

IMAGE-BASED EVALUATION OF CO₂ UPTAKE IN MORTAR UNDER ACCELERATED CARBONATION

การประเมินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์โดยใช้การวิเคราะห์ภาพ

ภาณุต์ ปุ๋ย¹, พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง², ธวัช สุริวงษ์³, ปาณิสรา ดีเสื่อ⁴, ปัญชน ต่อกิตติกุล⁵, วัชรพงษ์ วงศ์เขียว⁶,
ทนงศักดิ์ โนไชยา^{7*}

^{1*} นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

² รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ รองศาสตราจารย์, วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร

⁴ นักวิทยาศาสตร์, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

⁵ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

⁶ รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

⁷ รองศาสตราจารย์, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ARTICLE INFO:

Received: 18 November 2025

Received Revised Form: 25 February 2026

Accepted: 1 April 2026

ABSTRACT :

The carbonation process in cement-based materials has received increasing attention due to its potential for capturing carbon dioxide and supporting the development of carbon-negative concrete in the future. Traditional evaluation methods, which typically rely on spraying phenolphthalein solution and measuring the depth of the color change, often encounter inaccuracies—particularly when CO₂ absorption occurs unevenly across the specimen surface. This study aims to apply an image-based analysis technique to evaluate the carbon dioxide uptake of mortar under accelerated carbonation conditions, thereby enhancing the accuracy of quantitative assessment. Mortar specimens were prepared with water-to-cement ratios (w/c) of 0.35, 0.50, and 0.65, and the effects of replacing 20% by weight of cement with metakaolin and calcined clay were also examined. The specimens were cured in a sealed chamber containing 40% CO₂ by volume for 7, 14, and 28 days. After curing, carbonation degrees were quantified using the image-based analysis technique. The results indicated that mortars with higher water-to-cement ratios exhibited substantially greater CO₂ uptake. Additionally, cement replacement with calcined clay provided carbonation performance comparable to the control mortar, whereas metakaolin resulted in reduced CO₂ uptake. A comparison between the depth-measurement method and image-based analysis revealed consistent trends, with the image-based approach capable of evaluating both uniform and non-uniform carbonation patterns. Overall, the findings confirm that image-based analysis is an effective and reliable technique for assessing the CO₂ uptake of mortar.

**Corresponding Author,
Email address:
thanongsakno@nu.ac.th*

KEYWORDS : Image processing technique, CO₂ uptake, Water-to-cement ratio, Metakaolin, Calcined clay

บทคัดย่อ :

การศึกษากระบวนการเกิดคาร์บอนเนชันของวัสดุปูนซีเมนต์ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการเป็นการเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสนับสนุนแนวคิดคอนกรีตคาร์บอนต่ำ (carbon-negative concrete) ในอนาคต อย่างไรก็ตามวิธีการประเมินการเกิดคาร์บอนเนชันแบบดั้งเดิมด้วยการฉีดพ่นสารละลายฟีนอล์ฟทาลินและวัดระยะลึกของสีที่เปลี่ยนแปลงไป มักประสบปัญหาความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะในกรณีที่มีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอทุกด้านของชิ้นงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image-Based Analysis) สำหรับประเมินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์ภายใต้สภาวะเร่งการเกิดคาร์บอนเนชัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์เชิงปริมาณให้มีความแม่นยำ โดยมีมอร์ตาร์ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.35, 0.50 และ 0.65 นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ด้วยดินขาวเผาและดินเหนียวเผา ชิ้นงานถูกบ่มในถังปิดที่มีก๊าซ CO₂ ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยปริมาตร เป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน หลังการบ่มชิ้นงานจะถูกประเมินการเกิดคาร์บอนเนชันด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพเพื่อคำนวณระดับการเกิดคาร์บอนเนชัน ผลการศึกษาพบว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเหนียวเผาไม่เสถียรภาพของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม ขณะที่ดินขาวเผาส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง นอกจากนี้การเปรียบเทียบผลการประเมินระหว่างวิธีการวัดระยะลึกและการวิเคราะห์ภาพแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพสามารถประเมินชิ้นงานที่เกิดคาร์บอนเนชันทั้งในรูปแบบที่มีความสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การศึกษายังยืนยันว่าเทคนิคการวิเคราะห์ภาพเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ สำหรับใช้ในการประเมินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์

คำสำคัญ : เทคนิคการประมวลผลภาพ, การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์, อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, ดินขาวเผา, ดินเหนียวเผา

1. บทนำ

อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีตเป็นหนึ่งในแหล่งผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อย่างมากของโลก โดยคิดเป็นประมาณ 7-8% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก [1-2] ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการให้ความสำคัญอย่างมากต่อเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage: CCS) รวมถึงกระบวนการคาร์บอนเนชันตามธรรมชาติในวัสดุปูนซีเมนต์ ซึ่งถือเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต โดยกระบวนการคาร์บอนเนชันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง CO₂ กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ก่อให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีต โดยสามารถช่วยทำให้

โครงสร้างเนื้อวัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ขณะที่ในบางสภาวะอาจทำให้ความเปราะบางลดลงและส่งผลต่อความทนทานของเหล็กเสริมภายใน อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวยังถือเป็นกลไกสำคัญในการกักเก็บ CO₂ ในโครงสร้างคอนกรีตอีกด้วย [3]

มอร์ตาร์เป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุตัวแทนของระบบซีเมนต์ในการศึกษากระบวนการเกิดคาร์บอนเนชัน เนื่องจากมีโครงสร้างสม่ำเสมอและสามารถควบคุมอัตราส่วนผสมได้ พฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์ได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัยสำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ประเภทและปริมาณของวัสดุปอซโซลานเสริม (Supplementary Cementitious Materials; SCMs) รวมถึงโครงสร้างรูพรุนของวัสดุ ซึ่งเป็นตัวกำหนดกลไกการแพร่ผ่านของ CO₂ ภายในเนื้อวัสดุ ปัจจัย

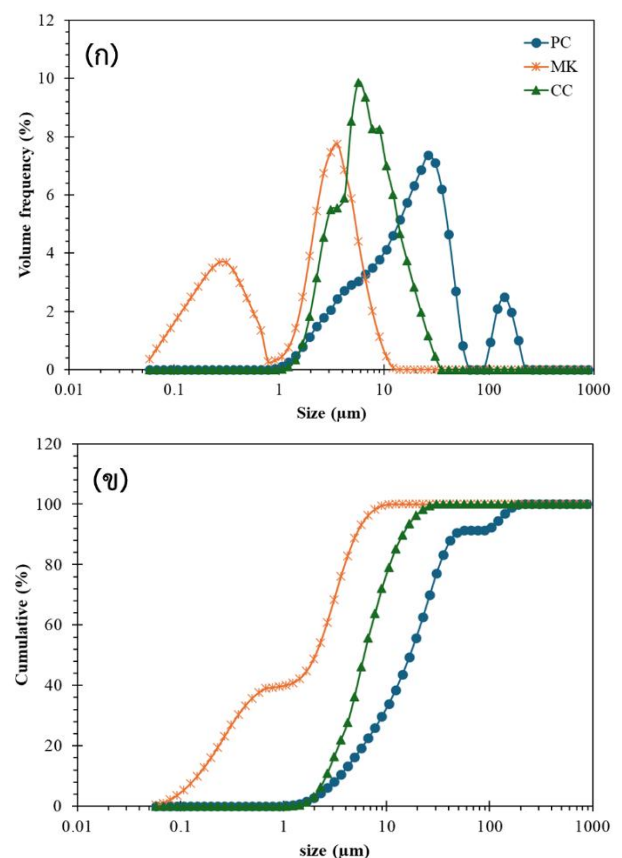
เหล่านี้สามารถส่งผลกระทบและมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์โดยรวม งานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า อายุของมอร์ตาร์มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดคาร์บอนเนชัน โดยมอร์ตาร์ที่มีอายุน้อยมักเกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนเนชันได้ช้ากว่า ในขณะที่ความลึกและอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและความเข้มข้นของ CO_2 ที่ใช้ในการบ่ม [4] นอกจากนี้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงขึ้นยังส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการกระคายเคืองของการเกิดคาร์บอนเนชันและยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติระดับจุลภาคของเนื้อซีเมนต์อีกด้วย แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของรูพรุนขนาดใหญ่ก็ตาม [5] สำหรับซีเมนต์ที่มีเฟสเบสไลต์เป็นองค์ประกอบหลัก การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ภายใต้การบ่มด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเร่งพบว่าทำให้เกิดการดูดซับ CO_2 สูงขึ้น มีการก่อตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เด่นชัดมากขึ้น และการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนที่ละเอียดขึ้น [6] ในส่วนของการใช้วัสดุปอซโซลานเสริม หรือ SCMs มีรายงานว่าสารเติมแต่งบางชนิด เช่น เถ้าลอย (fly ash; FA) สามารถเพิ่มความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชันและความสามารถในการดักจับ CO_2 ได้ ในขณะที่ตะกั่วเตาหลอมเหล็กบดละเอียด (ground granulated blast-furnace slag; GGBS) ให้ผลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่ต่ำกว่า [7] อย่างไรก็ตาม วิธีการประเมินการเกิดคาร์บอนเนชันแบบดั้งเดิมที่ใช้การฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอินลงบนผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้มาตรฐานสำหรับการวัดความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชันในซีเมนต์ เนื่องจากสีที่เกิดขึ้นเกิดจากมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) แตกต่างกันที่เกิดจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ การวัดความลึกของการเปลี่ยนสีจึงขึ้นอยู่กับการพิจารณาของผู้ทดสอบ ทำให้ผลการประเมินมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ จากข้อจำกัดดังกล่าวงานวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการใช้วิธีการประเมินเสริมที่สามารถให้ผลเชิงปริมาณได้อย่างแม่นยำมากขึ้น เช่นการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image-based analysis) ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถระบุและคำนวณพื้นที่ที่เกิดและไม่เกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนเนชันบนผิวหน้าที่หักของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพภายใต้สภาวะเร่งการเกิดคาร์บอนเนชัน โดยศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวเผาและดินเหนียวเผา เพื่อวิเคราะห์ผลขององค์ประกอบส่วนผสมต่อพฤติกรรมการดูดซับ CO_2 ผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุปูนซีเมนต์ ให้ได้ค่าที่ชัดเจนและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเตรียมชิ้นงาน

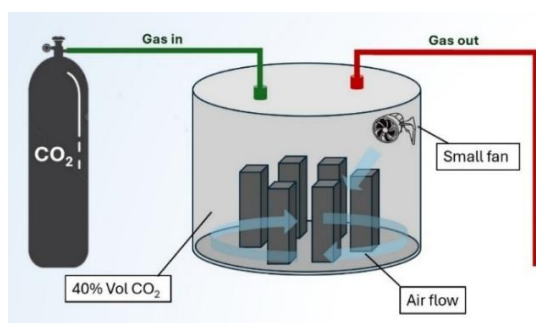
งานวิจัยนี้เตรียมชิ้นงานมอร์ตาร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดินขาวเผา (Metakaolin, MK; จากบริษัท Anpeak Specialty Minerals Co., Ltd.) และดินเหนียวเผา (Calcined clay, CC) ที่ผ่านการเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนปูนต่อทรายคงที่ เท่ากับ 1 ต่อ 2.4 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่ปรับจากมาตรฐาน ASTM C109/C109M [15] (อัตราส่วน 1:2.75) เป็นการเพิ่มสัดส่วนซีเมนต์เพสต์ในเนื้อมอร์ตาร์ (เพื่อให้เห็นบริเวณการเกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนเนชันและการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์ชัดเจนขึ้น) และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.35, 0.50 และ 0.65 เพื่อศึกษาผลของปริมาณน้ำต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน นอกจากนี้ยังได้ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ด้วยดินขาวเผา และดินเหนียวเผา เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์ผสมวัสดุเสริม โดยผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction, LD) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดินขาวเผา และดินเหนียวเผา ดังแสดงรูปที่ 1



Sample	Particle size (µm)			
	D10	D50	D90	D[4,3]
PC	3.48	16.81	46.01	27.05
MK	0.15	2.03	5.06	2.24
CC	2.58	6.04	14.32	7.45

รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดินขาวเผา และดินเหนียวเผา (ก) การกระจายขนาดอนุภาค และ (ข) ขนาดอนุภาคร้อยละสะสม

ชิ้นงานมอร์ตาร์ถูกเตรียมขึ้นด้วยแบบหล่อขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร (ตามมาตรฐานของ EN 196-1 [16]) หลังการขึ้นรูปแล้วจะปิดผิวชิ้นงานด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำเร็วเกินไป จากนั้นนำชิ้นงานบ่มที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 5 %) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนถอดออกจากแบบ ชิ้นงานที่ถอดแบบแล้วถูกพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 วัน ในการทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ชิ้นงานจะถูกวางในแนวตั้งในถังบ่มแบบปิดมีปริมาตรคงที่ 44 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 27 ± 2 °C และมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 เพื่อเร่งการปฏิกิริยาการบ่มเนชัน โดยกำหนดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 40 โดยปริมาตร (ซึ่งถูกกำหนดขึ้นจากการออกแบบการทดลอง โดยปรับแนวทางจากงานวิจัยก่อนหน้า [5,18] เพื่อให้สอดคล้องกับระบบจำลองของงานวิจัยนี้ ให้เกิดสภาวะการเร่งปฏิกิริยาการบ่มเนชันในระดับที่สามารถสังเกตและวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนภายในช่วงเวลาทดสอบ) โดยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกควบคุมด้วยวิธีการคำนวณจากอัตราการไหลของก๊าซ (flow rate) และปริมาตรถังบ่ม ทำการปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลคงที่ และจับเวลาการปล่อยก๊าซ จนกระทั่งปริมาตรก๊าซสะสมคิดเป็นร้อยละ 40 ของปริมาตรถัง จากนั้นจึงปิดระบบการจ่ายก๊าซทันที ความชื้นสัมพัทธ์ภายในถังบ่มถูกตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นในตอนเริ่มต้น มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 เจือจางดังกล่าวถูกใช้เหมือนกันสำหรับตัวอย่างทุกชุด ชิ้นงานถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงระบบการบ่มชิ้นงานภายใต้สภาวะเร่งการเกิดคาร์บอนเนชัน

สำหรับแต่ละส่วนผสม กำหนดให้ชิ้นงานมอร์ตาร์จำนวน 1 ชิ้นต่อช่วงเวลาการทดสอบ เมื่อครบระยะเวลาการบ่ม ชิ้นงานแต่ละก้อนจะถูกหักทุกกระยะ 40 มิลลิเมตรแบ่งออกเป็นสามส่วนเพื่อเปิดหน้าตัด จากนั้นฉีดพ่นสารละลายฟีนอล์ฟทาเลินความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (เตรียมสารละลายตามแนวทางของ RILEM CPC-18 [17]) ลงบนผิวหน้าหัก เพื่อประเมินความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชัน โดยความเข้มข้นดังกล่าวเหมาะสมต่อการแสดงการเปลี่ยนสีของชิ้นงานมอร์ตาร์แยกบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชัน (ไม่มีสี) ออกจากบริเวณที่ยังไม่เกิดคาร์บอนเนชัน (มีสีชมพู) ซึ่งหน้าตัดจากรอยหักชิ้นงานทั้ง 3 ตำแหน่งจะถูกใช้เพื่อหาค่าเฉลี่ยผลการทดสอบของชิ้นงานนั้น

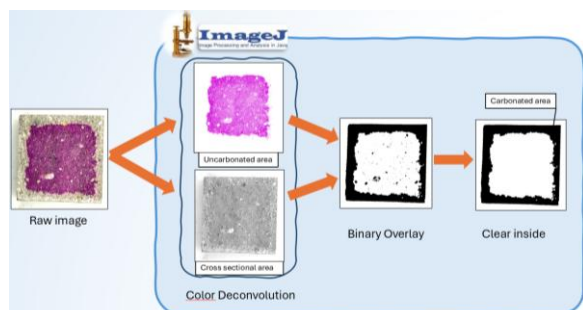
2.2 การวิเคราะห์พื้นที่การดูดซับคาร์บอน

ในการประมวลผลภาพโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image-based analysis) เพื่อคำนวณสัดส่วนพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชัน โดยอาศัยการแยกค่าความเข้มของสี (Thresholding technique) เพื่อระบุขอบเขตของพื้นที่ที่เกิดและไม่เกิดปฏิกิริยาการบ่มเนชัน จากนั้นจึงคำนวณปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยอ้างอิงจากสัดส่วนพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชัน ดังแสดงในรูปที่ 3

หลังจากทำการฉีดสารละลาย ฟีนอล์ฟทาเลิน (Phenolphthalein) ลงบนผิวหน้าตัดของตัวอย่างเพื่อแสดงขอบเขตของการเกิดคาร์บอนเนชันแล้ว ตัวอย่างถูกนำมาถ่ายภาพภายใต้สภาวะแสงเดียวกัน จากนั้นภาพที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ (ซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ภาพเชิงปริมาณ พัฒนาโดย National Institutes of Health (NIH), สหรัฐอเมริกา โดยใช้สำหรับการแยกขอบเขตระหว่างบริเวณที่เกิดและไม่เกิดปฏิกิริยาการบ่มเนชัน) ในขั้นตอนการประมวลผลภาพภาพตัวอย่างจะถูกประมวลผลโดยใช้เทคนิค Color Deconvolution เพื่อแยกเฉดสีภายในภาพ โดยกำหนดให้บริเวณที่มีสีเทา แทนพื้นที่พื้นผิวของตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยากระบวนการคาร์บอนเนชัน ส่วนพื้นที่ที่ปรากฏเป็นสีชมพู-ม่วง แทนบริเวณที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาการบ่มเนชันอย่างชัดเจน หลังจากการแยกสี จะทำการสร้าง Binary overlay เพื่อเปลี่ยนภาพให้เป็นข้อมูลแบบสองค่า (สีขาว-ดำ) ช่วยให้เราสามารถจำแนกขอบเขตของพื้นที่คาร์บอนเนชันได้อย่างแม่นยำมากขึ้น จากนั้นทำการประเมินขอบเขตรูปร่างโดยรวมของตัวอย่าง และใช้ในการคำนวณสัดส่วนของพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชันเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของชิ้นงาน จากนั้นทำการคำนวณระดับคาร์บอนเนชัน (Carbonation degree) ของมอร์ตาร์ ดังแสดงในสมการ (1)

$$CD(\%) = (CA / A_{\text{total}}) \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ CD คือ Carbonation degree (%), CA คือ Carbonated area, A_{total} คือ Total cross sectional area



รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพพื้นที่เกิดคาร์บอนเนชัน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในการประเมินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ รูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายและระดับคาร์บอนเนชันของชิ้นงานมอร์ตาร์หลังจากบ่มในบรรยากาศก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นที่ร้อยละ 40 โดยปริมาตร แล้วนำมาฉีดพ่นด้วยสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน จากภาพจะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงความลึกของการดูดซับเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นจาก 7 ถึง 28 วัน โดยชิ้นงาน PC-0.65 และ 20CC-0.65 แสดงพื้นที่การดูดซับสูงกว่าชิ้นงานอื่น ๆ ในทุกช่วงเวลา ในขณะที่ชิ้นงาน PC-0.50 มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ที่ระยะการบ่ม 14 วัน) และในส่วนชิ้นงาน PC-0.35 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่บ่งชี้ถึงการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทุกช่วงเวลาในการบ่ม

เมื่อพิจารณาเชิงลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image-based analysis) ตามผลการทดสอบในตารางที่ 1 จะพบผลกระทบของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันตามระยะเวลาการบ่ม โดยชิ้นงาน PC-0.35 ไม่สามารถตรวจวัดพื้นที่การดูดซับได้เลยในทุกช่วงระยะเวลาการทดสอบ ในขณะที่ชิ้นงานที่มีลักษณะใกล้เคียงกันอย่าง PC-0.50 มีแนวโน้มการดูดซับที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เริ่มจาก 0, 91 และ 203 ตารางมิลลิเมตร ในช่วงระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ นอกจากนี้ชิ้นงาน PC-0.65 มีพื้นที่การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มอย่างเห็นได้ชัด และมีค่า 630 ตารางมิลลิเมตร ที่ระยะบ่ม 28 วัน ทั้งนี้เป็นผลจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้โครงสร้างรูพรุนของมอร์ตาร์มีขนาดใหญ่และต่อเนื่องมากขึ้น ส่งเสริมการแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเนื้อวัสดุ และเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน [5, 9]

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากรูปที่ 5 เป็นกราฟเปรียบเทียบระดับคาร์บอนเนชันของชิ้นงานควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.65 เท่ากัน เทียบกับชิ้นงานที่ผสมดินขาวเผาและดินเหนียวเผาที่ช่วงเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ก็เพิ่มขึ้นตาม โดยค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ถูกตรวจพบมีค่า 39.5% และ 39.3% ในชิ้นงานมอร์ตาร์ผสมดินเหนียวเผา (CC) และมอร์ตาร์ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.65 ที่ระยะบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมดินขาวเผา (MK) มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 28.3% ที่ระยะเวลาการบ่มเดียวกัน

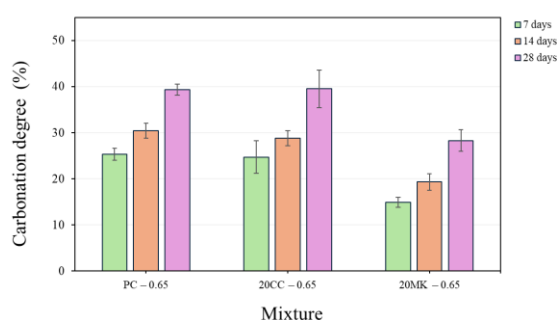
No.	7 days	14 days	28 days
PC - 0.35			
Carbonation degree (%)	0.0	0.0	0.0
PC - 0.50			
Carbonation degree (%)	0.0	5.6	12.6
PC - 0.65			
Carbonation degree (%)	25.3	30.4	39.3
20CC - 0.65			
Carbonation degree (%)	24.7	28.8	39.5
20MK - 0.65			
Carbonation degree (%)	14.9	19.3	28.3

รูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายและระดับคาร์บอนเนชันของมอร์ตาร์ที่พ่นด้วยฟีนอล์ฟทาลีน

ตารางที่ 1 ผลกระทบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่างมอร์ตาร์ตามระยะเวลาต่าง ๆ

อายุการบ่ม	ตัวอย่าง	ผิวหน้าตัด	พื้นที่คาร์บอนเนต	ระดับการ
ชิ้นงาน		ชิ้นงาน (mm ²)	(mm ²)	คาร์บอนเนชัน (%)
7 วัน	PC - 0.35	1632	0	0.0
	PC - 0.50	1617	0	0.0
	PC - 0.65	1639	415	25.3
	20CC - 0.65	1618	400	24.7
	20MK - 0.65	1625	242	14.9

อายุการบ่ม ชั้นงาน	ตัวอย่าง	ผิวหน้าตัด ชั้นงาน (mm ²)	พื้นที่คาร์บอนเนต (mm ²)	ระดับการ คาร์บอนเนชัน (%)
14 วัน	PC - 0.35	1620	0	0.0
	PC - 0.50	1633	91	5.6
	PC - 0.65	1636	498	30.4
	20CC - 0.65	1628	468	28.8
	20MK - 0.65	1624	314	19.3
28 วัน	PC - 0.35	1616	0	0.0
	PC - 0.50	1607	203	12.6
	PC - 0.65	1603	630	39.3
	20CC - 0.65	1612	637	39.5
	20MK - 0.65	1613	457	28.3



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบระดับคาร์บอนเนชันของชั้นงานมอร์ตาร์ที่ผสมดินขาวและดินเหนียวเผาที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water-to-cement ratio, w/c) มีอิทธิพลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของมอร์ตาร์ โดยเมื่อเพิ่มค่า w/c จะส่งผลให้ระดับการเกิดคาร์บอนเนชันเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากขึ้นก่อให้เกิดโครงสร้างเมทริกซ์ของซีเมนต์เพสต์ที่มีความพรุนสูง ส่งผลให้การซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เนื้อวัสดุเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น [10-11] การแพร่ผ่านของ CO₂ ภายในมอร์ตาร์จำเป็นต้องอาศัยโครงข่ายของรูพรุนและช่องว่างภายในวัสดุ ดังนั้นเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นความสามารถในการแพร่ผ่านของก๊าซจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันภายในเนื้อวัสดุในระดับที่สูงขึ้น ขณะที่เมื่อมีการทดแทนซีเมนต์ด้วยดินขาวเผา ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์กลับลดลง เนื่องจากช่องว่างถูกอุด

ด้วยอนุภาคขนาดเล็กของดินขาวเผาจากปรากฏการณ์ filler effect ร่วมกับผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction, LD) ของวัสดุตั้งต้น (รูปที่ 1) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการกระจายขนาดอนุภาคระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) ดินขาวเผา (MK) และดินเหนียวเผา (CC) โดยดินขาวเผามีขนาดอนุภาคละเอียดมากที่สุด โดยมีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า PC ประมาณ 8 เท่า จึงทำให้ดินขาวเผาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก และเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุที่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ในการสร้างผลิตภัณฑ์ยึดประสานเพิ่มเติม ส่งผลให้ปริมาณ Ca(OH)₂ ที่จะมาทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันลดลง อีกทั้งโครงสร้างที่แน่นขึ้นจากการอุดรูพรุนด้วยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะขัดขวางการแพร่ของ CO₂ เข้าไปภายในเนื้อวัสดุ [12,14] อีกทั้งดินขาวเผาเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดซับน้ำ จึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่าความพรุนลดลง อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าการใช้ดินเหนียวเผาทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถรักษาประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตาม ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทำทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

ฟีนอล์ฟทาลิน จะถูกพิจารณาจากระยะลึกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการวัดระยะลึกด้วยเครื่องมือวัดสเกล เช่น ไม้มบรรทัดหรือเวอร์เนียร์ ซึ่งวิธีดังกล่าวจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากตัวผู้ทำการวัดเอง ในภายหลังจึงมีการแก้ไขด้วยการถ่ายภาพและวัดด้วยโปรแกรมแทน โดยระยะลึกการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของชั้นงานมักถูกนำไปคำนวณหาค่า k ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพตามสมการ (2)

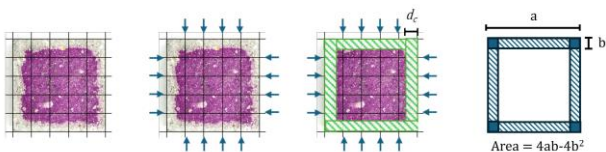
$$d_c = k \times \sqrt{t} \quad (2)$$

เมื่อ d_c คือ ความลึกของการเกิดคาร์บอนเนต (มม.), k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (มม./วัน^{0.5}), t คือ ระยะเวลาการสัมผัสคาร์บอนไดออกไซด์ (วัน)

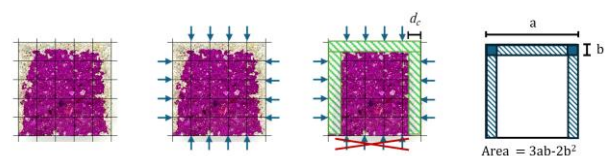
อย่างไรก็ตาม จากการคำนวณระยะลึกเฉลี่ยจากภาพถ่ายในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การดูดซับแบบสม่ำเสมอ และการดูดซับแบบไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปแล้วชั้นงานที่มีการดูด

ซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มักจะแสดงรูปแบบการซึมผ่านที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งสี่ด้าน การวัดระยะลึกเฉลี่ยจึงสามารถทำได้จากค่าระยะลึกที่วัดได้ที่เท่ากันทั้งสี่ด้านของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับกรณีที่ต้องประเมินความสามารถในการดูดซับหรือระดับการเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation degree) ระยะลึกเฉลี่ยที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาพื้นที่การดูดซับ (Carbonated area) เพื่อใช้คำนวณตามสมการ (1) สำหรับการหาค่าระดับการเกิดคาร์บอนเนชันต่อไป

ในทางกลับกัน หากชิ้นงานมีการดูดซับที่ไม่สม่ำเสมอ การหาค่าระยะลึกเฉลี่ยทำได้เพียง 3 ด้านเท่านั้น ส่งผลให้การนำค่าระยะลึกไปคำนวณพื้นที่ดูดซับจำเป็นต้องพิจารณาใหม่ โดยต้องตัดพื้นที่ด้านที่ไม่มีการเกิดคาร์บอนเนชันออก ดังแสดงในรูปที่ 7 สาเหตุของการเกิดการดูดซับไม่สม่ำเสมอมักสัมพันธ์กับกระบวนการขึ้นรูปของชิ้นงานเอง เช่น การตกตะกอนของอนุภาคปูนซีเมนต์ไปยังด้านล่างของแบบหล่อ ขณะที่ด้านบนมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานและนำไปสู่พฤติกรรมดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน ในแต่ละด้าน



รูปที่ 6 การพิจารณาพื้นที่การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระยะลึก กรณีดูดซับสม่ำเสมอทุกด้าน



รูปที่ 7 การพิจารณาพื้นที่การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระยะลึก กรณีดูดซับไม่สม่ำเสมอ

อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ต้องศึกษาความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของชิ้นงานที่แสดงความไม่สม่ำเสมอสูง การใช้เพียงระยะลึกเฉลี่ยในการคำนวณพื้นที่อาจทำให้เกิดความยุ่งยาก ไม่สะดวก และมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินสูง ซึ่งเทคนิคการประเมินด้วยภาพถ่ายจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการหาพื้นที่การเกิดคาร์บอนเนชัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระยะ 28 วัน ที่ได้จากการประเมินด้วยระยะลึกและการประเมินจากภาพถ่ายตามตารางที่ 2 พบว่าค่าระดับการเกิดคาร์บอนเนชัน มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าการใช้การวิเคราะห์พื้นที่ด้วยรูปภาพเป็นวิธีที่ช่วยลดความ

ยุ่งยากของขั้นตอนการวิเคราะห์ และลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการใช้วิธีวัดระยะลึกแบบดั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ในงานวิจัยนี้ ImageJ ถูกใช้ในการประเมินการเกิดคาร์บอนเนชันในลักษณะกึ่งอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยในอนาคตสามารถพัฒนาไปสู่การใช้การวิเคราะห์ภาพอัตโนมัติของ ImageJ เพื่อประเมินทั้งระยะลึกและพื้นที่ของบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันจากภาพหน้าตัดทั้งหมด ซึ่งจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากผู้ปฏิบัติงาน และเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการประเมินระดับคาร์บอนเนชันโดยวิธีวิเคราะห์ภาพและการวัดระยะลึก อายุการบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	พื้นที่การดูดซับ (mm ²)		ระดับคาร์บอนเนชัน (%)		ร้อยละความแตกต่าง (%)
	การวิเคราะห์ภาพ	การวัดระยะลึก	การวิเคราะห์ภาพ	การวัดระยะลึก	
PC0.50	203	182	12.6	11.3	10.8
PC0.65	630	644	39.3	40.3	2.3
20CC - 0.65	637	678	39.5	42.4	6.9
20MK - 0.65	457	481	28.3	30.1	6.1

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวและดินเหนียวเผื่อต่อพฤติกรรมดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image-Based Analysis) เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการเพิ่มความแม่นยำของการประเมินเชิงปริมาณ โดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีรูปแบบการเกิดคาร์บอนเนชันที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การประเมินด้วยวิธีการวัดระยะลึกแบบดั้งเดิมเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย การวิเคราะห์ภาพช่วยให้สามารถกำหนดพื้นที่ที่เกิดการคาร์บอนเนชันได้อย่างละเอียด ชัดเจน และสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของชิ้นงานมากขึ้น

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะแสดงแนวโน้มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม ขณะที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเหนียวเผื่อช่วยคงเสถียรภาพของค่าการดูดซับได้ดีตลอดช่วงการทดสอบ ทั้งนี้ การประยุกต์นำเทคนิคการประเมินด้วยภาพถ่ายเข้ากับการวิเคราะห์เชิง

วัสดุ ช่วยให้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือและรองรับการประเมิน กักเก็บคาร์บอนอย่างแม่นยำยิ่งขึ้นในงานวิจัยด้านวัสดุปูนซีเมนต์

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้การสนับสนุนสถานที่ และอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. M. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, no. 1, pp. 195–217, 2018.
- [2] M. Hason, A. Al-Sulttani, I. Abbood, and A. Hanoon, "Investigating carbon dioxide emissions generated by the Iraqi cement industry," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 928, no. 2, p. 022041, 2020.
- [3] Thai Cement Manufacturers Association, *Annual Sustainability Report 2022: Reducing CO₂ Emissions in the Thai Cement Industry*, Bangkok, Thailand, 2022..
- [4] Y. Wang, X. Li, and R. Liu, "The capture and transformation of carbon dioxide in concrete: A review," *Symmetry*, vol. 14, no. 12, p. 2615, 2022.
- [5] H. Mehdizadeh, X. Jia, K. Mo, and T. Ling, "Effect of water-to-cement ratio induced hydration on the accelerated carbonation of cement pastes," *Environ. Pollut.*, vol. 280, p. 116914, 2021.
- [6] S. Siddique, A. Naqi, and J. Jang, "Influence of water-to-cement ratio on CO₂ uptake capacity of belite-rich cement upon exposure to carbonation curing," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 111, p. 103616, 2020.
- [7] J. Liu, Y. Wu, F. Qu, H. Zhao, and Y. Su, "Assessment of CO₂ capture in FA/GGBS-blended cement systems: From cement paste to commercial products," *Buildings*, vol. 14, no. 1, p. 154, 2024.
- [8] O. Ahmed, S. Ahmad, and S. K. Adekunle, "Carbon dioxide sequestration in cementitious materials: A review of techniques, material performance, and environmental impact," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 83, Art. no. 102812, 2024.
- [9] C. Andrade and M. Sanjuán, "Updating carbon storage capacity of Spanish cements," *Sustainability*, vol. 10, no. 12, p. 4806, 2018.
- [10] Y. Malecot, L. Zingg, M. Briffaut, and J. Baroth, "Influence of free water on concrete triaxial behavior: The effect of porosity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 120, pp. 207–216, 2019.
- [11] A. Durekovic, "Cement pastes of low water-to-solid ratio: An investigation of the porosity characteristics under the influence of a superplasticizer and silica fume," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, pp. 365–375, 1995.
- [12] M. Bansal, A. Bahrami, B. Krishan, R. Garg, Y. Özkılıç, and E. Althaqafi, "Influence of pozzolanic addition on strength and microstructure of metakaolin-based concrete," *PLOS ONE*, vol. 19, 2024.
- [13] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2006.
- [14] D. Pinheiro, M. Sousa, F. Pelisser, J. D. S. Rego, A. Terrades, and F. Rojas, "Physical and chemical effects in blended cement pastes elaborated with calcined clay and nanosilica," *Materials*, vol. 16, no. 5, p. 1837, 2023.
- [15] ASTM International, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 - in. or [50 - mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [16] European Committee for Standardization (CEN), *Methods of Testing Cement – Part 1: Determination of Strength*, EN 196-1, Brussels, Belgium, 2016.
- [17] RILEM Technical Committee CPC-18, "Measurement of hardened concrete carbonation depth," *RILEM Recommendations*, Paris, France, 1988.
- [18] C. Lertanaporn, *Carbon Dioxide Curing of Fly Ash-Blended Mortar*, M.Eng. thesis, Dept. of Civil Engineering, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2023.