

อิทธิพลของการเติมกราฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

Influence of graphene oxide additions on the mechanical properties of concrete

ศุภโชค สาแรก^{1*} ชนชัย ทองโฉม² กิม เหนือคลอง³ และเพ็ญพิชชา สนิทอินทร์⁴

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: supachod.sara@dome.tu.ac.th

บทคัดย่อ

วัสดุผสมที่เป็นซีเมนต์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อประโยชน์สูงสุด โครงสร้างพื้นฐานทางประกอบด้วยเขื่อน ท่อใต้ดิน เขื่อน และตึกระฟ้า แม้ว่าส่วนผสมในคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์จะถูกนำมาใช้กับโครงสร้างพื้นฐานที่หลากหลาย หลังการปฏิวัติด้านวัสดุศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยี สารเติมแต่งขนาดโมเลกุลได้ดึงดูดนักวิทยาศาสตร์ และวิศวกร เนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์คอมโพสิต ด้วยเหตุนี้จึงมีคุณสมบัติสำคัญที่สามารถทำให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์มีความหนาแน่นขึ้น เพื่อปรับปรุง และเพิ่มคุณสมบัติทางกล โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกราฟีนออกไซด์ต่อกลไกทางกลของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงดัด และศึกษาพฤติกรรมหลังจากสัมผัสอุณหภูมิสูงของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ในการทดสอบนี้ได้เพิ่ม กราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละที่แตกต่างกันคือ 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ส่วนผสมกราฟีนออกไซด์มากที่สุด ส่งผลให้กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดสูงสุดเป็นนัยสำคัญ

คำสำคัญ: กราฟีนออกไซด์, วัสดุนาโน, คอนกรีต, กำลังรับแรงอัด

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.

Keywords: Graphene Oxide, Nanomaterials, concrete, Compressive strength

1. บทนำ

คุณสมบัติของคอนกรีตขึ้นอยู่กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดไฮเดรชันของซีเมนต์ในคอนกรีต และมีข้อบกพร่องที่พบ คือ พันธะการยึดแน่นระหว่างคอนกรีตต่ำ จึงมีการพัฒนาวัสดุขนาดนาโน เช่น นาโนซิลิกา (Nano-Silica) นาโนอลูมินา (Nano-Alumina) นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano-Calcium Carbonate) เส้นใยคาร์บอนนาโน (Carbon Nanofibers, CNFs) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes, CNTs) แกรไฟต์ (Graphite) กราฟีน (Graphene) และกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) เป็นต้น [1] เนื่องจากสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของซีเมนต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการใช้กราฟีนออกไซด์ ที่มีข้อได้เปรียบจากคุณสมบัติดูดซึมน้ำได้ดี ทำให้กระจายตัวได้ง่าย และสม่ำเสมอในซีเมนต์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงโครงสร้างของซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า CNTs และ CNFs ในบางกรณี [2]

กราฟีนออกไซด์ (GO) เป็นอนุพันธ์ของกราฟีนที่มีการออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นวัสดุสองมิติ และประกอบด้วยคาร์บอนเชื่อมต่อกันแบบหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนที่มีการไฮบริไดซ์แบบ sp² (sp²-Hybridization) และกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเชื่อมพันธะแบบโควาเลนต์กับพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ เช่น

ไฮดรอกซิล (-OH) เอพอกไซด์ (-O-) คาร์บอกซิล (-COOH) และคาร์บอนิล คีโตน (-COO) ซึ่งช่วยเพิ่มการกระจายตัว พื้นผิวหลักของกราไฟท์ ออกไซด์ประกอบด้วยกลุ่มไฮดรอกซิล และเอพอกไซด์ ขณะที่บริเวณขอบของกราไฟท์ออกไซด์ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอนิล คีโตน และคาร์บอกซิล โดยกราไฟท์ออกไซด์ มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากกระบวนการไฮเดรชันในซีเมนต์ และเสริมความแข็งแรงของคอนกรีต โครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นใน C-S-H เมื่อมีการเติมกราไฟท์ออกไซด์เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของกราไฟท์ออกไซด์ กับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และซิลิเกต (SiO_4^{4-}) ในสารละลายซีเมนต์ โดยหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล และ คาร์บอกซิล บนพื้นผิวของกราไฟท์ออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้น (nucleation sites) สำหรับการตกผลึกของ C-S-H ทำให้กระบวนการนี้ช่วยเร่งการสร้าง C-S-H รอบผิวของกราไฟท์ออกไซด์ ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ปกติ [3,4] ซีเมนต์ที่เติม GO สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นถึงร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับซีเมนต์ทั่วไป [5,6] แม้ใช้ปริมาณของ GO ที่น้อยก็สามารถเสริมคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้อย่างมาก ซึ่งคอนกรีตที่มีปริมาณ GO ร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักซีเมนต์ เพิ่มขึ้นทั้งในกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดัดแบบผ่าซีกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมร้อยละ 38.46 12.07 และ 14.87 ตามลำดับ [7] จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของส่วนผสมคอนกรีตที่มีร้อยละ GO 0.08 ของน้ำหนักซีเมนต์แสดงผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณ GO อื่นๆ การดูดซับน้ำ และการซึมผ่านน้ำของส่วนผสมคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณ GO เพิ่มขึ้น [8]

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีความสนใจในการนำกราฟีนออกไซด์ในการผลิตคอนกรีตปกติ โดยศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกล เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับดึง และกำลังรับแรงดัด และคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสความร้อนสูง นอกจากนั้นผู้วิจัยคาดว่าจะนำกราฟีนออกไซด์ไปใช้ในทางอุตสาหกรรมการก่อสร้างในปัจจุบัน เพื่อช่วยการก่อสร้างโครงสร้างได้สะดวก และรวดเร็วมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การก่อสร้างในปัจจุบัน

2. วัสดุ และการเตรียมตัวอย่าง

2.1 วัสดุ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

การทดสอบทั้งหมดใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594 - 2556 และตามมาตรฐาน ASTM C1157-08a [9] สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป และงานคอนกรีตโครงสร้าง มีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 3.05 และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซีเมนต์

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	ปูนซีเมนต์
การขยายตัวโดยวิธีออโตแคลฟ (Autoclave expansion) (%)	0.05
ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
การก่อตัวระยะต้น	90
การก่อตัวระยะปลาย	190
ความต้านทานแรงอัด (เมกะปาสกาล)	
อายุการบ่ม 3 วัน	24
อายุการบ่ม 7 วัน	32
อายุการบ่ม 28 วัน	42
การขยายตัวของแท่งทดสอบบอร์ดำ (%)	0.003

2.1.2 มวลรวม

มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ที่เลือกใช้เป็นทรายแม่น้ำ (River sand) คละขนาด โดยก่อนที่นำมามวลรวมละเอียดมาทำตัวอย่างการทดสอบ ต้องอยู่ในสภาวะอิ่มตัวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) และมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.64 ตามมาตรฐาน และมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ใช้มวลรวมหยาบขนาดใหญ่สูงสุด 9.5 มิลลิเมตร มวลรวมหยาบมีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.65 ที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง เนื่องจากมวลรวมหยาบมีขนาดเล็กจึงทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานได้ดี ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าสูง ตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M-18 [10]

2.1.3 สารลดปริมาณน้ำ

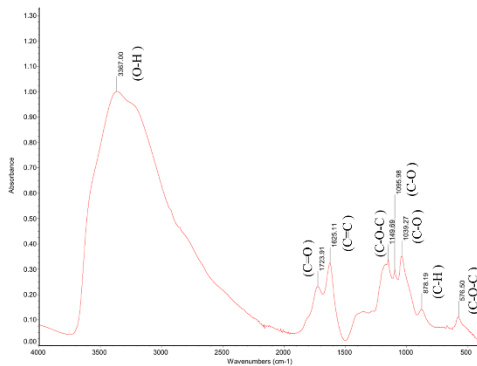
สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing) เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งาน (Workability) ของคอนกรีต และสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้น โดยเลือกใช้สารลดปริมาณน้ำที่อยู่ในประเภท Type F (Water Reducing High Range Admixture) ชนิด Naphthalene Formaldehyde Sulfonate โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494-92 [11]

2.1.4 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO)

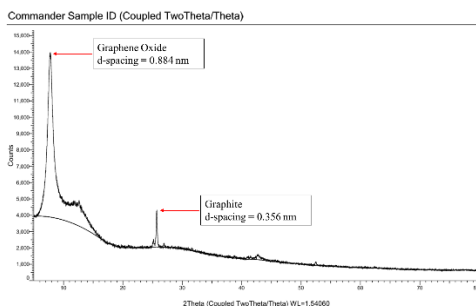
กราฟอินฟราเรด เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 6 กรัมต่อลิตร ซึ่ง สารละลายที่ใช้ในงานวิจัยผลิตโดย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยรูปที่ 1 แสดงการวิเคราะห์เทคนิคสเปกโท รสโกปีอินฟราเรดฟูริเยร์แปลง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ตามมาตรฐาน ASTM E168 [12] ของกราฟอิน ออกไซด์ โดยแต่ละยอด (peak) สูงสุดแสดงถึงการดูดกลืนแสงของหมู่ ฟังก์ชัน ซึ่ง peak ที่ตำแหน่ง 3367.00 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H ในกลุ่มฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl) บ่งบอกถึงการมีน้ำหรือกลุ่มไฮดร ออกซิลในโครงสร้างกราฟีนออกไซด์ peak ที่ตำแหน่ง 1723.91 cm^{-1} แสดง ถึงการสั่นของพันธะคาร์บอกซิล C=O ในกลุ่มฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxyl) หรือคาร์บอนิล (Carbonyl) peak ที่ตำแหน่ง 1625.11 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C=C ในโครงสร้างกราฟีน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะ ของพันธะคาร์บอน peak ที่ตำแหน่ง 1149.69 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ

พันธะ C-O-C ในกลุ่มฟังก์ชันเอพอกไซด์ (Epoxide) peak ที่ตำแหน่ง 1039.27 cm^{-1} และ 1095.98 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O ในกลุ่มฟังก์ชันเอพอกไซด์ (Epoxide) และไฮดรอกซิล (Hydroxyl) peak ที่ตำแหน่ง 878.19 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-H ที่อยู่โมเลกุลของกราฟีนออกไซด์ (GO) และ peak ที่ตำแหน่ง 576.50 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O-C ในกราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพันธะเอพอกไซด์ (Epoxide)

รูปที่ 2 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ตามมาตรฐาน D934-13 [13] ของกราฟีนออกไซด์ โดยปกติกราฟีนออกไซด์จะแสดงยอดการเลี้ยวเบนในช่วงมุม 2-Theta (2θ) ระหว่าง 9° ถึง 15° [14] ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 2 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



รูปที่ 1 การวิเคราะห์เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดฟูริเยร์แปลง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ของกราฟีนออกไซด์



รูปที่ 2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C192/C192M [15] โดยออกแบบคอนกรีตทั้งหมด 4 ส่วนผสม และทำการทดสอบทั้งในสถานะคอนกรีตสด และคอนกรีตแข็งตัวในช่วงอายุผสมแตกต่างกัน ซึ่งมีปริมาณซีเมนต์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และสารลดน้ำกำหนดไว้คงที่ คือ 462.5, 1150.0, 722.5, และ 13.87 kg/m^3 กราฟีน

ออกไซด์ (GO) ถูกเติมลงไปในส่วนผสมโดยใช้ปริมาณที่แตกต่างกันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ร้อยละ 0.04 0.08 และ 0.12 ตามลำดับ และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) คือ 0.4 แสดงดังตารางที่ 2

ในการเตรียมตัวอย่างให้นำปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 2-3 นาที แบ่งน้ำเป็น 3 ส่วน ให้ใส่ส่วนแรกจากผสมกัน 1 นาที นำส่วนที่ 2 และสารละลาย GO ใส่แล้วผสมให้เข้ากันอีก 1 นาที และใส่น้ำส่วนสุดท้ายผสมกันอีก 1 นาที จากนั้นคอนกรีตสดที่ได้ถูกเทลงในแบบหล่อที่ทำน้ำมันไว้ตามรูปทรงและขนาดของตัวอย่างที่กำหนด คือ ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร และ รูปทรงคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดหน้าตัด 10×10 ตารางเซนติเมตร และความยาว 35 เซนติเมตร หลังจาก 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7, และ 28 วัน

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีต kg/m^3

ชื่อตัวอย่าง	ซีเมนต์	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	น้ำ	GO	สารลดน้ำ
GO - 00	462.50	1150.00	722.50	185.00	0.00	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. วิธีการทดสอบ

3.1 ความสามารถในการใช้งาน (Workability)

ทดสอบความสามารถในการใช้งาน (Workability) ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ใช้วิธีทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143/C143M [16]

3.2 คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงอัด (Compression Test) และการทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 [17] และ ASTM C496 [18] ตามลำดับ โดยตัวอย่างการทดสอบมีรูปทรงกระบอก (Cylinder) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร ซึ่งทดสอบผ่านเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่อัตราการหดตัวที่เพิ่มขึ้น (Displacement Rate) คือ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบคุณสมบัติของกำลังรับแรงดัด (Flexural Tensile Test) ของคานคอนกรีต จะใช้วิธีในการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด (Four Point Bending) ตามมาตรฐาน ASTM C78 [19] โดยตัวอย่างการทดสอบมีขนาด $10 \times 10 \times 35$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งทดสอบผ่านเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่อัตราการหดตัวที่เพิ่มขึ้น (Displacement Rate) คือ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3 การทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)

การทดสอบการทนไฟของคอนกรีต โดยใช้เตาเผาไฟฟ้าที่สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 1,100 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3 โดยนำก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก ที่มีอายุการบ่ม 28 วัน นำก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบไปอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบสัมผัสอุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ต่อ นาที แล้วนำตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง

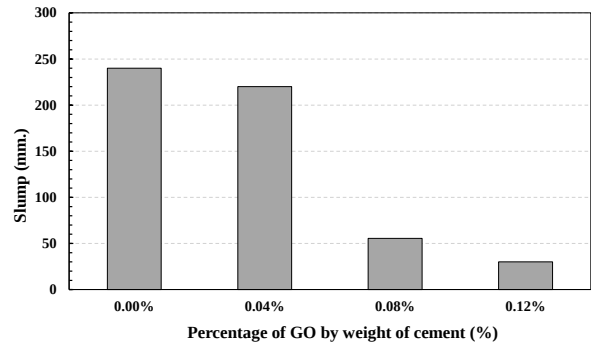


รูปที่ 3 เตาเผาไฟฟ้า

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 ความสามารถในการใช้งาน (Workability)

ความสามารถในการใช้งาน (Workability) จะทดสอบด้วยการหาค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยผลการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4 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 ดูดซับน้ำในส่วนผสมคอนกรีตจำนวนมาก เลยทำให้ปริมาณน้ำที่เหลือสำหรับการหล่อลื่นอนุภาคซีเมนต์ลดลง อีกทั้งโครงสร้างของ กราฟีนออกไซด์ มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) และ คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ชอบน้ำทำให้จับตัวกันในส่วนผสมของคอนกรีต การเกาะกลุ่มของกราฟีนออกไซด์ทำให้โครงสร้างของส่วนผสมที่หนาแน่นขึ้น และปฏิกิริยาระหว่างกราฟีนออกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเหล่านี้ดึงน้ำที่มีอยู่ในส่วนผสมออกมาใช้ ทำให้น้ำที่เหลือในส่วนผสมสำหรับการหล่อลื่นอนุภาคลดลง [20]



รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

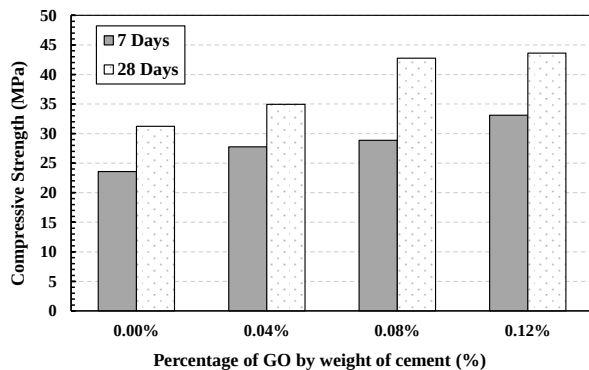
4.2 คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

รูปที่ 5 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 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.77 22.41 และ 40.39 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และกำลังรับแรงอัดที่มีอายุ 28 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 31.227 34.944 42.754 และ 43.617 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 11.90 36.91 และ 39.68 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

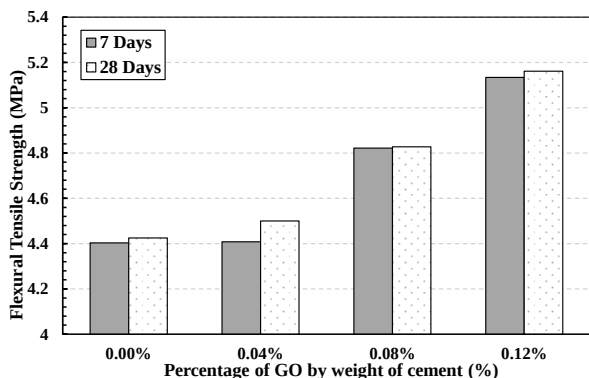
รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดัดที่มีอายุ 7 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 4.403 4.408 4.822 และ 5.134 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.11 9.52 และ 16.60 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และกำลังรับแรงดัดที่มีอายุ 28 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 4.425 4.5 4.827 และ 5.161 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.69 9.08 และ 16.63 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์โดยมีอัตราส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดสูงที่สุด เนื่องจากกราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอกซิล (-COOH) และคาร์บอนิล (-CO) บนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไฮดรชันในซีเมนต์ และหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนเหล่านี้สร้างพันธะระหว่างพันธะโควาเลนต์ หรือพันธะไอออนิก และผลิตภัณฑ์ไฮดรชัน ส่งผลให้เกิดการยึดติดระหว่างโครงสร้างของซีเมนต์กับกราฟีนออกไซด์ แน่นหนา กราฟีนออกไซด์สามารถช่วยลดช่องว่าง และเพิ่มความหนาแน่นของ

โครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากมีโครงสร้างสองมิติที่บาง และมีพื้นที่ผิวสูงทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในรูพรุน หรือรอยแตกขนาดเล็กในคอนกรีต อีกทั้งกราฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้น (nucleation sites) สำหรับการเจริญเติบโตในผลึกของผลึกกันไฮเดรชัน และกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติในการเชื่อมรอยร้าว ซึ่งช่วยลดการแพร่กระจายของรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีต เมื่อมีคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์รับน้ำหนักบรรทุกทุกหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกราฟีนออกไซด์ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของน้ำหนักที่รับ [7,13]



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

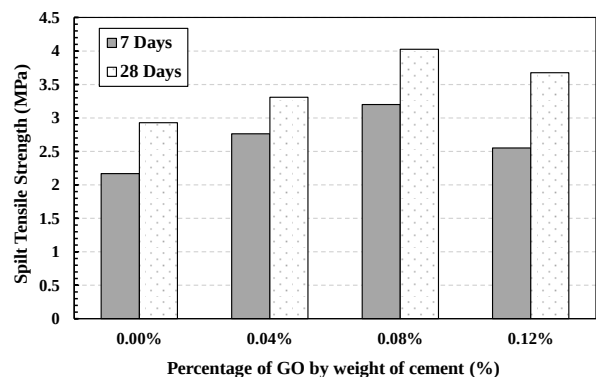


รูปที่ 6 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

รูปที่ 7 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 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 27.46 47.62 และ 17.68 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่มีอายุ 28 วัน ของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ คือ 2.93 3.31 4.025 และ 3.675 เมกะปาสกาล (MPa) ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.97 37.37 และ 25.43 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์โดยมีอัตราส่วนร้อยละ 0.08 ของน้ำหนักซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูง

ที่สุด [21] เพราะว่า กราฟีนออกไซด์ช่วยเสริมโครงสร้างจุลภาค ลดการแตกร้าว จากหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น ไฮดรอกซิล ($-OH$) คาร์บอกซิล ($-COOH$) และคาร์บอนิล ($-CO$) บนพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($C-S-H$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($C-H$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ และเหตุที่อัตราส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์สามารถรับกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลง คาดว่าเกิดจากการเกาะกลุ่ม (Agglomeration) ของกราฟีนออกไซด์มากเกินไป ทำให้โครงสร้างไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลถึงค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ลดลง [8]



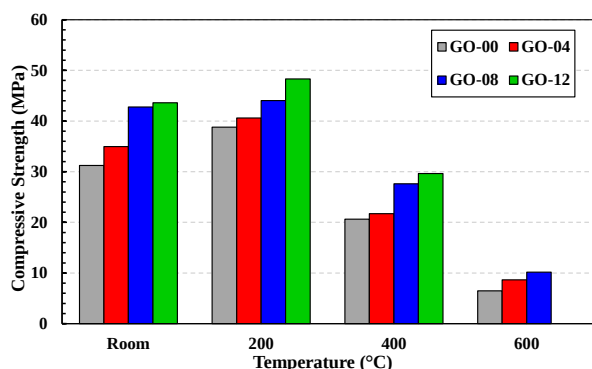
รูปที่ 7 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์

4.3 การทดสอบคอนกรีตหลังสัมผัสอุณหภูมิสูง (After exposure to high temperatures of concrete)

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 0.04 0.08 และ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ หลังสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส คือ 38.80 40.59 44.03 และ 48.32 เมกะปาสกาล ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส คือ 20.62 21.73 27.60 และ 29.64 เมกะปาสกาล ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์หลังสัมผัสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส คือ 6.492 8.668 10.19 และ 0 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดอาจเป็นผลมาจากการที่ GO ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุผ่านผลของการเชื่อมต่อ (bridging effect) และคุณสมบัติในการยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าว (crack-arresting properties) เมื่อคอนกรีตสัมผัสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดลดลง แต่ GO ยังคงช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่อุณหภูมินี้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในคอนกรีตเริ่มสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และไอน้ำ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเริ่มอ่อนแอลง และเมื่อคอนกรีตสัมผัสอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะ GO ในสัดส่วนร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ เกิดการวิบัติขึ้นเนื่องจากการสะสมของไอน้ำภายในโครงสร้างที่มี

ความหนาแน่นสูงจาก GO, การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์, และการปล่อยก๊าซจากการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันใน GO [22]



รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อสัมผัสอุณหภูมิต่างๆ

5. บทสรุป

5.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่เสริมด้วยกราฟีนออกไซด์มีค่าลดลงตามปริมาณ GO ที่ใส่อย่างมีนัยสำคัญ

5.2 กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.12 ของน้ำหนักซีเมนต์ ให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมากกว่าร้อยละ 39.68 และ 16.63 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

5.3 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.08 ของน้ำหนักซีเมนต์ ให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมากกว่าร้อยละ 37.37 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

5.4 อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมด้วยกราฟีนออกไซด์ลดลงร้อยละ 40 และ 80 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิห้อง ขณะที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิห้อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษา และขอบคุณ รศ.ดร. ชนชัย ทองโฉม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และดร. เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในวิจัยทุกด้าน ทำให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ginigaddara*, J. C. E., P. Mendisa, P. Devapurac, A.D. Liyanagec, P. Vaz-Serraa (2023). <An Introduction to High Performance Graphene Concrete.pdf>.
- [2] 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>

- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] 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.jobbe.2023.105989>
- [6] 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.jobbe.2022.105356>
- [7] 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>
- [8] 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.jobbe.2019.101007>
- [9] ASTM-International. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33/C33M-18).
- [10] ASTM-International. (2009). Standard Performance Specification for Hydraulic Cement (ASTM C1157-08a).
- [11] ASTM-International. (2017a). Standard specification for chemical admixtures for concrete.
- [12] ASTM/E168-16. (2016). Standard practices for general techniques of infrared quantitative analysis.
- [13] ASTM-International. (2022). *Standard Practices for Identification of Crystalline Compounds in Water-Formed Deposits By X-Ray Diffraction*1.
- [14] 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>
- [15] ASTM-International. (2007). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory (C192/C192M, Issue.
- [16] ASTM-International. (2020b). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.
- [17] ASTM-International. (2021a). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- [18] ASTM-International. (2017b). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [19] ASTM-International. (2021b). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.
- [20] 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>
- [21] 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>
- [22] Iqbal, H. W., Hamcumpai, K., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Likitlersuang, S., Pothisiri, T., ... & Wijeyewickrema, A. C. (2024). Enhancing fire resistance in geopolymers concrete containing crumb rubber with graphene nanoplatelets. *Construction and Building Materials*, 426, 136115.