

การพัฒนาคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตรีไซเคิลจากหมอนรองคอนกรีตที่หมดอายุการใช้งาน ด้วยการเติมสารกราฟีนควอนตัมดอท

Enhancement of Durability Properties of Recycled Concrete from Decommissioned Railway Sleepers with the Addition of Graphene Quantum Dots

นางสาวกวิมาศ รักษาสังข์¹ นายอภิสิทธิ์ หอมจันทร์² และอาจารย์ ผศ.ดร.ชยุตม์ งามโชนง³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลที่ได้จากการใช้มวลรวมรีไซเคิลจากหมอนรองคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว โดยการเติมสาร Graphene Quantum Dots (GQDs) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางความแข็งแรงและความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง โดยการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความทนทาน (Durability Test) เช่น การดูดซึมน้ำ การดูดซึมสาร การโจมตีจากกรด และการโจมตีจากซัลเฟต รวมถึงการศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของคอนกรีตรีไซเคิลโดยใช้เทคนิคการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เปรียบเทียบคอนกรีตรีไซเคิลที่เติมสาร GQDs และไม่เติมสาร GQDs ผลการศึกษาพบว่า การเติมสาร GQDs สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตรีไซเคิลได้ และสามารถนำไปใช้งานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคอนกรีตรีไซเคิลที่เติมสาร GQDs มีลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างที่มีความหนาแน่นและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงกว่า ทั้งนี้งานวิจัยนี้มีความสำคัญในการส่งเสริมการใช้วัสดุรีไซเคิลในอุตสาหกรรมก่อสร้าง พร้อมทั้งลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและส่งเสริมการใช้วัสดุทดแทนในอนาคต

คำสำคัญ: คอนกรีตรีไซเคิล, Graphene Quantum Dots, Durability Test, SEM, สารเติมแต่ง

Abstract

This study focuses on improving the properties of recycled concrete using recycled aggregates from unused concrete railway ties. The objective is to develop high-quality recycled concrete by adding Graphene Quantum Dots (GQDs) to enhance its strength and durability under extreme environmental conditions. Durability tests, including water absorption, acid attack, and sulfate resistance tests, were conducted. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the surface and structure of both recycled concrete with and without GQDs. The results indicated that adding GQDs significantly improved the mechanical strength and durability of the recycled concrete, making it a viable alternative for construction applications. The research emphasizes the potential of utilizing recycled materials in construction to reduce the reliance on natural resources while enhancing the performance of recycled concrete.

Keywords: Recycled Concrete, Graphene Quantum Dots, Durability Test, SEM, Additives

1 บทนำ

ในยุคปัจจุบัน การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและการก่อสร้างอาคารต่าง ๆ ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความต้องการใช้วัสดุก่อสร้าง เช่น ปูนซีเมนต์ หิน และทราย เพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ทรัพยากรเหล่านี้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป การใช้ทรัพยากรอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจนำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อมและการขาดแคลนทรัพยากรในอนาคต ด้วยเหตุนี้ แนวทางการใช้วัสดุรีไซเคิล เช่น คอนกรีตรีไซเคิล จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในวงการวิศวกรรมโยธา เพื่อส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืน

คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete) เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้จากการนำเศษคอนกรีตที่หมดอายุหรือไม่ได้ใช้งานแล้วมาย่อยให้เป็นมวลรวม (Recycled Aggregate) และนำกลับมาใช้ใหม่ในงานผสมคอนกรีต การใช้คอนกรีตรีไซเคิลมีข้อดีหลายประการ เช่น การลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้างและรีไซเคิล การลดการใช้วัสดุธรรมชาติ และการลดต้นทุนการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลยังมีข้อด้อยบางประการเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา โดยเฉพาะในด้านของความแข็งแรง และความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น การซึมผ่านของน้ำ การกัดกร่อนจากสารเคมี และการเสื่อมสภาพเมื่อใช้งานในระยะยาว

เพื่อลดข้อด้อยดังกล่าว งานวิจัยในปัจจุบันจึงมีแนวโน้มในการผสมวัสดุเสริมประสิทธิภาพลงในคอนกรีตรีไซเคิล หนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา คือ Graphene Quantum Dots (GQDs) ซึ่งเป็นวัสดุนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเล็กมาก (ขนาดประมาณ 2–20 นาโนเมตร) GQDs มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และโครงสร้างที่โดดเด่น เช่น พื้นที่ผิวสูง การนำไฟฟ้าดี และสามารถช่วยเสริมปฏิริยาปูนซีเมนต์ให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและทนทานยิ่งขึ้น จากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า GQDs สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต ลดการซึมผ่านของน้ำ และเสริมความต้านทานต่อสภาวะรุนแรง เช่น น้ำทะเล และสารเคมีต่าง ๆ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติม GQDs ต่อคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตรีไซเคิล โดยใช้มวลรวมจากหอนรอกคอนกรีตที่หมดอายุการใช้งาน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ในระดับอุตสาหกรรม การศึกษานี้ได้ออกแบบสูตรผสมคอนกรีตจำนวน 6 สูตร โดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ มวลรวมรีไซเคิล และการเติม GQDs ในระดับต่าง ๆ จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความคงทน เช่น การดูดซับน้ำ ความสามารถในการดูดซับน้ำ (sorptivity) ความต้านทานต่อการกัดกร่อนและซัลเฟต ตลอดจนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM และการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของแต่ละสูตร

ผลการศึกษาจะช่วยยืนยันศักยภาพของการใช้ GQDs เป็นสารเสริมในคอนกรีตรีไซเคิล ทั้งในด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม และอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนในอนาคต โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทยที่มีวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากจากโครงสร้างพื้นฐานที่เสื่อมสภาพ

2 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมสาร Graphene Quantum Dots (GQDs) ต่อคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตรีไซเคิล โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ ภายใต้สูตรผสมที่แตกต่างกัน เพื่อให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบ

2.1 วัสดุที่ใช้

2.1.1 มวลรวมหยาบธรรมชาติ (Natural Aggregate - NA)

หินบดจากแหล่งผลิตในประเทศไทย ผ่านการตรวจสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M

2.1.2 มวลรวมหยาบรีไซเคิล (Recycled Aggregate - RA)

ได้จากการย่อยหอนรอกคอนกรีตที่หมดอายุการใช้งาน โดยใช้เครื่องบดแบบ Jaw Crusher และคัดขนาดให้ผ่านตะแกรง 3/4 นิ้ว

2.1.3 Graphene Quantum Dots (GQDs)

ใช้ในอัตราส่วน 0.3% โดยน้ำหนักของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ละลาย GQDs ในน้ำให้เข้ากันก่อนเติมลงในเครื่องผสม

2.1.4 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement)

ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ตามมาตรฐาน ASTM C1157 ซึ่งมีคุณสมบัติในการแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำและให้ค่ากำลังอัดสูงในระยะเวลายาวนาน

2.1.5 ทรายหยาบ

ผ่านการตรวจสอบความสะอาดและขนาดตาม ASTM C33

2.1.6 น้ำประปา

ใช้ผสมคอนกรีตและบ่มตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C1602

2.2 สูตรผสมคอนกรีต

มีการออกแบบคอนกรีตทั้งหมด 6 สูตร ดังนี้

- 1) NA100: คอนกรีตผสมมวลรวมธรรมชาติ
- 2) QNA100: คอนกรีตผสมมวลรวมธรรมชาติ + GQDs
- 3) RA50: คอนกรีตผสม RCA ร้อยละ 50
- 4) QRA50: คอนกรีตผสม RCA ร้อยละ 50 + GQDs
- 5) RA100: คอนกรีตผสม RCA ร้อยละ 100
- 6) QRA100: คอนกรีตผสม RCA ร้อยละ 100 + GQDs

ตารางที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

รายการ	ค่า
Grade of Concrete	80.00 MPa
Type of Cement	Hydraulic
Maximum Nominal Size of Aggregates	20 mm
Minimum Cement Content	350 kg/m³
Maximum Cement Content	500 kg/m³
Water–Cement Ratio (W/C)	0.33
Workability	100 mm (Slump)
Exposure Condition	Severe
Specific Gravity of Cement	3.14
Specific Gravity of Coarse Aggregate (CA)	2.65
Specific Gravity of Fine Aggregate (FA)	2.62
Specific Gravity of Superplasticizer	1.08
Proportion of Coarse Aggregate	0.55
Proportion of Fine Aggregate	0.45
Percentage of Superplasticizer by weight of cement (sup)	0.80% - 1.00%
Water Absorption of Recycled Aggregate (RA)	3.80%

ตารางที่ 2 สัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีต

ประเภท	Mass of cement (kg)	Mass of Water (g)	Mass of CA (kg)	Mass of RA (kg)	Mass of FA (kg)	Mass of sup (g)	Mass of GQDs (g)
มวลรวม							
NA100	8.47	2794.50	15.62	0.00	12.63	84.68	0.00
QNA100	8.45	2769.09	15.62	0.00	12.63	84.68	25.40
RA50	8.45	2794.50	7.81	7.11	12.64	68.59	0.00
QRA50	8.47	2769.09	7.81	7.11	12.64	68.59	25.40
RA100	8.47	2794.50	0.00	14.22	12.65	54.20	0.00
QRA100	8.47	2769.09	0.00	14.22	12.65	54.20	25.40

2.3 การหล่อและบ่มตัวอย่าง

2.3.1 หล่อตัวอย่างคอนกรีต

ใช้แม่พิมพ์รูปทรงลูกบาศก์ (Cube) ขนาด 100 มม. และทรงกระบอก (Cylinder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ความสูง 5 ซม. ตามข้อกำหนด ASTM C39, ASTM C642-06 หล่อตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดจาก 6 สูตรที่ออกแบบ

2.3.2 บ่มตัวอย่างในน้ำ

บ่มตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน (ตามมาตรฐาน ASTM C511) เพื่อให้คอนกรีตพัฒนาแรงอัด

2.3.3 แซ่สารเคมีเพิ่มเติม

หลังจากบ่มในน้ำครบ 28 วัน ตัวอย่างจะถูกนำไปแช่ในสารเคมีต่างๆ ได้แก่ น้ำทะเลจำลอง กรดซัลฟิวริก และสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 56 วัน

2.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

2.4.1 กำลังอัด (Compressive Strength)

ทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C39 หลังบ่ม 28 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดขนาด 2000 kN

2.4.2 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ใช้วิธี ASTM C642 โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างแบบแห้งและแบบอิ่มตัว แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

2.4.3 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Sorptivity)

ทดสอบโดยการแช่ฐานของลูกบาศก์คอนกรีตในน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักตามช่วงเวลา เพื่อนำมาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับน้ำตามมาตรฐาน ASTM C1585

2.4.4 ความต้านทานต่อกรด (Acid Attack)

นำตัวอย่างไปแช่ในสารละลาย H_2SO_4 ความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 56 วัน แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและลักษณะผิว

2.4.5 ความต้านทานต่อซัลเฟต (Sulfate Resistance)

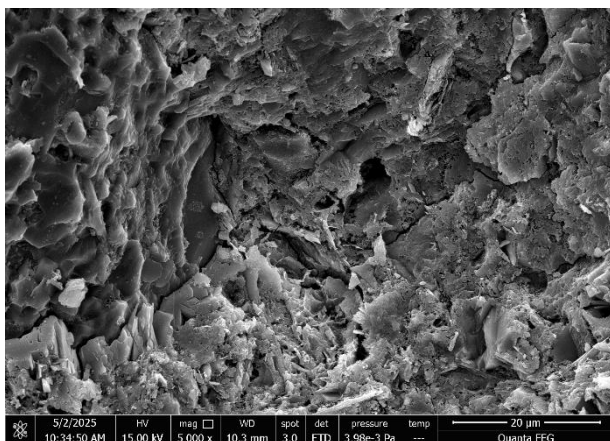
แช่ในสารละลาย Na_2SO_4 ความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 56 วัน และเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม

2.4.6 การแช่น้ำทะเลเทียม

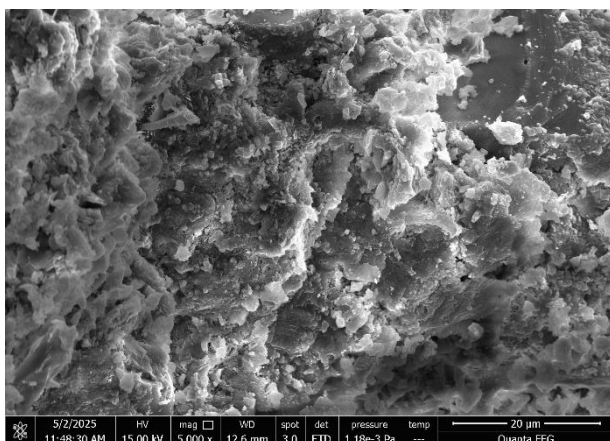
ใช้น้ำทะเลสังเคราะห์ (Marine Water) จากเกลือทะเลบริสุทธิ์ 3.5% แช่ตัวอย่างนาน 56 วัน สังเกตการเปลี่ยนแปลงของผิวคอนกรีต

2.4.7 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตัดชิ้นตัวอย่างจากคอนกรีตที่ผ่านการบ่ม แล้วนำไปเคลือบทองเพื่อส่องภาพด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3000-5000 เท่า เพื่อดูลักษณะโครงสร้าง, ITZ และการกระจายของสาร GQDs



รูปที่ 1 SEM กำลังขยาย 5000 QRA100 curing 28 days



รูปที่ 2 SEM กำลังขยาย 5000 RA100 curing 28 days

2.4.8 การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint)

คำนวณจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตวัสดุผสมแต่ละชนิดตาม ISO 14067 โดยใช้ค่า Emission factor จากฐานข้อมูลของ IPCC และ Ecolvent

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยคาร์บอน (Emission Factors) ที่ใช้ในการคำนวณ

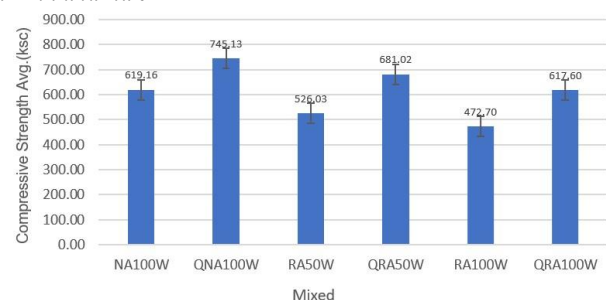
วัสดุ	ค่า Emission Factor (kgCO ₂ e)
Cement	0.93 / kg
Water	0.0003 / g (0.3 / kg)
Natural Aggregate (CA)	0.005 / kg
Recycled Aggregate (RA)	-0.0035 / kg
Fine Aggregate (FA)	0.004 / kg
Superplasticizer (sup)	0.0009 / g (0.9 / kg)

3 ผลการศึกษา

การทดลองแบ่งออกเป็น 6 สูตรผสมคอนกรีต เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่เพิ่มมวลรวมธรรมชาติ มวลรวมรีไซเคิล และการเติม Graphene Quantum Dots (GQDs) ซึ่งครอบคลุมการทดสอบด้านความแข็งแรงเชิงกล ความสามารถในการต้านทานน้ำและสารเคมี การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้อง SEM และการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์

3.1 กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

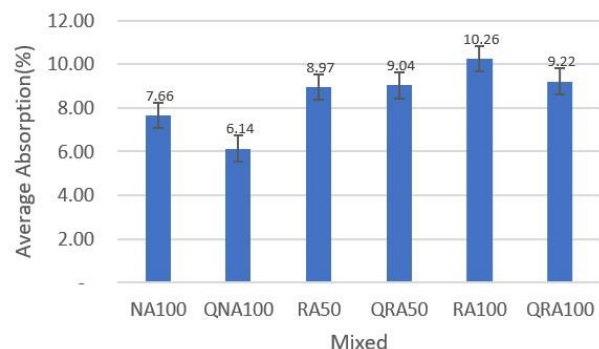
จากผลการทดลองพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตทุกตัวที่เติมสาร GQDs มีค่ามากกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้เติมสาร GQDs เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ใช้สัดส่วนมวลรวมคละเดียวกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 26.82 % และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีสัดส่วนมวลรวมคละธรรมชาติมากกว่ามวลรวมคละรีไซเคิลจะมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนมวลรวมรีไซเคิลมากกว่ามวลรวมธรรมชาติ



กราฟที่ 1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัด (Compressive Strength) ของคอนกรีตหลังบ่มน้ำ 28 วัน

3.2 ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

คอนกรีตที่เติม GQDs แสดงค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าสูตรที่ไม่เติม โดยค่าสูงสุดพบในสูตร RA100 (≈ 6.28%) ค่าต่ำสุดใน QNA100 (≈ 3.61%)

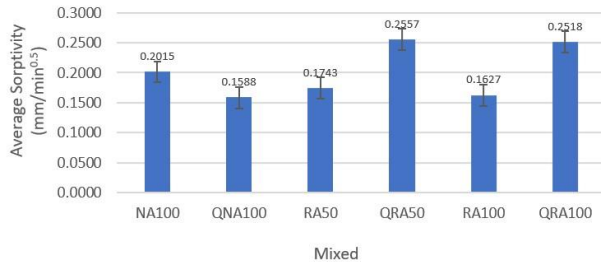


กราฟที่ 2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของคอนกรีตหลังบ่มน้ำ 28 วัน

ค่าเฉลี่ยลดลง 0.83% เมื่อเติม GQDs แสดงให้เห็นว่า GQDs ช่วยลดความพรุนและปิดรูพรองเล็กๆ ภายในเนื้อคอนกรีตได้

3.3 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Sorptivity)

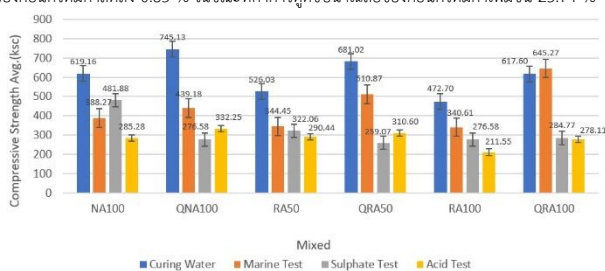
จากผลการทดลองพบว่า ค่าการดูดซับน้ำเฉลี่ย (Total Avg. Sorptivity) ของคอนกรีตมีโอเลิมสาร GQDs มีค่ามากกว่าค่าการดูดซับน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตมีโอไมเลิมสาร GQDs อยู่ 0.0426 mm/min.0.5 หรือ 23.74 % และค่าการดูดซับน้ำ (Sorptivity) มีค่าเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 0.2008 mm/min.0.5



กราฟที่ 3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (Sorptivity) ของคอนกรีตหลังบ่มน้ำ 28 วัน

3.4 ความทนทานต่อสารเคมี

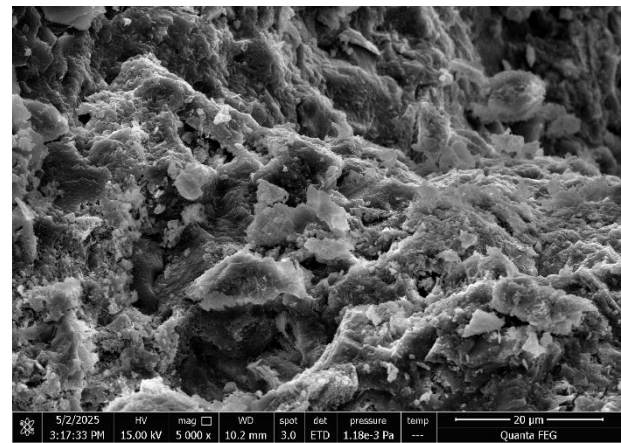
จากการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีสัดส่วนมวลรวมคลเซียมมากกว่ามวลรวมคลเซรีโซเคลจะมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนมวลรวมคลเซรีโซเคลมากกว่ามวลรวมคลเซียม เมื่อทำการเดิมสาร QGDs ลงไปในคอนกรีต ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเบ้นน้ำจะเพิ่มขึ้น 26.82 % ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดสอบน้ำทะเลจาลองเพิ่มขึ้น 11.72 % ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดสอบซัลโฟลิตลดลง 26.64 % และค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดสอบปรดลดลง 3.60 % และนอกจากนี้พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่มีสัดส่วนมวลรวมคลเซียมมากกว่ามวลรวมคลเซียมจะเ็นค่าสูงกว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนมวลรวมคลเซียมมากกว่ามวลรวมคลเซรีโซเคล โดยการเดิมสาร QGDs ลงไปในคอนกรีตทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตมีค่าลดลง 0.83 % ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น 23.74 %



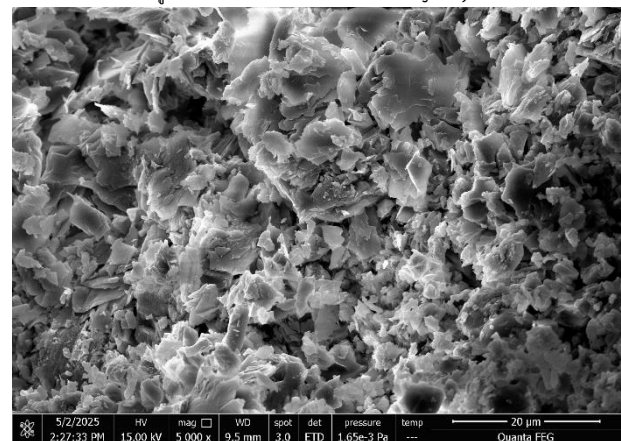
กราฟที่ 4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตหลังผ่านการทดสอบ Durability Test

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย SEM

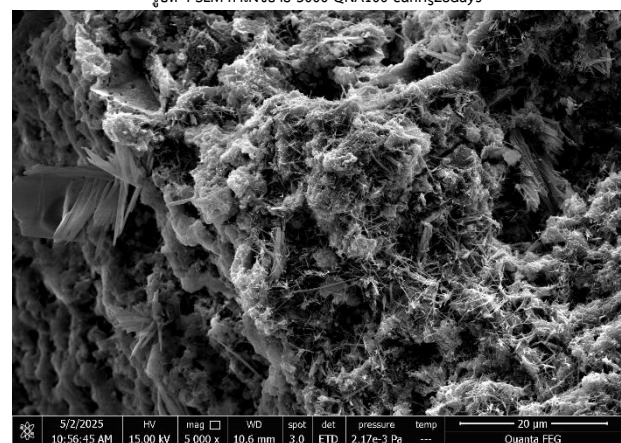
จากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สูตรที่เติม GQDs (โดยเฉพาะ QRA100) แสดงโครงสร้างที่หนาแน่น รูปทรงลดลง พบว่า ITZ มีความต่อเนื่องดีขึ้น มี C-S-H กระจ่ายตัวสม่ำเสมอ คอนกรีตที่ไม่เติม GQDs มีรูปทรงสมจำนวนมาก มีรอยแยกตามขอบมวลรวม ภาพ SEM ยืนยันผลเชิงกลและเชิงความคงทนในข้อก่อนหน้า



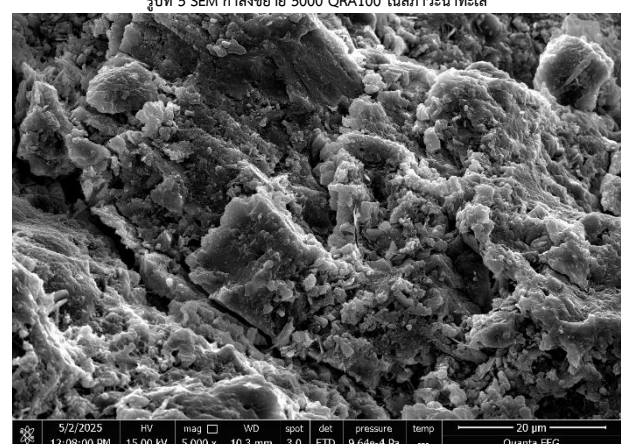
รูปที่ 3 SEM กำลังขยาย 5000 NA100 curing 28 days



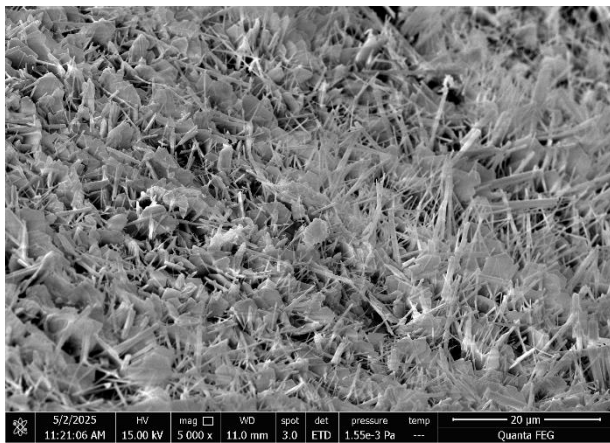
รูปที่ 4 SEM กำลังขยาย 5000 QNA100 curing 28 days



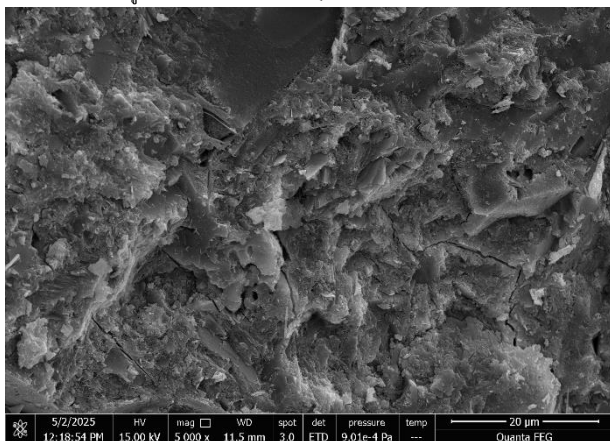
รูปที่ 5 SEM กำลังขยาย 5000 QRA100 ในสภาวะน้ำทะเล



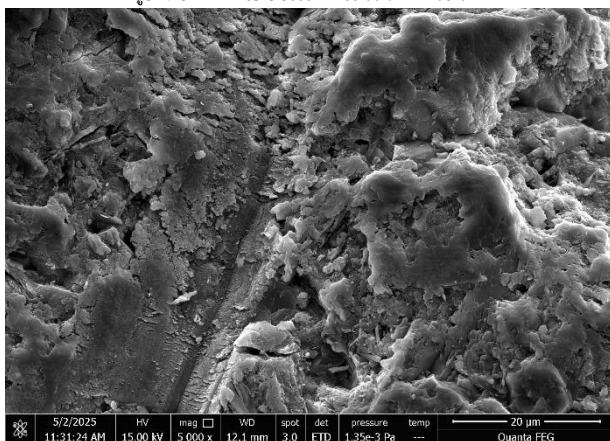
รูปที่ 6 SEM กำลังขยาย 5000 RA100 ในสภาวะน้ำทะเล



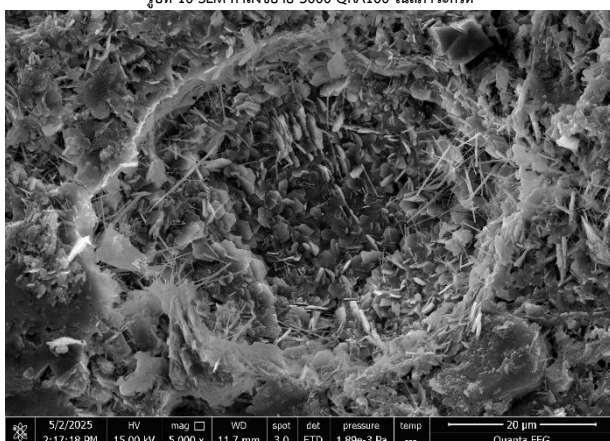
รูปที่ 8 SEM กำลังขยาย 5000 QRA100 ในสภาวะสารซัลเฟต



รูปที่ 9 SEM กำลังขยาย 5000 RA100 ในสภาวะสารซัลเฟต



รูปที่ 10 SEM กำลังขยาย 5000 QRA100 ในสภาวะกรด



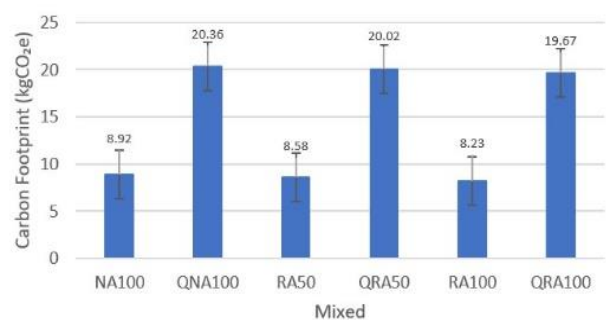
รูปที่ 11 SEM กำลังขยาย 5000 RA100 ในสภาวะกรด

3.6 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ (Carbon Footprint)

ผลการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต สูตร QRA100 มีคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่ำสุด $\approx 293 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$, สูตร NA100 มีค่าสูงสุด $\approx 344 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$, สูตรที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้เฉลี่ย 11–15% การใช้ GQDs แม้เป็นวัสดุคาร์บอน แต่ในสัดส่วนน้อยมาก จึงไม่มีผลเพิ่มคาร์บอนฟุตพริ้นต์อย่างมีนัย

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของคอนกรีตแต่ละสูตร

สูตรคอนกรีต	คาร์บอนฟุตพริ้นต์ (kgCO_2e)
NA100	8.92
QNA100	20.36
RA50	8.58
QRA50	20.02
RA100	8.23
QRA100	19.67



กราฟที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของคอนกรีตแต่ละสูตร

4 บทสรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมรีไซเคิล (Recycled Aggregate: RA) ที่ได้จากการย่อยหมอนรองคอนกรีตที่หมดอายุการใช้งาน ร่วมกับการเติมสาร Graphene Quantum Dots (GQDs) ซึ่งเป็นวัสดุนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ โดยเน้นประเมินคุณสมบัติเชิงกล ความทนทานภายใต้สภาวะแวดล้อมรุนแรง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (Carbon Footprint) เปรียบเทียบกับคอนกรีตสูตรมาตรฐานที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ

การนำมวลรวมรีไซเคิลจากหมอนรองรางรถไฟเก่ามาผสมกับมวลรวมธรรมชาติในการทำคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตนั้นมีค่าลดลงตามสัดส่วนของมวลรวมรีไซเคิลและมวลรวมธรรมชาติ โดยที่ยังมีมวลรวมรีไซเคิลมากกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงมากขึ้น [23] ซึ่งการเติมสาร GQDs ปริมาณ 0.3 % [22] ลงไปในการทำคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น 26.82 % และกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดสอบบดทะเลจาล้อมเพิ่มขึ้น 11.72 % กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดสอบซัลเฟตลดลง 26.64 % และกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดสอบกรดลดลง 3.60 % นอกจากนี้คอนกรีตจะมีการดูดซึมน้ำลดลง 0.83 % และการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น 23.74 %

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติม GQDs แม้ในปริมาณเล็กน้อยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกลุ่มที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล เช่น สูตร QRA50 และ QRA100 มีค่าแรงอัดที่สูงกว่าสูตร RA50 และ RA100 ตามลำดับ และมีการดูดซึมน้ำต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นและความต่อเนื่องของโครงสร้างจุลภาคที่ดีขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า GQDs มีแนวโน้มในการกระจายตัวสม่ำเสมอภายในเนื้อปูนและทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีในการเกิดผลึก C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้กำลังในปูนซิเมนต์ โดย GQDs เกาะตัวแน่นกับเนื้อปูนและมีการฝังตัวเข้าไปในบริเวณขอบเขตของมวลรวมรีไซเคิล ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นบริเวณที่มีรอยต่ออ่อนแอ (Interfacial Transition Zone - ITZ) การที่ GQDs เข้าไปเติมเต็มบริเวณนี้ทำให้ลดการแทรกซึม

ของน้ำและสารเคมี เพิ่มความเหนียวแน่นของชั้นปูนซีเมนต์ และลดความพรุนของ Interfacial Transition Zone (ITZ) ซึ่งเป็นบริเวณที่อ่อนแอที่สุดของคอนกรีต ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความหนาแน่นมากขึ้น และเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนโดยเฉพาะในสภาวะแวดล้อมที่ไม่รุนแรง เช่น น้ำทะเล

ด้านสิ่งแวดล้อม แม้ว่า การเติม GQDs จะทำให้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์รวมของสูตรคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตร QNA100 และ QRA100 มีค่า CF สูงกว่า NA100 และ RA100 ถึง 2 เท่าตัว เพิ่มขึ้นจากประมาณ 8.92 เป็น 20.36 kgCO₂e และจาก 8.23 เป็น 20.19 kgCO₂e ตามลำดับ แต่การใช้มวลรวมรีไซเคิลจากหมอนรองรถไฟคอนกรีตในสูตร RA50 และ RA100 สามารถชดเชยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้บางส่วน โดยช่วยลดการปล่อยคาร์บอนจากมวลรวมหยาบลง (เนื่องจากใช้แนวคิด System Expansion ในการหักลบภาระของวัสดุเหลือทิ้ง) จึงทำให้สูตร QRA50 มีค่า CF ต่ำกว่าสูตร QNA100 แม้จะเติม GQDs เท่ากัน กล่าวได้ว่า หากเลือกใช้เหมาะสม การเติม GQDs ร่วมกับ RA จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุโดยไม่ต้องใช้ปูนเพิ่ม และยังลดการใช้ทรัพยากรใหม่ ส่งผลให้วัสดุมีศักยภาพในการใช้งานเชิงวิศวกรรมควบคู่กับความยั่งยืนได้ดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับแนวทางของ Sustainable Construction

คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมรีไซเคิลร่วมกับการเติม GQDs มีข้อได้เปรียบที่เด่นชัดคือการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ซึ่ง GQDs ในช่วยปรับปรุงโครงสร้างของคอนกรีตจากระดับนาโน โดยทำให้การก่อตัวของเจล C-S-H มีประสิทธิภาพมากขึ้น โครงสร้างของคอนกรีตจึงแน่น แข็งแรง และการดูดซึมน้ำลดลง ทำให้คอนกรีตมีความทนทานต่อความชื้นและการซึมผ่านของสารเคมีได้ดีกว่าเดิม อย่างไรก็ตาม คอนกรีตประเภทนี้ยังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะการลดลงของกำลังอัดโดยรวมเมื่อใช้มวลรวมรีไซเคิลในปริมาณสูง ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวมรีไซเคิลที่มีความพรุนมากกว่า [24] จึงทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับปูนซีเมนต์ อ่อนแอกว่าคอนกรีตทั่วไป นอกจากนี้ เมื่อทดสอบภายใต้สภาวะรุนแรง เช่น การแช่ในสารละลายซัลเฟตและกรด พบว่ากำลังอัดลดลง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนจากเคมีรุนแรง การดูดซึมน้ำของคอนกรีตหลังเติม GQDs ยังเพิ่มขึ้นถึง 23.74% ซึ่งอาจมาจากโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กที่ยังสามารถกักเก็บน้ำไว้ภายใน แม้ไม่ส่งผลรุนแรงโดยตรง แต่ต้องระวังในกรณีที่ต้องการควบคุมความชื้น

จากคุณลักษณะข้างต้น แนวทางการประยุกต์ใช้คอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลร่วมกับ GQDs จึงควรมุ่งเน้นไปที่งานที่ต้องการความทนทานต่อแรงกดและสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น การใช้ในพื้นโรงงาน พื้นคลังสินค้า หรือถนน ลานจอดรถ และปูทาง นอกจากนี้ คอนกรีตชนิดนี้ยังเหมาะกับงานในพื้นที่ใกล้น้ำทะเล เช่น ถนนชายฝั่งหรือโครงสร้างริมฝั่ง เพราะมีความคงทนเพิ่มขึ้นเมื่อต้องสัมผัสน้ำทะเลเจือจาง และสามารถใช้งานโครงสร้างทั่วไปได้เมื่อใช้สัดส่วนมวลรวมรีไซเคิลที่เหมาะสม ซึ่งช่วยลดต้นทุนและช่วยลดปริมาณของเสียจากการรื้อถอนและลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติ จึงสามารถเพิ่มความยั่งยืนของวัสดุได้และสิ่งแวดล้อมได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณอาจารย์ ผศ.ดร.ชยุตม์ งามโชนง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาทั้งในด้านของทฤษฎี การวางแผน ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหา การติดตามความคืบหน้า และการปรับปรุงแก้ไขการงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณผู้ดูแลและผู้ที่เกี่ยวข้องกับห้องทดสอบคอนกรีตที่ให้การสนับสนุนการทํางานวิจัยนี้ ทั้งในเรื่องของการใช้สถานที่ การใช้อุปกรณ์ และการแนะนำประสบการณ์ในการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่มอบความรู้และประสบการณ์ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบโอกาสในการศึกษาและการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmad, T., & Chen, H. (2019). Nonlinear autoregressive and random forest approaches to forecasting electricity load for utility energy management systems. *Sustainable Cities and Society*, 45, 460–473.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). ASTM C642-06: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International.
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). ASTM C33/C33M-13: Standard specification for concrete aggregates. ASTM International.
- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). ASTM C511-16: Standard specification for curing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water tanks for testing hydraulic cements and concretes. ASTM International.
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2017). ASTM C192/C192M-17: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM International.
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2017). ASTM C39/C39M-17: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- [7] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). ASTM C642-13: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM International.
- [8] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). ASTM C150/C150M-18: Standard specification for portland cement. ASTM International.
- [9] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2019). ASTM C109/C109M-19: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). ASTM International.
- [10] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2019). ASTM C150/C150M-19: Standard specification for portland cement. ASTM International.
- [11] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). ASTM E1508-18: Standard guide for quantitative analysis by energy-dispersive spectroscopy. ASTM International.
- [12] Brown, M., & Reddy, K. (2017). Sustainable concrete solutions using graphene. *Construction and Building Materials*, 124, 33–42.
- [13] Chen, M., Li, H., Zhang, Y., Wang, Y., & Xu, G. (2021). Synergistic effect of graphene quantum dots and nano-silica in ultra-high-performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125173.
- [14] Choi, Y., Kim, Y., & Lee, J. (2018). Effects of graphene quantum dots on the strength and durability of concrete. *Journal of Nanomaterials*, 2018, Article ID 3489532.
- [15] Clifton, C., Knox, J. H., & Sellars, J. (2013). Assessing carbon emissions in concrete construction: Methodology and data. *Sustainable Structures and Materials*, 1(1), 29–41.
- [16] Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition.
- [17] Evangelista, L., & de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9–14.

- [18] Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 282–288. <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>
- [19] Goh, C., & Li, W. (2019). Effects of recycled concrete aggregate on the strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 234, 117434.
- [20] Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (4th ed.). Springer.
- [21] Habert, G., de Lacaillerie, J. B. D., & Roussel, N. (2008). An environmental evaluation of geopolymer-based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 16(10), 1098–1106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.06.018>
- [22] Hammond, G., & Jones, C. (2011). *Inventory of carbon and energy (ICE)*, version 2.0. University of Bath.
- [23] Jiang, X., & Zhou, X. (2020). Durability of concrete incorporating graphene quantum dots and recycled concrete aggregates. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138873.
- [24] McKenzie, W. M., & Adams, A. E. (2018). *A handbook of practical SEM techniques*. CRC Press.
- [25] Memon, N. A., et al. (2015). Durability of concrete made with recycled aggregates: A review. *Construction and Building Materials*, 89, 119–131.
- [26] Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- [27] Peng, J., Gao, W., & Wang, H. (2020). Life cycle environmental impacts of carbon nanomaterials: Graphene and its derivatives. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120703.
- [28] Peng, Z., Han, X., Chen, X., et al. (2020). Synthesis and environmental evaluation of graphene quantum dots: A cradle-to-gate life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120515.
- [28] Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718.
- [29] Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2004). Use of recycled aggregates in concrete mixtures. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 931–938.
- [30] Raj, A., Yamkasikorn, P., Wangtawesap, R., et al. (2024). Effect of graphene quantum dots (GQDs) on the mechanical, dynamic, and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 441, 137597.
- [31] Scrivener, K. L., Crumie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 935–939.
- [32] Sherif, M. A., Elchalakani, M., & Karrech, A. (2015). Strength and durability evaluation of recycled aggregate concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(2), 219–239.
- [33] Sellers, R., Chen, L., & Liu, C. (2016). Estimating carbon footprints of concrete using life cycle assessment. *Environmental Science & Technology*, 50(9), 4903–4911.
- [34] Sun, H., Zhang, Y., & Chen, Y. (2021). Life cycle environmental impact of graphene and related materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110706.
- [35] Suharwanto, E., Darmawan, A., & Suhariadi, F. (2019). Performance of recycled concrete made from railway sleeper: Experimental study. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment (SIBE)*.
- [36] Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Zeng, S. X. (2007). Towards adoption of prefabrication in construction. *Building and Environment*, 42(10), 3642–3654.
- [37] TGO (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกประเทศไทย). (n.d.). *แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์*. Retrieved from <http://www.tgo.or.th>
- [38] Thomas, B. S., Kumar, S., & Arel, H. S. (2018). Sustainable concrete containing different types of recycled waste materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 19, e00130. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00130>
- [39] Yang, Y., Lin, X., Wei, Y., & Song, L. (2020). A life-cycle assessment of graphene-based nanomaterials: Environmental impact and comparative analysis. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122815.
- [40] Zhang, H., & Chen, B. (2021). Recycled concrete aggregates for sustainable construction: Properties and applications. *Sustainable Materials and Technologies*, 27, e00213.
- [41] Zhang, Y., Chen, M., & Li, H. (2017). Effects of graphene oxide on the microstructure and durability of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 134, 240–250.