressive strength and flexural strength. Chemical behavior was analyzed through scanning electron microscopy (SEM), indicating the influential role of graphene in reinforcing, and improving the properties of concrete.

Keywords: Graphene Oxide, Nanomaterials, Microstructure, concrete,
Compressive strength



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโฉม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำแนวทางการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ พร้อมทั้งให้ความรู้ในเรื่องของการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต โดยใช้กราฟีนออกไซด์ อันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้จัดทำตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ สิริมนตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิมเหนือคลอง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณา สละเวลาให้การให้คำแนะนำ รวมทั้งข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับทุนสนับสนุนวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนเป็นอย่างดีรวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้การดูแลอบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งหลายให้กับผู้เขียนตั้งแต่อดีตสืบจนปัจจุบัน

คณะผู้จัดทำ

(5)

สารบัญ

บทคัดย่อ	(1)
ABSTRACT	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(4)
สารบัญ	(5)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(10)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial)	5
2.1.1 กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)	5
2.1.2 เปรียบเทียบกราฟีนกับวัสดุนาโนชนิดอื่นๆ	10
2.2 คอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	12
2.2.1 สมบัติของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	12
2.2.2 การศึกษาคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง	18

	(6)
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	24
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	24
3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)	24
3.1.2 มวลรวม (Aggregate)	25
3.1.3 สารผสมเพิ่ม (Admixture)	26
3.1.4 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO)	27
3.2 การออกแบบส่วนผสม และวิธีการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	28
3.2.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	29
3.2.2 วิธีการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	29
3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	30
3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด	30
3.3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว (Hardened)	31
3.3.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีต (Chemical Composition for Concrete)	39
3.4 สรุปการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	41
4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Workability of Concrete with Graphene Oxide)	41
4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Mechanical Properties of Concrete with Graphene Oxide)	42
4.2.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (The Compressive Strength of Concrete with Graphene Oxide)	42

	(7)
4.2.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (The Spilt Tensile Strength of Concrete with Graphene Oxide)	43
4.2.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (The Flexural Tensile Strength of Concrete with Graphene Oxide)	45
4.2.4 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Unit Weight of Concrete with Graphene Oxide)	46
4.2.5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและขนาดรูพรองของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Water Absorption and Porosity of Concrete with Graphene Oxide)	47
4.2.6 ผลการทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)	48
4.2.7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (The Compressive Strength of Concrete After Exposure to high temperature)	49
4.3 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Microstructure of Concrete with Graphene Oxide)	50
4.3.1 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	50
4.3.2 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังคอนกรีตสัมผัสอุณหภูมิสูง (Scanning Electron Microscopy of Concrete After Exposure to High Temperatures)	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการวิจัย	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
รายการอ้างอิง	57

ประวัติผู้เขียน



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบระหว่างกราฟีนออกไซด์ และวัสดุนาโนชนิดอื่นๆ	11
3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซีเมนต์ไฮดรอลิก (TPI Polene, 2024)	24
3.2 ส่วนผสมคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (kg/m^3)	29
3.5 ตารางสรุปวิธีการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง	40



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงสร้างอะตอมของวัสดุขนาดนาโน (T. Ginigaddaraa และคณะ, 2023)	1
1.2 การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของกราฟีนออกไซด์	3
2.1 โครงสร้างของอะตอมของกราฟีนออกไซด์ (Anwar และคณะ, 2023)	6
2.2 ปฏิกริยาเคมีระหว่างกราฟีนออกไซด์ และผลิตภัณฑ์การไฮเดรชัน	7
2.3 Raman spectroscopy ของกราฟีนออกไซด์ (Sun และคณะ, 2020)	8
2.4 กลไกการควบคุมของกราฟีนออกไซด์บนผลึกการไฮเดรชันของซีเมนต์	9
2.5 แผนภาพเชิงกลไกที่อธิบายการทำงานของ GO ในการส่งเสริมการก่อตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในซีเมนต์ (Mishra และคณะ, 2022)	9
2.6 ศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ของซีเมนต์ที่เติม GO หลังจากการบ่มในช่วงเวลา 7 และ 28 วัน (Mishra และคณะ, 2022)	10
2.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์กำลังรับแรงอัดที่วัดในช่วงอายุต่างๆ	12
2.8 ภาพจาก SEM (a) ภาพรอยร้าวซีเมนต์ที่ไม่ผสม GO (b) ภาพรอยร้าวซีเมนต์ผสม GO (Pan และคณะ, 2015)	13
2.9 (a) ภาพจาก FE-SEM (b) ภาพจาก EDX (Devi และ Khan, 2020)	13
2.10 (ก.) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ข.) กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (ค.) การดูดซึ่มของคอนกรีต (Devi และ Khan, 2020)	14
2.11 กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	15
2.12 (ก.) XRD ของกราฟีนออกไซด์ (ข.) FTIR ของกราฟีนออกไซด์ (ค.) XRD ของคอนกรีตที่ผสมกราฟีนออกไซด์ (ง.) FTIR ของคอนกรีตที่ผสมกราฟีนออกไซด์ (Reddy และ Prasad, 2022)	17
2.13 (ก.) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ข.) กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (ค.) ความต้านทานการซึ่ด (Fonseka และคณะ, 2023)	17
2.14 กลไกการดูดซึ่มระหว่างกราฟีนออกไซด์ และสารลดน้ำ (PS)	18
2.15 (ก.) การกระจายตัวของรูพรุนในคอนกรีต (ข.) การวิเคราะห์การขยายตัวของความร้อน (Mohammed และคณะ, 2017)	19
2.16 (a.) ภาพตัวอย่างคอนกรีตเปลี่ยนที่สัมผัสกับเปลวไฟ (b.) ส่วนที่ขยายของภาพโดย (x) คือ จุดน้ำ (c.) ภาพตัวอย่างคอนกรีต GO ที่สัมผัสกับเปลวไฟ (d.) ส่วนที่ขยายของภาพโดย (y) คือ จุดน้ำ (Rao และคณะ, 2024)	20

2.17 (ก.) กำลังรับแรงตัดเมื่อสัมผัสอุณหภูมิต่างๆ	21
(ข.) กำลังรับแรงอัดเมื่อสัมผัสอุณหภูมิต่างๆ (ค.) น้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Yang และคณะ, 2022)	
3.1 แผนภูมิ Gradation Curve ของมวลรวมละเอียด	25
3.2 แผนภูมิ Gradation Curve ของมวลรวมหยาบ	26
3.3 สารลดน้ำที่ใช้ในงานวิจัย (Sika Indonesia, 2024)	26
3.4 เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดฟูริเยร์แปลง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ของกราฟีนออกไซด์	28
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ของกราฟีนออกไซด์	28
3.6 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Test)	32
3.7 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก	33
3.8 ตัวอย่างการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด	35
3.9 เตาเผาไฟฟ้า	37
3.10 วิธีการเผาตัวอย่างคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	38
4.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	42
4.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน	43
4.3 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน	44
4.4 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน	46
4.5 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	47
4.6 ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	48
4.7 ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์	49
4.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิสูง	50
4.9 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์	51
4.10 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	53
4.11 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	53
4.12 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	54

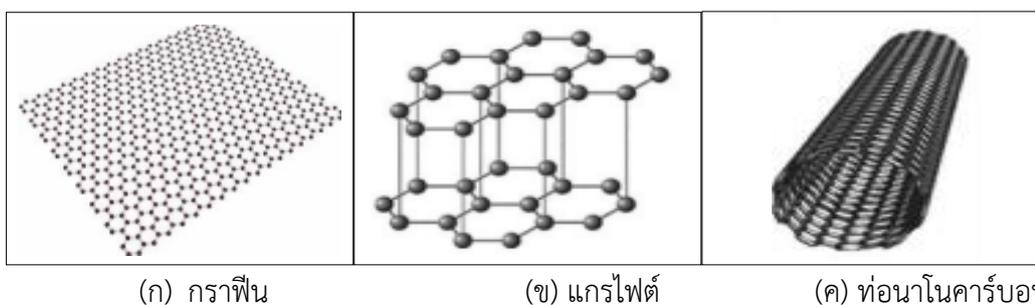
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุผสมที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา เช่น เชื้อน ท่อใต้ดิน และตึกสูง เป็นต้น แม้ส่วนผสมในคอนกรีตที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบถูกใช้ในโครงสร้างพื้นฐานมากมาย แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากความเปราะบาง ความต้านทานแรงดึงอย่างไม่มีนัยสำคัญ และไม่เป็มิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตคอนกรีตมีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Madbouly และคณะ, 2020)

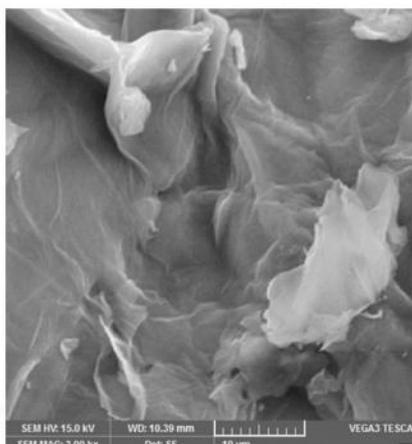
ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุ และนาโนเทคโนโลยี เกี่ยวกับวัสดุขนาดนาโน เนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคในส่วนผสมซีเมนต์ โดยวัสดุขนาดนาโนทำให้โครงสร้างระดับจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้น เพิ่มคุณสมบัติทางกล ลดการซึมผ่านของน้ำ และความสามารถต้านทานไฟฟ้า (Madbouly และคณะ, 2020) คุณสมบัติของคอนกรีตขึ้นอยู่กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ซึ่งเป็นสารประกอบเพิ่มความชุ่มชื้นของซีเมนต์ในคอนกรีต และมีข้อบกพร่องที่พบ คือ พันธะการยึดแน่นระหว่างคอนกรีตต่ำ จึงมีการพัฒนาวัสดุขนาดนาโน เช่น นาโนซิลิกา (Nano-Silica) นาโนอลูมินา (Nano-Alumina) นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano-Calcium) เส้นใยคาร์บอน (Nanofibers, CNFs) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes, CNTs) แกรไฟต์ (Graphite) กราฟีน (Graphene) และกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) เป็นต้น (T. Ginigaddaraa และคณะ, 2023) เนื่องจากสามารถเพิ่มความแข็งแรง และความทนทานของซีเมนต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการใช้กราฟีนออกไซด์ ที่มีข้อได้เปรียบจากคุณสมบัติดูดซึมน้ำได้ดี ทำให้กระจายตัวได้ง่าย และสม่าเสมอในซีเมนต์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงโครงสร้างของซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า CNTs และ CNFs ในบางกรณี (Sheikh และคณะ, 2021)



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างอะตอมของวัสดุขนาดนาโน (T. Ginigaddaraa และคณะ, 2023)

กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) เกิดจากการออกซิเดชันของกราไฟท์ (Graphite) โดยมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนต่างๆ เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอกซิล (Carboxyl) และอีพอกซี (Epoxy) ซึ่งนำกราฟีนออกไซด์มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนช่วยดูดซับอนุมูลอิสระของน้ำได้ดี รวมถึงปรับปรุงคุณสมบัติทางกล เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัด นอกจากนี้มีคุณสมบัติการทำความสะอาดตนเอง การตรวจจับตนเอง การต้านทานความร้อน และความสามารถต้านทานไฟฟ้า (Devi และ Khan, 2020; T. Ginigaddaraa และคณะ, 2023)

การเติมวัสดุนาโนกราฟีนออกไซด์ในส่วนผสมที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ มีผลกระทบบางประการคือ ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และกักเก็บน้ำที่มาก เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ และแร่ธาตุในซีเมนต์ส่งผลให้การกระจายตัวภายในโมเลกุลซึ่งกัน และกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้การเติมกราฟีนออกไซด์ลงในส่วนผสมที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบดูดซึมน้ำ และกักเก็บน้ำได้มาก โดยเป็นแนวโน้มที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในการเติมวัสดุนาโนในส่วนผสมที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ (Devi a และ Khan, 2020; Zhang และคณะ, 2021) แม้ว่าจะมีผลกระทบดังกล่าว แต่หากเติมกราฟีนออกไซด์ช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น ความชุ่มชื้นสูงขึ้น และลดความพรุนของคอนกรีต ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุนาโนชนิดอื่น ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำกราฟีนออกไซด์ในการผลิตคอนกรีตปกติ โดยศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกล เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับดึง และกำลังรับแรงดัด ทดสอบความสามารถซึมผ่านได้ เช่น โพรง และอัตราการดูดซึมน้ำ การทดสอบโครงสร้างจุลภาค เช่น การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) และคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง นอกจากนี้ผู้วิจัยคาดว่าจะนำกราฟีนออกไซด์ไปใช้ในงานอุตสาหกรรมการก่อสร้างในปัจจุบัน เพื่อช่วยการก่อสร้างโครงสร้างได้สะดวก และรวดเร็วมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรก่อสร้างในปัจจุบัน



ภาพที่ 1.2 การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของกราฟีนออกไซด์

(Reddy และ Prasad, 2022)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกล ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมร่วมกับซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของกราฟีนออกไซด์ และคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และลักษณะของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ หลังสัมผัสความร้อนสูง
- 1.2.5 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ในงานวิจัยใช้สารละลายกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 กรัมต่อลิตร ผสมในคอนกรีตโดยมีอัตราส่วนแตกต่างกัน 3 อัตราส่วน คือ 0.04 0.08 และ 0.12 % ตามลำดับ
- 1.3.2 ในงานวิจัยทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อายุการบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ
- 1.3.3 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ตัวอย่างเช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงดัด และคุณสมบัติในการต้านทานอุณหภูมิสูง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อทราบถึงสมบัติทางกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์
- 1.5.2 เพื่อทราบถึงปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมร่วมกับซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์
- 1.5.3 เพื่อทราบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของกราฟีนออกไซด์ และคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์
- 1.5.4 เพื่อทราบคุณสมบัติเชิงกล และลักษณะของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง
- 1.5.5 เพื่อทราบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง

บทที่ 2

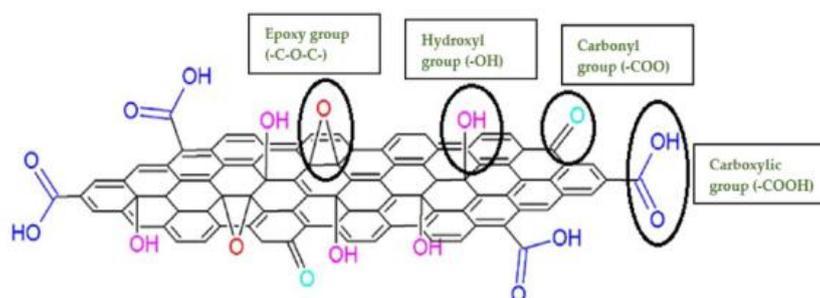
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุนาโน (Nanomaterial)

วัสดุนาโนเป็นวัสดุที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ต่างจากวัสดุปกติอย่างมาก เช่น ความแข็งแรงสูง การทนทานต่อการเสื่อมสภาพ และความสามารถในการกระจายตัวได้ดี คุณสมบัติเหล่านี้เกิดจากโครงสร้าง และขนาดที่เล็กของวัสดุ ทำให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพการนำวัสดุนาโนมาผสมกับซีเมนต์ในคอนกรีตมีการศึกษา และพัฒนาต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเสริมแรง (Reinforcement) และการสร้างโครงสร้างที่ช่วยป้องกันการกระจายของรอยร้าวในคอนกรีต การใช้วัสดุนาโนในคอนกรีตช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ เช่น การเพิ่มความแข็งแรงทางกล และความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำ และสารเคมี วัสดุนาโนยังช่วยกระจายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ วัสดุนาโนบางชนิด เช่น กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) ยังสามารถเป็นตัวเร่งกระบวนการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate, C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต นอกจากนี้การใช้วัสดุนาโนคาร์บอน เช่น ท่อคาร์บอนนาโน (Carbon nanotube, CNT) และกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide, GO) จะกระจายตัวในส่วนผสมซีเมนต์อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำและมีแนวโน้มรวมตัวเป็นกลุ่มเมื่ออยู่ในซีเมนต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้สารลดแรงตึงผิว หรือสารเพิ่มความเหลว เช่น สารลดน้ำ เพื่อให้วัสดุสามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำ และกระจายตัวสม่ำเสมอในซีเมนต์ เพื่อป้องกันปัญหาการยุบตัว และเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีต (Pan และ คณะ, 2015)

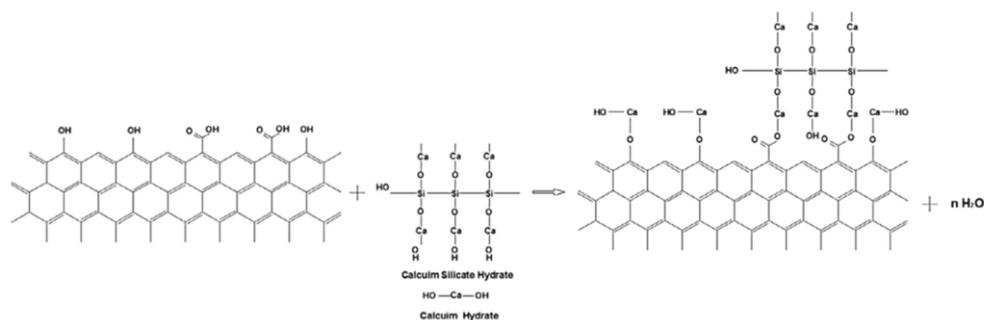
2.1.1 กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)

กราฟีนออกไซด์เป็นอนุพันธ์ของกราฟีนที่มีการออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นวัสดุ 2 มิติ และประกอบด้วย การเชื่อมต่อแบบหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนที่มีการไฮบริไดซ์แบบ sp^2 (sp^2 -Hybridization) และกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเชื่อมพันธะแบบโควาเลนต์กับพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) เอพอกไซด์ (-O-) คาร์บอกซิล (-COOH) และคาร์บอนิลคีโตน (-COO) ซึ่งช่วยเพิ่มการกระจายตัว พันธะนาบหลักของกราฟีนออกไซด์ประกอบด้วยกลุ่มไฮดรอกซิล และเอพอกไซด์ ขณะที่บริเวณขอบของกราฟีนออกไซด์ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอนิลคีโตน และคาร์บอกซิล แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะตอมของกราฟีนออกไซด์ (Anwar และคณะ, 2023)

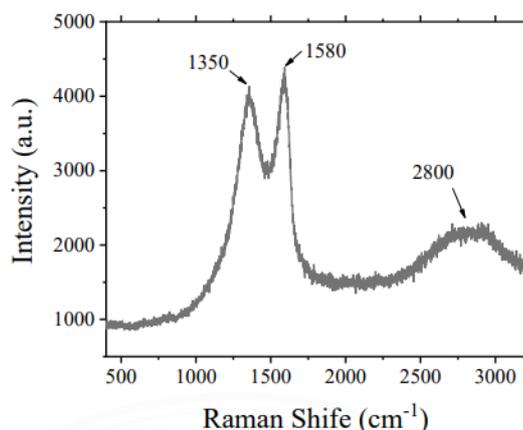
จึงทำให้การมีอยู่ของกลุ่มออกซิเจนเหล่านี้เปลี่ยนแปลงแรงแวนเดอร์วาลระหว่างแผ่นกราฟีนออกไซด์ และขยายระยะห่างระหว่างชั้นจาก 0.335 ถึง 0.625 นาโนเมตร โดยความหนาปกติของกราฟีนออกไซด์ในหนึ่งชั้นคือ 0.7 – 1 นาโนเมตร และช่วงขนาดด้านข้างอยู่ระหว่าง 100 นาโนเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงมีพื้นผิวอยู่ระหว่าง 700 ถึง 1500 ตารางเมตร/กรัม การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การปรับปรุงศักยภาพของวัสดุนาโน ซึ่งกราฟีนออกไซด์ มีพื้นที่การเกิดนิวเคลียสของ C-S-H แสดงดังภาพที่ 2.2 เช่น กระบวนการที่กลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนบนกราฟีนออกไซด์ ช่วยดึงดูดไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และซิลิเกต (SiO_4^{4-}) ในสารละลายซีเมนต์มากขึ้น เนื่องจากรูปร่างสองมิติ และเพิ่มความไวต่อปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่ใหญ่ขึ้นมีปัจจัยหลักในการให้ซีเมนต์ได้รับความแข็งแรง และพัฒนาคุณสมบัติการยึดเกาะ ซึ่งประสิทธิภาพทางกลของกราฟีนออกไซด์ พบว่ามีมอดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 32 กิกะปาสคาล และกำลังรับแรงดึง 130 เมกะปาสคาล ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ โดยหน้าที่หลักของกราฟีนออกไซด์ คือการสร้างพื้นผิวในกลุ่มฟังก์ชันเพื่อทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์การไฮเดรชันของซีเมนต์ เช่น C-S-H และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีความเป็นโคเวเลนต์สูงในกลุ่มคาร์บอนซิล ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง กราฟีนออกไซด์ กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Anwar และคณะ, 2023)



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างกราไฟท์ออกไซด์ และผลิตภัณฑ์การไฮเดรชัน

(Sheikh และคณะ, 2021)

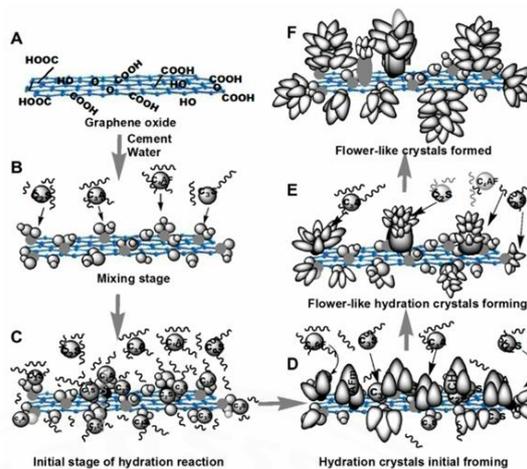
กราไฟท์ออกไซด์มีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับกราไฟท์ เนื่องจากมีกลุ่มที่ประกอบด้วยออกซิเจนอยู่บนพื้นผิว ซึ่งทำให้โครงสร้างอ่อนแออง นักวิจัยได้ใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของกราไฟท์ออกไซด์ ซึ่งสามารถช่วยในการทำความเข้าใจว่า กราไฟท์เปลี่ยนรูปร่างภายใต้ความเครียดวัสดุ เช่น เส้นใยโพลีเมอร์โมดูลัสสูง (High-Modulus Polymer Fibers) และท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Raman spectroscopy ที่เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุ ซึ่งให้ข้อมูลเชิงลึกในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ กราไฟท์ออกไซด์แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2.3 พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของกราไฟท์ออกไซด์ของเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากได้รับการปรับปรุงด้วยกลูตาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ซึ่งชี้ถึงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อความเครียดในกราไฟท์ออกไซด์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกันหลังการปรับปรุงทางเคมี ซึ่งแสดงพฤติกรรมเชิงกลที่ดีขึ้น ด้วยการเปรียบเทียบปัจจัยด้านประสิทธิภาพการถ่ายโอนความเครียด และโมดูลัสที่มีผลต่อกราไฟท์ออกไซด์ในสถานะต่างๆ สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ โดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น การวางแนวที่ไม่ตรงของแผ่นงานในวัสดุการค้นพบนี้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางกลของกราไฟท์ออกไซด์สามารถปรับเปลี่ยนและเข้าใจได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น การบำบัดทางเคมี และเทคนิคการกำหนดลักษณะเฉพาะ เช่น Raman spectroscopy (Young และคณะ, 2012)



ภาพที่ 2.3 Raman spectroscopy ของกราฟีนออกไซด์ (Sun และคณะ, 2020)

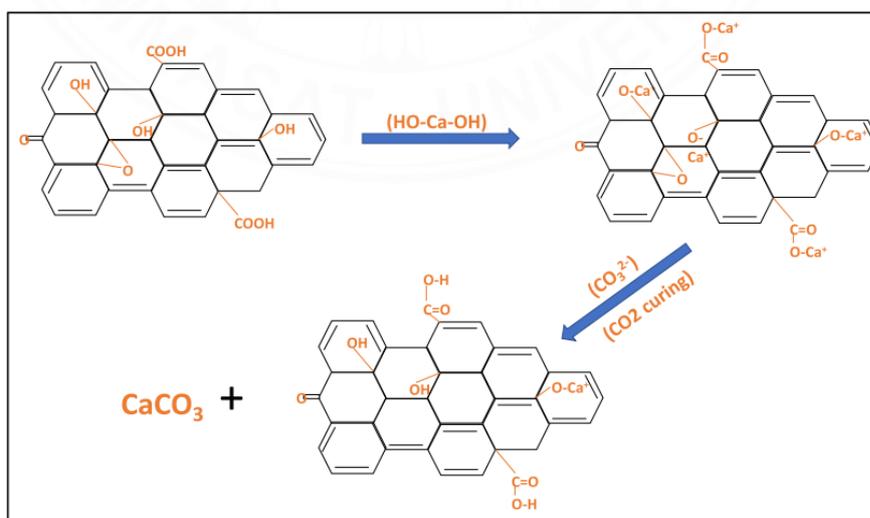
2.1.1.1 บทบาทของกราฟีนออกไซด์ต่อคอนกรีต

กราฟีนออกไซด์ (GO) มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากกระบวนการไฮเดรชันในซีเมนต์ และเสริมความแข็งแรงของคอนกรีต โครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นใน C-S-H เมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ กับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และซิลิเกต (SiO_4^{4-}) ในสารละลายซีเมนต์ โดยหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น $-\text{OH}$ และ $-\text{COOH}$ บนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้น (nucleation sites) สำหรับการตกผลึกของ C-S-H ทำให้กระบวนการนี้ช่วยเร่งการสร้าง C-S-H รอบผิวของกราฟีนออกไซด์ ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ปกติ โดยแสดงดังภาพที่ 2.4 และการเกิด C-S-H ที่เพิ่มขึ้นรอบกราฟีนออกไซด์ช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่มักเกิดในกระบวนการไฮเดรชัน ซึ่งเป็นสารที่ไม่ได้ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับคอนกรีต กราฟีนออกไซด์ช่วยลดความพรุน (Porosity) ในโครงสร้างของซีเมนต์ เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวระหว่าง 700 ถึง 1500 ตารางเมตร/กรัม ช่วยให้ไอออนแคลเซียม และซิลิเกตในซีเมนต์เกาะตัวบนพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ กราฟีนออกไซด์ยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้าง C-S-H ยังทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรงในระดับจุลภาค จึงทำให้โครงสร้าง C-S-H สามารถรับแรงดึง และแรงอัดได้มากขึ้น และการสร้างโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงของ C-S-H รอบกราฟีนออกไซด์ช่วยลดการแพร่กระจายของรอยแตก (Crack propagation) ในระดับจุลภาค และเพิ่มความต้านทานต่อแรงซ้ำๆ (Cyclic loading) จึงทำให้กราฟีนออกไซด์ช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต (Udumulla และคณะ, 2024)



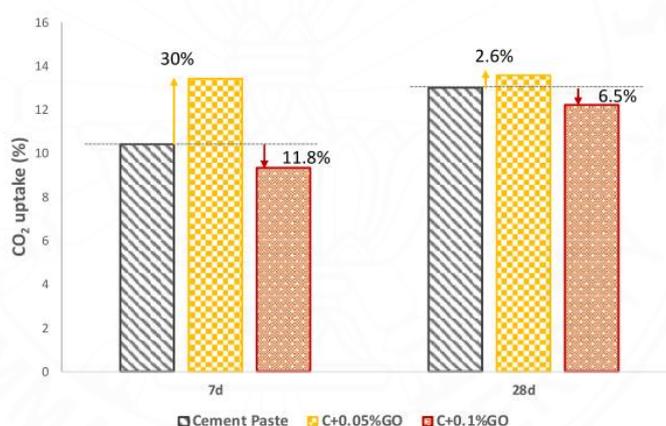
ภาพที่ 2.4 กลไกการควบคุมของกราฟีนออกไซด์บนผลึกการไฮเดรชันของซีเมนต์ (Udumulla และคณะ, 2024)

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Sequestration) ในระบบซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยกราฟีนออกไซด์ (GO) แสดงให้เห็นศักยภาพในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง โดย GO ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการคาร์บอนเนชัน และการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกลไกเฉพาะหลายประการ เช่น การเติม GO ในปริมาณต่ำ (0.05%) ช่วยเพิ่มการจับตัวของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) กับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในโครงสร้างซีเมนต์ ทำให้เกิดการตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) อย่างมีนัยสำคัญ (Alvi และคณะ, 2023; Mishra และคณะ, 2022)



ภาพที่ 2.5 แผนภาพเชิงกลไกที่อธิบายการทำงานของ GO ในการส่งเสริมการก่อตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในซีเมนต์ (Mishra และคณะ, 2022)

โดยพบว่าการบ่มด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเร่ง (Accelerated carbonation) ทำให้ระบบซีเมนต์ที่เติม GO สามารถดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นถึง 30% เมื่อเทียบกับซีเมนต์ทั่วไป ผลกระทบนี้เกิดจากคุณสมบัติพิเศษของ GO เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวปฏิกิริยา การมีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ช่วยเร่งการจับตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ และการปรับโครงสร้างรูพรุนในซีเมนต์ให้หนาแน่นขึ้นในระดับจุลภาค GO ส่งเสริมการจับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการเพิ่มพื้นที่ให้น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เสริมสร้างโครงสร้างของซีเมนต์ กระบวนการนี้ช่วยลดปริมาณรูพรุนและเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของซีเมนต์ในระยะยาว ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณ GO มากเกินไปอาจทำให้โครงสร้างหนาแน่นเกินไป ส่งผลให้การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และลดประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน โดยสรุป การใช้ GO ในปริมาณที่เหมาะสมไม่เพียงแต่ช่วยกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล และความทนทานของซีเมนต์ในเวลาเดียวกัน (Alvi และคณะ, 2023; Mishra และคณะ, 2022)



ภาพที่ 2.6 ศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ของซีเมนต์ที่เติม GO หลังจากการบ่มในช่วงเวลา 7 และ 28 วัน (Mishra และคณะ, 2022)

2.1.2 เปรียบเทียบกราฟีนกับวัสดุนาโนชนิดอื่นๆ

กราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุนาโนที่มีความโดดเด่นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น กราฟีน(Graphene) นาโนซิลิกา (Nano-Silica, NS) ท่อคาร์บอนนาโน (Carbon Nanotubes, CNTs) และกราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดิวซ์ (Reduced Graphene Oxide, rGO) โดยกราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน ซึ่งช่วยเพิ่มการกระจายตัวในน้ำ และซีเมนต์ได้ดี ต่างจากกราฟีน และ rGO ที่กระจายตัวได้ยาก ขณะเดียวกัน GO มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งมากกว่า NS และ CNTs ช่วยเพิ่มปริมาณโครงสร้างของ C-S-H ทำให้ลดรูพรุนในโครงสร้าง และเสริมความหนาแน่นของซีเมนต์ได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ ในด้านสมบัติทางกล GO สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัด และแรงดึงได้ประมาณ 30-50% ซึ่งสูงกว่า NS แต่ต่ำกว่า CNTs ที่สามารถเพิ่มกำลังดึงได้สูงถึง 100% แม้ว่าการกระจายตัวของ CNTs ในซีเมนต์จะยากกว่า แต่ กราฟีน และ rGO เหมาะกับงานที่ต้องการสมบัติทางกลที่สูงมาก แต่มีข้อจำกัดในต้นทุนการผลิต และการกระจายตัวในน้ำ GO จึงเป็นวัสดุที่สมดุลทั้งในแง่ของการเสริมสมบัติทางกล การกระจายตัวในน้ำได้ดี และการลดความพรุนในซีเมนต์ ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในคอนกรีต โดยสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 (Alvi และคณะ, 2023; Anwar และคณะ, 2023; Udumulla และคณะ, 2024)

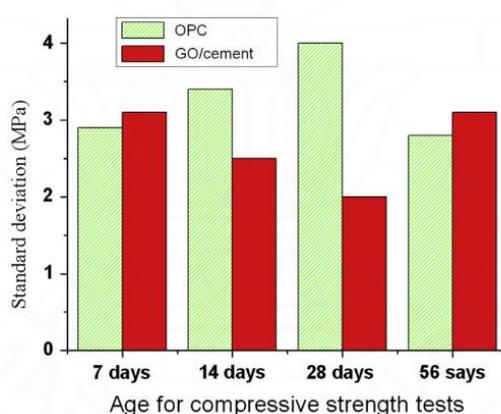
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบระหว่างกราฟีนออกไซด์ และวัสดุนาโนชนิดอื่นๆ

คุณสมบัติ	GO	Graphene	NS	CNTs	rGO
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อ กรัม)	700–1500	~2630	200–300	100–300	2000–2500
การกระจายตัวใน น้ำ	ดีเยี่ยม	ยาก	ดี	ยาก	ยาก
การกระจายตัวใน ซีเมนต์	ดีเยี่ยม	ปานกลาง	ดี	ต่ำ	ปานกลาง
กำลังรับแรงอัดที่ เพิ่มขึ้น (%)	~33	~50	~10–20	~20–40	~40–60
กำลังรับแรงดึงที่ เพิ่มขึ้น (%)	~59	~80	~10	~50–100	~70
การลดรูพรุน	ดีเยี่ยม	ดี	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง
ต้นทุนการผลิต	สูง	สูงมาก	ต่ำ	สูงมาก	สูงมาก

2.2 คอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

2.2.1 สมบัติของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

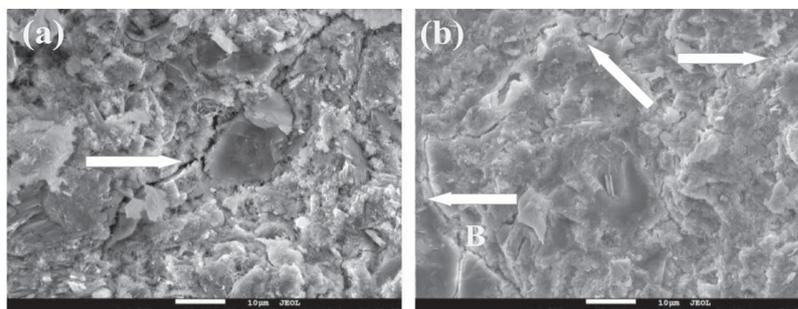
Pan และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการรวมกราฟีนออกไซด์ (GO) เข้าไปในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป โดย GO ที่ได้มาจากการแยกชั้นแกรไฟต์ทางเคมี และใช้เป็นตัวเสริมประสิทธิภาพของคอนกรีตเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลของวัสดุปูนซีเมนต์ การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อประเมินว่าการเติม GO ในปริมาณน้อยประมาณ 0.05% โดยน้ำหนัก ตัวชี้วัดของการศึกษาคือการวิเคราะห์ผลกระทบของ GO ต่อกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของวัสดุผสม โดยผลการศึกษาพบว่าเมื่อเติม GO จะมีการปรับปรุงความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ ศึกษาพฤติกรรมทางกลของ GO ผสมในซีเมนต์ เช่น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดเมื่อรับแรงกระทำสูงสุด การกระจายตัวของรอยร้าว และการวิบัติ และมีการศึกษาเชิงลึกถึงโครงสร้างจุลภาคของ Go ผสมในซีเมนต์ด้วยการวิเคราะห์จากการเพิ่มสร้างสารซิลิเกตแคลเซียม และการเพิ่มพื้นที่ผิวในการปรับปรุงประสิทธิภาพทางกล จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มกราฟีนออกไซด์ (GO) 0.05% โดยน้ำหนักลงในซีเมนต์ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ได้ 15-33% และกำลังรับแรงดัดได้ 41-59% โดยแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลลัพธ์กำลังรับแรงอัดที่วัดในช่วงอายุต่างๆ

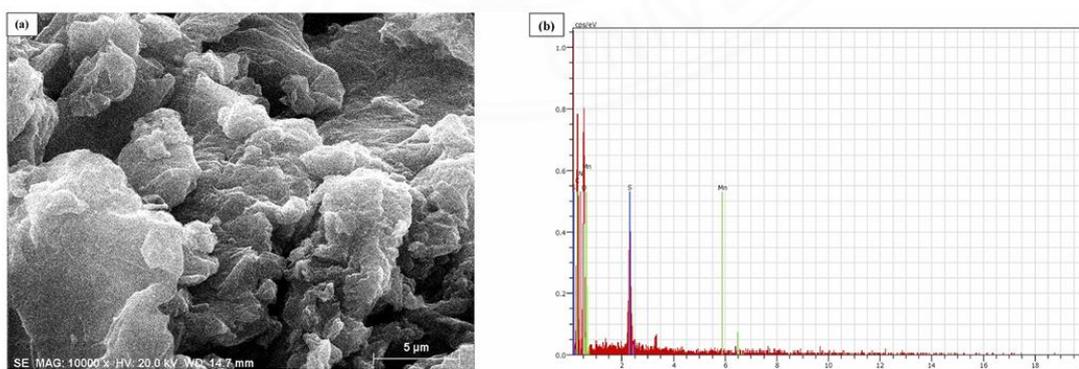
(Pan และคณะ, 2015)

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่า GO เบี่ยงเบนการกระจายตัวของรอยร้าว ซึ่งบ่งชี้ GO ทำหน้าที่เป็นตัวขวางการแพร่ของรอยแตก ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดมีความกว้างมากขึ้น และเกิดการวิบัติที่ลดลง แสดงดังภาพที่ 2.6 และผู้วิจัยนำเสนอถึงการนำ GO มาผสมช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของซีเมนต์ เนื่องจากการผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.8 ภาพจาก SEM (a) ภาพรอยร้าวซีเมนต์ที่ไม่ผสม GO (b) ภาพรอยร้าวซีเมนต์ผสม GO
(Pan และคณะ, 2015)

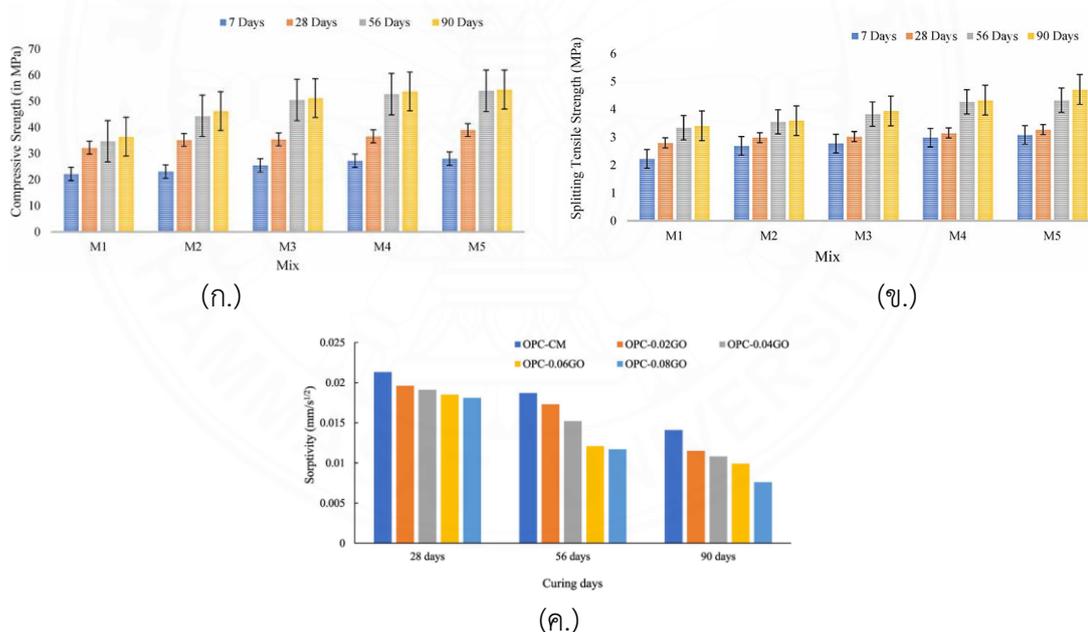
Devi และ Khan (2020) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ (GO) ต่อประสิทธิภาพทางกล และความทนทานของคอนกรีต โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาวัสดุผสมเสริมในคอนกรีตระดับจุลภาคด้วยสัดส่วนของร้อยละ GO ต่อน้ำหนักซีเมนต์ คือ 0 0.02 0.04 0.06 และ 0.08 ตามลำดับ ซึ่งจะทดสอบผลของการเพิ่ม GO ต่อความสามารถในการทำงาน กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง การซึมผ่านน้ำ การดูดซึมน้ำ และคุณภาพของวัสดุผสมเสริมในคอนกรีตระดับจุลภาค มีการประเมินลักษณะโครงสร้าง GO ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยการคายอิเล็กตรอน (Field Emission Scanning Electron Microscopy, FE-SEM) และการวิเคราะห์พลังงานการกระจายของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.9 (a) ภาพจาก FE-SEM (b) ภาพจาก EDX (Devi และ Khan, 2020)

รวมถึงการศึกษาเชิงลึกในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่มีอายุ 90 วัน โดยศึกษาผลกระทบของปริมาณ GO ต่อผลึกซีเมนต์ที่เกิดขึ้น และคุณภาพโดยรวมของคอนกรีต นอกจากนี้

การศึกษาวิจัยประเมินคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำของส่วนผสมคอนกรีต โดยมุ่งเน้นที่การทดสอบการดูดซึมพื้นผิวเริ่มต้น (Initial Surface Absorption Test, ISAT) และอัตราการดูดซึมน้ำที่ลดลงเมื่อมีปริมาณ GO เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงของส่วนผสมคอนกรีตที่มีร้อยละ GO 0.08 แสดงผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณ GO อื่นๆ การดูดซึมน้ำ และการซึมผ่านน้ำของส่วนผสมคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณ GO เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.8 แสดงถึงการปรับปรุงคุณสมบัติความทนทานเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีปริมาณ GO 0% กราฟนี้ออกไซด์ยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์โดยไม่เปลี่ยนแปลงกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจน ส่งผลให้ความแข็งแรงของส่วนผสมในคอนกรีตในระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น การทดสอบการดูดซึมพื้นผิวเริ่มต้น (ISAT) พบว่าอัตราการดูดซึมสูงขึ้นในทุกส่วนผสมในวันที่ 28 และลดลงในวันที่ 56 แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำที่ดีขึ้นตามเวลา และการเพิ่มปริมาณ GO ในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง โดยพบค่าการยุบตัวลดลงเมื่อปริมาณ GO เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการดูดซึมน้ำโดย GO และการเกาะกลุ่มกับอนุภาคซีเมนต์



ภาพที่ 2.10 (ก.) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ข.) กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (ค.) การดูดซึมของคอนกรีต (Devi และ Khan, 2020)

Ginigaddara และคณะ (2023) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้กราฟีนออกไซด์ (GO) ผสมในองค์ประกอบของซีเมนต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีต มีการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับองค์ประกอบของซีเมนต์ที่เสริมด้วย GO และการปรับปรุงคุณภาพด้วย GO การศึกษานี้ได้ตรวจสอบบทบาทในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของ GO ใน

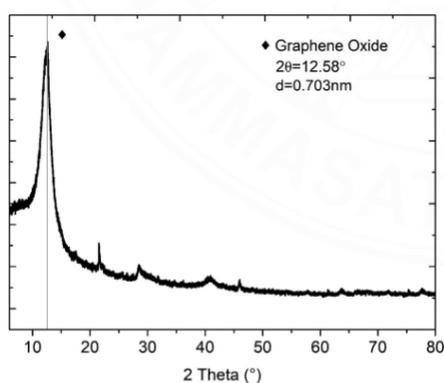
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเพิ่มกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ในการศึกษาที่มุ่งเน้นการใช้ GO ที่สังเคราะห์จากแกรไฟต์ในเส้นเลือด ซึ่งมีความบริสุทธิ์ และความเป็นผลึกสูง จึงทำให้เหมาะสำหรับการใช้ในองค์ประกอบของซีเมนต์ และศึกษาผลกระทบของการใช้ GO ที่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสด และ ศึกษาการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอายุการบ่มระหว่าง 7 และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า GO ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดเนื่องจากพื้นที่ผิวของอนุภาค GO ด้วยการทดสอบการยุบตัว (Slum Test) ตามมาตรฐาน BS EN 12350 พบว่ามีความแตกต่างของความสามารถในการทำงาน โดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้พอลิคาร์บอกซีเลตอีเธอร์ (Polycarboxylate Ether) และไม่ได้ใช้ในการการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มี GO มีการเพิ่มกำลังรับแรงอัดเร็วขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเชื่อมโยงกับอัตราการไฮเดรชันของซีเมนต์ที่เร่งขึ้นจาก GO จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วันเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการไฮเดรชันในซีเมนต์ ดังภาพที่ 2.9 และ GO มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากการให้ตำแหน่งของนิวเคลียส และอนุภาคของซีเมนต์ในการยึดเกาะ และสร้างผลึก ในการใช้ GO ที่สังเคราะห์จากกราฟต์ลักษณะเส้นใยในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้ผลลัพธ์ที่สม่ำเสมอ และน่าเชื่อถือโดยให้ความสำคัญของความบริสุทธิ์ และความเป็นผลึกสูงของ GO สำหรับประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในซีเมนต์คอนกรีตที่มีกราฟีนแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังอย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ข้อดีต่างๆ เช่น การลดแก๊สคาร์บอนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยต้องการคอนกรีตน้อยลงเพื่อให้ได้กำลังตามที่ต้องการ ผู้วิจัยมีการนำเสนอถึงงานวิจัยในอนาคต โดยให้มุ่งเน้นไปที่ส่วนผสมที่มีซีเมนต์เป็นผสมถูกเหนี่ยวนำด้วย GO โดยเฉพาะสำหรับในอาคารสูง ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกลที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีกราฟีนสามารถเอื้ออำนวยให้เกิดการออกแบบอาคารใหม่ และความเสถียรทางด้านสถาปัตยกรรม



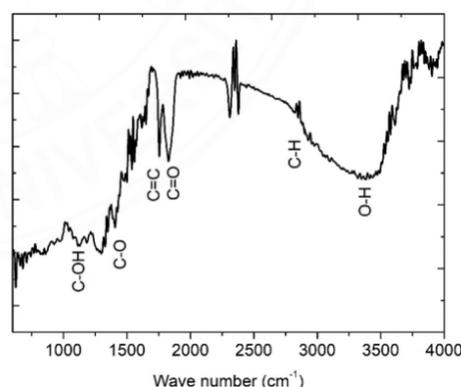
ภาพที่ 2.11 กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

(T. Ginigaddaraa และคณะ, 2023)

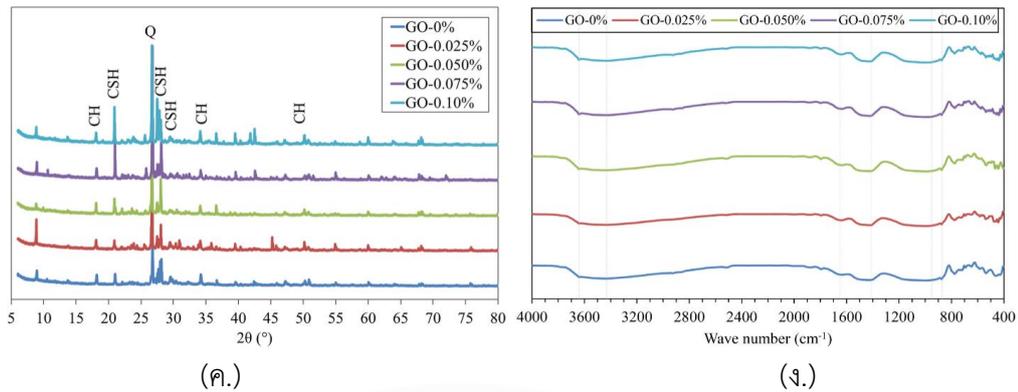
Reddy และ Prasad (2023) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ (GO) ต่อคอนกรีตกล่าวว่า GO เป็นวัสดุนาโนที่ช่วยเสริมคุณสมบัติของคอนกรีต วิเคราะห์ความสามารถในการทำงาน คุณสมบัติเชิงกล ความทนทาน และโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเมื่อมีการใส่ GO ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0.025 0.05 0.075 และ 0.10% ของน้ำหนักซีเมนต์ โดยคุณสมบัติเชิงกลมีการวิเคราะห์ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดัดแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าแม้ใช้ปริมาณของ GO ที่น้อยก็สามารถเสริมคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้อย่างมาก ซึ่งคอนกรีตที่มี GO 0.1% แสดงผลเพิ่มขึ้นทั้งกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดัดแบบผ่าซีกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม คือ 38.46 12.07 และ 14.87% ตามลำดับ ในอายุคอนกรีตที่ 28 วัน ความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่มี GO จากการทดสอบพบว่า การเพิ่ม GO ส่งผลดีลงต่อรูพรุนในคอนกรีต ซึ่งช่วยปรับปรุงความทนทานของคอนกรีต การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคต่างๆ คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) การวิเคราะห์การกระจายแสงเอ็กซ์-เรย์ (X-ray diffraction analysis, XRD) และเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารโดยใช้แสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 2.10 พบว่าการใส่ GO ช่วยกระตุ้น และช่วยเพิ่มความหนาแน่น และสม่ำเสมอมากขึ้นในคอนกรีต ผู้วิจัยได้สรุปว่า GO เสริมคุณสมบัติในคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเพิ่มความแข็งแรง ความทนทาน และลักษณะโครงสร้างจุลภาค ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นสัญญาณที่ดีในการเสริมคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากคอนกรีต



(ก.)

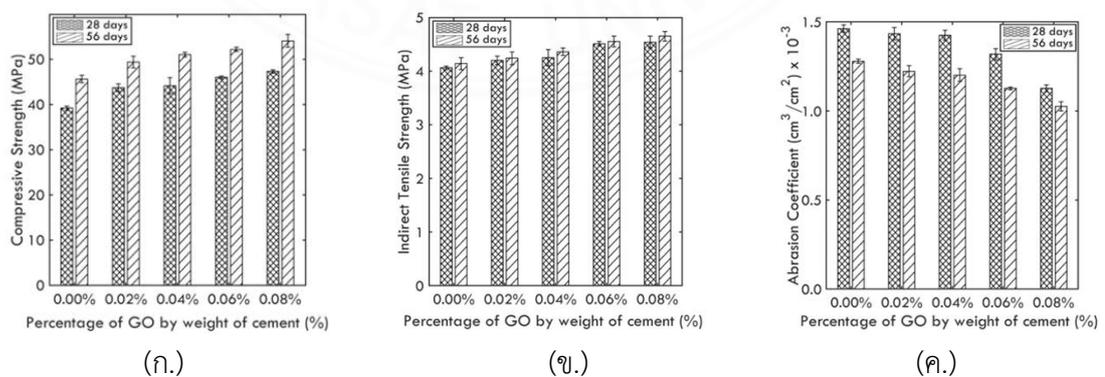


(ข.)



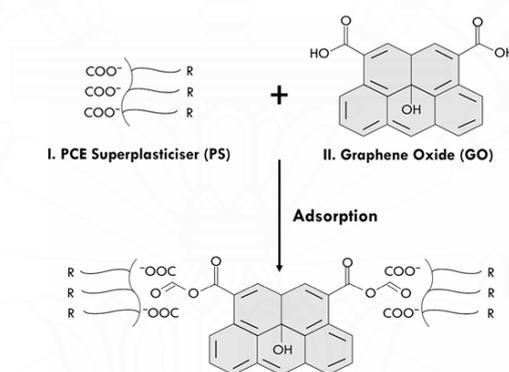
ภาพที่ 2.12 (ก.) XRD ของกราฟีนออกไซด์ (ข.) FTIR ของกราฟีนออกไซด์ (ค.) XRD ของคอนกรีตที่ผสมกราฟีนออกไซด์ (ง.) FTIR ของคอนกรีตที่ผสมกราฟีนออกไซด์ (Reddy และ Prasad, 2022)

Fonseka และคณะ (2023) ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการเติมกราฟีนออกไซด์ (GO) ในคอนกรีต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ GO ที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยมีการเติม GO ในปริมาณ 0.02% ถึง 0.08% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ เพื่อศึกษาการเพิ่มสมบัติทางกล และความทนทานของคอนกรีต ตัวชี้วัดสำคัญของการศึกษานี้ ได้แก่ การวิเคราะห์กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และความต้านทานต่อการขัดถู รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผ่านเทคนิค คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และการกระจายตัวของ GO ในซีเมนต์ ผลการศึกษาพบว่า การเติม GO ในปริมาณ 0.08% สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ถึง 21% ที่ 28 วัน และ 19% ที่ 56 วัน ตามลำดับ ในขณะที่กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น 12% สำหรับทั้ง 28 และ 56 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ความต้านทานต่อการขัดถูเพิ่มขึ้น 23% ที่ 28 วัน และ 20% ที่ 56 วัน ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.13 (ก.) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (ข.) กำลังรับแรงดัดแบบผ่าซีก (ค.) ความต้านทานการขัดถู (Fonseka และคณะ, 2023)

โครงสร้างจุลภาคที่วิเคราะห์ด้วย SEM แสดงให้เห็นว่า GO ช่วยเร่งการเกิดโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) บนพื้นผิวของ GO ทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น ลดรูพรุน และช่วยเบี่ยงเบนทิศทางของรอยแตกในโครงสร้างคอนกรีต จากการวิเคราะห์พบว่า GO มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความหนาแน่น และลดความพรุนในคอนกรีต จึงส่งผลให้ความต้านทานต่อการซัดถู และสมบัติทางกลของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเติม GO ในปริมาณมากอาจลดค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีต ซึ่งจำเป็นต้องใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) เพื่อช่วยเพิ่มการกระจายตัว และความสามารถในการทำงานของคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 2.12 นักวิจัยสรุปว่าการเติม GO ในปริมาณต่ำเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างที่ต้องการความทนทาน และความแข็งแรงสูง เช่น พื้นสนามบิน และถนน



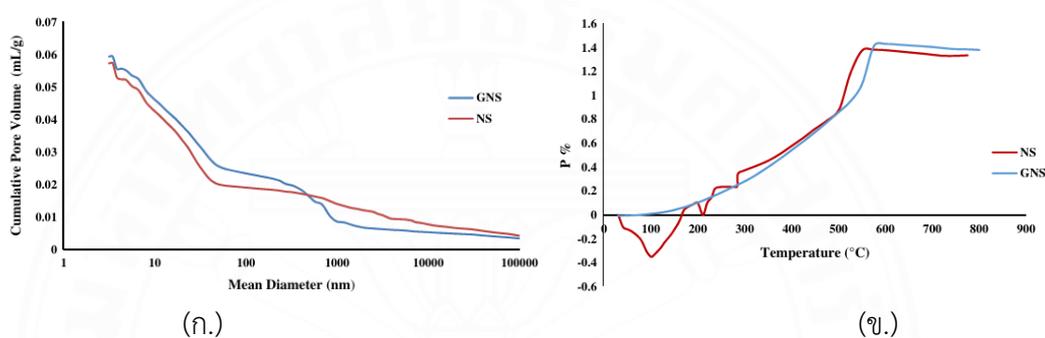
ภาพที่ 2.14 กลไกการดูดซับระหว่างกราฟีนออกไซด์ และสารลดน้ำ (PS)

(Fonseka และคณะ, 2023)

2.2.2 การศึกษาคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง

Mohammed และคณะ (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) ต่อสมบัติของคอนกรีตที่สัมผัสกับความร้อนสูง โดยทำการทดสอบในคอนกรีตประเภทกำลังปกติ (Normal Strength Concrete, NSC) และคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete, HSC) เพื่อประเมินสมบัติทางกล การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุน (Pore Structure) และพฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อเผชิญอุณหภูมิสูงสุดถึง 800 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่เติม GO รักษากำลังรับแรงอัดได้ประมาณร้อยละ 70 ของกำลังรับแรงอัดเริ่มต้น เมื่อสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในขณะที่คอนกรีตที่ไม่ได้ผสม GO สูญเสียกำลังไปถึงร้อยละ 65 และกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่เติม GO ลดลงเพียงร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับการลดลงของคอนกรีตที่ไม่ได้ผสม GO ในการเติม GO ช่วยลดรูพรุนประเภท Capillary Pores (รูพรุนที่มีขนาดมากกว่า 300 นาโนเมตร) และเพิ่มปริมาณของ Gel Pores

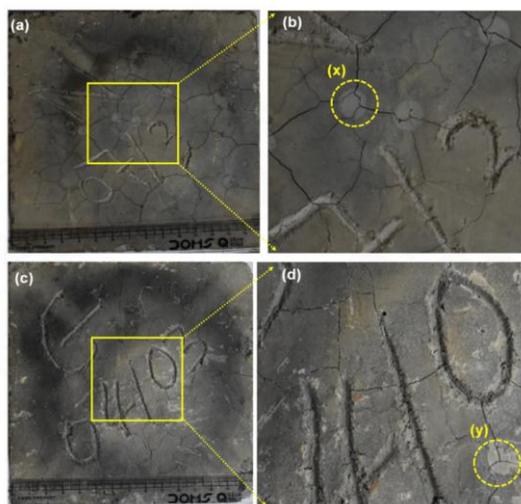
(รูพรุนที่มีขนาดน้อยกว่า 300 นาโนเมตร) ดังภาพที่ 2.13 การปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนช่วยลดการสะสมแรงดันไอน้ำภายในที่ช่วยลดการเกิดการสลายตัว (Spalling) และเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างคอนกรีต และคอนกรีตที่ผสม GO มีการขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion) อย่างสม่ำเสมอ และลดการเกิดการหดตัวในช่วงต้น (Early Thermal Contraction) ซึ่งช่วยลดการแตกร้าวจากแรงดันความร้อน จากการศึกษาวิจัยให้เห็นถึงศักยภาพของ GO ในการเพิ่มความทนทานของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับสภาวะอุณหภูมิสูง เช่น อุโมงค์หรือโครงสร้างที่เสี่ยงต่อไฟไหม้



ภาพที่ 2.15 (ก.) การกระจายตัวของรูพรุนในคอนกรีต (ข.) การวิเคราะห์การขยายตัวของความร้อน (Mohammed และคณะ, 2017)

Rao และคณะ (2024) ได้ศึกษาผลกระทบของการเติมกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) ในคอนกรีต เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล และความทนทานต่ออุณหภูมิสูง รวมถึงสภาวะไฟไหม้ โดยกำหนดปริมาณการเติมร้อยละ GO ที่ 0.025 0.05 และ 0.075 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ การทดลองเน้นวิเคราะห์กำลังรับแรงอัด การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุน การต้านทานความร้อน และพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้ความร้อนและเปลวไฟ LPG จากพบผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่เติม GO ในปริมาณร้อยละ 0.05 สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้สูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน และสูญเสียกำลังรับแรงอัดหลังสัมผัสอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละ 40 และ 35 ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตที่ไม่ได้ผสม GO สูญเสียถึงร้อยละ 70 กราฟีนออกไซด์สามารถช่วยลดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิภายในคอนกรีต โดยอุณหภูมิภายในคอนกรีตที่ผสม GO ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสม ประมาณ 50 องศาเซลเซียส เมื่อสัมผัสกับความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 2.14 ในการวิเคราะห์เชิงเทอร์โม-กราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis, TGA) และ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนแบบเชิงอนุพันธ์ (Differential Thermogravimetric Analysis, DTG) แสดงถึง GO มีบทบาทสำคัญในการรักษาน้ำ และผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของคอนกรีตจึงทำให้ลดการ

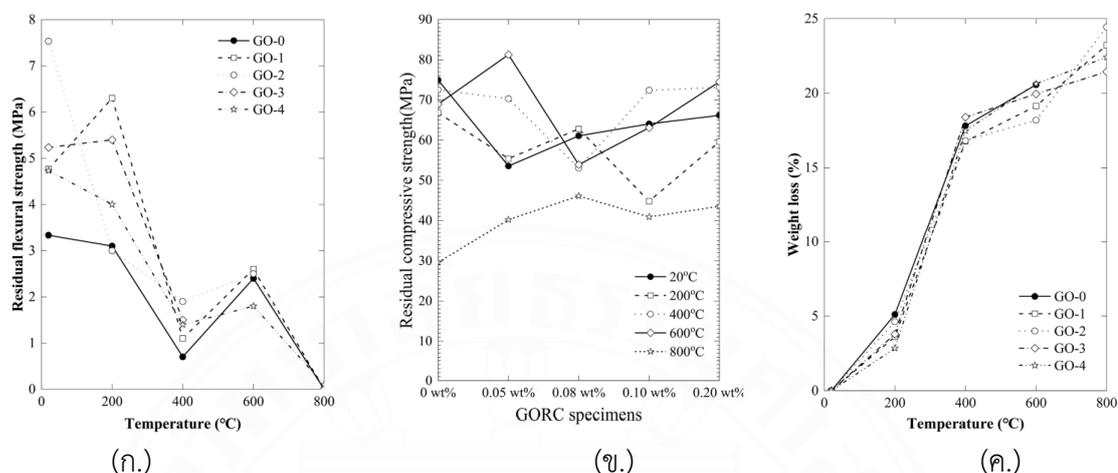
เปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกล GO ช่วยเปลี่ยน Capillary Pores ให้กลายเป็น Gel Pores ซึ่งช่วยเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้าง ลดโอกาสการสะสมแรงดันไอน้ำ และลดการแตกร้าว และการวิเคราะห์ด้วยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงให้เห็นว่า GO ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดนิวเคลียส จึงส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นสูงขึ้น และเชื่อมโยงระหว่างชั้นคอนกรีตดีขึ้น



ภาพที่ 2.16 (a.) ภาพตัวอย่างคอนกรีตเปลือยที่สัมผัสกับเปลวไฟ (b.) ส่วนที่ขยายของภาพโดย (x) คือ จุดน้ำ (c.) ภาพตัวอย่างคอนกรีต GO ที่สัมผัสกับเปลวไฟ (d.) ส่วนที่ขยายของภาพโดย (y) คือ จุดน้ำ (Rao และคณะ, 2024)

Yang และคณะ (2022) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) ต่อสมบัติของซีเมนต์ที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง โดยเน้นการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ตัวอย่างถูกเตรียมด้วย GO ในสัดส่วน 0 0.05 0.08 0.10 และ 0.20% ตามลำดับ ของน้ำหนักซีเมนต์ และถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับเพื่อศึกษาผลกระทบในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากการทดสอบพบว่า การสูญเสียน้ำหนักส่วนใหญ่เกิดในช่วง 200–400°C เนื่องจากการระเหยของน้ำอิสระ และน้ำในรูปพรุน GO ช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการควบคุมโครงสร้างของซีเมนต์ ซึ่งกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 126% เมื่อเติม GO ในสัดส่วน 0.08% ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C เนื่องจากกลไกการเพิ่มความหนาแน่นของ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) รอบ GO อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงดัดลดลงที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C เนื่องจากการสลายตัวของ C-S-H และการเสื่อมของโครงสร้างส่วนกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 800°C แต่ GO ยังช่วยรักษากำลังรับแรงอัดได้ดีกว่า

ซีเมนต์ปกติ โดยลดการแตกร้าว และการสูญเสียโครงสร้างจากแรงดันไอน้ำภายใน โดยรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.17 (ก.) กำลังรับแรงดัดเมื่อสัมผัสอุณหภูมิต่างๆ (ข.) กำลังรับแรงอัดเมื่อสัมผัสอุณหภูมิต่างๆ (ค.) น้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Yang และคณะ, 2022)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li และคณะ (2018) ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลโดยการรวมกราฟีนออกไซด์เข้ากับซีเมนต์ การศึกษานี้ใช้ขั้นตอนการผสมแบบดัดแปลงเพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์ในปูนซีเมนต์ มีแนวคิดคือการใช้ทรายซิลิกาเพื่อแยกแผ่นนาโนกราฟีนออกไซด์ มีการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) และการวัดความพรุนของปรอท (mercury intrusion- porosimetry, MIP) เพื่อศึกษาผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ต่อการเปลี่ยนผ่านของพื้นผิว (interfacial transition zone, ITZ) และความพรุนของซีเมนต์ จากผลการศึกษาพบว่า การใส่กราฟีนออกไซด์เข้ากับซีเมนต์เพิ่มคุณสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะกำลังรับแรงอัด ของมอร์ตาร์ ซึ่งมีส่วนผสมของกราฟีนออกไซด์ในปริมาณน้อย คือ 0.02 - 0.04% ของน้ำหนักซีเมนต์ สาเหตุนี้เกิดจากการเพิ่มความหนาแน่นของ ITZ และการปรับแต่งความพรุน นักวิจัยมุ่งเน้นไปที่การสำรวจการใช้ กราฟีนออกไซด์เป็นการเสริมแรงด้วยวัสดุนาโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลของมอร์ตาร์ผ่านการดัดแปลงโครงสร้างจุลภาค

Al-Bayati และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเติมผงแกรไฟต์ลงโรคอนกรีต ศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น ความสามารถต้านทานไฟฟ้า กำลังรับแรงอัด และความสามารถในการทำงานของคอนกรีต โดยมีการศึกษาปริมาณแกรไฟต์ที่เหมาะสมในส่วนผสมของคอนกรีต คือ 0.5 1 และ 2.5% ต่อน้ำหนักของซีเมนต์ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเติมแกรไฟต์ในคอนกรีตส่งผลให้

ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตแย่งทุกปริมาณของแกรไฟต์ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพบว่าปริมาณแกรไฟต์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 1% และนำไฟฟ้าได้สูงที่สุด ผู้วิจัยได้นำเสนอว่าหากเติมแกรไฟต์สูงกว่า 1% การนำไฟฟ้าจะลดลง และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) พบว่า แกรไฟต์มีผลต่อการสร้างรูพรุน และความพรุนโดยรวมของคอนกรีต

Madbouly และ คณะ (2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเติมแผ่นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ลงในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ 0 0.01 0.02 0.03 0.04 และ 0.05 % โดยน้ำหนัก เพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบเกี่ยวกับ คุณสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และความสามารถในการตรวจจับตนเอง จากผลการศึกษาพบว่า การเติม rGO ในปริมาณ 0.04% และ 0.05% สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ 27% และ 38% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ธรรมดา การผสม rGO ลงในซีเมนต์ช่วยลดขนาดรูพรุนของวัสดุผสมซีเมนต์ และปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้มีความหนาแน่น และสม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้ซีเมนต์ที่มี rGO ผสมอยู่แสดงพฤติกรรมเพียโซเรซิสทีฟ (Piezoresistive behavior) ความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงตามกำลังรับแรงอัด ซึ่งพฤติกรรมนี้ทำให้ซีเมนต์ที่มี rGO ผสมอยู่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุตรวจจับตนเองสำหรับ SHM และศึกษาลักษณะของ rGO ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (High-Resolution Transmission Electron Microscope, HRTEM) และ Raman Spectroscopy และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และ TGA

Sun และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ไฮบริดของกราฟีนออกไซด์/กราฟีน (GO/GR) ต่อคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ การศึกษานี้เตรียมไฮบริด GO/GR ในอัตราส่วนต่างๆ คือ 1:0 3:1 1:1 1:3 และ 0:1 นำมาผสมในมอร์ตาร์เพื่อวิเคราะห์กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่า GO ทำหน้าที่เป็นตัวกระจายสารเพื่อการกระจายตัวของ GR ในมอร์ตาร์ ขณะที่ GR ให้อิทธิพลเสริมแรงเนื่องจากคุณสมบัติทางกลที่ยืดหยุ่น การศึกษาถึงกลไกที่อยู่เบื้องหลังการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรง รวมถึงการกระจายตัวของ GR ในสารละลาย GO ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และการกระจายขนาดรูพรุนของมอร์ตาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าไฮบริด GO/GR เพิ่มความกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน GO:GR เท่ากับ 1:1 และ 3:1 ตามลำดับคุณสมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีขึ้นของ GR เมื่อมี GO ร่วมด้วย รวมถึงผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และโครงสร้างรูพรุนของมอร์ตาร์

Zhang และคณะ (2021) ทำการศึกษาผลของ Reduced Graphene Oxide (rGO) ต่อความแข็งแรง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และรูปร่างของซีเมนต์ที่ผสมซิลิกาฟุ่ม กลไกการเสริมแรงของ rGO ที่มีต่อปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเพิ่มความแข็งแรง การเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน

และการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และโครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์ที่ผสม rGO จากผลการศึกษาพบว่า การเติม rGO ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยมอร์ตาร์ที่มีปริมาณ rGO 0.08% มีกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดที่ 1 3 และ 28 วัน เพิ่มขึ้น 6.6% และ 12.5% 24.3% และ 22.6% 21.3% และ 30.3% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม rGO ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงเริ่มต้น โดยเพิ่มความเข้มสูงสุดในกราฟการปลดปล่อยความร้อน ปริมาณ CH และ C-S-H ในตัวอย่างที่มี 0.08% rGO เพิ่มขึ้น 4.76% และ 0.67% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม rGO ช่วยลดปริมาณรูพรุนรวม และปรับปรุงการกระจายขนาดรูพรุนปริมาณรูพรุนรวมลดลง 10.3% และปริมาณรูพรุนที่เป็นอันตรายลดลง 22.5%

He และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของผงแกรไฟต์ต่อคุณสมบัติทางกล และการปล่อยคลื่นเสียงของคอนกรีต โดยศึกษาผลของปริมาณผงแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นต่อความสามารถในการรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต ศึกษาลักษณะการปล่อยคลื่นเสียง (Acoustic Emission) ของคอนกรีตที่มีผงแกรไฟต์ในปริมาณต่างๆ ระหว่างการทดสอบกำลังอัด และกำลังรับแรงดัด เพื่อใช้ในการพยากรณ์การวิบัติวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการปล่อยคลื่นเสียงกับการเกิดความเสียหายของคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงแกรไฟต์ โดยลดลง 10.7% เมื่อเติมผงแกรไฟต์ 3% และลดลง 30.17% เมื่อเติม 9% ซึ่งเป็นผลจากการเกิดจุดบกพร่องเริ่มต้นในคอนกรีตจากผงแกรไฟต์ ในระหว่างการทดสอบกำลังอัด คอนกรีตที่ไม่มีผงแกรไฟต์จะมีจุดเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน 2 จุดในกราฟการปล่อยคลื่นเสียง โดยจุดเปลี่ยนที่สองสามารถใช้เป็นสัญญาณเตือนการวิบัติได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงแกรไฟต์ จุดเปลี่ยนที่สองจะลดความชัดเจนลง ในขณะที่จุดเปลี่ยนแรกจะชัดเจนมากขึ้น ผงแกรไฟต์ทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดลดลงเล็กน้อย แต่เพิ่มการเปิดปากรอยแตกที่วิกฤต ส่งผลให้ความแข็งแรงในการแตกหักในช่วงไม่เสถียรเพิ่มขึ้นถึง 9.9% เมื่อเติมผงแกรไฟต์ 9% ในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงดัด การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของสัญญาณคลื่นเสียงก่อนการวิบัติไม่สามารถใช้เป็นสัญญาณเตือนได้ เนื่องจากเกิดขึ้นใกล้กับแรงกระทำสูงสุด ดังนั้นการเพิ่มผงแกรไฟต์ทำให้สัญญาณคลื่นเสียง และความเสียหายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องก่อนการวิบัติ ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลเตือนภัยได้

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ พร้อมทั้งรายละเอียดในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเพื่อใช้ประกอบการอภิปรายผลการทดสอบของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ เพื่อศึกษาศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และลักษณะของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ หลังสัมผัสความร้อนสูง และเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีของกราฟีนออกไซด์ คอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์อีกด้วย และคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594 - 2556 และตามมาตรฐาน ASTM C1157-08a (ASTM-International, 2009) สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป และงานคอนกรีตโครงสร้าง ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังตารางที่ 3.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 3.15

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซีเมนต์ไฮดรอลิก (TPI Polene, 2024)

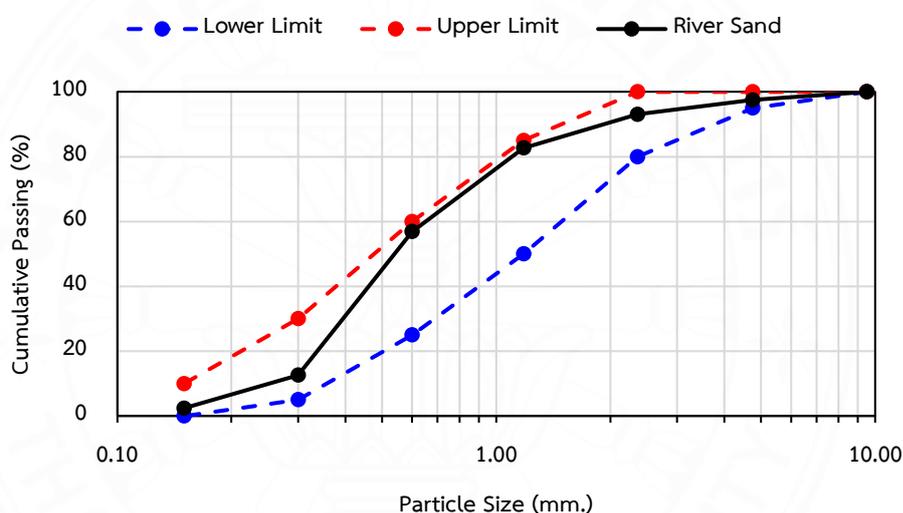
คุณสมบัติทางฟิสิกส์	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
การขยายตัวโดยวิธีออโตคลอฟ (Autoclave expansion) ร้อยละ	0.05
ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
การก่อตัวระยะต้น	90
การก่อตัวระยะปลาย	190
ความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) (เมกะปาสคาล)	
อายุการบ่ม 3 วัน	24
อายุการบ่ม 7 วัน	32
อายุการบ่ม 28 วัน	42
การขยายตัวของแท่งทดสอบมอร์ต้า ร้อยละ	0.003

3.1.2 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) และ มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.2.1 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

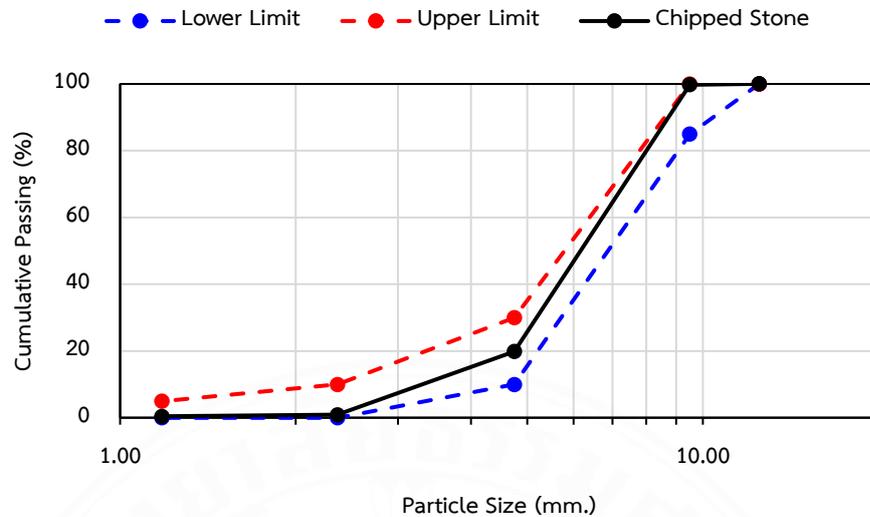
มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ที่เลือกใช้เป็นทรายแม่น้ำ (River sand) คละขนาด โดยก่อนที่นำมวลรวมละเอียดมาทำตัวอย่างการทดสอบต้องอยู่ในสถานะอิ่มตัวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.64



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิ Gradation Curve ของมวลรวมละเอียด

3.1.2.2 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สูงสุด 9.5 มิลลิเมตร มวลรวมหยาบมีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.65 ที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง เนื่องจากมวลรวมหยาบมีขนาดเล็กจึงทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานได้ดี ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้มวลหยาบขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร ที่ทำความสะอาดให้มีสิ่งเจือปนน้อยที่สุดมาใช้งานวิจัยนี้



ภาพที่ 3.2 แผนภูมิ Gradation Curve ของมวลรวมหยาบ

3.1.3 สารผสมเพิ่ม (Admixture)

สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing) เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งาน (Workability) ของคอนกรีต และสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้น โดยเลือกใช้สารลดปริมาณน้ำที่อยู่ในประเภท Type F (Water Reducing, High Range Admixture) ชนิด Naphthalene Formaldehyde Sulfonate โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494-92 (ASTM-International, 2017a) โดยแสดงดังรูปที่ 3.1



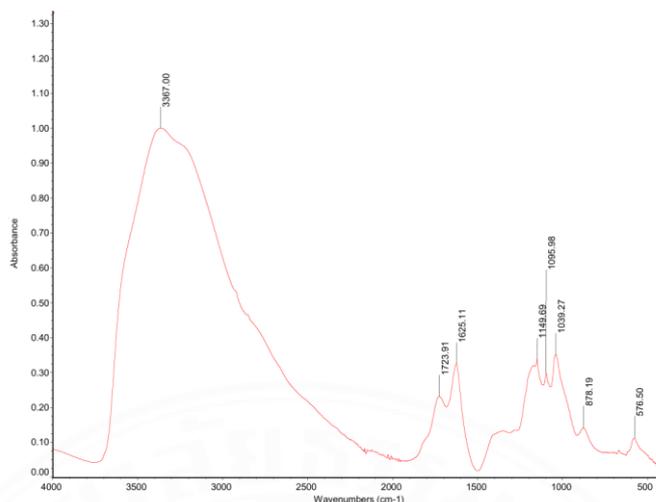
ภาพที่ 3.3 สารลดน้ำที่ใช้ในงานวิจัย (Sika Indonesia, 2024)

3.1.4 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO)

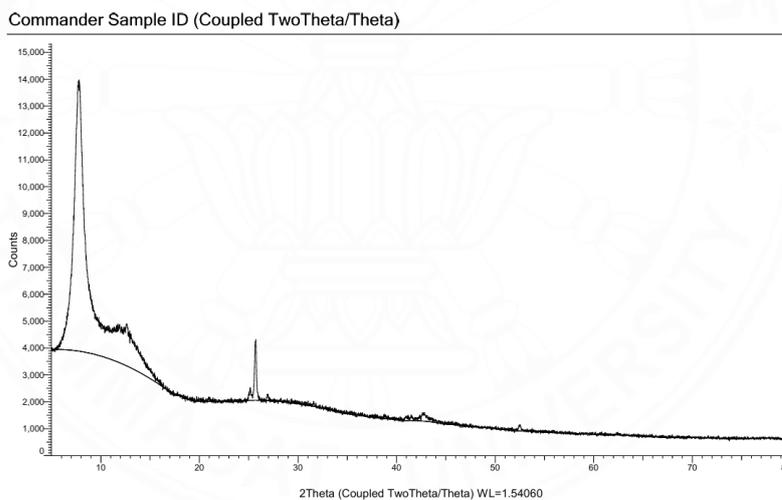
กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 6 กรัมต่อลิตร โดยสารละลายที่ใช้ในงานวิจัยผลิตโดย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในการหาคุณลักษณะของสารละลายกราฟีนออกไซด์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดฟูรีเยร์แปลง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

ภาพที่ 3.2 แสดงการวิเคราะห์เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดฟูรีเยร์แปลง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ตามมาตรฐาน ASTM E168 (ASTM/E168-16, 2016) ของกราฟีนออกไซด์ โดยแต่ละยอด (peak) สูงสุดแสดงถึงการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่ง peak ที่ตำแหน่ง 3367.00 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H ในกลุ่มฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl) บ่งบอกถึงการมีน้ำหรือกลุ่มไฮดรอกซิลในโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ peak ที่ตำแหน่ง 1723.91 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะคาร์บอกซิล C=O ในกลุ่มฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxyl) หรือคาร์บอนิล (Carbonyl) peak ที่ตำแหน่ง 1625.11 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C=C ในโครงสร้างกราฟีน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพันธะคู่คาร์บอน peak ที่ตำแหน่ง 1149.69 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O-C ในกลุ่มฟังก์ชันเอพอกไซด์ (Epoxyde) peak ที่ตำแหน่ง 1039.27 cm^{-1} และ 1095.98 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O ในกลุ่มฟังก์ชันเอพอกไซด์ (Epoxyde) และไฮดรอกซิล (Hydroxyl) peak ที่ตำแหน่ง 878.19 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-H ที่อยู่ในโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ (GO) และ peak ที่ตำแหน่ง 576.50 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O-C ในกราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพันธะเอพอกไซด์ (Epoxyde)

ภาพที่ 3.3 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ตามมาตรฐาน D934-13 (ASTM-International, 2022) ของกราฟีนออกไซด์ โดยปกติกราฟีนออกไซด์จะแสดงยอดการเลี้ยวเบนในช่วงมุม 2θ ระหว่าง 9° ถึง 15° (Fonseka และคณะ, 2023) ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 3.3 ที่มียอด (peak) แรกมีค่า 2θ ประมาณ 10° และระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) เท่ากับ 0.884 นาโนเมตร บ่งบอกถึงจุดยอดของกราฟีนออกไซด์ ในความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร และยอดที่ 2 มีค่า 2θ ประมาณ 25° และระยะห่างระหว่างระนาบผลึก เท่ากับ 0.356 นาโนเมตร บ่งบอกถึงจุดยอดของแกรไฟต์ (Sibirian และคณะ, 2018)



ภาพที่ 3.4 เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดฟูริเยร์แปลง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ของกราฟีนออกไซด์



ภาพที่ 3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ของกราฟีนออกไซด์

3.2 การออกแบบส่วนผสม และวิธีการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

การออกแบบส่วนผสม และวิธีการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ตามมาตรฐาน ASTM C192/C192M (ASTM-International, 2007) โดยมีอัตราส่วนกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีขั้นตอน และวิธีการดังนี้

3.2.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C192/C192M (ASTM-International, 2007) สำหรับตัวอย่างการทดสอบทั้งหมด ซึ่งตัวอย่างการทดสอบมีทั้งหมด 2 ขนาด คือ ตัวอย่างการทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร และตัวอย่างการทดสอบรูปทรงคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดหน้าตัด 10 x 10 ตารางเซนติเมตร และความยาว 35 เซนติเมตร โดยมีอัตราส่วนของกราฟีนออกไซด์ร้อยละ เท่ากับ 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยมีสัญลักษณ์บ่งบอกถึงปริมาณกราฟีนออกไซด์คือ GO-00 GO - 04 GO - 08 และ GO - 12 ตามลำดับ และส่วนผสมอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 3.3 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) คือ 0.4

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (kg/m^3)

ชื่อตัวอย่าง	Cement	มวลรวม		น้ำ	GO	สารลดน้ำ
		มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด			
GO - 00	462.50	1150.00	722.50	185.0	0	13.87
GO - 04	462.50	1150.00	722.50	184.82	0.19	13.87
GO - 08	462.50	1150.00	722.50	184.63	0.37	13.87
GO - 12	462.50	1150.00	722.50	184.45	0.56	13.87

3.2.2 วิธีการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

ในการผลิตคอนกรีตต้องทำความสะอาดมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ให้มีสิ่งเจือปนน้อยที่สุด และต้องทำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ส่วนมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ทำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งก่อนนำไปใช้งาน โดยมีวิธีการผลิตดังนี้

- 1) เตรียมส่วนผสมปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ น้ำ สารลดน้ำ และสารละลายกราฟีนออกไซด์ (GO)
- 2) นำส่วนผสมที่เป็นส่วนผสมแห้งใส่ลงในเครื่องผสม จากนั้นผสมให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี โดยใช้เวลา 2-3 นาที
- 3) นำส่วนผสมที่เป็นส่วนผสมเปียก ได้แก่ น้ำ สารผสมเพิ่ม และสารละลายกราฟีนออกไซด์ (GO) ลงไปผสมต่ออีก 2-3 นาที

- 4) ระหว่างส่วนผสมคอนกรีตกำลังผสมในเครื่องผสม ให้นำแบบหล่อรูปทรงกระบอก (Cylinder Mold) และแบบหล่อคานคอนกรีต (Beam Mold) ทาน้ำมันในแบบหล่อคอนกรีต
- 5) นำคอนกรีตออกจากเครื่องผสมเพื่อนำไปใส่เข้าแบบรูปทรงกระบอก (Cylinder Mold) และแบบหล่อคานคอนกรีต (Beam Mold) ในขั้นตอนต่อไป
- 6) เทคอนกรีตลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอก (Cylinder Mold) และแบบหล่อคานคอนกรีต (Beam Mold) โดยแบ่งเทเป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน โดยในแต่ละชั้นให้ทำการตักกระทันท์คอนกรีตด้วยเหล็กกระทันท์คอนกรีต 25 ครั้ง/ชั้น
- 7) คอนกรีตที่เทใส่แบบเสร็จแล้วนำมาปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ หลังจากนั้นนำไปเข้าเครื่องจีเย่าแบบตั้งโต๊ะเป็นเวลา 2 นาที เพื่อลดปริมาณรูพรองอากาศ (Void) ให้ภายในเนื้อคอนกรีต
- 8) นำคอนกรีตที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 7.) บ่มภายในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 9) หลังจากบ่มภายในแบบหล่อครบ 24 ชั่วโมง ให้ถอดแบบหล่อคอนกรีตออกก็จะได้ด้วยอย่างคอนกรีตที่ต้องการ
- 10) นำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มภายในน้ำเป็นเวลา 7, 14, และ 28 วัน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างที่บ่มแล้วไปใช้งานต่อในขั้นตอนต่อไป

3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว (Hardened) ที่มีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

ทดสอบความสามารถในงานใช้งาน (Workability) ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ใช้วิธีทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143/C143M (ASTM-International, 2020) เพื่อดูลักษณะการยุบตัวของคอนกรีตว่ามีความสามารถในการใช้งาน (Workability) หรือไม่ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ดังนี้

- 1.) เตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump Test) ได้แก่ กรวยสแตนเลส (Slump Cone) ถาดเหล็ก เหล็กกระทงคองกรีต เกรียง สามเหลี่ยม และตลับเมตร
- 2.) ผสมคอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบโดยทำการผสมตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.2.1
- 3.) นำคอนกรีตที่ผสมเสร็จมาเทลงในกรวยสแตนเลส (Slump Cone) แบ่งใส่เป็น 3 ชั้นเท่า ๆ กัน โดยในแต่ละชั้นให้ทำการตักกระทงคองกรีตด้วยเหล็กกระทงคองกรีต 25 ครั้ง/ชั้น และระหว่างที่ตักกระทงคองกรีตให้ใช้เท้าเหยียบหูทั้ง 2 ข้างของกรวยสแตนเลส (Slump Cone) จนกว่าคอนกรีตจะเต็ม
- 4.) เมื่อเทคอนกรีตจนเต็มให้นำเกรียงมาปาดให้เรียบร้อย หลังจากนั้นตั้งกรวยสแตนเลส (Slump Cone) ขึ้นในแนวตั้ง
- 5.) นำกรวยสแตนเลส (Slump Cone) ไปวางไว้ด้านข้างแล้วนำไม้กระทงวางด้านบนกรวยสแตนเลส (Slump Cone) แล้ววัดค่าการยุบตัว
- 6.) จดบันทึกค่าการยุบตัว

3.3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว (Hardened)

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened) จะเป็นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของคอนกรีตเสริมด้วยกราไฟท์ไดออกไซด์ ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Strength) การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight) การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water Absorption) ขนาดรูโพรง (Pore size) และการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (Compressive Strength of Concrete After Exposure to high temperature) โดยมีวิธี และขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

3.3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงอัด (Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM C39 (ASTM-International, 2021a) ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) มีวิธีในการทดสอบดังนี้

- 1.) ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้ง และจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร นำมาวางในลักษณะตั้งบนเครื่องทดสอบ (UTM)
- 3.) จัดก้อนตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางเครื่องทดสอบ
- 4.) กำหนด Displacement Rate เป็น 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในการทดสอบ
- 5.) กดเริ่มทดสอบ และบันทึกค่าการทดสอบ



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Test)

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Equation For Compression Strength) หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2) แสดงดังสมการที่ 3.1

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

σ_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต Compressive Strength

P = น้ำหนักกดประลัย (กิโลกรัม)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (ตารางเซนติเมตร)

3.3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM C496 (ASTM-International, 2017b) ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) มีวิธีในการทดสอบดังนี้

- 1.) ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้ง และจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร มาใส่ชุดทดสอบ (Splitting Tensile Test)
- 3.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 2.) นำมาวางในบนเครื่องทดสอบ (UTM)
- 4.) จัดก้อนตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางเครื่องทดสอบ
- 5.) กำหนด Displacement Rate เป็น 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในการทดสอบ
- 6.) กดเริ่มทดสอบ และบันทึกค่าการทดสอบ



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก
(Splitting Tensile Test)

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm²) แสดงดังสมการที่ 3.2

$$T_s = \frac{2P}{\pi dL} \quad (3.2)$$

T_s = กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก Splitting Strength

P = น้ำหนักกดประลัย (กิโลกรัม)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก (เซนติเมตร)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก (เซนติเมตร)

3.3.2.3 กำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test) ของคานคอนกรีต จะให้วิธีในการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด (Third Point Loading) ตามมาตรฐาน ASTM C78 (ASTM-International, 2021b) ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) มีวิธีในการทดสอบดังนี้

- 1.) ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้ง และจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร มาวัดจุดวางฐานรองรับทั้ง 2 ข้าง (Support) โดยวัดออกจากขอบของคานคอนกรีตเข้าไป 2.5 เซนติเมตร เป็นจุดวางฐานรองรับ (Support)
- 3.) นำก้อนตัวอย่างคานคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร มาวัดจุดใส่แรงด้านบน โดยวัดจากฐานรองรับ (Support) เข้ามาเป็นระยะ 1 ใน 3 ของความยาวของฐานรองรับถึงฐานรองรับ (Support to Support)
- 4.) เตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test) โดยปรับระดับฐานรองรับทั้ง 2 ข้าง (Support) ให้พอดีกับจุดวางฐานรองรับของคอนกรีต
- 5.) นำก้อนตัวอย่างคานคอนกรีตที่และชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด Flexural Tensile Test) มาวางบนเครื่องทดสอบ (UTM)
- 6.) กำหนด Displacement Rate เป็น 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในการทดสอบ
- 7.) กดเริ่มทดสอบและจดบันทึกค่าการทดสอบ



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด
(Third Point Loading)

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test) หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm²) แสดงดังสมการที่ 3.3

$$T_f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.3)$$

T_f = ค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) หรือโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus Of Rupture)

P = น้ำหนักกดประลัย (กิโลกรัม)

L = ความยาวของก้านตัวอย่างคานคอนกรีต (เซนติเมตร)

b = ความกว้างของก้านตัวอย่างคานคอนกรีต (เซนติเมตร)

d = ความลึกของก้านตัวอย่างคานคอนกรีต (เซนติเมตร)

3.3.2.4 การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight)

เตรียมคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และความสูง 20 เซนติเมตร โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1.) นำคอนกรีตที่ผสมตามสัดส่วนที่ออกแบบโดยทำการผสมตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.2.2

- 2.) นำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มอากาศเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปชั่งน้ำหนัก และหาปริมาตรของคอนกรีต เพื่อคำนวณหาหน่วยน้ำหนัก

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) แสดงดังสมการที่ 3.4

$$\gamma = \frac{W}{AL} \quad (3.4)$$

γ = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (Unit Weight)

W = น้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (กิโลกรัม)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (ตารางเมตร)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีต (เมตร)

3.3.2.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water Absorption) และหาขนาดรูพรอง (Pore size)

- 1.) นำคอนกรีตที่ผสมตามสัดส่วนที่ออกแบบโดยทำการผสมตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.2.2
- 2.) นำตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศเป็นเวลา 28 วัน ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง และไปชั่งน้ำหนัก
- 3.) หลังจากอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำไปแช่น้ำต่ออีกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 4.) ในขั้นตอนนี้ นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำมาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่า การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A624/A624M (ASTM-International, 2003) แสดงดังสมการที่ 3.5

$$\text{Water Absorbtion (\%)} = \left(\frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

$\text{Water Absorbtion (\%)} = \text{การดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)}$

W_{sat} = น้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (กรัม)

W_{dry} = น้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (กรัม)

3.3.2.6 การทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)

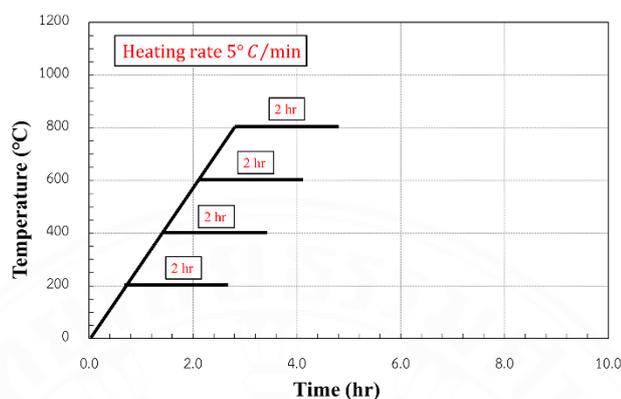
การทดสอบการทนไฟของคอนกรีต โดยใช้เตาเผาไฟฟ้าที่สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 1,100 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพ 3.12 จะประกอบด้วยเตาเผา และกล่องควบคุมความร้อนของเตาเผา) น้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตหลังสัมผัสความร้อน (Weight Reduction Ratio, WRR) ซึ่งมีวิธีในการทดสอบดังนี้



ภาพที่ 3.9 เตาเผาไฟฟ้า

- 1.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีอายุ 28 วัน ชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตก่อนทดสอบทุกครั้ง และจดบันทึกค่าน้ำหนัก
- 2.) นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตในขั้นตอนที่ 1 มาใส่ในเตาเผา โดยเว้นระยะห่างช่องว่างระหว่างคอนกรีต 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
- 3.) เริ่มทดสอบตัวอย่างโดยนำมาสัมผัสอุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 °C/min โดยแสดงดังภาพที่ 3.6

4.) นำตัวอย่างออกจากเตาเผา และบันทึกค่าน้ำหนักหลังสัมผัส อุณหภูมิ



ภาพที่ 3.10 วิธีการเผาตัวอย่างคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าน้ำหนักที่หายไปของหลังสัมผัสความร้อน (Weight Reduction Ratio, WRR) คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (เปอร์เซ็นต์) แสดงดังสมการที่ 3.7

$$WRR = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 \quad (3.6)$$

W_0 = น้ำหนักก่อนสัมผัสความร้อน (กรัม)

W = น้ำหนักหลังสัมผัสความร้อน (กรัม)

3.3.2.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (The Compressive Strength of Concrete After Exposure to high temperature)

หลังการทดสอบการหลุดล่อนของคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิ 200, 400, 600, และ 800 องศาเซลเซียส ในแต่ละสัดส่วนผสม โดยนำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบกำลังรับแรงอัดซึ่งขั้นตอนในการทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นไปตามหัวข้อ 3.3.2.1

3.3.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีต (Chemical Composition for Concrete)

การทดสอบโครงสร้างจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ โดยจะทดสอบโดยการใช้อิเล็กตรอนจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาโครงสร้างภายในของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ก่อน และหลังสัมผัสสภาวะอุณหภูมิสูง มีการศึกษา และวิเคราะห์พื้นผิวของคอนกรีต พันธะเคมีระหว่างกราฟีนออกไซด์ และซีเมนต์ การแทนที่ของกราฟีนออกไซด์ ความพรุนของคอนกรีต และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

3.4 สรุปการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการสรุปวิธีการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยสรุปวิธีการทดสอบ และมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 ตารางสรุปวิธีการทดสอบและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

คุณสมบัติ	วิธีการทดสอบ	มาตรฐาน	ลักษณะ ตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	อายุของ ตัวอย่าง
ความสามารถในการใช้งาน (Workability)	Slump Test	ASTM C143	-	-	-
กำลังรับแรงอัด (Compression Strength)	Compression Test	ASTM C39	Cylinder	3	7, 14, และ 28 วัน
กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength)	Splitting Tensile Test	ASTM C496	Cylinder	3	7, 14, และ 28 วัน
กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)	Flexural Tensile Test	ASTM C78	Beam	3	7, 14, และ 28 วัน
หน่วยน้ำหนัก	วัดขนาดก้อนตัวอย่าง และชั่งน้ำหนัก	-	Cylinder	3	28 วัน
การดูดซึมน้ำของคอนกรีต (Water Absorption)	หาน้ำหนัก W_{sat} และ W_{dry}	ASTM C642	Cylinder	3	28 วัน
กำลังรับแรงอัดหลังสัมผัส อุณหภูมิสูง (The Compressive Strength After Exposure to high temperature)	Compression Test	ASTM C39	Cylinder	3	28 วัน
การทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)	SEM	-	Piece	-	28 วัน

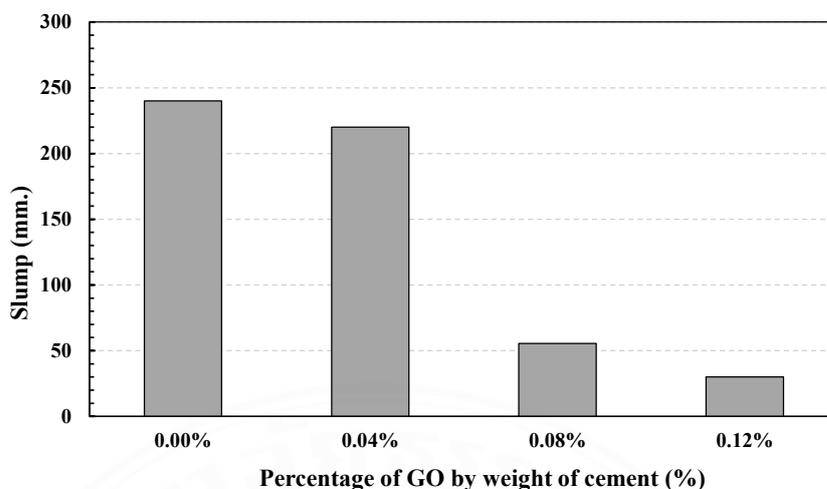
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ และศึกษาคุณสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบการยุบตัว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดัด อัตราการดูดซึมน้ำ รวมไปถึงการทดสอบโครงสร้าง ระดับจุลภาค โดยรายละเอียดมีดังนี้

4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการใช้งานได้ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Workability of Concrete with Graphene Oxide)

ความสามารถในการใช้งาน (Workability) จะทดสอบด้วยการหาค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยผลการทดสอบจะแสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่าค่าการยุบตัวมีค่าเท่ากับ 240.0 220.0 55.5 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยุบตัว (Slump) ลดลงร้อยละ 8.3 76.87 และ 87.5 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม เหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากกราฟีนออกไซด์มีพื้นที่ผิวเฉลี่ยประมาณ 700 – 1500 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูงทำให้กราฟีนออกไซด์ ดูดซับน้ำในส่วนผสมคอนกรีตจำนวนมากเลยทำให้ปริมาณน้ำที่เหลือสำหรับการหล่อลื่นอนุภาคซีเมนต์ลดลง อีกทั้งโครงสร้างของ กราฟีนออกไซด์ มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) และ คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ชอบน้ำทำให้จับตัวกันในส่วนผสมของคอนกรีต การเกาะกลุ่มของกราฟีนออกไซด์ทำให้โครงสร้างของส่วนผสมที่หนาแน่นขึ้น และปฏิกิริยาระหว่างกราฟีนออกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเหล่านี้ดึงน้ำที่มีอยู่ในส่วนผสมออกมาใช้ ทำให้น้ำที่เหลือในส่วนผสมสำหรับการหล่อลื่นอนุภาคลดลง (Anwar และคณะ, 2023)



ภาพที่ 4.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

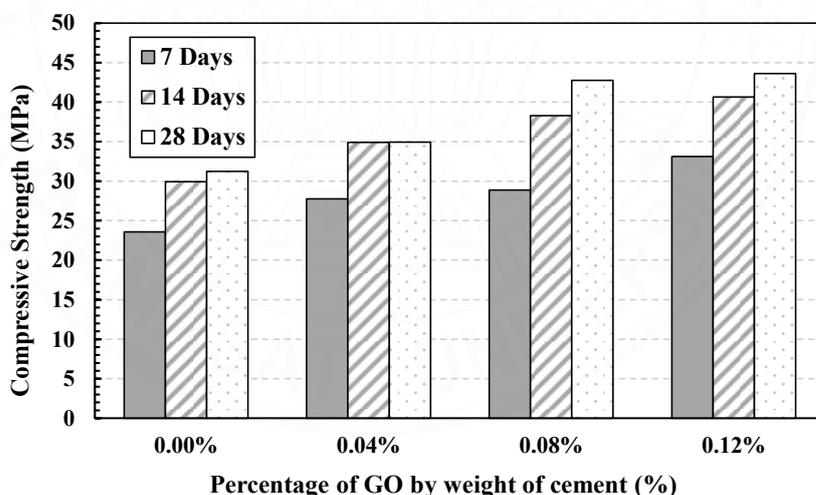
4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Mechanical Properties of Concrete with Graphene Oxide)

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ โดยได้ทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงกลได้แก่ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) โดยมีผลการทดสอบดังนี้

4.2.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (The Compressive Strength of Concrete with Graphene Oxide)

ภาพที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดที่มีอายุ 7 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 23.58 27.77 28.87 และ 33.11 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.77 22.41 และ 40.39 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม กำลังรับแรงอัดที่มีอายุ 14 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 29.93 34.92 38.29 และ 40.64 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.69 27.94 และ 35.82 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และกำลังรับแรงอัดที่มีอายุ 28 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 31.23 34.94 42.75 และ 43.62 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 11.90 36.91 และ 39.68 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์โดยมีอัตราส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอกซิล (-COOH) และคาร์บอนิล (-CO) บนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ และหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนเหล่านี้สร้างพันธะระหว่างพันธะโควาเลนต์ หรือพันธะไอออนิก และผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันส่งผลให้เกิดการยึดติดระหว่างโครงสร้างของซีเมนต์กับกราฟีนออกไซด์ แน่นหนา กราฟีนออกไซด์สามารถช่วยลดช่องว่าง และเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากมีโครงสร้างสองมิติที่บาง และมีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในรูพรุน หรือรอยแตกขนาดเล็กในคอนกรีต อีกทั้งกราฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้น (nucleation sites) สำหรับการเจริญเติบโตในผลึกของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน และกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติในการเชื่อมรอยร้าว ซึ่งช่วยลดการแพร่กระจายของรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีต เมื่อมีคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์รับน้ำหนักบรรทุกหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกราฟีนออกไซด์ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของน้ำหนักที่รับ (Fonseka และคณะ, 2023)



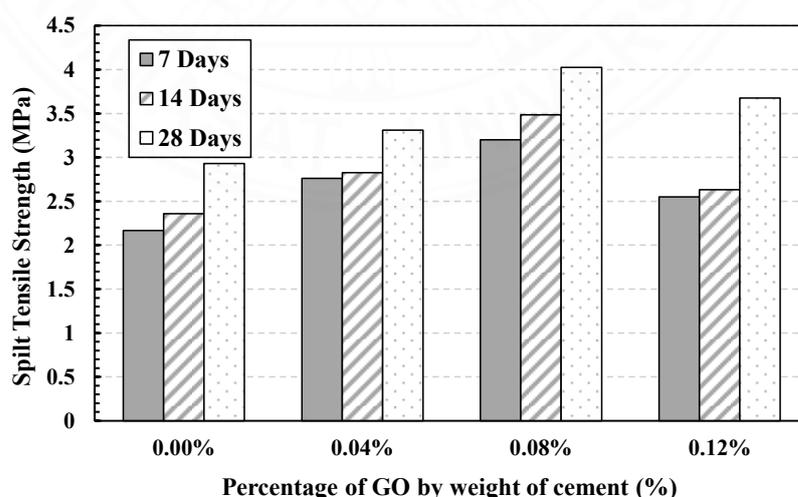
ภาพที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

4.2.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (The Split Tensile Strength of Concrete with Graphene Oxide)

ภาพที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่มีอายุ 7 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 2.17 2.76 3.20 และ

2.55 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 27.46 47.62 และ 17.68 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่มีอายุ 14 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 2.36 2.83 3.49 และ 2.63 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 19.74 47.75 และ 11.54 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่มีอายุ 28 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 2.93 3.31 4.03 และ 3.68 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.97 37.37 และ 25.43 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์โดยมีอัตราส่วนร้อยละ 0.08 ของน้ำหนักซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงที่สุด (Pan และคณะ, 2015) เพราะว่า กราฟีนออกไซด์ช่วยเสริมโครงสร้างจุลภาค ลดการแตกร้าว จากหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอกซิล (-COOH) และคาร์บอนิล (-CO) บนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ และเหตุที่อัตราส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์สามารถรับกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลง คาดว่าเกิดจากการเกาะกลุ่ม (Agglomeration) ของกราฟีนออกไซด์มากเกินไป ทำให้โครงสร้างไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลถึงค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ลดลง (Devi และ Khan, 2020)

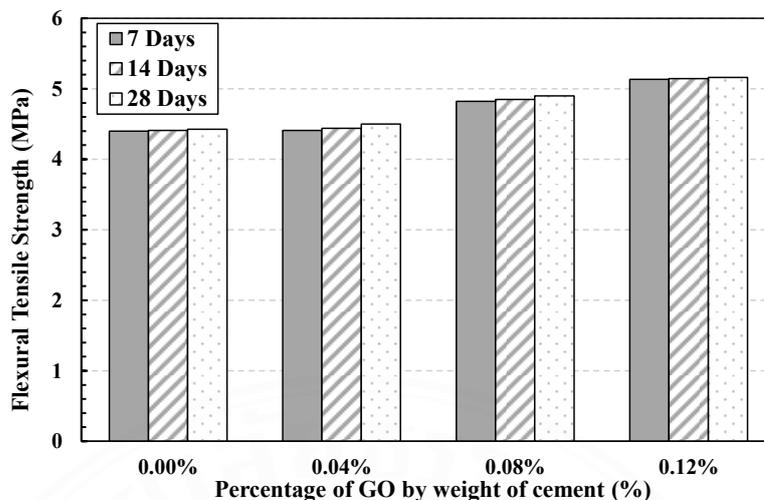


ภาพที่ 4.3 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

4.2.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (The Flexural Tensile Strength of Concrete with Graphene Oxide)

ภาพที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดัดที่มีอายุ 7 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 4.40 4.41 4.82 และ 5.13 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.11 9.52 และ 16.60 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม กำลังรับแรงดัดที่มีอายุ 14 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 4.41 4.44 4.85 และ 5.14 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.68 9.98 และ 16.21 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และกำลังรับแรงดัดที่มีอายุ 28 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 4.43 4.5 4.83 และ 5.16 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.69 9.08 และ 16.63 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์โดยมีอัตราส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอกซิล (-COOH) และคาร์บอนิล (-CO) บนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ และหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนเหล่านี้สร้างพันธะระหว่างพันธะโควาเลนต์ หรือพันธะไอออนิก และผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันส่งผลให้เกิดการยึดติระหว่างโครงสร้างของซีเมนต์กับกราฟีนออกไซด์ แน่นหนา กราฟีนออกไซด์สามารถช่วยลดช่องว่าง และเพิ่มความหนาแน่นของโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากมีโครงสร้างสองมิติที่บาง และมีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในรูพรุน หรือรอยแตกขนาดเล็กในคอนกรีต อีกทั้งกราฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้น (nucleation sites) สำหรับการเจริญเติบโตในผลึกของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน และกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติในการเชื่อมรอยร้าว ซึ่งช่วยลดการแพร่กระจายของรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีต เมื่อมีคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์รับน้ำหนักบรรทุกหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกราฟีนออกไซด์ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของน้ำหนักที่รับ (Fonseka และคณะ, 2023)

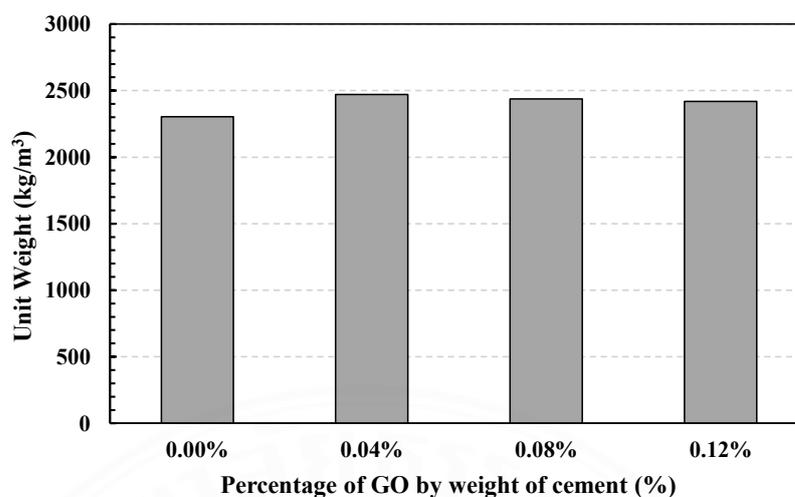


ภาพที่ 4.4 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

4.2.4 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Unit Weight of Concrete with Graphene Oxide)

ภาพที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 2,303.75 2,471.27 2,437.48 และ 2,419.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่า การเติมกราฟีนออกไซด์ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันและเพิ่มความหนาแน่นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เลยทำให้คอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์มีค่าหน่วยน้ำหนักสูงขึ้น แต่หากใส่กราฟีนออกไซด์ปริมาณสูงขึ้น หน่วยน้ำหนักลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการรวมตัวของอนุภาคกราฟีนออกไซด์เป็นอุปสรรคต่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในคอนกรีต และเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีต พบว่าหน่วยน้ำหนักมีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกับค่าการดูดซึมน้ำ คือ ค่าการดูดซึมน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่หน่วยน้ำหนักลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างภายในมีรูพรุนโดยรวมมากขึ้น แต่เป็นรูพรุนขนาดเล็กที่ไม่เชื่อมต่อกัน ซึ่งไม่ส่งผลช่วยการซึมผ่านของน้ำ (Sheikh และคณะ, 2021)

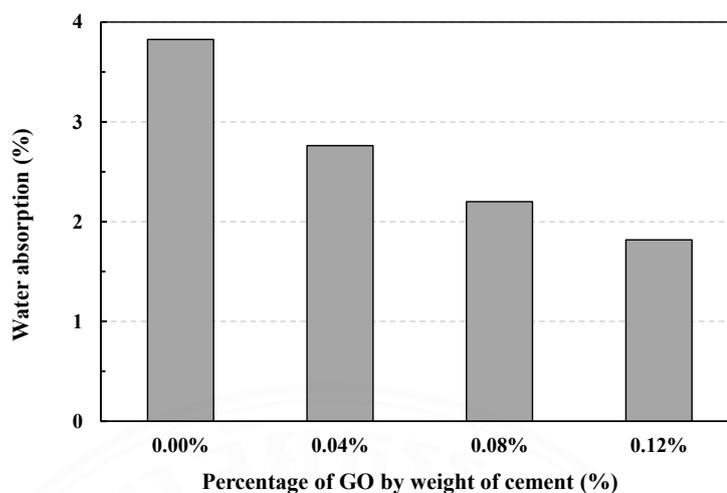


ภาพที่ 4.5 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

4.2.5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำและขนาดรูพรองของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Water Absorption and Porosity of Concrete with Graphene Oxide)

ภาพที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 3.83 2.76 2.20 และ 1.82 ตามลำดับ

กราฟีนออกไซด์มีบทบาทในการลดความสามารถในการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่โครงสร้างภายในของคอนกรีต เมื่อมีการเติมกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากกราฟีนออกไซด์เป็นจุดกำเนิดการตกผลึก (nucleation site) พัฒนาผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ช่วยสร้างผลึกที่หนาแน่น ส่งผลให้รูพรุนที่เชื่อมต่อกันลดลง และน้ำไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตได้ง่าย และส่งผลดีต่อความทนทานระยะยาวของคอนกรีต เช่น ความต้านทานคลอไรด์ และคาร์บอนเนชัน (Fonseka และคณะ, 2023; Li และคณะ, 2017; Reddy และ Prasad, 2022; Sheikh และคณะ, 2021)



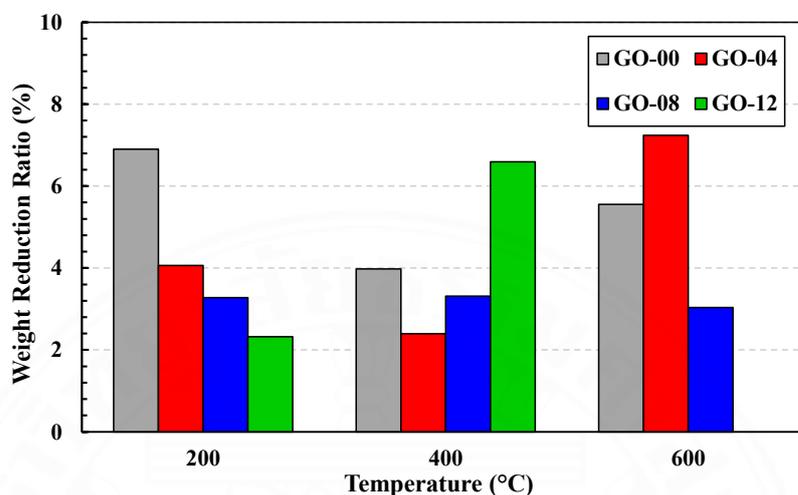
ภาพที่ 4.6 ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

4.2.6 ผลการทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)

ภาพที่ 4.7 แสดงผลร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียไปของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ หลังสัมผัสอุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยคอนกรีตเสริมกราฟีนออกไซด์ที่สัมผัสอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต คือ 6.90 4.07 3.28 และ 2.32 ตามลำดับ คอนกรีตเสริมกราฟีนออกไซด์ที่สัมผัสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต คือ 3.98 2.40 3.31 และ 6.60 ตามลำดับ คอนกรีตเสริมกราฟีนออกไซด์ที่สัมผัสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต คือ 5.55 7.24 3.03 และ 0.00 ตามลำดับ เนื่องจากคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0.12 เกิดการร้าวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างทั้งหมดเกิดการร้าวที่ระหว่างสัมผัสอุณหภูมิ

จากผลการทดสอบพบว่าการเติมกราฟีนออกไซด์ มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการคงสภาพโครงสร้างของคอนกรีตภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะในแง่ของการลดการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเป็นตัวชี้วัดความเสถียรของวัสดุ แต่เมื่อมีปริมาณกราฟีนออกไซด์มากเกินไป อาจเป็นปัญหาการรวมตัวของอนุภาคกราฟีนออกไซด์ ซึ่งทำให้โครงสร้างภายในไม่สม่ำเสมอและเปราะมากขึ้น ซึ่ง Han และคณะ (2022) ได้กล่าวการปลดปล่อยน้ำเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 105–800°C โดยน้ำที่จับตัวอย่างหลวมจะถูกปลดปล่อยที่อุณหภูมิประมาณ 105°C และน้ำที่จับตัวทางเคมีจะปลดปล่อยที่อุณหภูมิ 400–600 องศาเซลเซียส ซึ่งสัมพันธ์กับการสลายตัวของ C–S–H และ

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จึงสอดคล้องกับค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Hager และคณะ, 2013; Han และคณะ, 2022; Huang และคณะ, 2024)



ภาพที่ 4.7 ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

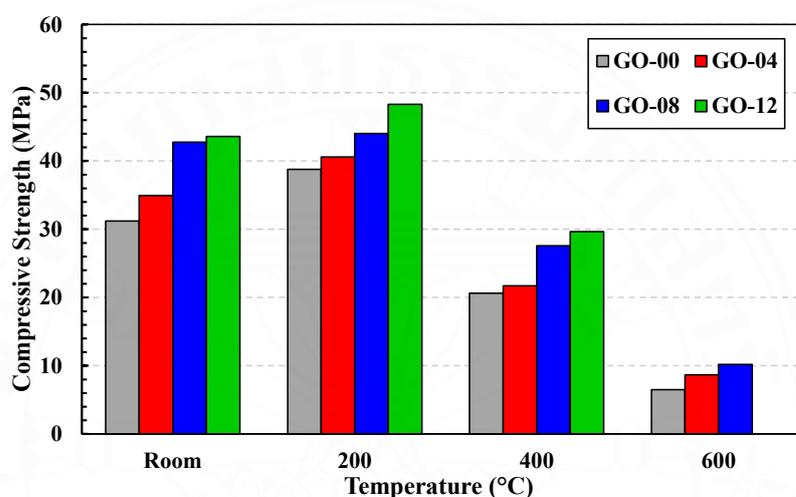
4.2.7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิสูง

(The Compressive Strength of Concrete After Exposure to high temperature)

รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ หลังสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส คือ 38.80 40.59 44.03 และ 48.32 เมกะปาสคาล ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส คือ 20.62 21.73 27.60 และ 29.64 เมกะปาสคาล ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส คือ 6.49 8.67 10.19 และ 0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างทั้งหมดเกิดการวิบัติระหว่างสัมผัสอุณหภูมิ

พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอาจเป็นผลมาจากการที่กราฟีนออกไซด์ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุผ่านผลของการเชื่อมต้อ (bridging effect) และคุณสมบัติในการยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าว (crack-arresting properties) เมื่อคอนกรีตสัมผัสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดลดลง แต่กราฟีนออกไซด์ยังคงช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่อุณหภูมินี้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในคอนกรีตเริ่มสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และไอน้ำ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้าง

คอนกรีตเริ่มอ่อนแอลง และเมื่อคอนกรีตสัมผัสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะกราฟีนออกไซด์ในสัดส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ เกิดการวิบัติขึ้น เนื่องจากการสะสมของไอน้ำภายในโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงจากกราฟีนออกไซด์, การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์, และการปล่อยก๊าซจากการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันในกราฟีนออกไซด์ (Huang และคณะ, 2024)



ภาพที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิสูง

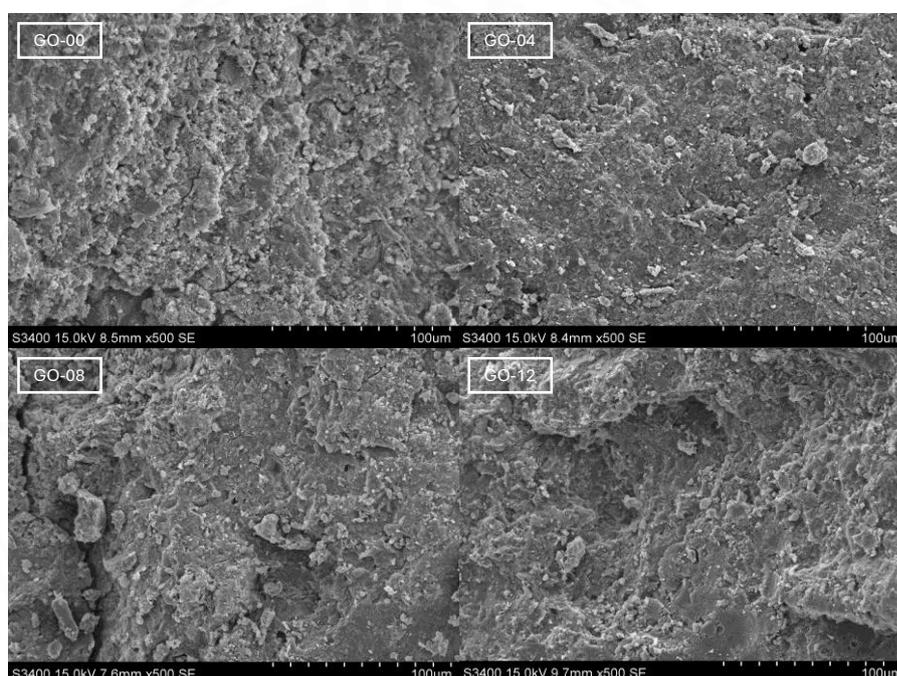
4.3 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ (Microstructure of Concrete with Graphene Oxide)

4.3.1 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมีความสำคัญในการทำความเข้าใจผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ ต่อคุณสมบัติของวัสดุในระดับนาโน โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษา และสังเกตลักษณะพื้นผิวของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของผลึกผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และโครงสร้างของรูพรุนภายใน

จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างควบคุม พบว่าโครงสร้างภายในมีรอยแยก และรูพรุนขนาดใหญ่กระจาย กระจุกตัวกัน การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ไม่สมบูรณ์ และการเชื่อมต่อระหว่างผลึกที่ไม่แน่นหนา คอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์อัตรา

ส่วนร้อยละ 0.04 และ 0.08 ลักษณะโครงสร้างภายในแสดงให้เห็นผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ที่เรียงตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะบริเวณที่แผ่นผลึกซ้อนทับกันเป็นชั้นที่เป็นลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮดรชันที่พัฒนาจากอนุภาคของกราฟีนออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดการตกผลึก (nucleation site) และคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 0.12 มีผลึกที่หนาแน่น แต่พบลักษณะการรวมกลุ่ม (agglomeration) ที่ส่งผลให้เกิดช่องว่าง หรือรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของการเติมกราฟีนออกไซด์ในคอนกรีต (Alvi และคณะ, 2023; Reddy และ Prasad, 2022)



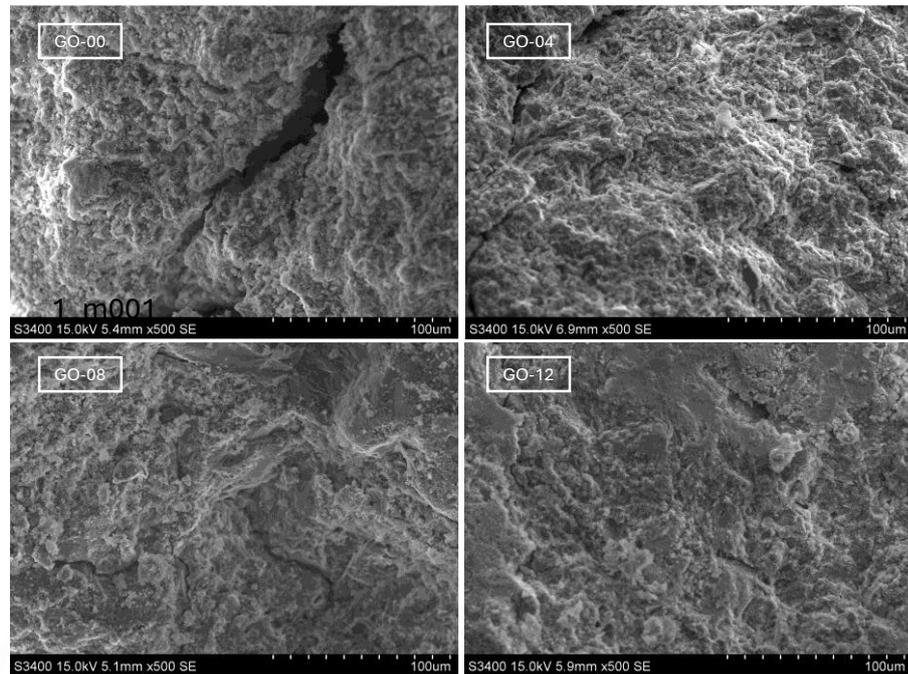
ภาพที่ 4.9 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์

4.3.2 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังคอนกรีตสัมผัสอุณหภูมิสูง (Scanning Electron Microscopy of Concrete After Exposure to High Temperatures)

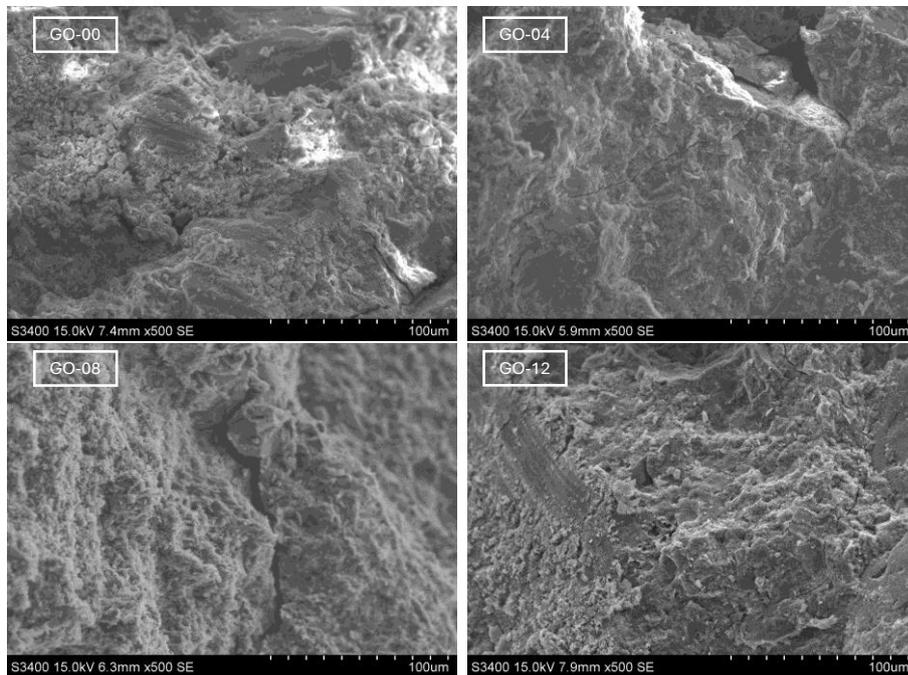
การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมีความสำคัญในการทำความเข้าใจผลกระทบของกราฟีนออกไซด์ ต่อคุณสมบัติของวัสดุในระดับนาโน โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษา และสังเกตลักษณะพื้นผิวของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ หลังสัมผัสอุณหภูมิ 200

400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของผลึกผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และโครงสร้างของรูพรุนภายใน

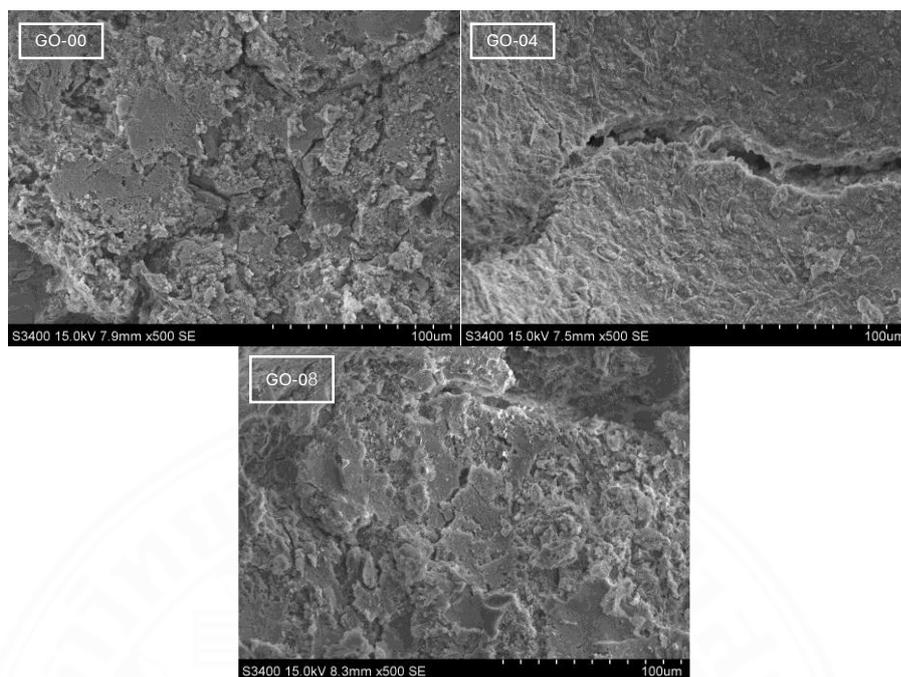
การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ หลังสัมผัสอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างควบคุมมีพื้นผิวหยาบ รอยร้าวขนาดเล็กถึงปานกลางเริ่มปรากฏ และมีรูพรุนภายในซึ่งเป็นผลจากการระเหยของน้ำที่สะสมบริเวณผิววัสดุ ขณะที่ตัวอย่างที่มีเติมกราฟีนออกไซด์ พบการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่รวมตัวเป็นกลุ่ม ส่งผลให้มีโครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นเนื้อแน่นมากกว่าตัวอย่างควบคุม โดยแสดงดังภาพที่ 4.10 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ หลังสัมผัสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เริ่มมีการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่าตัวอย่างควบคุมพื้นผิวมีลักษณะกระจัดกระจาย มีรูพรุนภายในที่เชื่อมต่อกันปรากฏจำนวนมาก ขณะที่ตัวอย่างที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์พบว่าโครงสร้างมีสม่ำเสมอระดับหนึ่ง โดยตัวอย่างที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 0.08 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะการรวมตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และลดการเกิดรูพรุนและการแตกร้าวได้ดีขึ้น และตัวอย่างที่มีการเติมกราฟีนออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 0.12 มีร่องรอยของการรวมตัวกันของอนุภาค (agglomeration) ของกราฟีนออกไซด์ ส่งผลให้โครงสร้างภายในบางบริเวณขาดความสม่ำเสมอ โดยแสดงดังภาพที่ 4.11 และการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ หลังสัมผัสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างควบคุมโครงสร้างคอนกรีตมีลักษณะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ รอยแตกระดับจุลภาค (microcrack) และการหลุดหล่อนของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0.04 และ 0.08 พบว่าโครงสร้างมีความหนาแน่นขึ้น ปริมาตรรูพรุน และขนาดรอยแตกลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม แสดงให้เห็นว่ากราฟีนออกไซด์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งความเสียหายจากความร้อน เสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างภายในของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ และคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0.12 พบว่าคอนกรีตเกิดการวิบัติระหว่างสัมผัสอุณหภูมิสูงไม่สามารถรักษาสภาพของตัวอย่างไว้ได้ซึ่งคาดว่า เป็นผลจากการรวมตัวของอนุภาคกราฟีนออกไซด์ (agglomeration) ที่มากเกินไปเลยส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในโครงสร้าง และเกิดความเปราะ จนคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดจากความร้อนได้ (Huang และคณะ, 2024)



ภาพที่ 4.10 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอนุภาคนิวทรีน 200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.11 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอนุภาคนิวทรีน 400 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.12 SEM ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมพัทธ์อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ เพื่อศึกษาปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมร่วมกับซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของ กราฟีนออกไซด์ และคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และลักษณะของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง และเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง โดยมีตัวอย่างการทดสอบคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ซึ่งมีการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงดัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ความสามารถต้านทานเมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูง และการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค สรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตเสริมกราฟีนออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัด และแรงดัดสูงสุด โดยให้ผลมากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 39.68 และ 16.63 ตามลำดับ ขณะที่อัตราส่วนร้อยละ 0.08 ของน้ำหนักซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงสุด โดยให้ผลมากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 37.37 นอกจากนี้กราฟีนช่วยเพิ่มค่าน้ำหนักของคอนกรีตเล็กน้อย แต่เมื่อใส่ปริมาณสูงเกินไปน้ำหนักลดลงเล็กน้อย และกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติช่วยลดการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ภายในคอนกรีต
2. ปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม คือคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 0.04 ของน้ำหนักซีเมนต์ เนื่องจากให้ค่าความสามารถในการทำงานได้ที่สูง และให้ค่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และกำลังรับแรงดัด โดยให้ผลมากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 11.90 12.97 และ 1.69 ตามลำดับ และใช้ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้วัสดุชนิดอื่นมาผสมร่วมกับซีเมนต์
3. กราฟีนออกไซด์มีบทบาทในโครงสร้างจุลภาคอย่างมาก เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ช่วยเร่งการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และลดขนาดรูพรุนภายในคอนกรีต ส่งผลให้

คอนกรีตมีโครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด และแข็งแรงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

4. คอนกรีตเมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราไฟท์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง เมื่ออุณหภูมิตั้งแต่ 400–600 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดลดลงจากการสลายตัวโครงสร้างภายในคอนกรีตบางส่วน และคอนกรีตเสริมกราไฟท์ออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 0.12 วิบัติจากความร้อนภายในที่สูง และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส คอนกรีตเกิดการวิบัติเนื่องจากความร้อนที่มากเกินไป
5. คอนกรีตเสริมกราไฟท์ออกไซด์หลังจากสัมผัสอุณหภูมิสูงโครงสร้างจุลภาคแสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะการรวมตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ลดการเกิดรูพรุน และรอยร้าวภายในได้ดีขึ้น แต่หากเติมกราไฟท์ออกไซด์ในปริมาณมากเกินไป ทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติระหว่างสัมผัสอุณหภูมิสูง ไม่สามารถรักษาสภาพของตัวอย่างไว้ได้ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการรวมตัวของอนุภาคกราไฟท์ออกไซด์ ที่มากเกินไปเลยส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในโครงสร้างจนคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดจากความร้อนได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

อิทธิพลการเติมกราไฟท์ออกไซด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์วัสดุทนแทนที่ให้ประสิทธิภาพต่อคอนกรีตได้ดี และช่วยในอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เนื่องจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์สูง แต่กราไฟท์ออกไซด์มีคุณสมบัติการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตแล้วยังช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการกระบวนการผลิตคอนกรีตด้วย อย่างไรก็ตาม การนำกราไฟท์ออกไซด์มาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างควรมีการตรวจสอบ และปรับปรุงคุณภาพเพิ่มเติมอีกครั้ง เนื่องจากต้นทุนของวัสดุกราไฟท์ออกไซด์ที่ค่อนข้างสูง และแหล่งผลิตที่น้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นชนิดอื่น

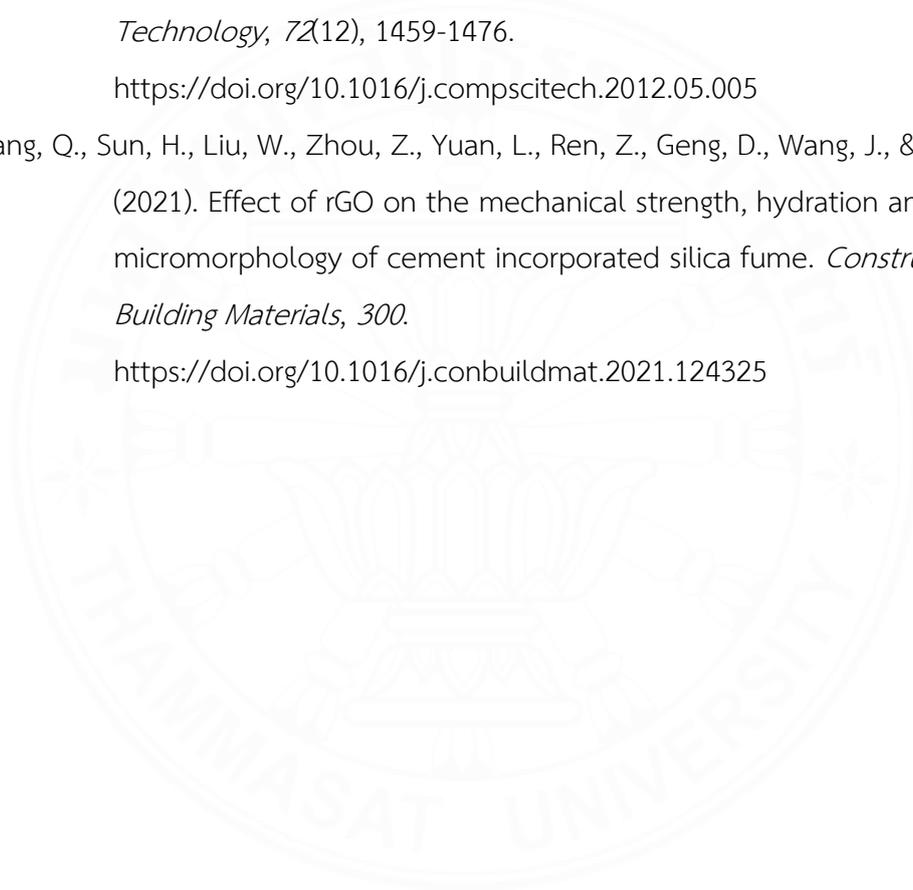
รายการอ้างอิง

- Al-Bayati, A. J., Butrouna, K. H., Steffen, R. E., Salman, B., & Al-Qaralleh, M. (2020). Utilizing Graphite Powder to Improve Concrete Conductivity, Compressive Strength, and Workability. *Construction Research Congress*.
- Alvi, I. H., Li, Q., Hou, Y., Onyekwena, C. C., Zhang, M., & Ghaffar, A. (2023). A critical review of cement composites containing recycled aggregates with graphene oxide nanomaterials. *Journal of Building Engineering*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105989>
- Anwar, A., Liu, X., & Zhang, L. (2023). Nano-cementitious composites modified with Graphene Oxide – a review. *Thin-Walled Structures*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110326>
- ASTM-International. (2003). *Standard Specification for Tin Mill Products, Electrolytic Tin Plate, Single Reduced*.
- ASTM-International. (2007). *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory (C192/C192M, Issue*.
- ASTM-International. (2009). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement (ASTM C1157-08a)*.
- ASTM-International. (2017a). *Standard specification for chemical admixtures for concrete*.
- ASTM-International. (2017b). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- ASTM-International. (2020). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.
- ASTM-International. (2021a). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.
- ASTM-International. (2021b). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.
- ASTM-International. (2022). *Standard Practices for Identification of Crystalline Compounds in Water-Formed Deposits By X-Ray Diffraction1*.

- ASTM/E168-16. (2016). *Standard practices for general techniques of infrared quantitative analysis*.
- Devi, S. C., & Khan, R. A. (2020). Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. *Journal of Building Engineering*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101007>
- Fonseka, I., Mohotti, D., Wijesooriya, K., Lee, C.-K., & Mendis, P. (2023). Influence of Graphene oxide on abrasion resistance and strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133280>
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*(1).
- Han, S., Hossain, M. S., Ha, T., & Yun, K. K. (2022). Graphene-oxide-reinforced cement composites mechanical and microstructural characteristics at elevated temperatures. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 3174-3194.
- He, W., Hao, W., Meng, X., Zhang, P., Sun, X., & Shen, Y. (2021). Influence of Graphite Powder on the Mechanical and Acoustic Emission Characteristics of Concrete. *Buildings*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/buildings12010018>
- Huang, K., Jing, H., Gao, Y., Yu, Z., Chen, M., & Sun, S. (2024). Study on the properties of graphene oxide reinforced cement-based materials at high temperature. *Construction and Building Materials*, 421, 135704.
- Li, X., Li, C., Liu, Y., Chen, S. J., Wang, C. M., Sanjayan, J. G., & Duan, W. H. (2017). Improvement of mechanical properties by incorporating graphene oxide into cement mortar. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 25(15-16), 1313-1322. <https://doi.org/10.1080/15376494.2016.1218226>
- Madbouly, A. I., Mokhtar, M. M., & Morsy, M. S. (2020). Evaluating the performance of rGO/cement composites for SHM applications. *Construction and Building Materials*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118841>
- Mishra, G., Warda, A., & Shah, S. P. (2022). Carbon sequestration in graphene oxide modified cementitious system. *Journal of Building Engineering*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105356>

- Mohammed, A., Sanjayan, J. G., Nazari, A., & Al-Saadi, N. T. K. (2017). Effects of graphene oxide in enhancing the performance of concrete exposed to high-temperature. *Australian Journal of Civil Engineering*, *15*(1), 61-71. <https://doi.org/10.1080/14488353.2017.1372849>
- Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A. H., Li, G., Zhu, J. W., Collins, F., Li, D., Duan, W. H., & Wang, M. C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. *Cement and Concrete Composites*, *58*, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>
- Rao, P. T., Prakash, J., Alexander, R., Shinde, M. J., & Dasgupta, K. (2024). Role of graphene oxide infusion in concrete to elevate strength and fire performance in construction concrete. *Diamond and Related Materials*, *147*. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111269>
- Reddy, P. V. R. K., & Ravi Prasad, D. (2022). Graphene oxide reinforced cement concrete – a study on mechanical, durability and microstructure characteristics. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, *31*(3), 255-265. <https://doi.org/10.1080/1536383x.2022.2141231>
- Sheikh, T. M., Anwar, M. P., Muthoosamy, K., Jaganathan, J., Chan, A., & Mohamed, A. A. (2021). The mechanics of carbon-based nanomaterials as cement reinforcement — A critical review. *Construction and Building Materials*, *303*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124441>
- Siburian, R., Sihotang, H., Lumban Raja, S., Supeno, M., & Simanjuntak, C. (2018). New Route to Synthesize of Graphene Nano Sheets. *Oriental Journal of Chemistry*, *34*(1), 182-187. <https://doi.org/10.13005/ojc/340120>
- Sun, H., Ling, L., Ren, Z., Memon, S. A., & Xing, F. (2020). Effect of Graphene Oxide/Graphene Hybrid on Mechanical Properties of Cement Mortar and Mechanism Investigation. *Nanomaterials (Basel)*, *10*(1). <https://doi.org/10.3390/nano10010113>
- T. Ginigaddaraa*, J. C. E., P. Mendisa, P. Devapurac, A.D. Liyanagec, P. Vaz-Serraa (2023). <An Introduction to High Performance Graphene Concrete.pdf>.
- Udumulla, D., Ginigaddara, T., Jayasinghe, T., Mendis, P., & Baduge, S. (2024). Effect of Graphene Oxide Nanomaterials on the Durability of Concrete: A Review

- on Mechanisms, Provisions, Challenges, and Future Prospects. *Materials*, 17(10), 2411. <https://doi.org/10.3390/ma17102411>
- Yan, J., Wang, J., Chen, H., & Xiang, P. (2022). High Temperature Exposure Assessment of Graphene Oxide Reinforced Cement. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.786260>
- Young, R. J., Kinloch, I. A., Gong, L., & Novoselov, K. S. (2012). The mechanics of graphene nanocomposites: A review. *Composites Science and Technology*, 72(12), 1459-1476. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.05.005>
- Zhang, Q., Sun, H., Liu, W., Zhou, Z., Yuan, L., Ren, Z., Geng, D., Wang, J., & Cheng, X. (2021). Effect of rGO on the mechanical strength, hydration and micromorphology of cement incorporated silica fume. *Construction and Building Materials*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124325>



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายศุภโชค สีแครง
วุฒิการศึกษา ปีการศึกษา 2566: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
(วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ทุนการศึกษา 2567 : ทุนสนับสนุนการวิจัย

ผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 ชื่อผลงาน อิทธิพลการเติมกราฟีนออกไซด์ต่อ
คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

