อิทธิพลของเถ้าข้าวโพดและกราฟีนควอนตัมดอทต่อสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์

Influence of Cornstalk Ash and Graphene Quantum Dots on Mechanical Properties of Mortar

ศศิอาภา เลิศลิลิตรุ่งโรจน์[1] และ พิชชา จองวิวัฒสกุล[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงงานนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการไหลและสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าข้าวโพดแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักและการเติมกราฟีนควอนตัมดอท (GQDs) ในอัตรา 0.3%, 0.6% และ 0.9% โดยน้ำหนัก ลงในมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ข้าวโพดบางส่วนที่ให้ค่ากำลังสูงสุด ทั้งนี้เพื่อประเมินผลกระทบเชิงสิ่งแวดล้อมและสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ การทดสอบประกอบด้วยการวัดค่าการไหล กำลังอัด กำลังดัด ความพรุน และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าข้าวโพดช่วยลดความพรุนและเพิ่มความแน่นของเนื้อวัสดุเมื่อใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยเฉพาะสัดส่วน 20% ให้ค่ากำลังอัดและกำลังดัดสูงสุด ในขณะที่การเติม GQDs ในอัตรา 0.3% ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนทั้งในด้านกำลังอัดและกำลังดัด รวมถึงลดความพรุนลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลภาค นอกจากนั้น ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าข้าวโพดแทนที่ปูนซีเมนต์ 20% และผสม GQDs ในปริมาณ 0.3% ยังให้ค่าประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมต่อกำลังอัดสูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความยั่งยืน

คำสำคัญ: เถ้าข้าวโพด, กราฟีนควอนตัมดอท, สมบัติเชิงกล, มอร์ตาร์

Abstract

This study aims to evaluate the flowability and mechanical properties of cement mortars incorporating cornstalk ash as a partial replacement for hydraulics cement at 10%, 20%, and 30% by weight, combined with graphene quantum dots (GQDs) added at 0.3%, 0.6%, and 0.9% by weight. GQDs were introduced into the mortar mix with the optimal cornstalk ash replacement level that yielded the highest compressive strength. The experimental program included flowability tests, compressive strength, flexural strength, porosity, and microstructural analysis using scanning electron microscopy (SEM). Results revealed that cornstalk ash effectively reduced porosity and improved matrix densification when used at an optimal level, with 20% cornstalk ash providing the highest strength. The incorporation of 0.3% GQDs significantly enhanced both compressive and flexural strength and further reduced porosity, which was consistent with SEM observations. Furthermore, the mortar containing 20% cornstalk ash and 0.3% GQDs exhibited the highest environmental efficiency index based on compressive strength, highlighting its potential as a sustainable construction material.

Keywords: Cornstalk ash, Graphene quantum dots, Mechanical properties, Mortar

1. บทนำ

กิจกรรมของมนุษย์ทำให้ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาก 280 ส่วนต่อล้าน (Parts per million , ppm) และในปัจจุบันเพิ่มขึ้นเป็นมากกว่า 400 ส่วนต่อล้าน (ppm) [1] ทำให้ภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่สุดของโลกในปัจจุบัน หนึ่งในแหล่งสำคัญของการปล่อย CO_2 คือการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) โดยการปล่อย CO_2 ส่วนใหญ่มาจากสองแหล่งหลัก คือ วัตถุดิบและการเผาเชื้อเพลิง มีรายงานว่าการผลิตปูนซีเมนต์คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 5–7% ของการปล่อย CO_2 ทั่วโลก ดังนั้นการลดการปล่อย CO_2 และต้นทุนพลังงานในระหว่างการผลิตปูนซีเมนต์จึงกลายเป็นประเด็นเร่งด่วนที่ต้องศึกษาค้นคว้าและในกระบวนการผลิต OPC ส่วนใหญ่ของการปล่อย CO_2 มาจากการย่อยสลายของหินปูน ซึ่ง OPC หนึ่งตัน จะปล่อย CO_2 ประมาณ 0.73–0.85 ตัน [2] สำหรับการผลิตคอนกรีตเพียงอย่างเดียวนั้นก่อให้เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 6 พันล้านตันต่อปี [3] จึงได้มีการวิจัยเพื่อลด CO_2 โดยการใช้วัสดุอื่นมาทดแทนบางส่วนของ OPC เช่น วัสดุเสริมกำลังปูนซีเมนต์ (Supplementary Cementitious Materials: SCMs) และวัสดุชีวมวล [2]

วัสดุเสริมกำลังปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เถ้าลอย (FA) ซิลิกาฟูม (SF) และ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) วัสดุเหล่านี้เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมที่ได้รับการปรับปรุงให้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมที่มีประสิทธิภาพและได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้งานได้ดี FA และ SF เป็นวัสดุปอซโซลานาที่ช่วยส่งเสริมสมบัติของคอนกรีตทั้งสมบัติเชิงกลและความทนทาน [4] ซึ่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินถูกนำมาใช้ในคอนกรีตมาแล้วกว่าครึ่งศตวรรษ และ

จากปริมาณการผลิตในยุโรปปีละประมาณ 40 ล้านตัน มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณครึ่งหนึ่ง อัตราการแทนที่ปกติอยู่ที่ประมาณ 10–20% เมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ [5] นอกจากนี้ FA ยังเป็นวัสดุเสริมประเภทซีเมนต์ที่มีปริมาณมากที่สุด [5] มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วย FA จะช่วยปรับปรุงสมรรถนะทางเทคนิคของคอนกรีต ทั้งในสถานะสดและเมื่อแข็งตัวแล้ว FA ช่วยเพิ่มความสามารถในการเทของคอนกรีตสด รวมทั้งเพิ่มความทนทานด้วยการลดการซึมผ่านของคอนกรีต [4] ดังนั้นบทบาทของวัสดุประสานในการเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตและส่งเสริมความยั่งยืนของสิ่งแวดล้อม ทำให้วัสดุประสานเหล่านี้มีความจำเป็นในการก่อสร้างสมัยใหม่เป็นอย่างมาก [6]

อย่างไรก็ตามการใช้ FA ซึ่งเป็นเถ้าละเอียดที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำพวกถ่านหินที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตและส่งเสริมความยั่งยืนของสิ่งแวดล้อมแล้วนั้น ผู้วิจัยเล็งเห็นในการนำวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ FA ที่ได้จากวัสดุอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตหรือวัสดุชีวมวลคือเถ้าข้าวโพดมาใช้ทดแทนซีเมนต์บางส่วนเพื่อส่งเสริมความยั่งยืนของสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นและใช้วัสดุที่เหลือทิ้งจากโรงฟ้าชีวมวลให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งงานวิจัยของ Salem et al. [6] ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเถ้าข้าวโพดเพื่อทดแทนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต ส่วนผสมที่แทนที่ซีเมนต์ 10% แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดลดลง 15% และ 11% ที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม อย่างไรก็ตามพบว่าเพิ่มขึ้น 2% ที่ 56 และ 90 วัน นอกจากนี้ส่วนผสมทดแทนซีเมนต์ 10% ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดและแรงดึงที่ 2% และ 12% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม อย่างไรก็ตามมีการศึกษาวิจัยจำนวนไม่มากนักที่ศึกษาการใช้เถ้าข้าวโพดทดแทนซีเมนต์บางส่วน [7]

ในปัจจุบันความก้าวหน้าในนาโนเทคโนโลยีทำให้สามารถพัฒนานาโนวัสดุต่างๆ ให้มีการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ เช่น การดูแลสุขภาพ อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องสำอาง สารเคลือบผิวและการก่อสร้าง ที่สำคัญนาโนวัสดุบางชนิดยังช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างการสังเคราะห์ด้วยการนำคาร์บอนเข้าไปในโครงสร้าง โดยอุตสาหกรรมการก่อสร้างได้นำนาโนวัสดุถูกนำมาใช้มากขึ้น เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะคอนกรีตตัวอย่างได้แก่ คาร์บอนดอต (CD) กราฟีนควอนดัมดอต (GQDs) และกราฟีนออกไซด์ (GO) คาร์บอนดอตซึ่งเป็นกลุ่มของนาโนวัสดุที่มีพื้นฐานมาจากคาร์บอน มีลักษณะเฉพาะคือมีขนาดเล็กน้อยกว่า 10 นาโนเมตร โดย Qu et al. [8] พบว่าการเติมคาร์บอนดอต 0.08% ลงในวัสดุคอมโพสิตที่มีพื้นฐานมาจากซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังอัดได้มากถึง 16.8% ในส่วนของคาร์บอนดอตเป็นอนุภาคขนาดนาโนที่ได้มาจากกราฟีนที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร [9] พบว่าการใช้ GQDs เป็นสารเติมแต่งในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังอัดและกำลังดัดได้มากถึง 40% และ 108% ตามลำดับ ส่วน Long et al. [10] พบว่า GQDs สามารถแก้ปัญหาการกระจายตัวที่ไม่ดีในเมทาเคาลิน (MK) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เทคนิคการกระจายตัวด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่ช่วยเหลือด้วย GQDs ช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของ MK ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่ม GQD 1.0% ตามน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทำให้กำลังอัดของปูนซีเมนต์ในระยะเวลา 28 วันเพิ่มขึ้นอย่างมาก 31.03% [11] ศึกษาผลกระทบของการผสม GO (กราฟีนรูปแบบออกซิไดซ์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนต่างๆ โดยทั่วไปประกอบด้วยกราฟีนชั้นเดียวหรือหลายชั้น) ลงในวัสดุปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมและเถ้าลอย ผลการศึกษาพบว่าการเติม GO 0.05% โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มกำลังดัดในช่วง 28 วันได้มากถึง 16.1% นอกจากนี้ การผสม GO 0.03% โดยน้ำหนักยังช่วยเพิ่มกำลังอัดตัวในช่วง 28 วันได้มากถึง 12.4% แม้ว่าจะมีการศึกษามากมายที่ศึกษาการเสริมประสิทธิภาพเชิงกลของวัสดุประสานโดยใช้นาโนวัสดุ แต่ยังคงขาดการวิจัยที่นำนาโนวัสดุมาเสริมประสิทธิภาพกับวัสดุชีวมวล

เนื่องจากมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้นาโนวัสดุที่เกี่ยวข้องกับส่วนผสมของซีเมนต์และเถ้าจากการเกษตรมีจำนวนไม่มากนัก โครงงานนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาช่องว่างของวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้นาโนวัสดุในระบบซีเมนต์ที่ผสมวัสดุนี้ โดยเฉพาะเถ้าจากต้นข้าวโพดจะถูกใช้เป็นสารยึดเกาะทดแทนบางส่วนในระบบซีเมนต์ โดยวัตถุประสงค์ของโครงงานนี้ ได้แก่ (1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้เถ้าข้าวโพดแทนที่ซีเมนต์บางส่วนต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ และ (2)เพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้ GQDs ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าข้าวโพด โดยผลลัพธ์จะถูกเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมเพื่อกำหนดสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โครงงานนี้มีส่วนสนับสนุนการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, เถ้าข้าวโพด, ทราย, น้ำ และ GQDs โดยรายละเอียดของวัสดุมีดังต่อไปนี้

ซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้ในการศึกษานี้ดำเนินการตามมาตรฐาน มอก. 2594-2566 มีลักษณะทางกายภาพเป็นฝุ่นผงเนื้อละเอียดสีเทาอ่อน ดังแสดงใน**รูปที่ 1** ซึ่งมีประกอบด้วย CaO (58.0%-68.0%), SiO_2 (16.0%-26.0%), Al_2O_3 (4.0%-8.0%), Fe_2O_3 (2.0%-5.0%), MgO (1.0%-4.0%), SO_3 (0.1%-2.5%) และมีความถ่วงจำเพาะ 3.0

เถ้าข้าวโพดได้มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย มีลักษณะเป็นผงหยาบหว่าปูนซีเมนต์ มีสีดำ ซึ่งอาจเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ก่อนนำมาใช้ในการศึกษาต้องนำเถ้าเข้าโพดไปปรับปรุงผ่านการอบ การร่อนและการปั่น จนมีลักษณะเป็นฝุ่นผง ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2022) [11] ดังแสดงใน**รูปที่ 2** มีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ SiO_2 (39.0%), CaO (11.7%), Al_2O_3 (4.9 %), Fe_2O_3 (2.5%), MgO (2.5%), SO_3 (2.4%) และองค์ประกอบอื่น ๆ

ทรายที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้เป็นทรายแม่น้ำที่มีความถ่วงจำเพาะที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.6 มีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.7% และมีโมดูลัสความละเอียด 2.4

GQDs ที่แสดงอยู่ใน**รูปที่ 3** เป็นวัสดุนาโนที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่จัดเตรียมมาจากบริษัท CrtstalLyte จำกัด

รูปที่ 1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

รูปที่ 2 เถ้าข้าวโพด

รูปที่ 3 GQDs

2.2 สัดส่วนการผสม

สัดส่วนการผสมดังแสดงอยู่ใน**ตารางที่ 1** โดยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกถูกแทนที่ด้วยเถ้าเข้าโพด 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักในขณะที่มีการเติม GQDs 0.3%, 0.6% และ 0.9% โดยน้ำหนักในมอร์ตาร์ที่มีกำลังสูงสุดคือแทนที่ด้วยเถ้าข้าวโพด 20% ในส่วนของอัตราส่วนของน้ำต่อตัวประสานคอนกรีตและอัตราส่วนของทรายต่อตัวประสานคอนกรีตคือ 0.6 และ 2.75 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สัดส่วนการผสมมอร์ตาร์

ส่วนผสม	ซีเมนต์ (กก/ลบ.ม.)	เถ้าข้าวโพด (กก/ลบ.ม.)	ทราย (กก/ลบ.ม.)	น้ำสะอาด (กก/ลบ.ม.)	GQDs (กก/ลบ.ม.)
C00	507	0	1394	306	-
C10	456.3	37.9	1394	306	-
C20	405.6	75.9	1394	306	-
C30	354.9	113.8	1394	306	-
C20-G0.3	405.6	75.9	1394	306	1.5
C20-G0.6	405.6	75.9	1394	306	3.0
C20-G0.9	405.6	75.9	1394	306	4.6

2.3 ซีเมนต์มอร์ตาร์และเตรียมการผสม

ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากการผสมวัสดุแห้งได้แก่ ปูนซีเมนต์และเถ้าข้าวโพดเข้าด้วยกันเป็นเวลา 1 นาทีด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ จากนั้นเติมน้ำที่มี GQDs ลงไปเล้วผสมต่ออีก 30 วินาที ถัดมานำทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยผิวสัมผัสแห้งเติมลงไปและผสมต่ออีก 2 นาที สุดท้ายแล้วมอร์ตาร์ที่ถูกผสมเสร็จจะถูกเทลงในแบบหล่อและคลุมด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการถอดแบบแล้ว จึงทำการบ่มตัวอย่างในอากาศจนถึงวันทดสอบวัสดุ

2.4 วิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นในการวิเคราะห์ผลของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าข้าวโพดและ GQDs โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพคือสมบัติการไหลและความพรุน และสมบัติเชิงกลคือ กำลังดัดและกำลังอัด วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค รวมถึงการประเมินด้านสิ่งแวดล้อมที่ทำการคำนวณค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมทั้งหมดและประสิทธิภาพกำลังเชิงสิ่งแวดล้อมของวัสดุ

2.4.1 สมบัติการไหล (Flowability)

เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์ ได้ทำการทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C1437 [12]

2.4.2 กำลังอัด (Compressive strength)

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 [13] โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง และพิจารณากำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

2.4.3 กำลังดัด (Flexural strength)

การทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C348 [14] โดยใช้ตัวอย่างทดสอบทรงปริซึมขนาด 40×40×160 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง และพิจารณากำลังดัดที่ระยะการบ่มที่ 28 วัน

2.4.4 ความพรุน (Porosity)

ความพรุนถูกวัดตามมาตรฐาน ASTM C642 [15]. โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างและค่าร้อยละของความพรุนสามารถคำนวณได้ตาม**สมการที่ (1)**

$$\text{Porosity}\,(\%) = \left[1 - \frac{A-D}{C-D}\right] \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ A คือมวลของตัวอย่างที่อบแห้งในอากาศ (กรัม); C คือมวลของตัวอย่างพื้นผิวแห้งในอากาศหลังการแช่น้ำและการต้ม (กรัม) และ D คือมวลของตัวอย่างในน้ำหลังการแช่น้ำและการต้ม (กรัม)

2.4.5 วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

ในการศึกษาครั้งนี้จะนำตัวอย่างขนาด 10×10×10 มิลลิเมตร มาวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.4.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental impact evaluation)

เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้มีการประเมินการปล่อย CO_2 รวมเทียบเท่า (Total Equivalent CO_2 Emissions) และประสิทธิภาพกำลังเชิงสิ่งแวดล้อม (Eco-strength Efficiency) โดยปริมาณการปล่อย CO_2 รวมของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าข้าวโพดและ GQDs ถูกคำนวณโดยใช้**สมการที่ (2)** ซึ่งปัจจัยการปล่อยก๊าซ CO_2 ที่เกี่ยวข้องแสดงไว้ใน**ตารางที่ 2** สำหรับการพิจารณาทั้งในด้านกำลังและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้มีการคำนวณประสิทธิภาพด้านกำลังเชิงสิ่งแวดล้อมโดยใช้**สมการที่ (3)**

$$\text{Total equivalent } CO_2 \text{ emissions} = \sum_{i=1}^{n}(QM \times EFM) \quad (2)$$

$$Eco-strength\ efficiency = \frac{Compressive\ strength}{Total\ \textbf{equivalent}\ \textbf{CO}_2\ \textbf{emissions}} \quad (3)$$

โดยที่ QM คือปริมาณวัสดุ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และ EFM คือค่าปัจจัยการปล่อย CO_2 เทียบเท่าของวัสดุ (กิโลกรัม $CO_{2\text{-}e}$ ต่อกิโลกรัมวัสดุ)

ตารางที่ 2 ค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

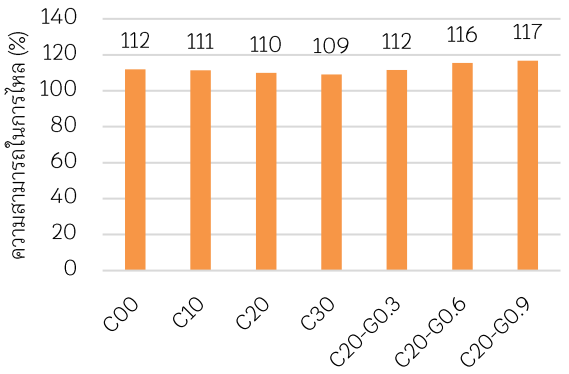
วัสดุ	ค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (กิโลกรัม CO_2-e ต่อกิโลกรัมวัสดุ)
ซีเมนต์	0.742 [17]
เถ้าข้าวโพด	0.008 [18]
GQDs	-0.630 [19]
ทราย	0.04 [20]

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 สมบัติการไหล (Flowability)

รูปที่ 4 แสดงความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ จากการทดสอบสมบัติการไหลของมอร์ตาร์อยู่ในช่วง 105%- 120% แสดงได้ว่ามอร์ตาร์เหล่านี้มีสมบัติการไหลที่เหมาะสม ไม่เหลวจนทำให้เกิดการแยกตัวของวัสดุ โดยเมื่อเปรียบเทียบสมบัติการไหลของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพด พบว่า C00 มีความสามารถในการไหลมากที่สุดคือ 112% กล่าวได้ว่าการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดที่มีสัดส่วนมากขึ้น จะทำให้สมบัติการไหลนั้นลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลมสม่ำเสมอของเถ้าข้าวโพดที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของเถ้าข้าวโพดเองซึ่งดูดซับน้ำ

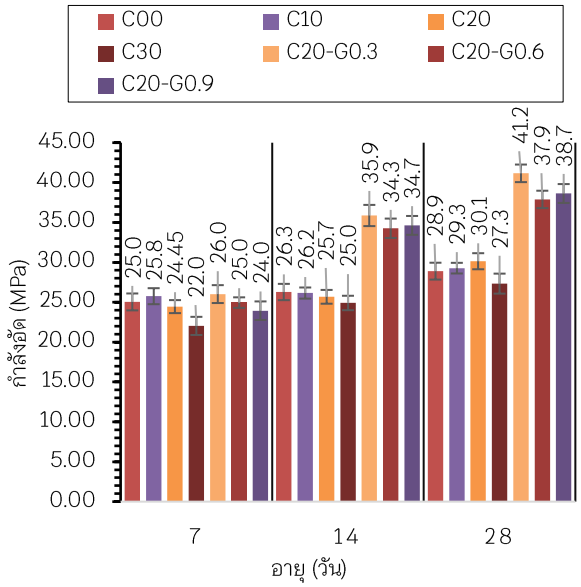
เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการไหลของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดที่มีกำลังสูงสุด(ส่วนผสมที่แทนที่ 20%) และ GQDs พบว่า C20-G0.9 มีความสามารถในการไหลมากที่สุดที่ 117% กล่าวได้ว่าการใส่ GQDs ที่มีสัดส่วนมากขึ้น ทำให้สมบัติการไหลเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ของ GQDs เมื่อถูกเติมลงในมอร์ตาร์



รูปที่ 4 ความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์

3.2 กำลังอัด (Compressive strength)

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดและใส่ GQDs ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการทดสอบพบว่า C20 ที่ 28 วันมีกำลังอัดเป็น 30.1 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 4.3% เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (C00) ซึ่งสาเหตุหลักเกิดมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าข้าวโพดที่ช่วยส่งเสริมการเกิดเจล C-S-H ที่เพิ่มขึ้น



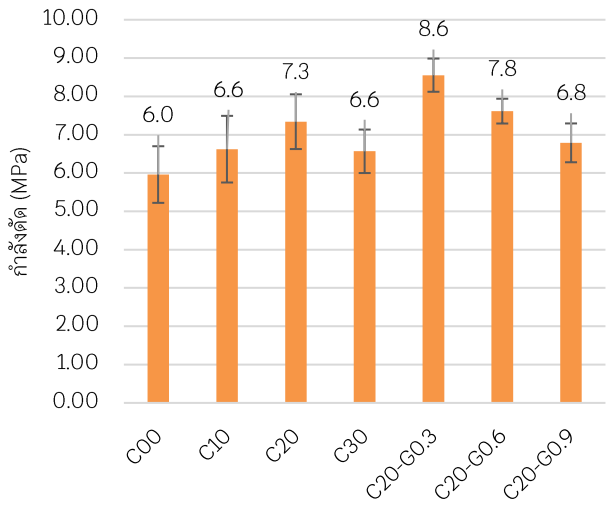
รูปที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์

นอกจากนี้การเติม GQDs ยังช่วยเพิ่มกำลังอัดได้มากขึ้น โดยตัวอย่าง C20-G0.3 ให้ค่ากำลังสูงสุดที่ 41.2 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 42.6% เมื่อเทียบกับ C00 แสดงให้เห็นว่าปริมาณ GQDs ที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.3% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในตัวอย่าง C20-G0.3 น่าจะเกิดจากการเร่งพัฒนากำลังในช่วงแรกของการบ่ม ซึ่งเป็นผลจากการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของ GQDs ที่ใส่ลงในมอร์ตาร์ ทำให้เกิด C-S-H มากขึ้น ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเสริมกำลังอัดของตัวอย่าง นอกจากนี้ GQDs ยังมีปฏิสัมพันธ์กับเมทริกซ์ซีเมนต์ ช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามหากเติม GQDs มากกว่า 0.3% อาจทำให้การเกิดจุดกำเนิดผลึก

(Nucleation sites) นั้นถูกปิดกั้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกยับยั้งและส่งผลให้กำลังอัดลดลง

3.3 กำลังดัด (Flexural strength)

กำลังดัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าต้นข้าวโพดและ GQDs ที่อายุ 28 วัน แสดงไว้ใน**รูปที่ 6** ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง C20 มีกำลังดัดสูงถึง 7.3 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 23.2% จากส่วนผสมควบคุม (C00) ซึ่งน่าจะเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าข้าวโพดซึ่งช่วยเพิ่มการก่อตัวของ C-S-H และ เมื่อเปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดที่มีกำลังสูงสุดและ GQDs ลงไปด้วย พบว่า C20-G0.3 นั้นมีกำลังดัดสูงถึง 8.6 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 30.3% เมื่อเทียบกับ C00 ผลที่เกิดขึ้นเกิดจากอนุพันธ์ของ GQDs ที่มีกลไกคล้ายการเสริมไมโครไฟเบอร์ จึงช่วยเพิ่มกำลังดัด แต่อย่างไรก็ตามการเติม GQDs เกิน 0.3% โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังดัดนั้นลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการอุดตันของตำแหน่งนิวเคลียสที่ไปยับยั้งกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



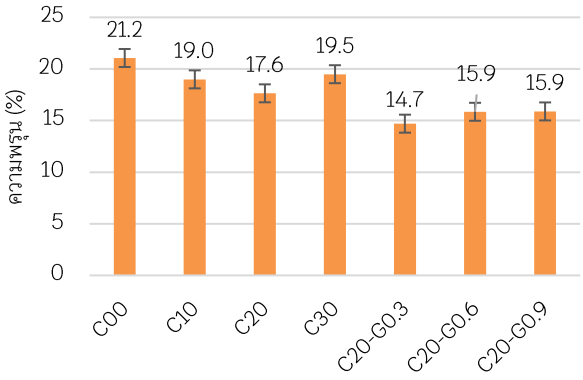
รูปที่ 6 กำลังดัดของมอร์ตาร์

3.4 ความพรุน (Porosity)

ความพรุนของของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดและใส่ GQDS ในปริมาณที่แตกต่างกันแสดงดังใน**รูปที่ 7** จากการทดสอบพบว่าความพรุนของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดพบว่า C00 มีความพรุนมากที่สุดและ C20 มีความพรุนน้อยที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบความพรุนของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดที่มีกำลังสูงสุดและ GQDs ลงไปด้วย พบได้ว่า C20 ความพรุนมากที่สุดและ C20-G0.3 มีความพรุนน้อยที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากผลการเติมเต็มช่องว่างภายในเมทริกซ์ของซีเมนต์ ทำให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้น ในทางกลับกันการเติม GQDs เกิน 0.3% ทำให้ค่าความพรุนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกิดจากการกักเก็บฟองอากาศภายใน ทำให้รูพรุนโดยรวมเพิ่มขึ้น

ความพรุนของมอร์ตาร์มีความเชื่อมโยงกับความแข็งแรงหรือกำลังอัดของมอร์ตาร์ หากมอร์ตาร์มีความพรุนต่ำ อันเกิดมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในระบบวัสดุประสาน ซึ่งช่วยสร้างเจล C-S-H มากขึ้นส่งผลให้เนื้อมอร์ตาร์มีความแน่นมากขึ้น กำลังของมอร์ตาร์จะสูงขึ้น จึงสามารถคาดคะเนสมบัติเชิงกลประการหนึ่งคือกำลังของมอร์ตาร์ได้ว่า C20 มีกำลังสูงสุดสำหรับมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดและ C20-G0.3 มีกำลังสูงสุดสำหรับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าข้าวโพดและใส่ GQDs ลงไปด้วย



รูปที่ 7 ความพรุนของมอร์ตาร์

3.5 วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

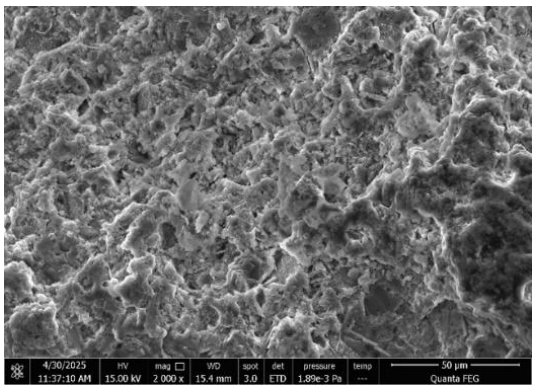
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมอร์ตาร์ C00, C20, C20-G0.3 และ C20-G0.6 แสดงไว้ใน**รูปที่ 8** โดยเมื่อพิจารณา**รูปที่ 8 (ค)** ซึ่งเป็นมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าข้าวโพดแทนที่ปูนซีเมนต์ 20% และผสม GQDs ในปริมาณ 0.3% เปรียบเทียบกับ**รูปที่ 8 (ก) และ 8 (ข)** จะพบว่ามีการก่อตัวของผลึกเพิ่มเติม ส่งผลให้ช่องว่างในเนื้อมอร์ตาร์ถูกเติมเต็มอย่างเหมาะสมด้วยเจล C-S-H และผลึกที่เกิดจากการเติม GQDs ซึ่งช่วยเพิ่มความทนทานและกำลังของมอร์ตาร์ได้ดีกว่าตัวอย่างควบคุม อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ GQDs เป็น 0.6% ดังแสดงในรูปที่ **8 (ง)** จะเห็นได้ว่าเมทริกซ์มีความพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

3.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

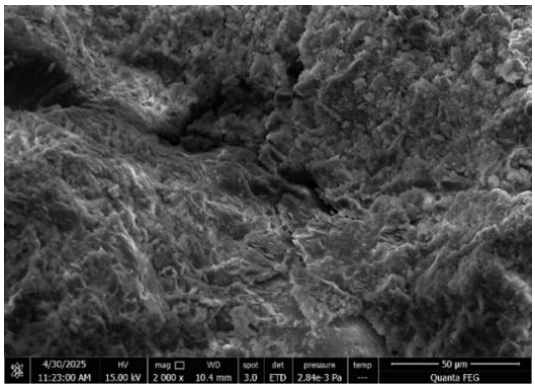
รูปที่ 9 และ 10 แสดงปริมาณการปล่อยคาร์บอนสะสมทั้งหมด (Total Embodied Carbon Emissions) และประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมต่อกำลังอัด (Eco-strength Efficiency) ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าข้าวโพดเป็นวัสดุทดแทนบางส่วนของสารยึดเกาะในซีเมนต์ ช่วยลดปริมาณคาร์บอนสะสมทั้งหมด เนื่องการมีการใช้ปูนซีเมนต์ที่ลดลง ในขณะเดียวกันการเติม GQDs ซึ่งเป็นวัสดุที่ช่วยดูดซับคาร์บอนก็ช่วยลดปริมาณคาร์บอนสะสมลงเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาในด้านสมบัติเชิงกลและผลกระต่อสิ่งแวดล้อม (**รูปที่ 10**) พบว่า C20-G0.3 มีค่าประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมต่อกำลังอัดสูงกว่าค่าควบคุมถึง 81.7% ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า C20 - G0.3 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในด้านสมบัติเชิงกลและความ

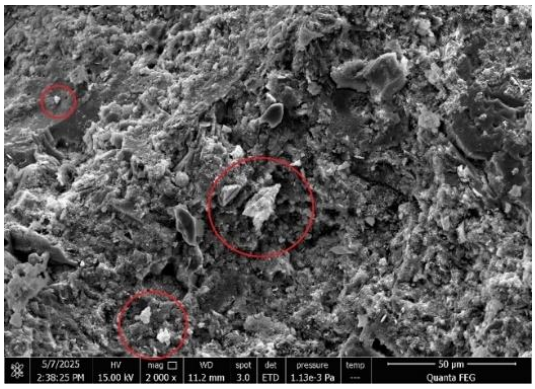
ยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งแนวทางนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการใช้งานจริง



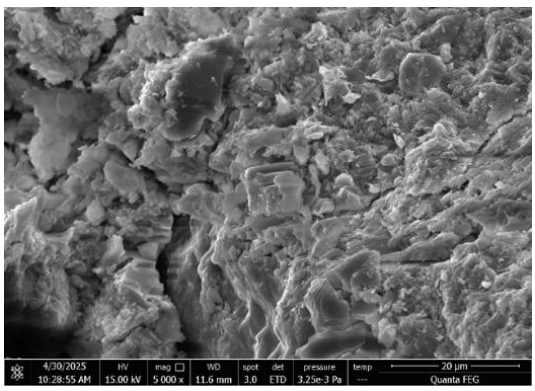
(ก) C00



(ข) C20

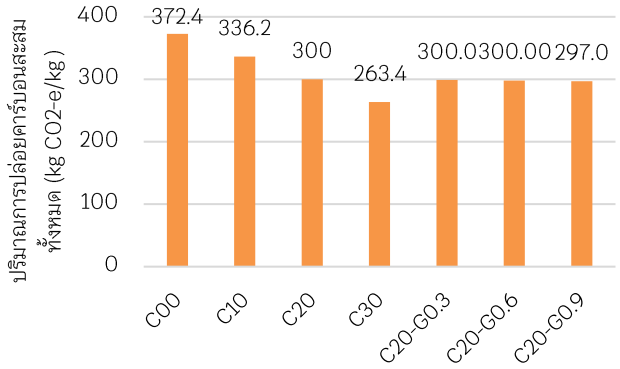


(ค) C20-G0.3

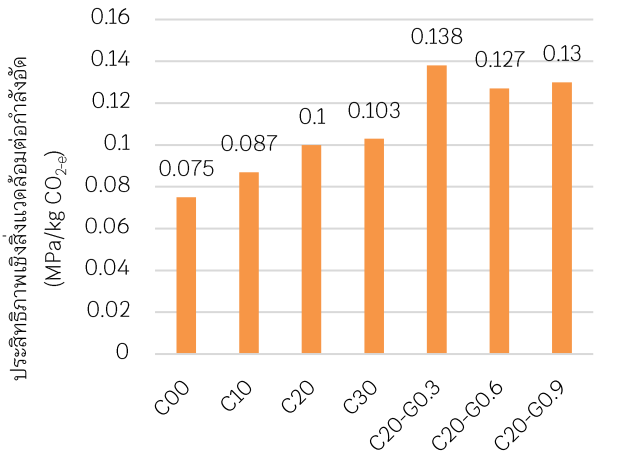


(ง) C20-G0.6

รูปที่ 8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมอร์ตาร์



รูปที่ 9 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนสะสมทั้งหมด



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมต่อกำลังอัด

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้เถ้าข้าวโพดจากโรงไฟฟ้าชีวมวลเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน (0%, 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก) และผลของการเติมกราฟีนควอนตัมดอท (GQDs) ในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าข้าวโพดทดแทน 20% ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้กำลังสูงสุด โดยเติมในปริมาณ 0.3%, 0.6% และ 0.9% โดยน้ำหนัก เพื่อประเมินสมบัติการไหล กำลังอัด กำลังดัด ความพรุน โครงสร้างจุลภาค และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สรุปผลได้ดังนี้

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพดทำให้สมบัติการไหลลดลง ขณะที่การเติม GQDs ส่งผลให้สมบัติการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติชอบน้ำของ GQDs

มอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าข้าวโพด 20% มีค่ากำลังอัดสูงกว่าควบคุมเล็กน้อย โดยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม GQDs 0.3% ซึ่งช่วยเร่งการเกิดเจล C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อย่างไรก็ตาม การเติม GQDs มากเกินไปจะลดกำลังอัดเนื่องจากอาจรบกวนการเกิดจุดนิวเคลียส

การแทนที่ด้วยเถ้าข้าวโพด 20% และเติม GQDs 0.3% ให้ค่ากำลังดัดสูงสุด เพิ่มขึ้น 30.3% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม GQDs

มีบทบาทคล้ายไมโครไฟเบอร์ในการเพิ่มกำลังดัด อย่างไรก็ตาม ปริมาณเกิน 0.3% ส่งผลให้ค่ากำลังลดลง

ความพรุนลดลงชัดเจนเมื่อใช้เถ้าข้าวโพด 20% ร่วมกับ GQDs 0.3% ซึ่งช่วยเติมเต็มโพรงในเมทริกซ์ซีเมนต์ ทำให้เนื้อวัสดุหนาแน่นขึ้น ในขณะที่การเติม GQDs ในปริมาณสูงกว่านี้จะทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกักเก็บฟองอากาศ

การใช้เถ้าข้าวโพดร่วมกับ GQDs 0.3% ช่วยเสริมการก่อตัวของเจล C-S-H และผลึกอื่น ๆ ภายในโพรง ส่งผลให้โครงสร้างแน่นและมีความทนทานมากขึ้น ส่วนการใช้ GQDs เกิน 0.3% ส่งผลให้โครงสร้างมีรูพรุนมากขึ้น สอดคล้องกับผลด้านกำลังและความพรุน

ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าข้าวโพด 20% และเติม GQDs 0.3% ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมต่อกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 81.7% แสดงให้เห็นว่าเป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างมอร์ตาร์ที่ทั้งแข็งแรงและยั่งยืนต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารอ้างอิง

[1] Vijayavenkataraman S. Iniyan S. & Goic R. (2012). A review of climate change mitigation and adaptation. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16 Issue 1 pp. 878–897). https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009

[2] Zhijun He. Xiaodong Zhu. Junjie Wang. Mulan Mu. and Yuli Wange. (2019). Comparison of CO2 emissions from OPC and recycled cement production. Case studies in *Construction and Building Materials.*

[3] Dixit, A., Geng, G., Du, H., & Pang, S. D. (2022). The role of age on carbon sequestration and strength development in blended cement mixes. *Cement and Concrete Composites*, 133. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104644

[4] M. Glavind (2009). Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction. Case study in *Sustainability of Construction Materials* (pp. 120-147).

[5] Malhotra, V M (2007), 'Global warming and sustainability issues related to concrete technology', in *Proceedings of the International Conference on Sustainability in the Cement and Concrete Industry*, pp. 17–27.

[6] Saikia, S. K., & Rajput, A. S. (2024). Effect of carbon sequestration methods on uptake potential and characteristics of ordinary portland cement-based concrete. *Construction and Building Materials*, 418. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135330

[7] Salem S. Hamdy Y. Abdelraouf E. S. & Shazly M. (2022). Towards sustainable concrete: Cement replacement using Egyptian cornstalk ash. Case Studies in *Construction Materials 17.* https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01193

[8] Qu, H., Qian, S., Liu, X., Gao, R., Wang, Z., Zheng, C., & Zhang, Z. (2022). Carbon dots as a superior building nanomaterial for enhancing the mechanical properties of cement-based composites. *Journal of Building Engineering*, 52. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104523

[9] Win, T. T., Prasittisopin, L., Nganglumpoon, R., Pinthong, P., Watmanee, S., Tolek, W., & Panpranot, J. (2024). Innovative GQDs and supra-GQDs assemblies for developing high strength and conductive cement composites. *Construction and Building Materials*, 421. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135693

[10] Long, W. J., Liu, J. W., & He, C. (2023). A facile approach to disperse metakaolin for promoting compressive strength of cement composites. *Construction and Building Materials*, 404. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133268

[11] Liu, C., Huang, X., Wu, Y. Y., Deng, X., & Zheng, Z. (2021). The effect of graphene oxide on the mechanical properties, impermeability and corrosion resistance of cement mortar containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 288. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123059

[12] ASTM. (2005). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a material admixture in concrete. ASTM C618-05. Annual Book of ASTM

[13] ASTM International. (2007). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar (ASTM C1437).

[14] ASTM International. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) (ASTM C109/C109M).

[15] ASTM International. (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars (ASTM C348)."

[16] ASTM International. (2013). Standard Test Method for Density Absorption and Voids in Hardened Concrete (ASTM C642).

[17] Thai Cement Manufacturers Association, Hydraulic Cement: a Low Carbon Cement Product to Reduces Greenhouse Gas, Https://Www.Thaicma.or.Th/En/Environ mentally/Environment/Environmentally_friendly_cement _products (2024)

[18] Abubakar, A., Mohammed, A., & Samson, D. (2021). Assessment of embodied energy and carbon IV oxide emission of concrete containing corncob ash. Int J Sustain Green Energy, 10, 76-84.

[20] Grist, E. R., Paine, K. A., Heath, A., Norman, J., & Pinder, H. (2015). The environmental credentials of hydraulic limepozzolan concretes. Journal of Cleaner production, 93, 26-37.

[21] Borthakur, P., Darabdhara, G., Duarah, R., & Das, M. R. (2024). Graphene quantum dots in environmental pollution control. In *Nanomaterials in Environmental Analysis* (pp. 79–107). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820643-0.00007-9

[22] Kaur, M., Kaur, M., & Sharma, V. K. (2018). Nitrogen-doped graphene and graphene quantum dots: A review onsynthesis and applications in energy, sensors and environment. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 259, pp. 44–64). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.07.001

[23] Luca Lavagna and Roberto Nisticò (2022). An Insight into the Chemistry of Cement. Cement Research 5. https://www.researchgate.net/publication/366618423_An_Insight_into_the_Chemistry_of_Cement-A_Review

[24] Tabish, T. A., & Zhang, S. (2019). Graphene quantum dots: Syntheses, properties, and biological applications. In *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology* (Vols. 1–5, pp. 171–192). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04133-3

[25] Tshangana, C. S., Muleja, A. A., Kuvarega, A. T., Malefetse, T. J., & Mamba, B. B. (2021). The applications of graphene oxide quantum dots in the removal of emerging pollutants in water: An overview. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 43). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102249

[26] Zhang, H., Kang, S., Wang, G., Zhang, Y., & Zhao, H. (2016). Fluorescence Determination of Nitrite in Water Using Prawn-Shell Derived Nitrogen-Doped Carbon Nanodots as Fluorophores. *ACS Sensors*, 1(7), 875–881. https://doi.org/10.1021/acssensors.6b00269