

**การออกแบบและศึกษาผลของการใช้เม็ดเหล็กแทนที่ทรายในmortar
เพื่อนำไปพัฒนาสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ**
**Design and Evaluation of Mortar with Steel Shot as a Sand Substitute for Potential Use in
Additive Manufacturing**

พาววิญ จันทวิเมลิอง¹, ศุภากร เจียสกุล² และ เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เม็ดเหล็ก (Steel Shot) แทนที่ทรายในmortar โดยมุ่งเน้นการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และพัฒนามortar ให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการพิมพ์คอนกรีตสามมิติ (3D Concrete Printing) การศึกษาเริ่มต้นจากการทดสอบค่าความหนาแน่นและการกระจายตัวของเม็ดเหล็กและทรายในmortar โดยใช้สัดส่วนการแทนที่เม็ดทรายด้วยเม็ดเหล็กที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 100 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงคัดเลือกสัดส่วนที่มีค่าการกระจายตัวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานมาทดสอบเพิ่มเติม ได้แก่ การไหลแผ่ของmortar (flowability) การหาค่าเวลาก่อตัว (setting time) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) และกำลังรับแรงดัด (flexural strength) โดยทดสอบแต่ละสัดส่วนจำนวน 3 ตัวอย่าง และบ่มตัวอย่างในอากาศเป็นเวลา 3, 7 และ 14 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการแทนที่เม็ดทรายด้วยเม็ดเหล็กที่ร้อยละ 10 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากการทดสอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ โดยค่าการกระจายตัวที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มีความสามารถในการไหลแผ่และเวลาก่อตัวที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ อีกทั้งยังให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 47.96 MPa และค่ากำลังดัดที่สูงกว่าค่าควบคุม โดยมีค่าเท่ากับ 14.01 MPa จากผลการศึกษาครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าmortarที่ใช้เม็ดเหล็กแทนที่ทรายในสัดส่วนร้อยละ 10 มีศักยภาพในการนำไปพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้ในการพิมพ์โครงสร้างสามมิติ และควรมีการศึกษาคุณสมบัติเพิ่มเติมอื่น ๆ เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้วัสดุดังกล่าวในทางปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

Abstract

This thesis aims to study the effects of using steel shot as a replacement for sand in mortar, with the intention of utilizing industrial waste in a beneficial way. The research focuses on developing mortar with steel shot as a suitable material for 3D printing technology. The study includes testing the density and particle distribution of mixtures where steel shot replaces sand at 0%, 10%, 20%, 30%, and 100% by weight. Mixtures that meet standard requirements were then selected for further testing, including flow table, setting time, compressive strength, and flexural strength. For the compressive and flexural strength tests, three specimens were prepared for each mix ratio and cured under air for 3, 7, and 14 days. The experimental results showed that the 10% sand replacement with steel shot provided the most optimal performance among all tested ratios. At this proportion, the particle distribution met standard criteria, flowability and setting time were within the recommended range for 3D printing technology, and the highest compressive strength was achieved at 47.96 MPa. Additionally, the flexural strength was significantly higher than the control group, with a value of 14.01 MPa. This study concludes that steel shot at a 10% replacement rate is optimal and has the potential for further development in testing additional properties relevant to 3D concrete printing applications.

คำสำคัญ: mortor, เม็ดเหล็ก, เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด

Keywords: Mortar, Steel Shot, 3D concrete printing, compressive strength, flexural strength

1 บทนำ

มอร์ตาร์ (Mortar) เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ ผสมเป็นเนื้อเดียวกันสำหรับงานก่อ ฉาบ และซ่อมแซมโครงสร้างต่าง ๆ คุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ เช่น กำลังอัด (compressive strength), กำลังดัด (flexural strength), การไหลของเนื้อปูน (flow/workability) และเวลาการก่อตัว (setting time) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพและความคงทนของงานก่อสร้าง หากมอร์ตาร์มีกำลังอัดและกำลังดัดสูง ย่อมทำให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้ดีและทนทานต่อแรงต่าง ๆ ในขณะที่การไหลที่เหมาะสมทำให้การทำงานง่ายขึ้น และเวลาการก่อตัวที่เหมาะสมไม่เร็วหรือช้าเกินไปส่งผลต่อความสะดวกในการเทและตกแต่งผิวหน้าในงานก่อสร้างได้ทันก่อนที่ปูนจะแข็งตัว

การพัฒนา มอร์ตาร์สำหรับเทคโนโลยี 3D printing หรือ 3D Printable Mortar เป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในวงการวิศวกรรมและการก่อสร้างในปัจจุบัน ซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนในกระบวนการก่อสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านของการสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีความต้องการการปรับตัวสูง โดยเทคโนโลยี 3D printing หรือ Additive Manufacturing กำลังเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงวิธีการก่อสร้างที่ดั้งเดิม มอร์ตาร์สำหรับเทคโนโลยี 3D printing จะต่างกับมอร์ตาร์ทั่วไปโดยจะมีการพิจารณาคุณสมบัติการออกแบบมอร์ตาร์ที่เฉพาะเจาะจง โดยจะต้องไม่ติดหัวฉีด และไหลสม่ำเสมอ พิมพ์แล้วไม่ยุบตัว ไม่ล้นขึ้นก่อนหน้า แข็งแรงพอใช้เป็นโครงสร้างจริง แข็งตัวพอดี ไม่เร็วไป ไม่ช้าไป นอกจากนี้ยังนำ เม็ดเหล็กที่เป็นของเหลือใช้มาเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนามอร์ตาร์เพื่อให้เกิดประโยชน์โดยจะใช้ เม็ดเหล็กแทนที่ทรายธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์หลายประการ เช่น Compressive Strength, Density, Flexural Strength, Setting time และ Flowability เป็นต้น

นอกจากการพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลและการทำงานของมอร์ตาร์แล้ว งานวิจัยนี้ยังมุ่งเน้นแนวทางการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) และการพัฒนาอย่างยั่งยืน (sustainability) การนำของเสียอุตสาหกรรมประเภท เม็ดเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาเป็นวัตถุดิบในมอร์ตาร์ถือเป็นตัวอย่างของการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดการสูญเสียและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายมิติ โดย เม็ดเหล็กจะได้มาจากกระบวนการ Steel shot blasting คือ เมื่อถึงแก๊สผ่านกระบวนการซ่อมทั้งหมดแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการทำความสะอาด ประกอบวาล์ว สกรีนข้อความและน้ำหนักบนถัง และทดสอบการรั่ว (Hydrostatic) เมื่อถึงผ่านการทดสอบเรียบร้อยแล้ว จะถูกส่งไปยังโรงบรรจุก๊าซเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่กระบวนการซ่อมและจัดการของเสีย ในกระบวนการซ่อมซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญของการ ซ่อมบำรุง มีการนำสัที่ ถลอกหรือไม่สมบูรณ์ออกจากถัง โดยใช้การพ่นเม็ดเหล็กเพื่อขัด ถลอกสัเก่าออกก่อนเคลือบ สัใหม่ ของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือ เม็ดเหล็กที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถใช้ขัดสัถังได้อีก และเม็ดเหล็ก ดังกล่าวมักปนเปื้อนด้วยเศษสัเก่า ของเสียจากกระบวนการนี้ จะถูกจัดการตามรหัสของเสียอุตสาหกรรม จากกระบวนการดังกล่าว

มักถูกกำจัดโดยการฝังกลบในหลุมฝังกลบหรือส่งเข้าสู่พื้นที่กำจัดขยะอุตสาหกรรม เนื่องจากถูกจัดประเภทเป็นขยะอันตรายซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการกำจัด นอกจากนั้นยังสิ้นเปลืองพื้นที่ฝังกลบแล้วยังอาจก่อปัญหามลพิษโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมได้ หากแต่ด้วยคุณลักษณะทางกายภาพที่มีความหนาแน่นสูงและส่วนประกอบหลักเป็นโลหะเหล็ก อย่างไรก็ตาม เม็ดเหล็กที่เกิดขึ้นยังมีศักยภาพในการนำกลับไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการอื่นได้ เช่น การนำไป หลอมใหม่ หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น เพื่อลดปริมาณของเสียและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ นั่นจึงเป็นเหตุผลอีกข้อหนึ่งที่นำเม็ดเหล็กมาเป็นวัสดุเสริมในการพัฒนามอร์ตาร์สำหรับเทคโนโลยี 3D printing [1]

2 ระเบียบวิธีวิจัยและผลการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1. Hydraulic Cement
2. ทรายหยาบ
3. เม็ดเหล็กที่ถูกใช้แล้ว (Steel Shot, SA)
4. น้ำสะอาด
5. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, SP)
6. Hydroxypropyl Methylcellulose (HPMC)

2.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาการกระจายตัวของเม็ดเหล็ก (Steel Shot) และความหนาแน่นของเม็ดเหล็ก เพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ โดยการทดสอบดังนี้

2.2.1 การทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดเหล็กและทราย

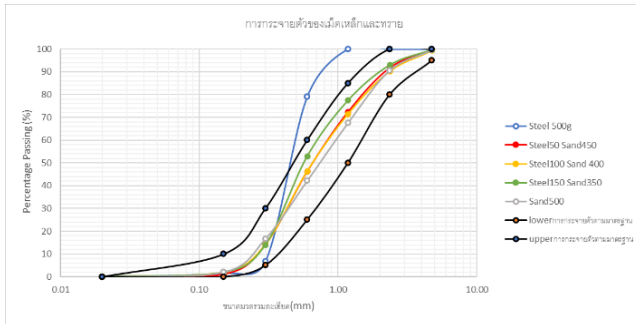
การทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดเหล็กและทราย สามารถหาได้จาก การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136 [2] โดยจะมีการทดสอบทั้งหมด 5 อัตราส่วน คือ ทราย 500กรัม, เม็ดเหล็ก 500 กรัม, เม็ดเหล็ก 50 กรัม ทราย 450, เม็ดเหล็ก 100 กรัม ทราย 400, เม็ดเหล็ก 150 กรัม ทราย 350



รูปที่1 เครื่องทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดเหล็กและทราย

โดยเส้นสีดำส้มคือ lower การกระจายตัวตามมาตรฐาน ASTM C33,เส้นสีดำฟ้าคือ Upper การกระจายตัวตามมาตรฐาน ASTM C33 [3],เส้นสีฟ้า คือ นำเม็ดเหล็ก แทนทรายทั้งหมด 500g(SA100%),เส้นสีแดงคือ นำเม็ดเหล็กแทนทราย 50gและ

ทราย 450g (SA10%), เส้นลึงเหล็กคือ นำเม็ดเหล็ก แทนทราย 100g และทราย 400g (SA20%), เส้นลึงเหล็กคือ นำเม็ดเหล็ก แทนทราย 150g และทราย 350g (SA30%), เส้นลึงเหล็กคือ ทราย 500g (SA0%)



รูปที่ 2 กราฟการกระจายตัวของเม็ดเหล็กและทรายเทียบกับมาตรฐาน ASTM C33

เมื่อหาค่า Fineness Modulus (FM) หรือ ค่าโมดูลัส ความละเอียด ควรอยู่ระหว่าง 2.3-3.10 ตามมาตรฐานของ ASTM C33 [3] จากการคำนวณตามสมการ (1) SA0% มีค่าเท่ากับ 2.815, SA10% มีค่าเท่ากับ 2.745, SA20% มีค่าเท่ากับ 2.763, SA30% มีค่าเท่ากับ 2.7611, SA100% มีค่าเท่ากับ 2.128 ซึ่งไม่อยู่ในมาตรฐาน

$$FM = \frac{\text{ผลรวมของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสะสมที่ต่างบนตะแกรงมาตรฐาน}}{100} \quad (1)$$

2.2.2 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเหล็ก

การทดลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเหล็ก โดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ (Water Displacement Method) ทั้ง 3 ตัวอย่างใช้สมการ (2) ในการคำนวณพบว่ามีความหนาแน่นเท่ากับ 4551.82 kg/m³, 4587.17 kg/m³ และ 4587.17 kg/m³ ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 4,575.38 kg/m³

$$\rho = \frac{M_{SA}}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของเม็ดเหล็ก (kg/m³)

M_{SA} คือ มวลของเม็ดเหล็ก (kg)

V_1 คือ ปริมาตรน้ำก่อนใส่เม็ดเหล็ก (m³)

V_2 คือ ปริมาตรน้ำหลังใส่เม็ดเหล็ก (m³)

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองนี้พบว่ามีความหนาแน่นต่ำกว่าค่าตามทฤษฎีของเหล็กกล้า ซึ่งมีค่าประมาณ 7,800 - 7,850 kg/m³ (True Density) อยู่ประมาณ 40% การเบี่ยงเบนนี้สามารถอธิบายได้จากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะและสภาพของเม็ดเหล็กที่ใช้ในการทดลองอย่างการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกและกากสี (Contamination from Coating Residue) เม็ดเหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบรีไซเคิล (Recycled Steel Shot) ซึ่งผ่านกระบวนการพ่น (Blasting) หรือขัดผิว (Surface Treatment) มาก่อน ทำให้มีคราบสี (Coating Residue) และเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตติดอยู่บนพื้นผิวของเม็ดเหล็ก [4]

2.3 ขั้นตอนการผลิตมอร์ตาร์

2.3.1 การออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์

ในการทดลองนี้ เม็ดเหล็กจะถูกใช้ในการแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 กำหนดให้ใส่สารเติมแต่ง SP และ HPMC ร้อยละ 1 และ 0.43 ของปริมาณน้ำ ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c ratio) มีค่าเท่ากับ 0.35 สำหรับทุกส่วนผสม [5] โดยสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์เป็นไปตามตารางที่ 1 ข้างต้น

ตารางที่ 1 การออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์

ส่วนผสม	ซีเมนต์ (kg/m ³)	น้ำ (kg/m ³)	ทราย (kg/m ³)	SA (kg/m ³)	HPMC (kg/m ³)	Sp (kg/m ³)
Control	839.75	293.91	1259.63	0.00	1.26	2.94
10%SA	839.75	293.91	1133.67	125.96	1.26	2.94
20%SA	839.75	293.91	1007.70	251.93	1.26	2.94
30%SA	839.75	293.91	881.74	377.89	1.26	2.94

หมายเหตุ: SA หมายถึงเม็ดเหล็ก, %SA หมายถึง การแทนที่ทรายด้วยเม็ดเหล็กตามร้อยละนั้นๆ

2.3.2 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

การผสมมอร์ตาร์ในการทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องผสมมอร์ตาร์แบบใบกวนแนวตั้ง (Hobart-type mixer) ตามขั้นตอนที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C305 [6] โดยมีมีการปรับให้เหมาะสมกับวัสดุผสมพิเศษ ได้แก่ ลูกเหล็ก (steel shot), สารลดน้ำ (superplasticizer), และสารเพิ่มความหนืด (Hydroxypropyl Methylcellulose: HPMC)

2.4 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

ในงานวิจัยนี้มีการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ทั้งหมด 4 คุณสมบัติดังที่ได้กล่าวในระเบียบวิธีวิจัย โดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

2.4.1 การทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

การทดสอบความสามารถในการไหลแผ่นี้ อาศัยวิธีการวัดด้วย Flow Table Test ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [7] เพื่อประเมินการกระจายตัวและการไหลของมอร์ตาร์ในส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบนี้มีความสำคัญในการพิจารณาคุณสมบัติของมอร์ตาร์สำหรับการนำไปใช้งานในงานก่อสร้างที่ต้องการไหลตัวที่เหมาะสมโดยเฉพาะ 3D Printing

ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ทรายด้วยเม็ดเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักทราย พบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเม็ดเหล็กที่ใช้ทดแทนทราย โดยมีค่า Flow Diameter เท่ากับ 14.5, 15.5, 16.5 และ 18 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณเม็ดเหล็กในมอร์ตาร์ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่มี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของเม็ดเหล็กที่มีความหนาแน่นและพื้นผิวที่แตกต่างจากทราย ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคในส่วนผสมเกิดได้ง่ายขึ้น และส่งผลให้ค่าการไหลแผ่สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่ใช้ใน 3D Printing เนื่องจากสามารถลดการเกิดการอุดตันในหัวพิมพ์และเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ ซึ่งผลการทดสอบมอร์ตาร์ในส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเหล็กนั้น ค่าการไหลแผ่ที่ได้อยู่ในช่วงเหมาะสมคือ 150 ถึง 190 มม.อ้างอิงจากงานวิจัย[8] ทั้งนี้ความสามารถในการไหลที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ 3 มิติขึ้นอยู่กับขนาดของหัวพิมพ์ รูปร่างของหัวพิมพ์ ความดันในการพิมพ์ และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 3 การทดสอบความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์

2.4.2 การทดสอบหาเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์

ในการทดสอบหาเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ทรายด้วยเม็ดเหล็ก ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของเม็ดเหล็กต่อเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

การทดสอบหาเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ทรายด้วยเม็ดเหล็กในอัตราส่วน 0%, 10%, 20%, และ 30% โดยใช้วิธี Modified Vicat Needle ตามมาตรฐาน ASTM C807[9] ได้ค่า Setting Time เท่ากับ 126.32, 143.64, 171.43, 172 นาที ตามลำดับคำนวณจากสมการ (3)

$$SS = \frac{H - E}{C - D} \times (c - 10) + E \quad (3)$$

ซึ่ง E คือ เวลาในการทดสอบครั้งสุดท้ายที่มีการจมมากกว่า 10mm

H คือ เวลาในการทดสอบครั้งแรกที่มีการจมน้อยกว่า 10mm

C คือ ระยะการจม (Penetration) ที่เวลา E (mm)

D คือ ระยะการจม (Penetration) ที่เวลา H (mm)

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เม็ดเหล็กแทนที่ทรายสามารถเพิ่มเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ได้ ซึ่งหมายความว่าวัสดุมีการแข็งตัวช้าลง ซึ่งอาจมีผลต่อความสามารถในการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำให้วัสดุยังคงสภาพพลาสติก (Plastic State) ได้นานขึ้น สามารถไหลผ่านหัวพิมพ์ได้ง่ายขึ้น และช่วยลดแรงดันที่ต้องใช้ในการอัดผ่าน

หัวพิมพ์ ซึ่งจากผลการทดสอบการแทนที่ด้วยเม็ดเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 10 อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการพิมพ์ คือ ระยะเวลาก่อตัวที่ 110-150 นาที อ้างอิงจากงานวิจัย[10] อย่างไรก็ตาม เวลาการก่อตัวที่นานเกินไปอาจทำให้โครงสร้างที่พิมพ์มีความเสี่ยงต่อการยุบตัวระหว่างการพิมพ์ เนื่องจากวัสดุอาจไม่แข็งแรงพอที่จะรองรับน้ำหนักของชั้นถัดไป ดังนั้น การเลือกอัตราส่วนเม็ดเหล็กที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้สมดุลระหว่างเวลาการก่อตัวและความสามารถในการพิมพ์



รูปที่ 4 การทดสอบหาเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์

2.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

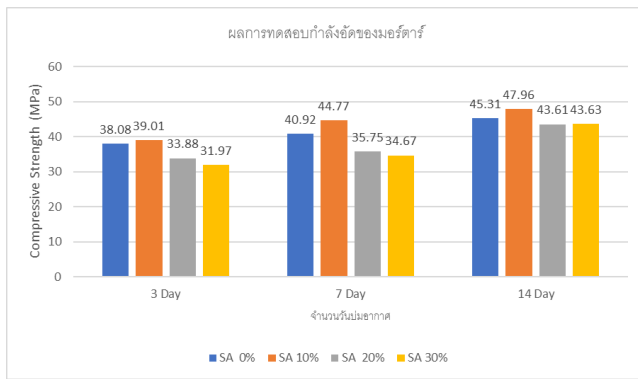
การทดสอบคุณสมบัติกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตในครั้งนี้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109[11] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม ในช่วงระยะเวลาวันที่ 3 วันที่ 7 และวันที่ 14 โดยผลที่ได้ สมการ(4)จะนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

$$\text{Compressive Strength} = \frac{P}{A} \quad (4)$$

ซึ่ง P คือ แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบแตก (N หรือ KN)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm² หรือ m²)

ผลการทดสอบ SA 0% ใช้เวลาบ่ม3วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 38.08 MPa ใช้เวลาบ่ม7วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 40.92MPa ใช้เวลาบ่ม14วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 45.31 MPa SA 10% ใช้เวลาบ่ม3วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 39.01 MPa ใช้เวลาบ่ม7วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 44.77 MPa ใช้เวลาบ่ม14วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 47.96 MPa SA20% ใช้เวลาบ่ม3วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 33.88 MPa ใช้เวลาบ่ม7วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 35.75 MPa ใช้เวลาบ่ม14วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 43.61MPa SA 30% ใช้เวลาบ่ม3วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 31.97 MPa ใช้เวลาบ่ม7วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 34/67MPa ใช้เวลาบ่ม14วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 43.63 MPa



รูปที่ 5 แผนภูมิผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสัดส่วน SA 0%, 10%, 20%, 30%

พบว่า การแทนที่ทรายด้วย เม็ดเหล็กในอัตรา 10% ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ได้สูงสุดในช่วงอายุ 14 วัน โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 47.96 MPa ซึ่งสูงกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ใช้เม็ดเหล็ก (SA0%) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 45.31 MPa ซึ่งถือเป็นค่าควบคุม

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วน เม็ดเหล็ก เป็น 20% และ 30% กลับพบว่า ค่ากำลังอัดลดลง โดยมีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณ เม็ดเหล็กที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเม็ดเหล็กจะมีความหนาแน่นสูง ซึ่งสามารถเพิ่มความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์และส่งผลต่อค่ากำลังอัดในกรณีที่ใช้ใน ปริมาณที่เหมาะสม แต่เมื่อใช้ในปริมาณมากเกินไป จะส่งผลให้โครงสร้างภายในมอร์ตาร์เสียหาย เนื่องจาก เม็ดเหล็กมีคุณสมบัติ ดูดซับน้ำได้น้อยกว่า ทรายธรรมชาติ[12] การเพิ่มปริมาณเม็ดเหล็กจึงทำให้น้ำส่วนเกิน (excess water) คงอยู่ในเนื้อปูนมากขึ้น เมื่อน้ำเหล่านี้ระเหยออกในช่วงการบ่ม จะก่อให้เกิด โพรงอากาศ (voids) ภายในเนื้อมอร์ตาร์ ส่งผลให้โครงสร้างมีความพรุนและลดค่ากำลังอัดโดยรวม

2.4.4 การทดสอบสมบัติกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์

การทดสอบคุณสมบัติกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตในครั้งนี้ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C348[13] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์โดยตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×4×16 เซนติเมตร ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม ในช่วงระยะเวลา 14 วัน โดยผลที่ได้จะนำมาคำนวณจากสมการ (5) และหาค่าเฉลี่ย

$$\sigma = \frac{M \cdot C}{I} \quad (5)$$

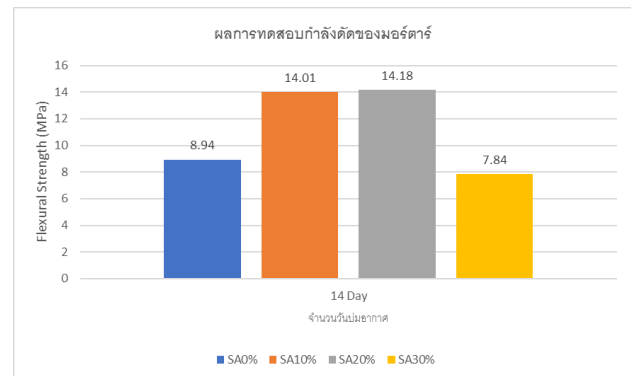
$$M = \frac{P \cdot L}{4} \quad (6)$$

$$I = \frac{b \cdot d^3}{12} \quad (7)$$

- ซึ่ง σ คือ ความเค้นดัด (Flexural stress) (MPa)
 M คือ โมเมนต์ดัดสูงสุดกรณีโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดตรงกลางคาน
 P คือ Applied Load (N)
 L คือ Span Length (mm)

- c คือ ระยะจากจุดกลางถึงผิวล่างสุดของหน้าตัด ($d/2$)
 I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดสี่เหลี่ยม (mm^4)
 b คือ ความกว้างหน้าตัด (mm)
 d คือ ความลึกหน้าตัด (mm)

ผลการทดสอบทราย SA 0% ใช้เวลาบ่ม 14 วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังดัดเท่ากับ 8.94 MPa SA 10% ใช้เวลาบ่ม 14 วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังดัดเท่ากับ 14.01 MPa SA 20% ใช้เวลาบ่ม 14 วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังดัดเท่ากับ 14.18 MPa และ SA 30% ใช้เวลาบ่ม 14 วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังดัดเท่ากับ 7.84 MPa



รูปที่ 6 แผนภูมิผลการทดสอบกำลังดัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสัดส่วน SA 0%, 10%, 20%, 30%

ที่ SA10% ค่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 14.01 MPa คิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 56.7% จากค่าควบคุม ที่ SA20% ได้ค่ากำลังดัดสูงสุด คือ 14.18 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 10 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนเม็ดเหล็กที่ประมาณ 20% เป็นสัดส่วนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดต่อการรับแรงดัด ที่ SA30% ค่ากำลังดัดกลับลดลงเหลือเพียง 7.84 MPa ซึ่งน้อยกว่าค่าควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติม เม็ดเหล็กในปริมาณมากเกินไปส่งผลเสียต่อโครงสร้างของมอร์ตาร์ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกิดจากความหนาแน่นและคุณสมบัติของเม็ดเหล็กที่มีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำกว่าทราย[12] เมื่อแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสม (10–20%) จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นและการกระจายแรงได้ดี ส่งผลให้กำลังดัดเพิ่มขึ้น แต่หากเกินกว่า สัดส่วนนั้น จะทำให้เกิดน้ำส่วนเกินในเนื้อปูน ส่งผลให้เกิดโพรงอากาศและโครงสร้างภายในอ่อนตัวลง

3 บทสรุป

3.1 สรุปผลการวิจัย

ปริญญานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นในการศึกษาการใช้เม็ดเหล็ก (Steel Shot) แทนที่ทรายในมอร์ตาร์ เพื่อนำไปพัฒนาสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติและประเมินคุณสมบัติเชิงกล โดยผู้วิจัยได้มีความสนใจในการนำเม็ดเหล็ก ซึ่งเป็นของเหลือใช้มาร่วมใช้ในงานของวัสดุโยธา จากการศึกษาพบว่าเม็ดเหล็กเป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้ในกระบวนการขัดผิว เพื่อปรับสภาพผิวของถังก๊าซ และจัดสีเกาออกจากถัง ถึงแม้การใช้เม็ดเหล็กในการ ทำความสะอาดพื้นผิวถังก๊าซจะมีข้อดี แต่ของเสียจากการบ่มการ ได้แก่ เม็ดเหล็กใช้แล้ว ผงเหล็ก

และกากสี ยัง เป็นของเสียที่อาจทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาในอนาคต ผู้วิจัยจึงนำของเหลือใช้หรือเม็ดเหล็กนี้ มาใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นการเพิ่มมูลค่า โดยนำมาแทนที่ในสัดส่วนของทรายแม่น้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบของมอร์ตาร์เป็นการเพิ่มมูลค่าของเหลือใช้ และ มีการพัฒนามอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายแม่น้ำด้วย เม็ดเหล็ก เป็นมอร์ตาร์สำหรับเทคโนโลยี 3D printing หรือ 3D Printable Mortar เป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในวงการวิศวกรรมและการก่อสร้างในปัจจุบัน ซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุนในกระบวนการก่อสร้าง

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเม็ดเหล็กและมอร์ตาร์ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบมาในหัวข้อต่างๆได้แก่ การทดสอบการกระจายตัวของเม็ดเหล็กและทราย , การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเหล็ก,การทดสอบความสามารถในการไหลแผ่, การทดสอบเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์, การทดสอบรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และการทดสอบรับแรงดัดของมอร์ตาร์ จากการทดสอบพบว่าเม็ดเหล็กมีการกระจายตัวที่ดียกเว้นแทนที่ทรายในสัดส่วน100%ที่ไม่อยู่ในมาตรฐานการกระจายตัว และมีความหนาแน่นที่สูง

มอร์ตาร์ที่นำเม็ดเหล็กมาแทนที่ทรายในสัดส่วนต่างๆ (SA0%, SA10%, SA20%, SA30%) พบว่าการเพิ่มปริมาณเม็ดเหล็กในมอร์ตาร์ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่และเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในส่วนของการทดสอบกำลัง SA10% มีกำลังอัดที่ดีที่สุดและกำลังดัดที่ดีขึ้น แต่ SA20% กลับพบว่า ค่ากำลังอัดลดลง และ SA30% ทั้งกำลังอัดและกำลังดัดมีค่าลดลง ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเมื่เม็ดเหล็ก ส่งผลดีต่อค่ากำลังอัดและกำลังดัดในกรณีที่ใช้ในปริมาณที่เหมาะสม แต่เมื่อใช้ในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้โครงสร้างภายในมอร์ตาร์เสียสมดุล เนื่องจากเม็ดเหล็กมีคุณสมบัติ ดูดซับน้ำได้น้อยกว่าทรายธรรมชาติ[12] การเพิ่มปริมาณเม็ดเหล็ก จึงทำให้น้ำส่วนเกิน (excess water) คงอยู่ในเนื้อปูนมากขึ้น เมื่อน้ำเหล่านี้ระเหยออกในช่วงการบ่ม จะก่อให้เกิดโพรงอากาศ (voids) ภายในเนื้อมอร์ตาร์ ส่งผลให้โครงสร้างมีความพรุนและส่งผลต่อค่ากำลังอัดและกำลังดัดโดยตรง

ผลการทดสอบคือเม็ดเหล็กแทนที่ทรายร้อยละ10 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดมีค่าการกระจายตัวอยู่ในมาตรฐาน มีความสามารถในการไหลแผ่และเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ที่อยู่ในเกณฑ์แนะนำของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด 47.96MPa ค่ากำลังดัดที่สูงกว่าค่าควบคุม

3.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดสอบการกระจายตัวของเม็ดเหล็กและทราย จากกราฟการกระจายตัวเมื่อเทียบกับมาตรฐานASTM C33[3] พบว่าค่า SA0%, SA10%, SA20%, SA30% อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (Upper และ Lower) ยกเว้นSA100% เมื่อนำไปคำนวณค่า Fineness Modulus (FM) SA100% 2.128 SA10% มีค่าเท่ากับ 2.745 SA20% มีค่าเท่ากับ 2.763 SA30% มีค่าเท่ากับ 2.611 ซึ่ง SA100% ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C33 คือช่วง 2.3-3.1

ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเหล็กโดยใช้วิธีการ

ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเหล็กโดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ (Water Displacement Method) ทั้ง 3 ตัวอย่างพบว่า มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4551.82 kg/m³ ,4587.17 kg/m³ และ 4587.17 kg/m³ ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 4,575.38 kg/m³

ผลการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ทรายด้วยเม็ดเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักทราย พบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเม็ดเหล็กที่ใช้ทดแทนทราย โดยมีค่า Flow Diameter เท่ากับ 14.5, 15.5, 16.5 และ 18 เซนติเมตร ตามลำดับ ค่าการไหลแผ่ที่ได้อยู่ในช่วงเหมาะสมคือ 150 ถึง 190 มม. อ้างอิงจากงานวิจัยทั้งนี้ความสามารถในการไหลที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ 3 มิตินั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหัวพิมพ์ รูปร่างของหัวพิมพ์ ความดันในการพิมพ์ และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

ผลการทดสอบหาเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ SA0%, SA10%, SA20%, และ SA30% โดยใช้วิธี Modified Vicat Needle ตามมาตรฐาน ASTM C807 ได้ค่า Setting Time เท่ากับ 126.32, 143.64, 171.43, 172 นาที ตามลำดับ จากผลการทดสอบการการแทนที่ด้วยเม็ดเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 10 อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการพิมพ์ คือ ระยะเวลาก่อตัวที่ 110-150 นาที

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด SA 0% ใช้เวลาบ่ม 3, 7, 14 วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 38.08 , 40.92 และ 45.31 MPa ตามลำดับ SA 10% ใช้เวลาบ่ม 3, 7, 14 วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 39.01, 44.77 และ 47.96 MPa ตามลำดับ SA 20% ใช้เวลาบ่ม 3, 7, 14 วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 33.88, 35.75 และ 43.61 MPa ตามลำดับ SA 30% ใช้เวลาบ่ม 3, 7, 14 วันมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 31.97, 34.67 และ 43.63 MPa ตามลำดับ พบว่า SA10% ค่ากำลังอัดที่14 วันมีค่าสูงสุด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด SA 0, 10, 20, 30% ใช้เวลาบ่ม 14วัน มีค่าเฉลี่ยกำลังดัดเท่ากับ 8.94 14.01, 14.18 และ 7.84 MPa ตามลำดับ SA20% ได้ค่ากำลังดัดสูงสุด ซึ่งมากกว่าSA10% เล็กน้อย

3.3 ข้อเสนอแนะ

1.ควรศึกษาและทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติมในอนาคต เช่น ความสามารถในการไหลตัว (Flowability), การคงรูปหลังการพิมพ์ (Buildability) และแรงยึดระหว่างชั้น (Interlayer Bond Strength) สำหรับการประยุกต์ในงาน 3D Printing โดยเฉพาะ และ ควรทดสอบภาคสนามหรือในระบบการพิมพ์จริง (3D Printer) เพื่อประเมินการนำไปใช้งานจริงทั้งในด้านโครงสร้างและความเสถียรในการก่อสร้าง

2.ควรศึกษาอายุการใช้งานระยะยาว เช่น กำลังอัดที่อายุ 28 วัน หรือ 90 วัน เพื่อประเมินผลกระทบระยะยาวของเม็ดเหล็ก ต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ และควรวิเคราะห์ คุณสมบัติทางเคมีและผิวสัมผัสของเม็ดเหล็ก เพื่อประเมินผลต่อปฏิกิริยาเคมีกับปูน เช่น ความเป็นสนิม หรือปฏิกิริยากับสารผสมอื่น

3.ควรพิจารณาการปรับอัตราส่วนน้ำต่อปูน (w/c ratio) ใหม่ เนื่องจาก เม็ดเหล็กไม่สามารถดูดซับน้ำได้เท่าทรายธรรมชาติ [12] การคงสัดส่วนน้ำเท่าเดิมอาจทำให้เกิดน้ำส่วนเกินภายในเนื้อมอร์ต

ดาร์ หรือ ทดลองเพิ่มเติมในส่วนของการลดน้ำหรือสารช่วยกระจายตัว (Superplasticizer, Dispersing Agent) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการผสมและลดการแยกชั้น

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “การออกแบบและศึกษาผลของการใช้ เม็ดเหล็กแทนทรายในมอร์ตาร์เพื่อนำไปพัฒนาสำหรับเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (Design and Evaluation of Mortar with Steel Shot as a Sand Substitute for Potential Use in Additive Manufacturing)” ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายหลายฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้การสนับสนุน และคำแนะนำตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินงาน ขอขอบคุณ คุณอดิสร ชวนปี ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือการปฏิบัติงานภายในห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี และขอขอบคุณ นายสมพงษ์ รุ่งสว่าง ดร. กานต์ธิปิก ฮามคำไพ นายหาญรบ โล่ห์นธ์ ซึ่งเป็นรุ่นพี่ที่คอยช่วยเหลือ เสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเม็ดเหล็ก และบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเติมแต่ง (HPMC) เพื่อใช้ในการศึกษาพัฒนางานวิจัยฉบับนี้

นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว ซึ่งให้โอกาสให้ได้รับการศึกษา และให้การสนับสนุนเสมอมา สุดท้ายนี้ หากปรากฏข้อผิดพลาดประการใดในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอน้อมรับไว้เพื่อเป็นบทเรียนและปรับปรุงงานวิจัยในโอกาสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณพนันต์ อมรพรวิวัฒน์, ภูติส ภูลภัทร์แสงทอง, รศ.ดร.วิฑิต ปานสุข. (2560). “วิชา โครงการทางวิศวกรรมโยธา,”
- [2] ASTM C136 / C136M, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021,
- [3] ASTM C33 / C33M, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021
- [4] รศ.ดร. มนัสกร ราชากรกิจ, ขนิษฐา แผลงนอก, ธิติภูมิ สิทธิวงศ์. (2567). “รายงานผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกากอุตสาหกรรมจากกระบวนการซ่อมถังก๊าซหุงต้ม,”
- [5] Zuanfeng Pan, Doudou Si, Jinghong Tao, Jianzhuang Xiao. (2023). Compressive behavior of 3D printed concrete with different printing paths and concrete ages. ส
- [6] ASTM C305, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021
- [7] ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021
- [8] Tay, Y.W.D.; Qian, Y.; Tan, M.J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. Compos.B Eng. 2019, 174, 106968.
- [9] ASTM C807, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021
- [10] Natchanon Chantab, Pochara Amornsittipat,, Sompong Rungsawang. (2568). “Topology Optimization of 3D-Printed Concrete Structures,”
- [11] ASTM C109 / C109 M-2 1, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2- in. or [5 0 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021
- [12] Giedrius Girska, Dzigit Nagrockiene. (2016). The Use of Steel Cord Scrap in Concrete
- [13] ASTM C348 / C348M-21, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021