

การพัฒนาซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยสำหรับงานพิมพ์สามมิติ Development of Fiber Reinforced Cement Mortar Suitable for 3D Printing

ศิลา คมขำ^{1*} บุชิต มาให้² และ ปิติ สุนทรสุขกุล³

^{1,3} ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและงานก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

*Corresponding author; E-mail address: s6301081823018@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยสำหรับการพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ โดยทำการแปรผันปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนในอัตราส่วน 0 – 0.1% โดยปริมาตร เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ ได้แก่การทดสอบความสามารถในการพิมพ์ เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ การหลุดตัวของชั้นพิมพ์ และการทดสอบช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการหลุดตัว ควบคู่ไปกับการทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน ได้แก่การทดสอบการไหลแผ่ การทดสอบความหนืด (viscosity) รวมถึงการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด ผลการวิจัยพบว่า ส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนในอัตราส่วน 0.1% โดยปริมาตร มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ มากที่สุด โดยมีเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์เป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ มีช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการหลุดตัวต่ำที่สุด และมีความสูงแต่ละชั้นพิมพ์ที่มากที่สุด รวมถึงมีกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุด โดยกำลังอัดของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ได้จากการหล่อ แต่ในส่วนกำลังดัดพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

คำสำคัญ: การพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ เส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ การหลุดตัวของชั้นพิมพ์ ช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการหลุดตัว

Abstract

The objective of the study was to determine the optimum mix proportion of fiber reinforced cement mortar for 3D printing applications. The mortar mixes were prepared with polypropylene micro-fiber varied from 0 to 0.1% and then subjected to series of test related to required properties for cement printing such as printability test, printable time, layer settlement, and time gap together with some basic properties such as flow test, viscosity test, compressive strength test, and flexural strength test. The results indicated the optimum volume fraction of polypropylene micro-fiber of 0.1% which passed the required initial printable time, and time gap. It also yielded the highest compressive and flexural strengths. The printed specimens exhibited slighter lower compressive strength but higher flexural strength than the cast specimens.

Keywords: 3D cement printing, Micro-polypropylene fiber, Open time, Layer settlement, Printable time gap without settlement

1. คำนำ

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การบินและอวกาศ ยานยนต์ ชีวการแพทย์และอาหาร [1],[2] เนื่องจากความสามารถในการผลิตที่รวดเร็ว ราคาถูก และสามารถผลิตวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีด้านการพิมพ์ 3 มิติ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากต้นทุนการก่อสร้างต่ำ สามารถสร้างผลิตภัณฑ์จำนวนมากในเวลาที้น้อยกว่าการใช้แรงงานมนุษย์ที่สามารถทำงานได้เพียง 8-12 ชั่วโมงต่อวัน ในขณะที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทำงานได้อย่างต่อเนื่องหลายชั่วโมงโดยไม่ต้องหยุดพักและมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีความสามารถในการสร้างชิ้นงานด้วยรูปทรงที่หลากหลาย ส่งผลให้สามารถลดข้อจำกัดทั้งทางสถาปัตยกรรมและทางวิศวกรรมลงได้ อาทิเช่น การพิมพ์ผนังที่มีส่วนโค้งเว้ามาก หรือ มีสถาปัตยกรรมที่สลับซับซ้อน เป็นต้นการพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ ใช้เทคนิคการผลิตแบบเพิ่มชั้นหรือที่เรียกว่าการก่อสร้างแบบอิสระ [3],[4] โดยการขึ้นรูปโครงสร้างจากการฉีดมอร์ตาร์ผ่านหัวพิมพ์ที่ติดตั้งบนคานหรือแขนกลที่เคลื่อนที่ได้อิสระ ด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถสร้างรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อนได้โดยไม่ต้องใช้แบบหล่อจึงมีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการก่อสร้างทั่วไป

การพิมพ์ 3 มิติโดยทั่วไปมักใช้ในการขึ้นรูปต้นแบบที่เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก โดยใช้วัสดุสังเคราะห์จำพวกพลาสติกเป็นหลัก การนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ และการนำปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ปอกตีทั่วไปมาใช้เป็นวัสดุพิมพ์จะทำให้เกิดข้อจำกัดในการทำงานอยู่หลายประการ เช่น การแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ (ซีเมนต์มอร์ตาร์) ที่ค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับวัสดุจำพวกพลาสติก การเปลี่ยนแปลงสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์เหลวตามระยะเวลาที่ผ่านไป ระยะเวลาการพิมพ์ที่จำกัด หลังจากผสมแล้ว การหลุดตัวของชั้นพิมพ์เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้าง เป็นต้น ดังนั้นนอกจากการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างแล้ว ยังต้องพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์ให้มีความเหมาะสมกับการพิมพ์ด้วย เช่น มีกำลังรับแรงในช่วงต้นที่ดี มีการไหลแผ่ที่ดี มีระยะเวลาในการพิมพ์ที่เหมาะสม และมีความสามารถในการต้านทานการหลุดตัวระหว่างชั้นที่ดี เป็นต้น

งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงสัดส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ให้มีความเหมาะสมต่อการพิมพ์ 3 มิติ มีความสามารถในการต้านทานการหลุดตัวระหว่างชั้นได้ดี โดยทำการแปรผันปริมาณเส้นใยไมโครโพรพิลีนในสัดส่วนผสม เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานที่สำคัญต่อการพิมพ์ซีเมนต์ 3 มิติ เช่น การไหลแผ่ ความหนืด ระยะเวลาที่เริ่มพิมพ์ได้ การหลุดตัวของชั้นพิมพ์ ช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการหลุดตัว เป็นต้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15

2.1.2 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume, SF)

ซิลิกาฟุ้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดอยู่ที่ 0.03-0.30µm พื้นที่ผิวสัมพัทธ์อยู่ที่ 20,000 m²/kg และมีความถ่วงจำเพาะ 2.20 มีองค์ประกอบหลักทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้ง (SF) ที่ใช้ในการทดสอบ

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃
Silica Fume	38.30	1.17	4.76	0.48	1.05

2.1.3 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ขนาดไม่เกิน 1.19 มิลลิเมตร มีความถ่วงจำเพาะ 2.50

2.1.4 เส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน (MFP)

ผลิตจากพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟิน มีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวขนาดเล็ก ใช้ในการผสมคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าว มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3 ลักษณะเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน (MFP)

Property	Diameter (µm)	Length (mm)	Specific Gravity	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
MFP	38.30	1.17	4.76	0.48	1.05



รูปที่ 1 เส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน

2.1.5 สารลดน้ำ (Water Reducers)

การวิจัยนี้ใช้สารลดน้ำปริมาณสูง (Superplasticizer) Type G ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยลดการใช้น้ำปริมาณสูงถึง 30%

2.1.6 สารเพิ่มความอึดน้ำ (Water retention)

การวิจัยนี้ใช้สารเพิ่มความอึดน้ำ ประเภทโพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) มีความถ่วงจำเพาะ 1.09 มีจุดหลอมเหลว 42 – 46 องศาเซลเซียส

2.2 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ในงานพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อมวลรวมละเอียดที่ 3/4 โดยน้ำหนัก ผสมกับซิลิกาฟุ้งในสัดส่วน 10 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ แปรผันปริมาณการใส่เส้นใยที่ 0-0.1 % โดยปริมาตร กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.22 ปริมาณการเติมสารลดน้ำชนิด G ที่ 10.0 % โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ปริมาณการเติมสารเพิ่มความอึดน้ำ (Water Retention) ประเภทโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ 2.5% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ส่วนผสม (kg/m ³)	ปูนซีเมนต์	ทราย	ซิลิกาฟุ้ง	น้ำ	สารลดน้ำ	PEG	PP
PP0	878	1170	88	212	96	22	0.00
PP25							0.23
PP50							0.45
PP75							0.68
PP100							0.91

** PP หมายถึง เส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน

PEG หมายถึง โพลีเอทิลีนไกลคอล

2.3 วิธีทดสอบ

2.3.1 การทดสอบการไหลโดยโต๊ะทดสอบการไหล

การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C230 (Standard Specifications for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement) [5] โดยค่าการไหลแต่คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{การไหลแผ่ (\%)} = \frac{D_1 + D_0}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ D_1 คือความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนกระแทก, D_2 คือความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางหลังกระแทก

2.3.2 การทดสอบกรอบเวลาในการพิมพ์

กรอบเวลาการพิมพ์ (Printable time) หมายถึง ช่วงระยะเวลาที่วัสดุสามารถพิมพ์ออกมาเป็นเส้นได้อย่างต่อเนื่อง มีขนาดของเส้นพิมพ์คงที่และสม่ำเสมอ ไม่เกิดการเสียรูปและไม่เกิดข้อบกพร่องในการพิมพ์ (กำหนดเป็นระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์) ไปจนถึงช่วงเวลาที่วัสดุไม่สามารถพิมพ์ออกมาได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ข้างต้น (กำหนดเป็นระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์) ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ พิมพ์เส้นตัวอย่างเส้นตรง ยาว 30 เซนติเมตร โดยใช้หัวพิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร พิมพ์ทำมุมตั้งฉากกับพื้น กำหนดให้หัวพิมพ์อยู่สูงจากพื้น 15 มิลลิเมตร ใช้

อัตราการป้อนวัสดุประมาณ 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวฉีดประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการพิมพ์เส้นตัวอย่างทุก 5 นาที บันทึกเวลาในการพิมพ์แต่ละรอบกับเวลาที่ส่วนผสมเริ่มสัมผัสกับน้ำ ทำการวัดความสูงและความกว้างของเส้นตัวอย่างในตำแหน่ง หัว กลาง และท้าย ของเส้นตัวอย่าง จากนั้นนำมาคำนวณหาผลต่างความกว้างของเส้นตัวอย่าง เพื่อใช้ในการระบุความสม่ำเสมอของเส้นพิมพ์

2.3.3 การทดสอบช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัว

ช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัว (Printable time gap without settlement) หมายถึงระยะเวลาหลังจากการพิมพ์คอนกรีตชั้นก่อนหน้าจนถึงเวลาที่สามารถพิมพ์คอนกรีตชั้นต่อไปได้โดยไม่เกิดการทรุดตัวของคอนกรีตชั้นก่อนหน้า ทำการทดสอบโดยการทดลองพิมพ์ตัวอย่างยาว 30 เซนติเมตร ที่ความสูงของหัวพิมพ์ 15 มิลลิเมตร จากพื้นผิว โดยเริ่มพิมพ์ตัวอย่างชั้นแรกเมื่อถึงเวลาเริ่มต้น (Tint) ของส่วนผสมนั้นๆ กำหนดเป็นการพิมพ์ที่นาที่ที่ 0 จากนั้นพิมพ์ชั้นต่อไปที่บนชั้นเดิมที่มีความสูงของหัวพิมพ์ 15 มิลลิเมตร จากพื้นผิวชั้นก่อนหน้า ในทุกๆ 5 นาที โดยวัดความสูงของตัวอย่างแต่ละชั้นทุกครั้งก่อนทำการพิมพ์ครั้งต่อไป ทำการทดสอบต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างชั้นแรกไม่เกิดการทรุดตัว กำหนดให้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มพิมพ์ตัวอย่างชั้นแรกถึงเวลาที่ตัวอย่างชั้นแรกไม่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักของตัวอย่างชั้นถัดไปเป็นช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัว

2.3.4 การทดสอบความเหนียว

ทำการทดสอบความเหนียวเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวของมอร์ตาร์กับคุณสมบัติอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อใช้ทำนายระยะเวลาเริ่มพิมพ์และคุณสมบัติอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการพิมพ์ 3 มิติ ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความเหนียว (viscometer) โดยใช้เข็มทดสอบเบอร์ 4 ขนาด 3.5 มิลลิเมตร ความเร็วในการทดสอบที่ 6 รอบต่อนาที กำหนดแรงบิดของเครื่องทดสอบให้อยู่ระหว่าง 10-90 % ของเครื่องทดสอบ ทำการทดสอบทุกๆ 10 นาที บันทึกค่าที่จากเครื่องทดสอบกับเวลาในการทดสอบ โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความเหนียวมีหน่วยเป็น mPa.s จึงต้องทำการแปลงหน่วยเพื่อให้ทราบค่า Shear stress โดยใช้สมการที่ (2) และ สมการที่ (3)

$$\text{Shear stress} = \text{Viscosity} \times \text{Shear rate} \quad (2)$$

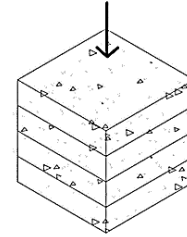
$$\text{Shear rate} = \frac{\pi DN}{60h} \quad (3)$$

เมื่อ D คือขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มที่ใช้ในการทดสอบ, N คือความเร็วรอบ มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm), h คือความยาวของเข็มที่ใช้ในการทดสอบ

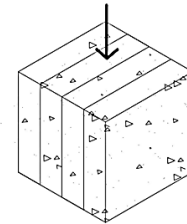
2.3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดทำการทดสอบทั้งจากตัวอย่างที่ได้จากการหล่อ และตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ โดยตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์จะทำการทดสอบ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกคือให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์ รูปแบบที่ 2 คือให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์ ดังรูปที่ 2 โดยตัวอย่างที่ได้จากการหล่อใช้แบบหล่อขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) [6] ในส่วนของตัวอย่างที่ได้

จากการพิมพ์ทำการตัดตัวอย่างด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้เป็นรูปทรงลูกบาศก์ ขนาดไม่เกิน 5x5x5 เซนติเมตร โดยตัวอย่างทั้ง 2 แบบทำการทดสอบเมื่อครบ 7 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



(a) แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์

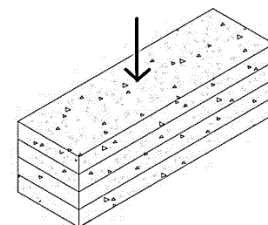


(b) แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์

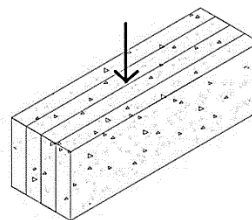
รูปที่ 2 รูปแบบการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์

2.3.6 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ในการทดสอบกำลังรับแรงดัดทำการทดสอบทั้งจากตัวอย่างที่ได้จากการหล่อ และตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ โดยตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์จะทำการทดสอบ 2 รูปแบบเช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด แสดงดังรูปที่ 3 โดยตัวอย่างที่ได้จากการหล่อใช้แบบหล่อขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C 348-21 (Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars) [7] ในส่วนของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ทำการตัดตัวอย่างด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้มีขนาดหน้าตัดไม่เกิน 4x4 เซนติเมตร และมีความยาว 16 เซนติเมตร โดยตัวอย่างทั้ง 2 แบบทำการบ่มโดยใช้พลาสติกคลุม และทำการทดสอบเมื่อครบ 7 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



(a) แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์



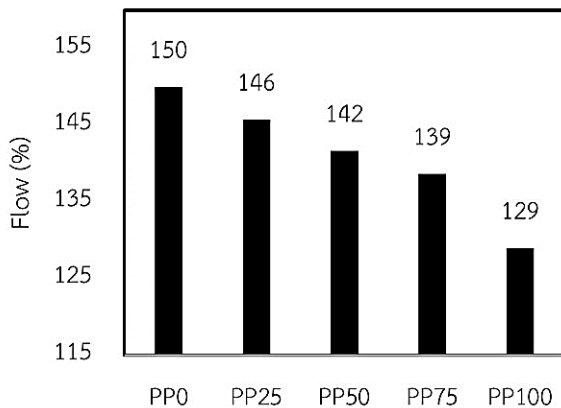
(b) แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์

รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบกำลังคัดของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 การทดสอบการไหลแม่

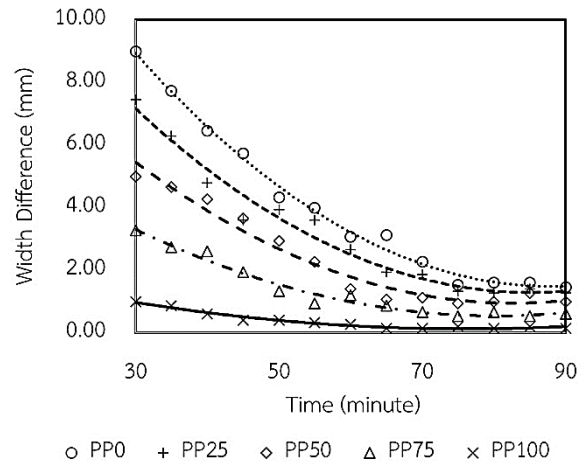
จากรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์เสริมเส้นใย สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้โต๊ะทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการไหลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน เนื่องจากเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนมีการดูดซับความชื้นจากซีเมนต์มอร์ตาร์และเส้นใยที่ผสมอยู่ในมอร์ตาร์ยังทำให้เกิดการขัดและยึดรั้งกันของเนื้อมอร์ตาร์ ส่งผลให้ความสามารถในการไหลแม่ลดลง โดยส่วนผสมที่มีค่าการไหลแม่ที่น้อยที่สุดคือ PP100 มีค่าการไหลแม่ที่ 129% ซึ่งยังเพียงพอต่อความต้องการของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ต้องการการไหลแม่ไม่น้อยกว่า 115%



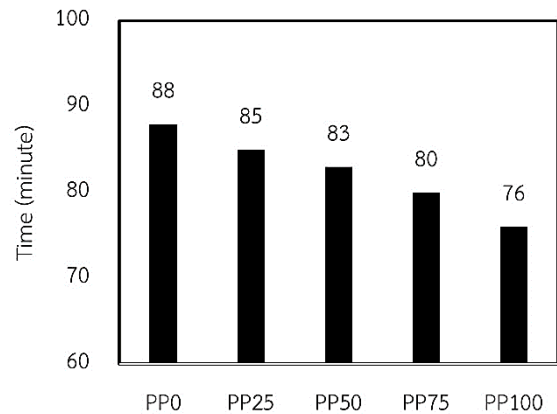
รูปที่ 4 ค่าการไหลแม่ของมอร์ตาร์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ

3.2 การทดสอบกรอบเวลาในการพิมพ์

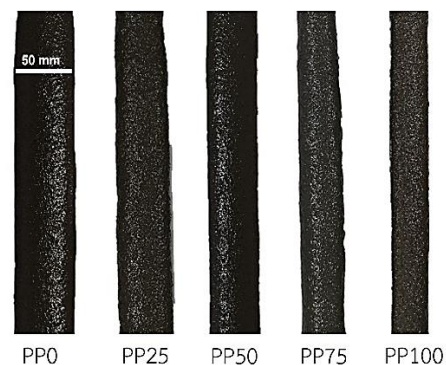
จากรูปที่ 5 เมื่อนำค่าความกว้างของเส้นตัวอย่างทั้งสามตำแหน่งมาคำนวณหาค่าผลต่างเฉลี่ยเทียบกับเวลา พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปผลต่างความกว้างเฉลี่ยของเส้นตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าเส้นตัวอย่างจะมีความสม่ำเสมอขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงเวลาหนึ่งค่าผลต่างความกว้างของเส้นตัวอย่างจะเริ่มคงที่ แสดงถึงความสม่ำเสมอของเส้นตัวอย่างมีความคงที่ ที่เวลานั้นกราฟเริ่มเปลี่ยนจากความสัมพันธ์แบบพาราโบลาเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ส่งผลให้ความชันของกราฟเท่ากับ 0 จึงกำหนดให้เวลาที่ความชันของกราฟเท่ากับ 0 เป็นเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความกว้างของเส้นพิมพ์กับเวลา



รูปที่ 6 ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์



รูปที่ 7 ลักษณะของเส้นตัวอย่างที่ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์

จากรูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ของสัดส่วนผสมต่างๆ จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน มอร์ตาร์มีระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ลดลง และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 พบว่าเวลาที่เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ของแต่ละส่วนผสม ส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนมากขึ้นจะมีความสม่ำเสมอของเส้นตัวอย่างมากขึ้นด้วย (ผลต่างความกว้างของเส้นตัวอย่างมีค่าลดลง)

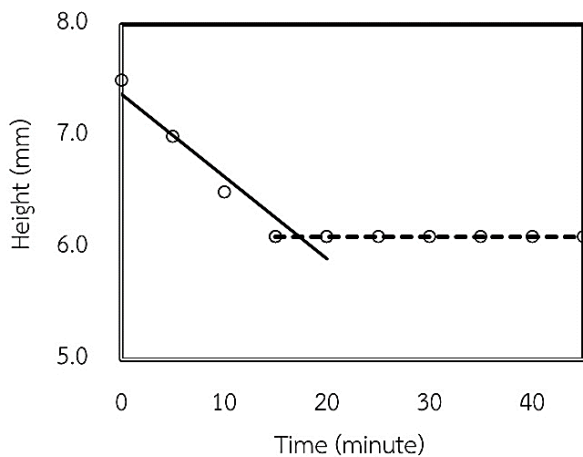
ในส่วนขอระยะเวลาสิ้นสุดการพิมพ์ พบว่า มอร์ตาร์ในทุกส่วนผสมสามารถทำการพิมพ์ได้แม้เวลาผ่านไปเกิน 3 ชั่วโมง ซึ่งเพียงพอต่อระยะเวลาในการทำงานแล้ว จึงทำการยุติการทดสอบเพื่อป้องกันการแข็งตัวของมอร์ตาร์

คาร์ภายในระบบลำเลียงวัสดุซึ่งจะส่งผลเสียต่อเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าทุกสัดส่วนผสมมีรอบเวลาการพิมพ์มากกว่า 2 ชั่วโมง การที่มอร์ตาร์มีระยะเวลาในการทำงานได้นานเป็นผลมาจากการใส่สารลดน้ำชนิด G เนื่องจากสารลดน้ำชนิดนี้มีคุณสมบัติช่วยลดการใช้น้ำปริมาณสูงและหน่วงการก่อตัวของคอนกรีต

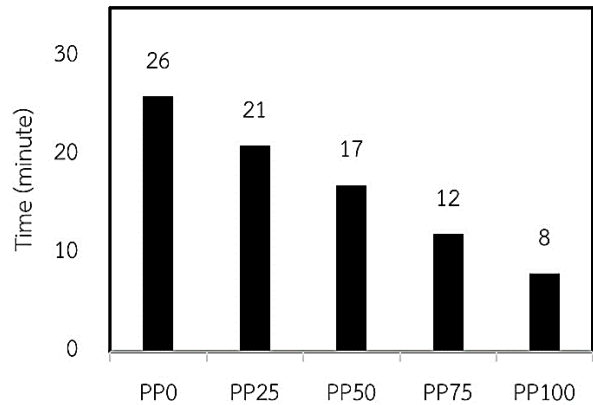
3.3 การทดสอบช่องว่างเวลาในการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัว

จากรูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัว พบว่า ในช่วงแรกความสูงของเส้นตัวอย่างชั้นที่ 1 มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมอร์ตาร์ยังพัฒนากำลังได้ไม่เพียงพอต่อการรับน้ำหนักของชั้นพิมพ์ชั้นถัดไป เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่ง ความสูงของเส้นตัวอย่างจะเริ่มคงที่ แสดงให้เห็นว่าเส้นตัวอย่างไม่เกิดการทรุดตัว เนื่องจากมอร์ตาร์สามารถพัฒนากำลังได้เพียงพอต่อการรับน้ำหนักของชั้นพิมพ์ชั้นถัดไป เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเส้นพิมพ์ชั้นที่ 1 กับเวลา สามารถแบ่งความสัมพันธ์ได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงที่เกิดการทรุดตัวของเส้นตัวอย่าง (ความสูงของเส้นตัวอย่างลดลง) กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันติดลบ ช่วงที่สองเป็นช่วงที่เส้นตัวอย่างไม่เกิดการทรุดตัว (ความสูงของเส้นตัวอย่างคงที่) กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแกน x จึงกำหนดให้เวลาที่กราฟทั้งสองเส้นตัดกันเป็นช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัวของแต่ละสัดส่วนผสม

จากรูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัวของสัดส่วนผสมต่างๆ พบว่า มอร์ตาร์มีช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัวลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีน ซึ่งส่งผลให้มอร์ตาร์สามารถพิมพ์ขึ้นรูปได้เร็วขึ้น ประหยัดเวลาในการทำงานมากขึ้น โดยส่วนผสมที่ใส่เส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนที่ 0.1% โดยน้ำหนัก สามารถพิมพ์ขึ้นรูปได้เร็วกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนถึงประมาณ 3 เท่า



รูปที่ 8 ความสูงของชั้นพิมพ์ที่ 1 เมื่อพิมพ์ทุกๆ 5 นาที

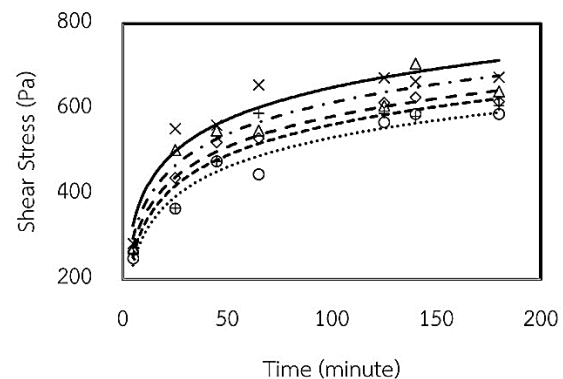


รูปที่ 9 ช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการทรุดตัว

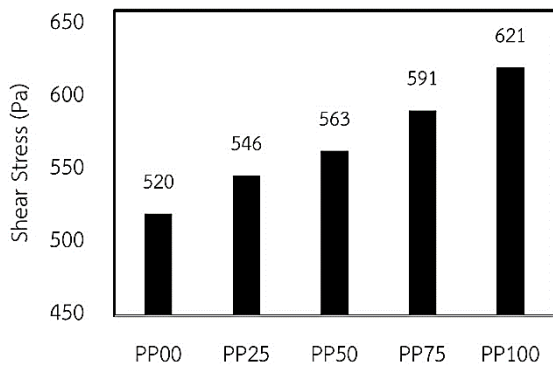
3.4 การทดสอบความหนืด

จากรูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบความหนืดของมอร์ตาร์โดยใช้เครื่องวัดความหนืด (viscometer) จากผลการทดสอบพบว่าค่าความหนืดของมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของมอร์ตาร์ เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของมอร์ตาร์ในแต่ละช่วงเวลาพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนมีการดูดน้ำจากเนื้อมอร์ตาร์

จากรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนในส่วนผสม ส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าความหนืดที่เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 520-621 Pa ซึ่งการมีค่าความหนืดที่เวลาเริ่มต้นในการพิมพ์ที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่งผลให้มอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนสูง มีความสม่ำเสมอของเส้นพิมพ์มากกว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนต่ำกว่า ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของมอร์ตาร์กับเวลา

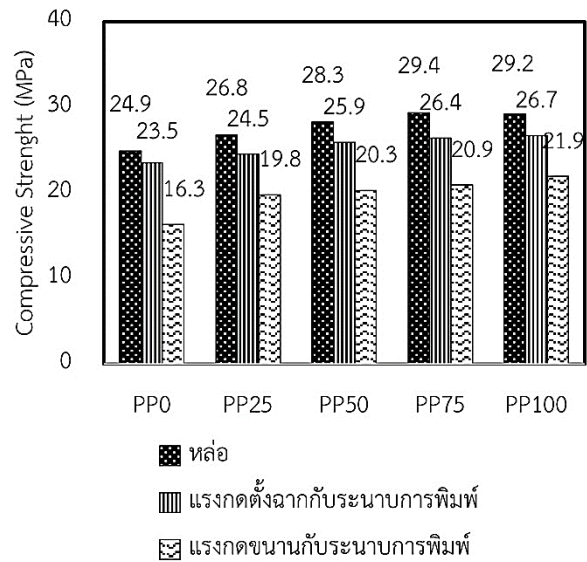


รูปที่ 11 ค่าความหนืดของมอร์ตาร์แต่ละชนิดที่ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์

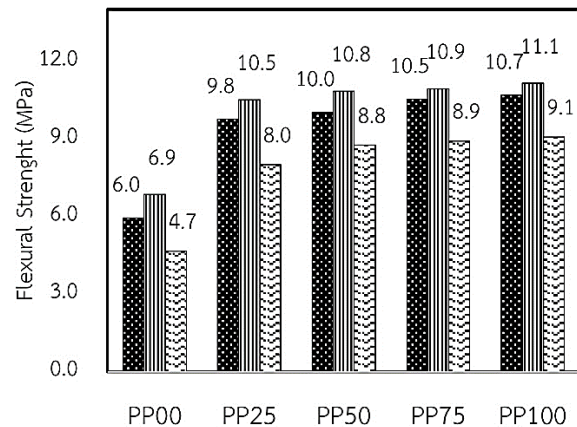
3.5 การทดสอบทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีทั้งตัวอย่างที่ได้จากการหล่อ และตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ โดยตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ ให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์ และให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์ จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนในส่วนผสม และเมื่อพิจารณาในแต่ละส่วนผสมพบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ได้จากการหล่อมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ เนื่องจากตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์มีความอ่อนแอของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นพิมพ์ โดยบริเวณผิวสัมผัสของชั้นพิมพ์แต่ละชั้นจะถูกวางซ้อนทับกันโดยปราศจากการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (ไม่ถูกกระแทกหรือจี้ให้เป็นเนื้อเดียวกัน) อีกทั้งการเว้นช่องว่างเวลาการพิมพ์ในแต่ละชั้นยังทำให้ผิวมอร์ตาร์ขาดความชุ่มชื้นทำให้กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นพิมพ์ลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดโดยรวมของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ลดลง

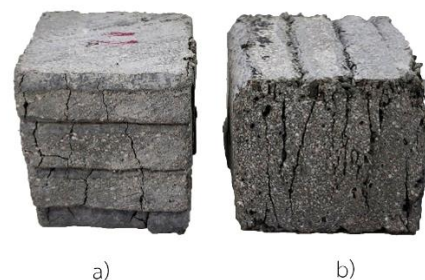
จากรูปที่ 12 เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ระหว่างตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์ กับตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์ พบว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์ เนื่องจากการทดสอบโดยให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์จะก่อให้เกิดแรงเฉือนในทิศทางเดียวกันกับรอยต่อของชั้นพิมพ์ ซึ่งบริเวณรอยต่อของชั้นพิมพ์มีกำลังยึดเหนี่ยวที่ต่ำ ทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อของชั้นพิมพ์ ดังรูปที่ 14 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลดลง



รูปที่ 12 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 13 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 14 ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ a) ทดสอบโดยให้แรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์ b) ทดสอบโดยให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์

3.6 การทดสอบทดสอบกำลังรับแรงดัด

จากรูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์สำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ ตามมาตรฐาน ASTM C 348-21 จากผลการทดสอบพบว่า

ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนในส่วนผสม และเมื่อพิจารณาในแต่ละส่วนผสมพบว่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ได้จากการหล่อและตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์เล็กน้อย เนื่องจากลักษณะการพิมพ์เป็นแนวเส้นตรงส่งผลให้เส้นใยในเนื้อมอร์ตาร์มีการเรียงตัวตามแนวพิมพ์ ทำให้เส้นใยสามารถรับแรงดึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีกำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 13 เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ระหว่างตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์กับตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์ พบว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์มีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดขนานกับระนาบการพิมพ์

4. สรุป

1. ด้านการไหลแผ่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้การไหลแผ่ของมอร์ตาร์มีค่าลดลง
2. ด้านกรอบเวลาการพิมพ์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้มอร์ตาร์มีระยะเวลาในการเริ่มพิมพ์ลดลง โดยส่วนผสม PP100 มีระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์น้อยที่สุดที่ 76 นาที และพบว่าทุกสัดส่วนผสมมีกรอบเวลาการพิมพ์มากกว่า 2 ชั่วโมง
3. ด้านช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการหลุดตัวพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้มอร์ตาร์มีช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการหลุดตัวลดลง โดยส่วนผสม PP100 มีช่องว่างเวลาการพิมพ์โดยไม่เกิดการหลุดตัวต่ำที่สุดที่ 8 นาที
4. ด้านความหนืดของมอร์ตาร์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าความหนืดที่ระยะเวลาเริ่มต้นในการพิมพ์เพิ่มขึ้นด้วย
5. ด้านกำลังรับแรงอัดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดจากตัวอย่างที่ได้จากการหล้อมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด
6. ด้านกำลังรับแรงดัดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครโพลีโพรพิลีนส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงดัดจากตัวอย่างที่ได้จากการพิมพ์ที่ทดสอบโดยให้แนวแรงกดตั้งฉากกับระนาบการพิมพ์มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ได้จากการหล่อเล็กน้อย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ บว.(วช.)/08/2565 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิติ สุคนธ์สุกุล อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิจัย ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแนะแนวทางการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่ยิ่งจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10.
- [2] Wegrzyn, T. F., Golding, M., & Archer, R. H. (2012). Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, 27(2), 66–72.
- [3] Buswell, R., Soar, R., Gibb, A., & Thorpe, A. (2007). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224–231.
- [4] Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, S., Gibb, A., Thorpe, T. (2009). Fabricating construction components using layer manufacturing technology. *Proc Int Conf Glob Innov Constr, Loughborough*, pp 512–520.
- [5] ASTM C230 / C230M-21, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org
- [6] ASTM C109 / C109M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org
- [7] ASTM C348 / C348M-21, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org