สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกากกาแฟ

Physical and Mechanical Properties of Cement Mortar mixed with Recycled Spent Coffee Grounds

กุลธิดา บรรจงศิริ และ อนัญญา ประดิษฐปรีชา*

Kultida Bunjongsiri and Anunya Pradidthaprecha*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

9/9 ม.9 ตำบลบางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120 ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : pradidthaprecha.w@gmail.com

วันที่รับบทความ: 25 กรกฎาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 16 กันยายน 2568 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 18 กันยายน 2568

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกากกาแฟ โดยนำไปแทนที่ทรายที่ร้อยละ 0 10 20 30 40 50 70 90 และ 100 โดยปริมาตร ทดสอบหาปริมาณน้ำ โดยควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน ถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ขนาด 500 เท่า เพื่อดูผลการกระจายตัวของกากกาแฟในมอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่า การนำกากกาแฟเป็นวัสดุทดแทนทรายส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟ ทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.43 ถึง 44.83 ตามลำดับ ผลการทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟมีอัตราการพัฒนาของกำลังอัดในแต่ละส่วนผสมเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.72 เมื่อผสมกากกาแฟร้อยละ 30 และเปลี่ยนแปลงลดลงร้อยละ 11.29 เมื่อผสมกากกาแฟร้อยละ 100 โดยส่วนใหญ่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง และมีการพัฒนากำลังไม่มากนัก จึงต้องมีการปรับปรุงส่วนผสมต่อไป หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับปริมาณของกากกาแฟและมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 6.51 ถึง 30.52 ตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าการกระจายตัวของกากกาแฟทั่วตัวอย่างของมอร์ตาร์เห็นเป็นเนื้อเดียวกัน

คำสำคัญ **:** มอร์ตาร์, กากกาแฟ, ทราย, กำลังรับแรงอัด

Abstract This study examined the mechanical and physical characteristics of mortar that contains coffee grounds at volume percentages of 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, and 100% in place of sand. The mortar's water content, flow, and control flow rate were tested at 110 ± 5 percent. The mortar's compressive strength was tested at 7, 14, 21, and 28 days of curing age. The effects of mixing the coffee grounds mortar were seen using a 500x Optical microscope to acquire the results. According to the test results, the combination needed more water when coffee grounds were used in place of sand. The water consumption of the mortar increased by 4.43% and 44.83%, respectively, when coffee grounds were substituted for sand. According to

the strength test results, the rate at which the compressive strength of each mixture developed rose by 5.72% when 30% coffee grounds were added, and it fell by 11.29% when 100% coffee grounds were added. Further improvement of the combination is necessary because the compressive strength tended to decline and there was little strength development. Depending on the amount of coffee grounds, the mortar's unit weight tends to reduce by 6.51 to 30.52 percent as the coffee grounds content rises. The uniform distribution of coffee grounds throughout the mortar sample was demonstrated by the Optical microscope images.

Keywords: Mortar, Coffee grounds, Sand, Compressive strength

1. บทนำ

การวิจัยและพัฒนาวัสดุก่อสร้างมีในปัจจุบันสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตด้วยการใช้วัสดุที่หมุนเวียนได้ ทำให้ลดต้นทุนการก่อสร้างไปได้มากพอสมควรและหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้เป็นวัสดุประสานหรือใช้ในการก่อฉาบ [1] จะมีส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งคือ ทราย การนำทรายจากธรรมชาติมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องทั่วโลก ซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากทรายมีที่มาจากแม่น้ำและตลิ่ง ถูกใช้เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้วยแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่นำกากกาแฟมาใช้ทดแทนทรายนี้ ทำให้สามารถกำจัดขยะอินทรีย์ได้โดยไม่ต้องฝังกลบ และยังสามารถรักษาทรัพยากรธรรมชาติของเราได้อีกทางหนึ่งด้วย [2] ซึ่งคาดการณ์ว่าปริมาณกากกาแฟที่ใช้แล้วที่ผลิตทั่วโลกอยู่ที่ 60 ล้านตัน ถือเป็นขยะที่มีมากที่สุดในการเตรียมกาแฟ และโดยปกติแล้วกากกาแฟใช้แล้วส่วนใหญ่จะมีปลายทางที่หลุมฝังกลบ [3]

กากกาแฟ (Spent Coffee Grounds; SCGs) เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการการสกัดน้ำกาแฟ โดยจากปริมาณการบริโภคกาแฟในประเทศไทย เราจะมีกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากกว่า 290,000 ตัน/ปี ในปี 2565 [4] กากกาแฟจัดเป็นของเสียชีวภาพซึ่งมีระยะเวลาในการย่อยสลายไม่แน่นอน โดยปกติจะมีระยะเวลาไม่กี่วันถึงไม่กี่เดือน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความชื้น ปริมาณจุลินทรีย์ และการนำไปจัดการ เช่น หากนำไปทำปุ๋ยหมัก จะย่อยสลายได้เร็วกว่าการนำไปทิ้งในแหล่งทิ้งขยะทั่วไปที่อาจใช้เวลาหลายเดือน [5] การจัดการกากกาแฟในอุตสาหกรรมกาแฟสำเร็จรูป จะนำกากกาแฟไปเผาเพื่อสร้างเป็นพลังงานความร้อนใช้ในกระบวนการผลิต และในภาคครัวเรือน [6] และร้านกาแฟส่วนใหญ่จะส่งกำจัด ปัจจุบันกระแสสิ่งแวดล้อมกำลังเป็นที่จับตามอง ทำให้มีการรณรงค์ลดปริมาณขยะ และ/หรือนำขยะเหล่านั้นมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่อไป กากกาแฟเองถือได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์มากมายด้วยส่วนประกอบของตัวเอง เช่น น้ำมัน เส้นใย สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงอัดแท่ง [7-8] เป็นต้น อาจจะถือได้ว่ากากกาแฟสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเลียม หรือมาจากแหล่งอาหาร ซึ่งนอกจากจะช่วยเรื่องสิ่งแวดล้อมและความมั่งคงด้านพลังงานและอาหารแล้ว ยังเป็นการลดการใช้จ่ายในการกำจัดกากกาแฟ และต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ถูกนำมาปรับใช้ในแวดวงอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น เป็นแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุดในทุกๆ กระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมการก่อสร้างให้ประสบผลสำเร็จและก้าวหน้าขึ้น เพราะมันคือ “โมเดลที่จะ

เปลี่ยนวิถีและรูปแบบการก่อสร้าง" ที่มีอยู่ในปัจจุบัน และอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติอย่างฟุ่มเฟือย และยังสร้างผลกระทบในวงกว้างให้กับโลกของเราด้วย

งานวิจัยที่ผ่านมา จากมหาวิทยาลัยในออสเตรเลียที่ค้นพบว่าการแทนที่ทรายในคอนกรีตบางส่วนด้วยกากกาแฟที่ผ่านการแปรรูปเป็นไบโอชาร์ (biochar, ถ่านชีวภาพ) สามารถเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้ ร้อยละ 30 และช่วยลดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ได้ถึง ร้อยละ 10 ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยจัดการปัญหาขยะอินทรีย์จากกากกาแฟ แต่ยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติคือทราย และส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในอุตสาหกรรมก่อสร้างอีกด้วย [9] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยยังคงขาดข้อมูลในช่วงสัดส่วนที่กว้างกว่านี้ รวมถึงการใช้งานมอร์ตาร์ประเภทอื่น ๆ ที่อาจได้รับผลกระทบจากส่วนผสมกากกาแฟแตกต่างกันไป ประกอบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกากกาแฟมาใช้ในงานก่อสร้างของประเทศไทยมีจำนวนที่น้อยมาก ผู้วิจัยจึงสนใจการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ โดยแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟที่สัดส่วนต่างๆ จาก ร้อยละ 0 ถึง 100 โดยปริมาตร

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การทดสอบในงานวิจัยนี้มีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุ การทดสอบหาผลกระทบต่างๆ ของมอร์ตาร์มาตรฐานและมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ รวมถึงการทดสอบกำลังอัด ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุ

1.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตาม มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภทหนึ่ง และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C150/C150M [10]

2.ทรายแม่น้ำ มีขนาดคละคงที่ตามมาตรฐาน ASTM C778 [11]

3.กากกาแฟที่เหลือจากกระบวนการสกัดน้ำกาแฟจากเมล็ดกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้า ร้อยละ 100 นำมาอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ นำมาคัดขนาดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C778 [11]

4.น้ำประปาจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง

2.2 อุปกรณ์

1.เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม

2.เครื่องทดสอบกำลังรับอัด (Universal Testing Machine)

3.เครื่องผสมมอร์ตาร์

4.ตะแกรงมาตรฐาน

5.แบบหล่อมอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร

6.เครื่องมือทดสอบการไหลแผ่ (Flow Test)

7.ขวดแก้วทดสอบความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ (Le Chatelier)

8.ขวดแก้วทดสอบความถ่วงจำเพาะทรายและกากกาแฟ (Volumetric Flask)

9.กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

2.3 วิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย แบ่งวิธีการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนดังนี้คือ

ส่วนที่ 1 การเตรียมวัสดุและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ

และหน่วยน้ำหนัก วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กากกาแฟที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำกาแฟจากการบริโภค นำไปอบแห้งจนน้ำหนักคงที่และนำไปคัดขนาดตามมาตรฐาน ASTM C778 [11] และทราย โดยทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ ตาม ASTM C188 [12] ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของทรายและกากกาแฟ ตามมาตรฐาน ASTM C128 [13]

ส่วนที่ 2 ทดสอบการไหลเพื่อหาความต้องการน้ำในส่วนผสมของมอร์ตาร์ การเตรียมตัวอย่างวัสดุวัตถุดิบที่นำมาศึกษาจาก กากกาแฟที่ได้นำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกและทำการทดสอบหาปริมาณน้ำโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230/C230M [14] โดยทดสอบการไหล (Flow Test) แทนที่ทรายด้วยกากกาแฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 การแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟในมอร์ตาร์สามารถทำได้ทั้งแบบแทนที่โดยน้ำหนัก (weight-based replacement) และแทนที่โดยปริมาตร (volume-based replacement) ซึ่งแต่ละวิธีมีผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์แตกต่างกัน ในการทดสอบนี้เลือกการแทนที่โดยปริมาตรเพื่อรักษาปริมาตรรวมของมอร์ตาร์ให้ใกล้เคียงกัน มีการควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ในส่วนการทดสอบนี้ทำให้ทราบปริมาณกากกาแฟกับความต้องการน้ำ เพื่อใช้ในการควบคุมความข้นเหลวของมอร์ตาร์และนำไปหล่อเป็นก้อนตัวอย่างในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดในส่วนการทดสอบต่อไป

ส่วนที่ 3 ทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [15] โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน เพื่อนำผลทดสอบมอร์ตาร์จากค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดในแต่ละอายุเพื่อติดตามการพัฒนากำลังรับแรงอัดและความสามารถในการรับแรงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ และนำตัวอย่างภายหลังจากการทดสอบไปถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) เพื่อดูการกระจายตัวของกากกาแฟในก้อนตัวอย่างของมอร์ตาร์

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ แบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ตามการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

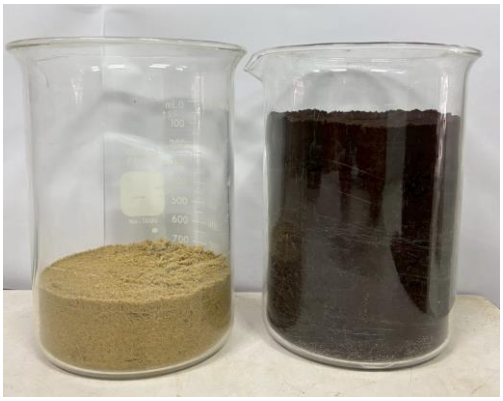
1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของปูนซีเมนต์ ได้เท่ากับ 3.15

2. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของทราย เท่ากับ 2.63 และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของทราย มีค่าเท่ากับ 1.42 เปอร์เซ็นต์

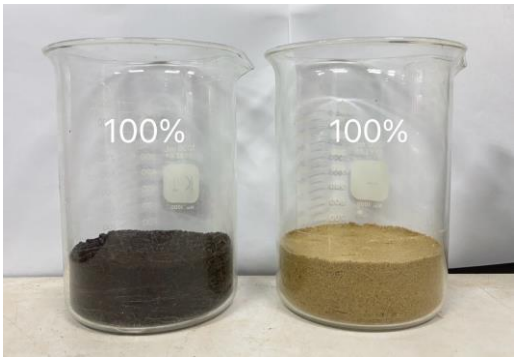
3. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของกากกาแฟ เท่ากับ 1.39

จากการทดสอบพบว่าความถ่วงจำเพาะ และปริมาตรของวัสดุ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์เมื่อมีการใช้วัสดุทดแทนทรายด้วยกากกาแฟ ซึ่งกากกาแฟมีความหนาแน่นต่ำกว่าทรายมาก จากรูปที่ 1 (ก) จะเห็นได้ว่าหากน้ำหนักของทรายเท่ากับกับกากกาแฟ มีปริมาตรแตกต่างกันอย่างมาก (ที่น้ำหนัก 300 กรัม ทรายมีปริมาตร 392.7 ลบ.ซม. กากกาแฟมีปริมาตร 863.94 ลบ.ซม.) ส่วนรูปที่ 1 (ข) ปริมาตรทรายและกากกาแฟมีปริมาตรเท่ากันจะมีน้ำหนักที่แตกต่างกัน (ที่ปริมาตร 392.7 ลบ.ซม กากกาแฟมีน้ำหนัก 128 กรัม ทรายมีน้ำหนัก 300 กรัม) และการที่กากกาแฟมีปริมาตรมากแต่น้ำหนักเบาทำให้ปริมาณของมวลรวมละเอียดมีมากทำให้ความต้องการของซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการไปยึดเพื่อสร้างการยึดเกาะตัวต้องมีปริมาณมากตามไปด้วยประกอบกับความแข็งแรงของกากกาแฟมีค่าต่ำกว่าทรายก็จะส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าน้อยตามลง

ไปด้วย ซึ่งอาจต้องไปดูการแทรกตัวของกากกาแฟในส่วนผสมของมอร์ตาร์และการกระจายตัวของกากกาแฟในตัวอย่างทดสอบเพื่อนำไปทำการถ่ายภาพขยายต่อไป



(ก) แสดงปริมาตรของทราย และกากกาแฟที่ต่างกันเมื่อมีน้ำหนัก 300 กรัม ทรายมีปริมาตร 392.7 ลบ.ซม. กากกาแฟมีปริมาตร 863.94 ลบ.ซม



(ข) แสดงน้ำหนักของทราย และกากกาแฟที่ต่างกันเมื่อมี ปริมาตร 392.7 ลบ.ซม กากกาแฟมีน้ำหนัก 128 กรัม ทรายมีน้ำหนัก 300 กรัม

รูปที่ 1 เปรียบเทียบปริมาตรและน้ำหนักตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

3.2 ผลทดสอบการไหล ตามมาตรฐาน ASTM C230/C230M

การทดสอบการไหล (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C230 แสดงในรูปที่ 2 โดยการแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 ควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 เท่ากันทุกการทดสอบ ทดสอบความสามารถในการไหลแผ่โดยใช้กรวยตัดขนาดตามมาตรฐานวางแผ่นทดสอบผิวเรียบ ทำการบรรจุมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จใหม่ๆ ลงในกรวยจนเต็ม จากนั้นทำการยกกรวยตัดขึ้นโดยปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลอย่างอิสระ ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่แผ่ออกตามมาตรฐาน ASTM C1437-07 [16] ดังรูปที่ 2 รายละเอียดของส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟแสดงดังตารางที่ 1

ผลการทดสอบพบว่า การนำกากกาแฟเป็นวัสดุทดแทนทรายที่ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน ทำให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.43, 11.33, 18.97, 27.34, 31.53, 36.94, 41.13 และ 44.83 ตามลำดับ

รูปที่ 2 ทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230

Table 1 รายละเอียดของส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ

*Coffee	Mix Proportion of Mortar (By Weight)			
Grounds	Cement	Sand	Coffee	Water
%	kg.	kg.	kg.	kg.
0	733.63	2017.48	0.00	595.71
10	733.63	1815.73	106.63	622.12
20	733.63	1613.98	213.25	663.20
30	733.63	1412.23	319.88	708.69
40	733.63	1210.49	426.51	758.57
50	733.63	1008.74	533.14	783.52
70	733.63	605.24	746.39	815.79
90	733.63	201.75	959.64	840.74
100	733.63	0.00	1066.27	862.75

*Coffee Grounds: % Replacement Sand with Coffee Grounds

จากรูปที่ 3 แสดงแผนภูมิส่วนผสมโดยปริมาตรของส่วนผสมเห็นได้จากปริมาณของน้ำที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลกระทบของกากกาแฟมีผลต่อการไหลของมอร์ตาร์จากการที่มอร์ตาร์มีความพรุนสูงจากโครงสร้างของกากกาแฟ มีการดูดซึมน้ำมาก ด้วยความหนาแน่นต่ำจากน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ดูได้จากส่วนผสมในตารางที่ 2

3.3 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

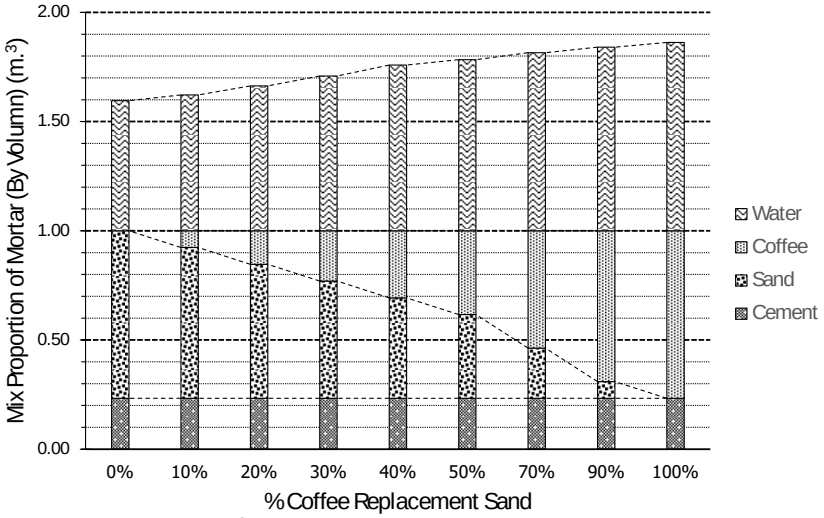
จากผลทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ตาม ASTM C109/C109M [15] แสดงดังรูปที่ 4 ทำเห็นถึงสีและการวิบัติซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่รับกำลังได้แตกต่างกัน จากการที่ผิวของกากกาแฟมีลักษณะหยาบและไม่สม่ำเสมอแรงยึดเกาะระหว่างกับซีเมนต์เพสต์กับอนุภาคของกากกาแฟมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณกากกาแฟทดแทนทรายที่เพิ่มขึ้น ส่วนหนึ่งมาจากความต้องการของซีเมนต์เพสต์เพื่อใช้ในการยึดเกาะมวลรวม จากการที่ปริมาตรเท่ากันแต่ความละเอียดไม่เท่ากันทำให้อัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรมีค่ามากขึ้น เมื่อแทนที่กากกาแฟในปริมาณที่สูงขึ้นขณะที่ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยไม่สัมพันธ์กับปริมาณมวลรวมละเอียด

ลักษณะของการวิบัติจากแรงอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเป็นการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) มากกว่าคอนกรีต เนื่องจากไม่มีมวลรวมหยาบช่วยต้านแรงดึง ความพรุนเพิ่มขึ้น แตกร้าวจากการหดตัวและการดูดซึมน้ำและกำลังอัดลดลง เมื่อใช้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นและการวิบัติจากแรงอัด [17] การยึดเกาะลดลงจากการที่ตัวอย่างหลุดล่อนหรือแตกร้าวตามแนวต่อ เมื่อสังเกตการวิบัติในรูปที่ 4 จะเห็นว่าเป็นการวิบัติแบบ Shear Cone เป็นหนึ่งในรูปแบบการพังทลายที่พบได้บ่อยในการทดสอบกำลังอัด โดยทั่วไปมีมุมอยู่ที่ประมาณ 45° การเกิด Shear Cone บ่งชี้ว่า วัสดุมีความสามารถรับแรงอัดได้ระดับหนึ่ง แต่ยังมีแนวโน้มล้มเหลวจากแรงเฉือน และการที่แรงเฉือนสูงกว่าทำให้ความสามารถของวัสดุ เกิดการลื่นไถลภายในเนื้อวัสดุ การยึดเกาะระหว่างมอร์ตาร์กับแผ่นกดไม่ดี ทำให้เกิดการลื่นและเฉือน วัสดุมีความพรุนหรือมีฟองอากาศ ลดความสามารถในการต้านแรงเฉือน ซึ่งพบได้เมื่อใช้ทดสอบแรงอัดกับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงอัดได้อย่างชัดเจน สอดคล้องกับการวิจัยของ Moussa, T. และคณะ (2024) ศึกษาความยืดหยุ่นเชิงเส้นภายใต้แรงเค้นต่ำ และเกิดการแตกหักแบบเปราะเนื่องจากกลไกการเชื่อมต่อที่อ่อนแอระหว่างวัสดุประสานและกากกาแฟ [18]

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับสัดส่วนกากกาแฟ ในรูปแบบของกราฟโมเดล Linear regression ได้สมการเชิงเส้น $y = -14.302 x + 74.129$ และ ค่า $R^2 = 0.473$ ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง ร้อยละของกากกาแฟ (x) และ กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (y) โดยมีความความชันติดลบ (-14.302) พบว่า เมื่อร้อยละของกากกาแฟเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัด

ของมอร์ตาร์จะลดลง และเมื่อพิจารณา R^2 (Coefficient of Determination) มีค่าความแปรปรวนของข้อมูลได้ประมาณร้อยละ 47.3 ซึ่งถือว่า ปานกลาง ไม่สูงมากและเมื่อพิจารณารูปแบบของกราฟโมเดล Non-linear regression จากสมการ $y = 7.5988 x^2 - 22.79 x + 75.772$ และ ค่า $R^2 = 0.4809$ พบว่ากราฟจะมีลักษณะพาราโบลาเปิดขึ้นแนวโน้มของข้อมูลเหมือนกับแบบโมเดล Linear regression ในส่วนของค่า $R^2 = 0.4809$ สูงกว่าแบบ linear เล็กน้อย แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากขึ้นเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 48.09

สีของตัวอย่างทดสอบแตกต่างกันตามปริมาณของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นทำให้สีของตัวอย่างมีความเข้มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 เห็นได้ชัดถึงสีที่มีความต่างกันในรูปที่ 4 ก และ ข ส่วนด้านความแข็งแรงก็มีกำลังลดลงตามปริมาณของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงค่าจากตารางที่ 2



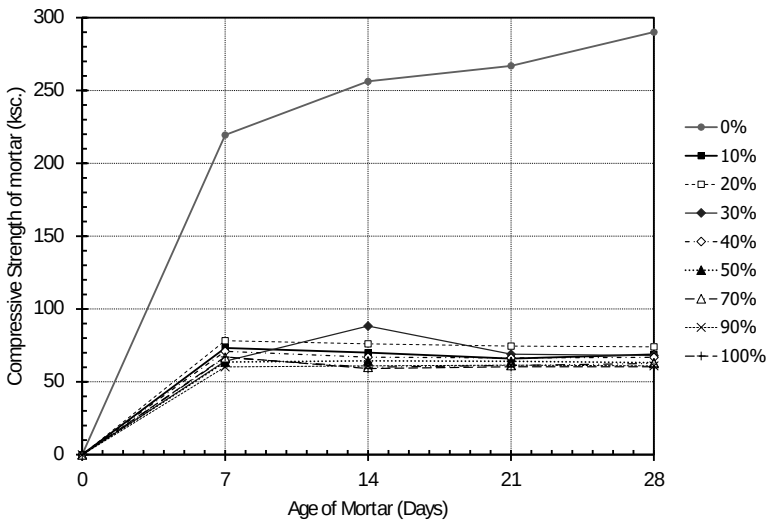
รูปที่ 3 แผนภูมิแสดงส่วนผสมโดยปริมาตรของส่วนผสม

(ก) Coffee Grounds Mortar ร้อยละ 0 (ข) Coffee Grounds Mortar ร้อยละ 100

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติด้วยกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์มาตรฐาน และมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 100

Table 2 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟที่อัตราส่วนต่าง ๆ

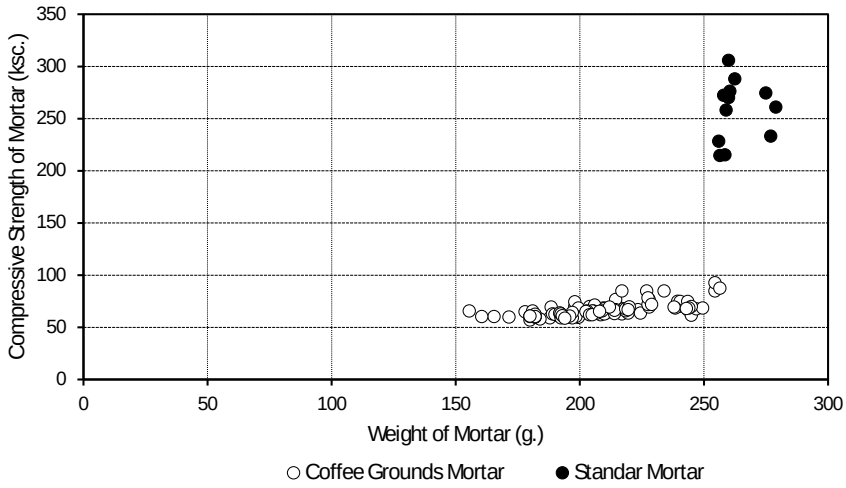
Sample No.	Coffee Grounds	% Flow	Age of Compressive strength (days)				Remark
			7 (ksc.)	14 (ksc.)	21 (ksc.)	28 (ksc.)	
M-1	0		219.44	256.26	266.88	290.07	***Standard***
M-2	10	110	73.26	70.04	65.92	68.79	
M-3	20	110	78.23	76.11	74.54	74.00	
M-4	30	110	64.17	88.33	68.97	68.07	
M-5	40	110	70.95	66.87	66.42	66.76	
M-6	50	110	63.61	64.35	64.08	63.12	
M-7	70	110	66.63	60.07	61.24	62.63	
M-8	90	110	60.18	60.90	61.47	60.91	
M-9	100	110	67.12	59.15	60.32	60.32	



รูปที่ 5 แสดงแผนภูมิการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่าง ๆ

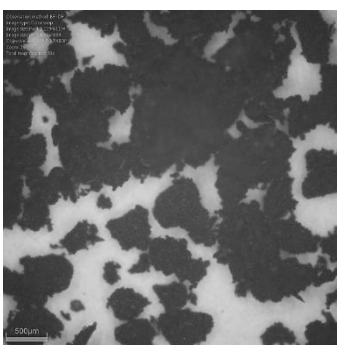
จากการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นกระบวนการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น ตามอายุการบ่ม โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในจากกากกาแฟ โดยการแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 ความแตกต่างของกำลังอัดในแต่ละส่วนผสมมีไม่มาก มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน 5.84 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 14 วัน 9.92 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 21 วัน 4.75 กก./ซม.^{2} และที่อายุ 28 วัน 4.67 กก./ซม.^{2} แสดงให้เห็นว่าปริมาณของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการรบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เป็นผลมาจากกากกาแฟสดเป็นสารอินทรีย์ สารเหล่านี้อาจเคลือบผิวของอนุภาคซีเมนต์ และ ขัดขวางการดูดน้ำ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ไม่เต็มที่ [19] ส่งผลให้เจล C-S-H ซึ่งเป็นตัวสร้างกำลังอัด เกิดขึ้นน้อยหรือไม่

ต่อเนื่อง และโพรงอากาศ (voids) หรือฟอง (air bubbles) ในเนื้อมอร์ตาร์ ลดความหนาแน่นและกำลังอัดของมอร์ตาร์จากน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ

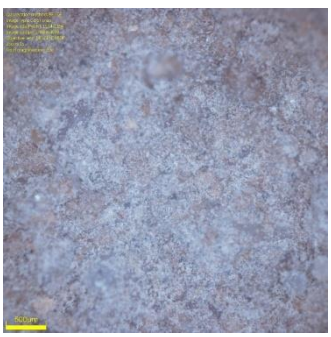


รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของมอร์ตาร์และหน่วยน้ำหนักที่ส่วนผสมต่าง ๆ

จากรูปที่ 6 เห็นได้ว่ากำลังของมอร์ตาร์มีผลต่อหน่วยน้ำหนักที่ส่วนผสมต่างๆ น้ำหนักของก้อนมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟอยู่ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 200±50 กรัม และมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 50-100 กก./ซม.^{2} ขึ้นอยู่กับปริมาณของกากกาแฟ ส่วนมอร์ตาร์มาตรฐานมีกำลังและหน่วยน้ำหนักมากกว่ามอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ และมอร์ต้ามาตรฐานจากการทดสอบมีความหนาแน่น 2,088 กก./ลบ.ม. เมื่อแทนที่กากกาแฟ ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 ตามลำดับ ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมกากกาแฟมีค่าลดลงร้อยละ 6.51, 12.64, 15.96, 20.37, 21.2, 25.93, 25.99 และ 30.52 ตามลำดับ จากการที่กากกาแฟมีน้ำหนักที่เบากว่าทราย นอกจากนั้น จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ พบว่ากากกาแฟสดเป็นขยะประเภทสารอินทรีย์จึงมีผลกับการลดความหนาแน่น และกำลังอัดของมอร์ตาร์ลง



(ก) ภาพถ่ายขยายกากกาแฟ ขนาด 500 เท่า



(ข) ภาพถ่ายขยายมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ ขนาด 500 เท่า

รูปที่ 7 ภาพถ่ายขยายมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ

จากรูปที่ 7 ผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ขนาด 500 เท่า จะเห็นได้ว่าภาพถ่ายขยายกากกาแฟ อนุภาคมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับระดับของการคั่วกาแฟ จะให้สีที่แตกต่างกัน เมื่อถ่ายขยายมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟจะเห็นถึงความแตกต่างของสีปูนซีเมนต์และสีของกากกาแฟที่กระจายไปทั่วตัวอย่างของมอร์ตาร์ แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนในการผสมกากกาแฟไม่ได้จับตัวกันหรือกระจุกตัวกันอยู่ในบริเวณใดบริเวณหนึ่งที่จะส่งผลกระทบกับความสามารถในการรับแรงอัด

4. สรุปผล

สรุปผลการทดสอบกากกาแฟเป็นวัสดุทดแทนทรายมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์อย่างชัดเจน พบว่าเมื่อแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟโดยปริมาตรจากความถ่วงจำเพาะของทรายและกากกาแฟแตกต่างกัน ส่งผลให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีการควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ลักษณะทางกายภาพของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ มีความแตกต่างจากมอร์ตาร์ทั่วไปอย่างชัดเจน เนื่องจากกากกาแฟมีคุณสมบัติที่เบา พรุน และมีพื้นผิวหยาบ ในด้านการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์มีความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มตามอายุวันในทุกส่วนผสม สำหรับมอร์ตาร์มาตรฐานมีการพัฒนาอย่างชัดเจน ส่วนความแตกต่างของกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟมีค่าแตกต่างกันไม่มาก อีกด้านหนึ่งคือผลของกำลังของมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักที่ส่วนผสมต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณของกากกาแฟ ภาพถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ทำให้เห็นกากกาแฟที่กระจายไปทั่วตัวอย่างของมอร์ตาร์จากสีที่แตกต่างกัน มอร์ตาร์เป็นเนื้อเดียวกัน ผลของกำลังรับแรงที่ลดลงมาจากความแข็งแรงที่ต่างกันของทรายและกากกาแฟ สอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นในอดีต [20-22] นอกจากนั้นกากกาแฟสามารถส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ คือองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่มีผลต่อมอร์ต้า เช่น สารอินทรีย์ (Organic compounds) อาจลดการยึดเกาะกับปูนซีเมนต์ น้ำมันและกรดไขมันอาจรบกวนการไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากการรบกวนการเกิดเจล C-S-H ของซีเมนต์ และเจล Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) นี้คือผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เป็นตัวสร้างโครงสร้างจุลภาคที่ให้กำลังอัดและความแข็งแรงแก่มอร์ตาร์และคอนกรีต รวมทั้งความชื้นและสารระเหย ถ้ากากกาแฟไม่ผ่านการอบแห้ง อาจทำให้เกิดฟองอากาศหรือโพรงในเนื้อมอร์ตาร์อีกด้วย [23]

แนวทางในการพัฒนาและใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ของกากกาแฟ เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโดยการแทนที่ทรายในมอร์ตาร์ต้องนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพแทนทรายบางส่วนในมอร์ตาร์ นอกจากนั้นยังลดน้ำหนักและเพิ่มความพรุนสำหรับวัสดุฉนวน โดยอาศัยความพรุนของกากกาแฟช่วยดูดซับเสียงและควบคุมอุณหภูมิน่าจะเป็นแนวทางที่ดีในการใช้ประโยชน์จากกากกาแฟ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ ผศ.จิรัฐิติ์ บรรจงศิริ ที่ให้การสนับสนุนการทดสอบในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Kim, J., & Lee, S., "Study of recycled spent coffee grounds as aggregates in cementitious materials," *Recent Progress in Materials*, vol.5, no.1, pp.1-23, 2023.

[2] Saberian, Mohammad, Jie Li, Anita Donnoli, Ethan Bonderenko, Paolo Oliva, Bailey Gill, Simon Lockrey, and Rafat Siddique., "Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review," *Journal of Cleaner Production,* vol.289:125837, 2021.

[3] Paul McClure, " Waste coffee grounds make concrete 30% stronger" [Online] . Available: https: / / newatlas. com/ materials/ waste- coffee-grounds-make-concrete-30-percent-stronger/.

[4] Natthaphong Tantiwattanaphan, "Coffee grounds from coffee cups to the concept of circular economy for bio-products," *Environmental Journal*, vol.23, no.1, pp.1-8, 2019 (in Thai).

[5] Bomfim, A. S. C. D., De Oliveira, D. M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneeckhaute, C., ... & Rodrigue, D., "Spent coffee grounds characterization and reuse in composting and soil amendment." *In Waste*, vol.1, no.1, pp. 2-20. MDPI, 2022.

[6] Atabani, A. E., Mercimek, S. M., Arvindnarayan, S., Shobana, S., Kumar, G., Cadir, M., & Al-Muhatseb, A. A. H., "Valorization of spent coffee grounds recycling as a potential alternative fuel resource in Turkey: An experimental study," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol.68, no.3, pp. 196-214, 2018.

[7] Mahmoud, E., Atabani, A. E., & Badruddin, I. A., " Valorization of spent coffee grounds for biogas production: A circular bioeconomy approach for a biorefinery," *Fuel*, vol. 328, 125296, 2022.

[8] Atabani, A. E., Mahmoud, E., Aslam, M., Naqvi, S. R., Juchelková, D., Bhatia, S. K., … & Palacky, P., " Emerging potential of spent coffee ground valorization for fuel pellet production in a biorefinery," *Environment, Development and Sustainability*, vol.25, no.8, pp.7585-7623, 2023.

[9] Roychand, R., Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., Zhang, G., & Li, C. Q., "Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength," *Journal of cleaner production*, vol.419, 138205, 2023.

[10] American Society for Testing and Materials, ASTM C150/C150M-17, Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standard, 2017.

[11] American Society for Testing and Materials, ASTM C778 Standard Specification for Standard Sand, Standard Specification for Standard Sand. Annual Book of ASTM Standard.

[12] American Society for Testing and Materials, ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standard.

[13] American Society for Testing and Materials, ASTM C128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standard, 2015.

[14] American Society for Testing and Materials, ASTM Standard C230/ C230M, Standard specification for flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standard, 2008.

[15] American Society for Testing and Materials, ASTM C109/ C109M Standard Test Method for

Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standard, 2016.

[16] American Society for Testing and Materials, ASTM C1437-07 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, 2015.

[17] Feng, M., Wang, Z., & Wu, L., "Experimental study on high-strength concrete, ultrahigh-strength concrete and corresponding mortar under triaxial compression," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol.46, no.11, pp.11179-11194, 2021.

[18] Moussa, T., Maalouf, C., Ghanem, A., Bliard, C., Abbes, B., Badouard, C., ... & Polidori, G., " Physicomechanical and Hygrothermal characterization of a sugarcane waste/spent coffee grounds composite for buildings," *Waste and Biomass Valorization*, vol.15, no.9, pp.5431-5443, 2024.

[19] Chen, Z., Wen, H., Shao, J., Su, L., He, Y., & Li, Y., "Evaluate on shrinkage deformation and internal curing mechanism in low water-to-cement ratio cement mortar modified with recycled spent coffee grounds," *Construction and Building Materials*, vol.493, 143167, 2025.

[20] Na, S., Lee, S., & Youn, S., "Experiment on activated carbon manufactured from waste coffee grounds on the compressive strength of cement mortars," *Symmetry*, vol.13, no.4, pp.619, 2021.

[21] Yee, J. J., Khong, S. C., Tee, K. F., & Chin, S. C., "Physical and mechanical properties of spent coffee grounds (SCG) in concrete," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol.28, no.4, pp.843-858, 2024.

[22] Shahid, K. A., Ganesh, V., & Ghazali, N., "The incorporation of spent coffee grounds as an additive in cement ventilation blocks," *Open Civ Eng J*. DOI: 10.2174/0118741495286280240206073611, 2024, 18, e18741495286280, 2024.

[23] Nasr, Y., El Zakhem, H., Hamami, A. E. A., El Bachawati, M., & Belarbi, R., "Comprehensive review of innovative materials for sustainable buildings' energy performance," *Energies*, vol.16, no.21, 7440, 2023.

ประวัติผู้ประพันธ์ :

Assoc.Prof. Dr. Kultida Bunjongsiri : She earned a B.Eng. and an M.Eng. in environmental engineering from Chulalongkorn University in Thailand in 1992 and 1997, respectively. From Griffith University in Australia, she received a Ph.D. in environmental engineering in 2017. Her primary area of competence is environmental engineering. She was named a Senior Fellowship by the Higher Education Academy in accordance with the UK Professional Standards Framework as of 2024 (UKPSF).

Assist.Prof.Dr.Anunya Pradidthaprecha: In 2009, 2011, and 2021, respectively, she earned her bachelor's, master's, and doctorate in public health from Khon Kean University in Thailand. Her main areas of expertise are in parasitology, nutrition, epidemiology, and community health. She received the UK Professional Fellowship recognition from the Higher Education Academy in 2023 (UKPSF).