เวลาที่เหมาะสมในการก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ
Suitable time of concrete printed by 3D concrete printer

ณภัทร ธุระกิจ[1] ณัฐกรณ์ จรรยาสกุลโรจน์[2] และ รองศาสตราจารย์ วิทิต ปานสุข[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์และการหาช่วงเวลาที่เหมะสมของการพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการฉีดขึ้นรูปผ่านเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยใช้ปริมาณน้ำ 270-440 กก/ลบ.ม. มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) 0.28 และใช้สารผสมเพิ่ม Hydroxypropyl Methy Cellulose (HPMC) และสารลดน้ำ (SP) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์โดยทำการทดสอบด้วยการวัดการไหลแผ่ ระยะเวลาในการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดซึ่งให้ค่าที่เหมาะสมสำหรับงานพิมพ์คอนกรีต

จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า W/C ที่เหมาะสมสำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ คือ 0.28 โดยใช้ ปริมาณน้ำ 440 กก/ลบ.ม. และใช้ HPMC เป็นสารผสมเพิ่มอย่างไรก็ตามสัดส่วนผสมข้างต้นมีการใช้ปริมาณซีเมนต์มากทำให้ส่วนผสมของมอร์ตาร์มีราคาสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการปรับส่วนผสมอีกครั้งโดยการใส่สารลดน้ำ(SP) ซึ่งผลที่ได้นอกจากจะช่วยลดปริมาณในการใช้ซีเมนต์แล้ว ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ให้ดีขึ้นได้อีกด้วย

ในส่วนของการทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการการฉีดขึ้นรูปนั้น เป็นส่วนสำคัญสำหรับการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติเนื่องจากการฉีดขึ้นรูปต้องอาศัยความแข็งตัวของเนื้อปูนที่เพียงพอที่จะทำให้ชั้นล่างสามารถรับน้ำหนักในชั้นถัดๆไปได้

คำสำคัญ: การพิมพ์คอนกรีต **3** มิติ, เวลาที่เหมาะสม, สูตรผสมมอร์ตาร์

Abstract

The objective of this research is to determine the optimal mixing ratio for mortar and identify the best timing for 3D printed concrete. The study utilizes 3 D printer injection molding simulation, and the researcher designed a mortar mixture with a water content range of 270-440 kg/m3 and a water-cement ratio (W/C) of 0.28. Additionally, hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) and water-reducing agents (SP) were added to improve mortar properties. The mortar mixture underwent flow rate, setting time, and compressive strength measurements to determine appropriate values for concrete printing.

Results indicated that the optimal W/C ratio for 3D printing is 0.28, with a water content of 440 kg/m3 and the use of HPMC as an admixture. However, the mixture ratio that addressed above causing the high cost of mortar mixes, the researchers adjusted the ingredients by incorporating water-reducing agents (SP) to reduce cement usage and improve mortar properties since the optimization of mortar properties is a crucial aspect of the research, as the developed mortar must be suitable for the scope of the study.

Keywords: **3D printing;Suitable time; Mortar mixture**

คำนำ

เครื่องพิมพ์3มิติเริ่มมีการนำมาใช้ครั้งแรกในปี 1980 หลังจากนั้นได้เริ่มมีการพัฒนาเครื่องพิมพ์3มิติสำหรับใช้ในงานต่างๆอย่างแพร่หลายและอุตสาหกรรมการก่อสร้างก็ได้เริ่มให้ความสำคัญกับการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติเพื่อให้สามารถนำมาใช้กับการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีวัสดุซีเมนต์ (cement base material) เป็นวัสดุในการฉีดขึ้นรูประบบการก่อสร้างนี้และควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ผ่านชุดโปรแกรมเพื่อสั่งการการฉีดขึ้นรูป โครงสร้างทีละชั้น (Layer) โดยไม่ต้องใช้แบบหล่อทำให้

สามารถลดการใช้แรงงานคนและไม้แบบลงได้ ทั้งยังสามารถหล่อโครงสร้างที่มีความซับซ้อนตามต้องการได้อีกด้วยอีกทั้งใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการก่อสร้างรูปแบบเดิม ดังนั้นการนำวัสดุคอนกรีตมาใช้สำหรับฉีดขึ้นรูปโครงสร้างจึงเป็น ทางเลือกในการก่อสร้างที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในอนาคต

1. วัตถุประสงค์

1.เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของมอร์ตาร์
2.เพื่อหาเวลาการก่อตัวที่เหมาะสมของเหมาะสม
3.เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการก่อสร้างในแต่ละชั้น

2. ระเบียบการวิจัย

2.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียดตามตารางที่ 3.1 มีวัตถุประสงค์เพื่อหา ความชื้นส่วนเกิน (Free water) และขนาด ของวัสดุที่จะนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมมอร์ ตาร์และเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ตาราง 2.1 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด

คุณสมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ
ความชื้นอิ่มตัวผิวแห้งของวัสดุ	ASTM C128-10
การคละขนาดของมวลรวมละเอียด	ASTM C136-11

2.2 การออกแบบสูตรผสมมอร์ตาร์

ในส่วนของการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์นั้นต้องคำนึงถึงการเทได้หรือ workability ของมอร์ตาร์ เพื่อที่จะให้มอร์ตาร์อัดผ่านหัวฉีด(Nozzle) ได้ โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการเลือกสูตรผสมนั้นคือปริมาณน้ำที่ใช้ต่อมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตรและส่วนของน้ำต่อปูน (Water cement ratio) และยังต้องคำนึงถึงปริมาณสารผสมเพิ่มที่ต้องใส่เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของตัวมอร์ตาร์ให้เหมาะสมอีกด้วย

ในส่วนของการพิจารณาอัตราส่วนของน้ำต่อปูน (Water to cement ratio)นั้นเป็นส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากเนื่องจากปริมาณน้ำที่มาเกินไปหรือ น้อยเกินไปอาจจะส่งผลต่อมอร์ตาร์อย่างมากทั้งด้านกำลังและการเทได้ (Workability) โดยอัตราส่วนของน้ำต่อปูนที่เหมาะสม จะอยู่ที่ระหว่าง 0.4 - 0.6 ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัย เลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนอยู่ที่ 0.44 เนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนนี้จะทำให้มอร์ตาร์สามารถไหลผ่านหัวฉีด(Norzzle)ได้อย่างเหมาะสมและตัวมอร์ตาร์ไม่เหลวจน กินไป โดยทำการทดสอบผ่าน (Flow Table)

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มสารผสมลงไปในส่วนผสมมอร์ตาร์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของการเทได้และการยึดเกาะตัวของมอร์ตาร์อีกด้วยนั้นสารผสมเพิ่มที่ใส่คือ Hydroxypropyl Methyl Cellulose [HPMC] และสารลดนำพิเศษ (superplasticizer [SP]) คือ 0.01 - 1.00 % โดยน้ำหนักของน้ำโดยผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสารผสมเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะ

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการผลิตมอร์ตาร์

รหัสสูตรผสม	ปริมาณน้ำ	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	สารผสมเพิ่ม
W440-28	440	0.28	-
W440-28-H01	440	0.28	HPMC 0.01 % of water
W440-28-H02	440	0.28	HPMC 0.02 % of water
W440-28-H03	440	0.28	HPMC 0.03 % of water
W440-28-S01	440	0.28	SP 0.03% of water
W440-28-S03	440	0.28	SP 1.0% of water
W440-28-S05	440	0.28	SP 1.8% of water
W270-28-H01S05	270	0.28	HPMC 0.01% and SP 1.78% of water
W270-28-H02S05	270	0.28	HPMC 0.019% and SP 1.78% of water
W270-28-H03S05	270	0.28	HPMC 0.029% and SP 1.78% of water

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการผลิตมอร์ตาร์

ส่วนผสม	W/C	Cement (kg/m^3)	Aggregates (kg/m^3)	HPMC (kg/m^3)	Starch Ether (kg/m^3)	SP (kg/m^3)	Water (kg/m^3)
W440-28	0.28	1582	98	-	-	-	440
W440-28-H01	0.28	1582	98	0.04	-	-	440
W440-28-H02	0.28	1582	98	0.09	-	-	440
W440-28-H03	0.28	1582	98	0.13	-	-	440
W440-28-S01	0.28	1582	98	-	-	1.58	440
W440-28-S03	0.28	1582	98	-	-	4.75	440
W440-28-S05	0.28	1582	98	-	-	7.91	440
W270-27-H01S05	0.28	965	1014	0.03	-	4.83	270
W270-27-H02S05	0.28	965	1014	0.05	-	4.83	270
W270-27-H03S05	0.28	965	1014	0.08	-	4.83	270

2.3 การทดสอบคุณสมบัติมอร์ตาร์

ในการพิจารณาส่วนผสมมอร์ตาร์นอกจากต้องพิจารณาคุณสมบัติความสามารถการเทได้ (work ability) จากการออกแบบส่วนผสม W/C ยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของมอร์ตาร์สดและ หลังการแข็งตัวของมอร์ตาร์ จากตารางที่ 34 การทดสอบมอร์ตาร์สดเพื่อหาค่าการไหลแผ่ (Flow table) และการหาเวลาก่อตัว (Setting time) เป็นคุณสมบัติที่ต้องนำมาพิจารณาลักษณะ การลำเลียงของมอร์ตาร์ การออกแบบหัวฉีดเครื่องพิมพ์และรูปแบบการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยไม่ส่งผลให้สูญเสียกำลังรับแรงอัดของโครงสร้างที่เกิดการแยกชั้นของมอร์ตาร์หรือเสียรูปทรงของโครงสร้างจากการพิมพ์สำหรับการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐานในตารางที่ 2 เป็นการทดสอบของมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 1 และ 7 วัน โดยใช้ลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร เป็นตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ เพื่อนำมาใช้เป็นค่าการรับกำลังของโครง สร้างในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2.4 มาตราฐานการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

คุณสมบัติ	มาตราฐานการทดสอบ
ค่าการไหลแผ่มอร์ตาร์(Flow table)	ASTM C1437-13
เวลาก่อตัวของมอร์ตาร์	ASTM C807-14
กำลังรับแรงอัด(compressive strength)	ASTM C109-15

2.4 การเลือกสูตรผสมมอร์ตาร์จาก Flow และ Setting time

การเลือกสูตรผสมมอร์ตาร์นั้นต้องเลือกจาก Flow และ Setting time โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่หน้าเชื่อถือและมีขอบเขตงานใกล้เคียงกัน

Table 2
Material properties of the fresh mortar for 3D printing.

Maximum size of particle (mm)	1
Density of the 3D extrusion mortar (kg/m^3)	2,000
Flow table test (at 10 drops)	60–70
Initial setting time	110–150 min

รูปภาพที่ 2.1 Material properties

2.5 ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีด

2.5.1 ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นชั้น 1

ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปชั้นที่ 1 นั้นเป็นพื้นฐานแรกของการก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากชั้นที่ 1 นั้นจะเป็นตัวรับน้ำหนักของชั้นถัดๆมาที่จะทำการฉีดขึ้นรูป ดังนั้นจึงทำให้การฉีดขึ้นรูปชั้น 1 นั้นต้องสามารถรับน้ำหนักด้วยตัวมันเองได้และไม่แบะเมื่อมีชั้นต่อๆไปฉีดทับ หรืออีกนัยหนึ่งคือชั้นที่ 1 นั้นห้ามแบะเกินไปและห้ามแข็งจนเกินไปนั้นเอง

2.5.2 ช่วงเวลาการที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูป

ช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูปคือช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำงานของสูตรผสมมอร์ตาร์ต่างๆ ซึ่งเวลาในการทำงานก็เป็นอีกหนึ่งส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากต้องนำเวลาที่ได้ไปประมาณระยะเวลาที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้ของสูตรผสมมอร์ตาร์นั้นๆ

2.5.3 ช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไป

ช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไปนั้นก็เป็นอีกหนึ่งส่วนสำคัญของการก่อสร้างด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากช่วงเวลาของการฉีดขึ้นรูปชั้นถัดๆไปนั้นต้องมีความเหมาะสม พอดี เพื่อให้มีการผสานกันระหว่างชั้นนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุดและให้เกิดกำลังระหว่างชั้นที่มากสุด

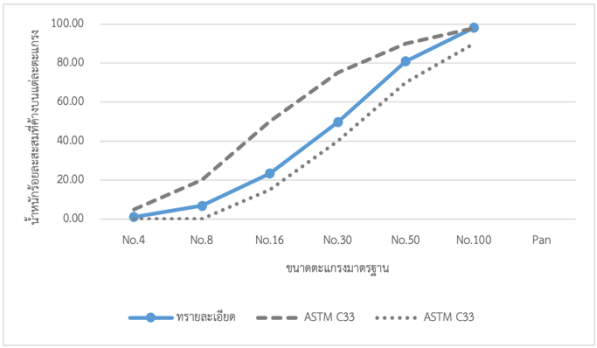
3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบวัสดุส่วนผสมมอร์ตาร์

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียดเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดในส่วนผสมของมอร์ตาร์เพื่อนำไปออกแบบส่วนประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และปริมาณความชื้นของมวลรวมละเอียดที่ส่งผลต่ออัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ โดยวัสดุมวลรวมละเอียดเป็นวัสดุที่ทางผู้ผลิตไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติบางประเภทได้จึงต้องมีการทดสอบก่อน ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งในส่วนของวัสดุปูนซีเมนต์ควบคุมและกำหนดคุณภาพจากแหล่งผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตรา SCG น้ำประปาสะอาดและสารผสมเพิ่มที่ได้มาตรฐาน

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบวัสดุส่วนผสมมอร์ตาร์

คุณสมบัติ	ทรายละเอียด
ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.17
ปริมาณน้ำเส่วนเกิน (ร้อยละ)	0.148
โมดูลัสความละเอียด	2.6

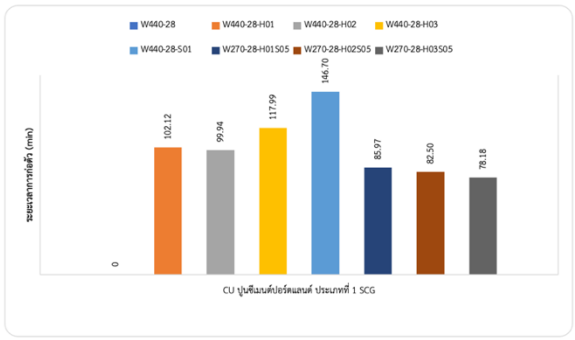


รูปภาพที่ 3.1 กราฟการคละขนาด

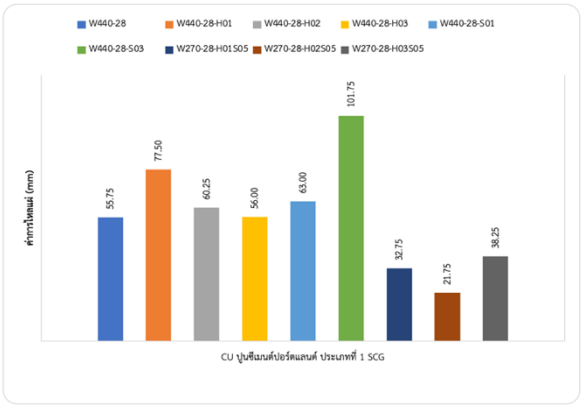
3.2 ผลการทดสอบมอร์ตาร์

3.2.1 มอร์ตาร์-ปูนปอร์ตแลนด์ type I

ในการทดสอบมอร์ตาร์ของปูนปอร์ตแลนด์ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อซีเมนต์(W/C)อยู่ที่0.28โดยการทดสอบจะมีทั้งการไม่ใส่สารผสมเพิ่มและการใส่สารผสมเพิ่มHydroxypropyl Methyl Cellulose (HPMC) และ สารลดนำพิเศษ (superplasticizer [SP])



รูปภาพที่ 3.2 กราฟระยะเวลาก่อตัวของปูนพอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1



รูปภาพที่ 3.3 กราฟค่าการไหลแผ่(mm)

3.2.2 การคัดเลือกสูตรมอร์ตาร์

การเลือกสูตรมอร์ตาร์เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกจาก 2 ปัจจัย

1.Flow หรืออัตราการไหลผ่าน ต้องอยู่ในช่วง 50 – 70 mm

2.Setting time ต้องอยู่ในช่วง 85-150 mm

ซึ่งจะทำให้เหลือสูตรผสมมอร์ตาร์อยู่เพียง 3 สูตรที่ผ่านเกณฑ์คือ

1.W440-28

2.W440-28-H01

3.W440-28-H02

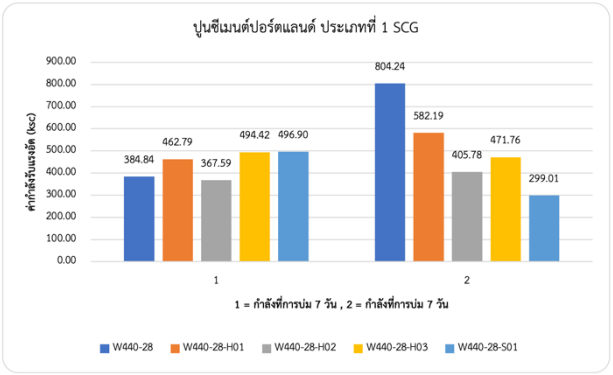
4.W440-28-H03

5.W440-28-S01

หลังจากนั้น ผู้วิจัยเริ่มทำการหากำลังประลัยโดยการเลือกสูตรจากการตัดตามเกณฑ์ Flow และ Setting time ที่เลือกไว้

ตารางที่ 3.2 ตารางเก็บผลกำลังอัดและคุณสมบัติเชิงกล

ส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ (mm)	Setting time (min)	กำลังอัดที่อายุบ่ม 1 วัน (ksc)	กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (ksc)
W440-28	55.75	102.12	384.84	804.24
W440-28-H01	77.5	99.94	462.79	582.19
W440-28-H02	60.25	117.99	367.59	405.78
W440-28-H03	56	110.4	494.42	471.76
W440-28-S01	63	146.7	496.9	229.01



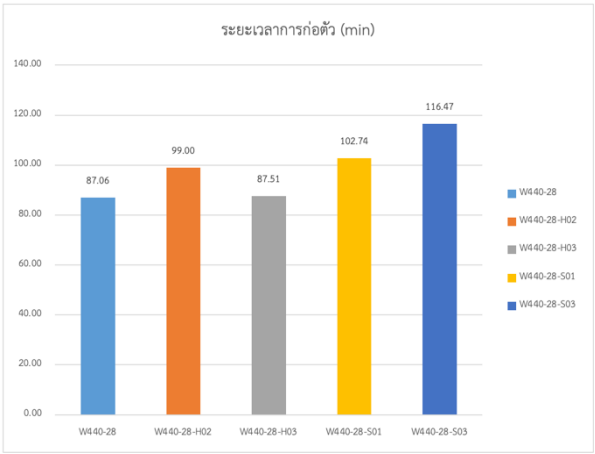
รูปภาพที่ 3.4 กราฟค่ากำลังประลัยของปูนประเภทที่ 1

4.2.3 มอร์ตาร์-ปูนไฮบริด

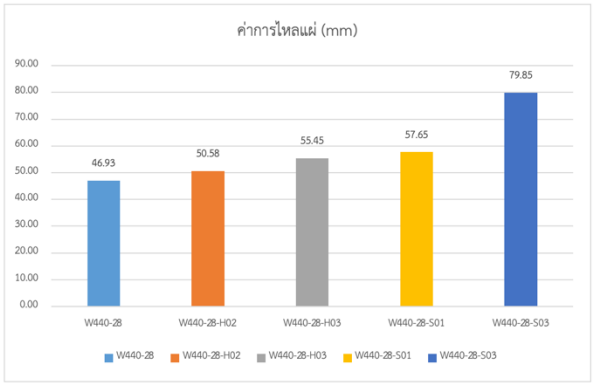
ในการทดสอบมอร์ตาร์ของปูนปอร์ตแลนด์ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) อยู่ที่ 0.28 โดยการทดสอบจะมีทั้งการไม่ใส่สารผสมเพิ่มและการใส่สารผสมเพิ่ม Hydroxypropyl Methyl Cellulose (HPMC) และ สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer [SP]) เช่นเดียวกับการทดสอบของปูนพอร์แลนด์ ประเภทที่ 1 แต่หลังจากได้ทำการทดสอบพอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แล้วจึงตัดสูตรผสมบางสูตรออกเนื่องจากสังเกตได้ว่าลักษณะจะคล้ายคลึงกัน

ตารางที่ 3.3 ตารางเก็บผลคุณสมบัติเชิงกล

ส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ (mm)	Setting time (min)	กำลังอัดที่อายุบ่ม 1 วัน (ksc)	กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (kcs)	ลักษณะการขึ้นรูป
W440-28	46.93	87.06	-	-	
W440-28-H01	53.23	107.58	-	-	
W440-28-H02	50.58	99.00	-	-	
W440-28-H03	55.45	87.51	-	-	
W440-28-S01	57.65	102.74	-	-	
W440-28-S03	79.85	116.47	-	-	



รูปภาพที่ 3.5 กราฟระยะการก่อตัวของปูนไฮบริด



รูปภาพที่ 3.6 กราฟอัตราการไหล่ของปูนไฮบริด

3.2.4 การคัดเลือกสูตรมอร์ตาร์

การเลือกสูตรมอร์ตาร์เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกจาก 2 ปัจจัย

1. Flow หรืออัตราการไหลผ่าน ต้องอยู่ในช่วง 50 – 70 mm
2. Setting time ต้องอยู่ในช่วง 85-150 mm

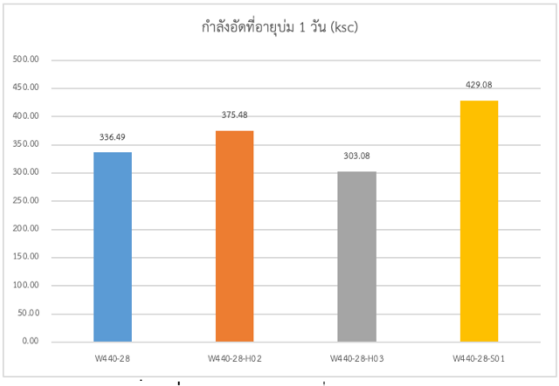
ซึ่งจะทำให้เหลือสูตรผสมมอร์ตาร์อยู่เพียง 4 สูตรที่ผ่านเกณฑ์คือ

1. W440-28
2. W440-28-H02
3. W440-28-H03
4. W440-28-S01

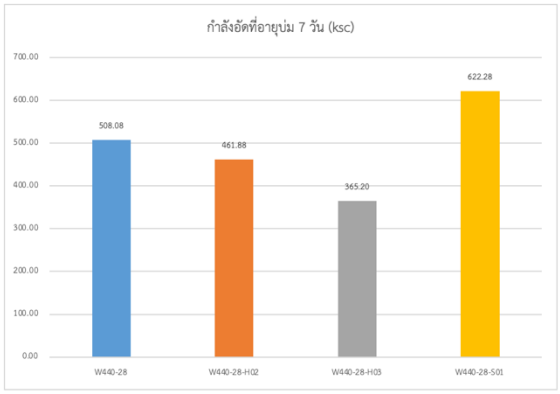
หลังจากนั้นผู้วิจัยเริ่มทำการหากำลังประลัยโดยการเลือกสูตรจากการตัดตามเกณฑ์ Flow และ Setting time ที่เลือกไว้

ตารางที่ 3.4 ตารางเก็บผลคุณสมบัติเชิงกลของปูนไฮบริด

ส่วนผสม	ค่าการไหลแผ่ (mm)	Setting time (min)	กำลังอัดที่อายุบ่ม 1 วัน (ksc)	กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน (ksc)
W440-28	55.75	87.06	336.49	508.08
W440-28-H02	60.25	99	375.48	461.88
W440-28-H03	56	87.51	303.08	365.20
W440-28-S01	63	102.74	429.08	622.28



รูปภาพที่ 3.7 กราฟกำลังอัดที่อายุบ่ม 1 วัน



รูปภาพที่ 3.8 กราฟกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน

3.3 การทดสอบการฉีดขึ้นรูปมอร์ตาร์

ในการทดลองผู้วิจัยได้มีการทดลองขึ้นรูปวัสดุมอร์ตาร์ตามโดยมีการจำแนกออกตามสูตรมอร์ตาร์ที่ใช้

3.3.1 การฉีดขึ้นรูปผ่านกรวยขนาด 2 cm

จากการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ตามหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 แล้วจึงได้มีการขึ้นรูปสูตรของมอร์ตาร์แต่ละสูตรเพื่อดูความเหมาะสมของชิ้นงานและลักษณะที่ถูกฉีดขึ้นมา โดยจะทำการแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ มอร์ตาร์จากปูนปอร์ตแลนด์ประเภทและมอร์ตาร์จากปูนไฮบริด

3.3.1.1 มอร์ตาร์จากปูนปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

รูปภาพที่ 4.9 ตัวอย่างการขึ้นรูปสูตรผสม W440-28 และ W440-28-H01

3.3.1.2 มอร์ตาร์จากปูนไฮบริด SCG

รูปภาพที่ 4.10 ตัวอย่างการขึ้นรูปสูตรผสม W440-28 และ W440-28-H01

3.4 ผลทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมของสูตรผสม W440-28-H03

ในการทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมนั้น ผู้วิจัยได้เลือกสูตรผสมที่ใช้ปูนไฮบริดเนื่องจากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงลกลของทั้งปูนทั้ง 2 ชนิดนั้น ไม่ได้มีความแตกต่างกันจนมีนัยสำคัญ จึงเลือกที่จะใช้ปูนไฮบริดในการทดสอบต่อไป และได้ทำการเลือกสูตรผสมเพียง 2 สูตรเพื่อที่จะทำทดสอบหาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเนื่องจากหลังจากที่แต่ทำการทดสอบฉีดขึ้นรูปในหัวข้อที่ 4.3.1.1 และ 4.3.1.2 แล้วพบว่าสูตรผสมในสูตรที่ใช้ HPMC ปริมาณน้อย จะทำให้มอร์ตาร์ที่ฉีดออกมาไม่ค่อยจับตัวกันเท่าที่ควร จึงได้ทำการเลือกมาเพียง 2 สูตรผสมคือ W440-28-H03 และ W440-28-S01

3.4.1 ผลทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมของการขึ้นรูปชั้น 1

หลังจากผสม 2 นาทีได้ทำการเริ่มฉีดขึ้นทีละชั้นเป็นจำนวน 15 ชิ้นตัวอย่างเพื่อพิจารณาความสามารถในการแข็งตัวของชั้นที่หนึ่ง หลังจากนั้นก็ทำการฉีดชั้นที่ 2 ทับในทุกๆหนึ่งนาทีหลังฉีดขึ้นรูปชั้นที่หนึ่งเสร็จ นาทีเพื่อนำไปพิจารณาในหัวข้อที่ 4.4.2

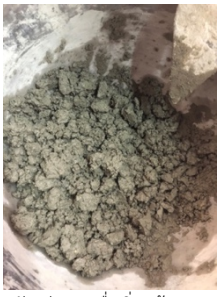
รูปภาพที่ 3.11 การทดลองฉีดขึ้นรูป

3.4.2 ผลการทดสอบช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการหาจากการฉีดขึ้นรูปมอร์ตาร์ไปเรื่อยๆ ในขึ้นหัวข้อ 4.4.1 จนพบว่าเวลาที่เหมาะสมกับการทำงานในกรณีใช้สูตรมอร์ตาร์ W440-28-H03

ตารางที่ 3.5 ตารางผลระยะเวลาการทดสอบ

สูตร	ระยะเวลาทำงาน
W440-28-H03	28
W440-28-H03	27
W440-28-H03	32
W440-28-H03	30
W440-28-H03	28
W440-28-H03	30
W440-28-H03	31
Average time	29.43



รูปภาพที่ 3.12 ตัวอย่างปูนเมื่อเริ่มแห้งของ W440-28-H03

3.4.3 ผลการทดสอบช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไป

ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการฉีดขึ้นรูปทั้งหมด 10 ชิ้นงานโดยเริ่มทำการฉีดขึ้นรูปตั้งแต่ 6 นาทีขึ้นไปเนื่องจากเหตุผลในหัวข้อ 4.4.1 เพื่อให้ชั้นที่ 1 นั้นแข็งตัวอย่างเหมาะสมและสามารถรับแรงน้ำหนักในชั้นถัดไปได้หลังจากทำการ Cut เพื่อดูรอยเชื่อมกันระหว่างชั้นแล้ว หลังจากนั้นทำการวัดความกว้างของชั้นแรกและชั้นที่ 2 ว่าผลต่างของความกว้างนั้นเกิน 5 mm หรือไม่แล้วทำการสรุปผล

รูปภาพที่ 3.13 ตัวอย่างการ Cut ที่การฉีดขึ้นรูปห่างกัน 5 นาที

รูปภาพที่ 3.14 การวัดขนาดความกว้าง

3.5 ผลทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมของสูตรผสม W440-28-S01

3.5.1 ผลทดสอบระยะเวลาที่เหมาะสมของการขึ้นรูปชั้น 1

หลังทำการผสมเสร็จได้เริ่มทำการฉีดขึ้นรูปตัวอย่างมอร์ตาร์ในทุกๆ 1 นาที เป็นจำนวน 14 ชิ้นตัวอย่างเพื่อพิจารณาความสามารถในการแข็งตัวของชั้นที่หนึ่ง หลังจากนั้นก็ทำการฉีดชั้นที่ 2 ทับในทุกๆหนึ่งนาทีหลังฉีดขึ้นรูปชั้นที่หนึ่งเสร็จเพื่อนำไปพิจารณาในหัวข้อที่ 4.5.2

รูปภาพที่ 3.14 การฉีดขึ้นรูปตัวอย่าง

3.5.2 ผลการทดสอบช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการหาจากการฉีดขึ้นรูปมอร์ตาร์ไปเรื่อยๆ ในขึ้นหัวข้อ 4.4.1 จนพบว่าเวลาที่เหมาะสมกับการทำงานในกรณีใช้สูตรมอร์ตาร์ W440-28-S01

ตารางที่ 3.6 ตารางเก็บผลระยะเวลาทำงาน

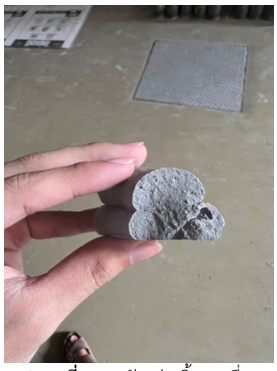
สูตร	ระยะเวลาทำงาน
W440-28-S01	44
W440-28-S01	42
W440-28-S01	45
W440-28-S01	44
W440-28-S01	40
Average	43

รูปภาพที่ 3.15 ตัวอย่างปูนเมื่อเริ่มแห้งของ W440-28-S01

3.5.3 ผลการทดสอบช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไป

ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการฉีดขึ้นรูปทั้งหมด 14 ชิ้นงานโดยเริ่มทำการฉีดขึ้นรูปตั้งแต่ 5 นาทีขึ้นไปเนื่องจากเหตุผลในหัวข้อ 4.5.1 เพื่อให้ชั้นที่ 1 นั้นแข็งตัวอย่างเหมาะสมและสามารถรับแรงน้ำหนักในชั้นถัดไปได้ หลังจากทำการ Cut เพื่อดูรอยเชื่อมกันระหว่างชั้นแล้วหลังจากนั้นทำการวัดความ

กว้างของชั้นล่างและชั้นบนว่าผลต่างของความกว้างนั้นเกิน 5 mm หรือไม่ แล้วทำการสรุปผล



รูปภาพที่ 3.16 ตัวอย่างชิ้นงานที่แบะ

รูปภาพที่ 3.17 ตัวอย่างชิ้นงานที่ไม่แบะ

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ประสงค์เพื่อพัฒนาหาส่วนผสมของสูตรมอร์ตาร์ที่เหมาะสมและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปเพื่อการจำลองลักษณะการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยการพัฒนาสูตรผสมมอร์ตาร์นั้น ผู้วิจัยได้ทำการใช้สารผสมเพิ่ม 2 ชนิดและการปรับปริมาณน้ำ (W/C) เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะหัวฉีดที่ทำการจำลองมากที่สุด ในส่วนของการหาเวลาที่เหมาะสมนั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การหาระยะเวลาที่เหมาะสมของการขึ้นรูปชั้น 1,การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและการช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไปทั้งนี้ค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นอยู่ในขอบเขตของงานวิจัยซึ่งก็คือ การที่ผู้วิจัยไม่สามารถผสมมอร์ตาร์ใหม่ได้ตลอดระยะเวลาการทำงานซึ่งอาจจะไม่เสมือนงานก่อสร้างจริงที่มีการผสมปูนใหม่แล้วฉีดขึ้นรูปอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งเป็นการจำลองหัวฉีดขึ้นรูปที่มีขนาดเพียง 2 เซนติเมตร และสุดท้ายคือสภาพอากาศประเทศไทย ณ ขณะวิจัยนั้นเป็นช่วงหน้าร้อน ซึ่งอาจจะส่งผลให้กับคุณสมบัติของมอร์ตาร์ได้

4.1.1 การพัฒนาวัสดุมอร์ตาร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการจำลองการฉีดขึ้นรูป

ในส่วนของการพัฒนาส่วนผสมวัสดุมอร์ตาร์นั้นจำเป็นต้องมีการทดสอบวัสดุที่เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์นั้นคือ ทราย เนื่องจากทรายมีผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์โดยตรง ซึ่งในการทดสอบทรายนั้น ได้หาค่าของค่าการดูดซึมน้ำ ปริมาณน้ำส่วนเกินและโมดูลัสความละเอียด หลังจากนั้นทำการหาคุณสมบัติของมอร์ตาร์เชิงกลของมอร์ตาร์ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ระยะก่อตัว และกำลังรับแรงอัด ที่มีการใช้ส่วนของปริมาณ น้ำ ปูน หิน และสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน

จากการทดสอบวัสดุมวลรวมละเอียดแล้วพบว่าจะได้ค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ที่ 2.6 ส่วนการทดสอบปริมาณน้ำส่วนเกินและค่าค่าการดูดซึมน้ำจะได้ค่าอยู่ที่ 0.148 และ 0.17 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณน้ำส่วนเกินที่ได้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับทรายปกติ ทั้งนี้สาเหตุอาจจะเกิดจากสภาวะอากาศที่ร้อนของช่วงหน้าร้อนประเทศไทย จึงทำให้ค่าปริมาณน้ำส่วนเกินของทรายละเอียดนั้นมีค่าน้อย และในส่วนของค่าโมดูลัสความละเอียดก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ปกติโดยอ้างอิงจากค่าโมดูลัสที่ทรายละเอยีดจะอยู่ที่ช่วง 2.20 ส่วนค่าโมดูลัสที่ได้จากการทดสอบอยู่ที่ 2.6 โดยค่าที่ได้อาจจะมากกว่าโมดูลัสความละเอียดของทรายปกติทั้งนี้การเขย่าของเครื่องเขย่าในการทำการทดสอบนั้นผ่านการใช้งานมาอย่างยาวนานอาจจะทำให้กระบวนการเขย่าเพื่อร่อนผ่านตะแกรงคละขนาดได้ไม่ดีเท่าที่ควร แต่ก็สามารถอนุโลมได้เนื่องจากค่าโมดูลัสความละเอียดไม่ได้ผิดพลาดจากค่าที่ควรจะเป็นมากนัก ซึ่งการพัฒนาสูตรผสมมอร์ตาร์นั้นผู้วิจัยได้ใช้ทรายจากถุงเดิมตลอดการทดลอง

หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมมอร์ตาร์แล้วผู้วิจัยก็เริ่มทำการออกแบบอัตราส่วนผสมของส่วนประกอบมอร์ตาร์รวมถึงปริมาณของสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ให้เหมาะสมกับหัวฉีดขึ้นรูปขนาด 2 เซนติเมตรให้มากที่สุด โดยเริ่มจากการพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมอร์ตาร์ ด้วยการศึกษาค้นขว้าข้อมูลจึงได้กำหนดคุณสมบัติการไหลแผ่ไว้อยู่ที่ช่วง 40 – 70 มิลลิเมตร และระยะเวลาการก่อตัวอยู่ที่ 85 – 150 นาที เพื่อให้เหมาะสมกับการจำลองการฉีดผ่านเครื่องพิมพ์ 3 มิติมากที่สุด และต่อมาคือการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดมาตราฐานของคอนกรีตที่กำหนดไว้ที่ 240 Kcs ซึ่งจะพบว่าค่ากำลังที่ได้นั้น ผ่านทุกสูตรผสมหลังจากทำการคัดเลือกผ่านคุณสมบัติเชิงกลทั้งสิ้น

ในการพัฒนาวัสดุมอร์ตาร์นั้น ผู้วิจัยได้ทำการใช้ปูน 2 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันกล่าวคือ ปูนพอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนไฮบริด ซึ่งเป็นของบริษัท SCG ทั้งคู่ หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของส่วนผสมมอร์ตาร์โดยใช้ปูนทั้ง 2 ชนิดแล้วพบว่า ไม่เห็นความแตกต่างจนเกิดนัยสำคัญให้เลือกใช้ปูนประเภทใดประเภทหนึ่ง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปูนไฮบริดในการทดสอบวัดค่าต่างๆต่อไป

หลังจากทำการคัดเลือกผ่านคุณสมบัติเชิงกลแล้วจะได้สูตรผสมที่เหมาะสมคือ W440-28,W440-28-H01,W440-28-H02,W440-28-H03 และ W440-28-S01 โดยพิจารณาจากค่าอัตราการไหลแผ่และระยะเวลาในการก่อตัวเป็นหลัก หลังจากนั้นก็ได้ทำการฉีดขึ้นรูปสูตรผสมที่ผ่านการคัดเลือกแล้วพบว่าลักษณะของเนื้อปูนที่ใส่สารผสมเพิ่มในปริมาณน้อย จะก่อให้เกิดการไม่จับตัวกันของเนื้อปูน โดยสาเหตุอาจจะเกิดจากสภาพอาการที่ร้อนทำในประเทศไทย ทำให้การระเหยของน้ำในมอร์ตาร์ระเหยไวขึ้นอีกด้วย

ผู้วิจัยจึงได้เลือก 2 สูตรผสมที่เหมาะสมกับการฉีดขึ้นรูปผ่านหัวฉีดขนาด 2 เซนติเมตรและสภาพอากาศที่ร้อนของประเทศไทยอีกด้วย

ซึ่ง 2 สูตรที่เลือกมาทำการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปคือ W440-28-H03 และ W440-28-S01

4.1.2 การหาเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป

ในส่วนของการหาเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปนั้น ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือการหาระยะเวลาที่เหมาะสมของการขึ้นรูปชั้น 1,การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปและการช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไป โดยระยะเวลาที่ได้นั้นแบ่งออกเป็นระยะเวลาของสูตรผสมมอร์ตาร์ทั้ง 2 ส่วนผสม

4.1.2.1 การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมของสูตรผสม W440-28-H03

จากผลการทดสอบจะสรุปได้ว่าสูตรผสมนี้มีระยะเวาที่เหมาะสมของการฉีดขึ้นรูปชั้นที่ 1 อยู่ที่ 6 นาที โดยสรุปได้ว่าหากใช้สูตรผสมนี้ควรที่จะรอประมาณ 6 นาทีเพื่อให้มอร์ตาร์ชั้นล่างนั้นแข็งตัวก่อนที่จะฉีดขึ้นรูปชั้นถัดไป ในส่วนการทดสอบต่อมาคือช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปซึ่งจะได้ค่าออกมาอยู่ที่ 29.43 นาที โดยสามารถสรุปได้ว่าหลังจากที่มีการผสมแล้ว จะมีเวลาในการฉีดขึ้นรูปประมาณ 30 นาทีก่อนที่มอร์ตาร์จะเริ่มมีการแข็งตัวจนไม่สามารถฉีดผ่านหัวฉีดได้ และสุดท้ายคือช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไปนั้นจะได้ค่าอยู่ที่ 6 นาที โดยสามารถสรุปได้ว่าเวลาในการฉีดขึ้นรูปชั้นต่อไปนั้น ต้องรอประมาณ 6 นาทีจะทำให้ชั้นหนึ่งไม่แบะตัวจนเกินไป โดยเกณฑ์ที่ใช้คัดเลือกการแบะของชิ้นตัวอย่างนั้นชิ้นพิจารณาจากการวัดความกว้างของชั้นล่างและชั้นบน โดยความต่างของความกว้างต้องมีระยะไม่เกิน 5 มิลลิเมตร จึงจะอยู่ในเกณฑ์ไม่แบะ

4.1.2.2 การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมของสูตรผสม W440-28-S01

จากผลการทดสอบจะสรุปได้ว่าสูตรผสมนี้มีระยะเวาที่เหมาะสมของการฉีดขึ้นรูปชั้นที่ 1 อยู่ที่ 9 นาที โดยสรุปได้ว่าหากใช้สูตรผสมนี้ควรที่จะรอประมาณ 9 นาทีเพื่อให้มอร์ตาร์ชั้นล่างนั้นแข็งตัวก่อนที่จะฉีดขึ้นรูปชั้นถัดไป ในส่วนการทดสอบต่อมาคือช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปซึ่งจะได้ค่าออกมาอยู่ที่ 43 นาที โดยสามารถสรุปได้ว่าหลังจากที่มีการผสมแล้ว จะมีเวลาในการฉีดขึ้นรูปประมาณ 30 นาทีก่อนที่มอร์ตาร์จะเริ่มมีการแข็งตัวจนไม่สามารถฉีดผ่านหัวฉีดได้ และสุดท้ายคือช่วงเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปในชั้นถัดๆไปนั้นจะได้ค่าอยู่ที่ 8 นาที โดยสามารถสรุปได้ว่าเวลาในการฉีดขึ้นรูปชั้นต่อไปนั้น ต้องรอประมาณ 8 นาทีจะทำให้ชั้นหนึ่งไม่แบะตัวจนเกินไป ทั้งนี้จะพบว่าสูตรผสมนี้จะให้ระยะเวลาที่สูงกว่าสูตผสม W440-28-H03 เนื่องจากการใช้สารผสมเพิ่มที่แตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนจากค่าระยะเวลาการก่อตัวและระยะเวลาที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ และเงินทุนจากคณะวิศกรรมศาสตร์ ภาควิชาโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณอาจาย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ วิทิต ปานสุข อาจารย์ประจำภาควิชาโยธา เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำตลอดการวิจัยและทำให้วิทยานิพนธ์นี้ลุล่วงไปได้ดี

ขอขอบคุณ นางสาวณัฏฐา เวสสะภักดี,นายอธิพัฒน์ ทองญวน และนายกันตวิชญ์ สุพรรณแสง ที่ให้เกียรติให้คำปรึกษาและช่วยเหลือการปฏิบัติงานในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณนางสาววิรัลนัฐ พิมพ์ชัย ที่เป็นผู้ช่วยเหลือในการเรียบเรียงคำภาษาอังกฤษและขอขอบคุณเพื่อนร่วมชั้นปีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Hager, I., Maroszek, M., Mróz, K., Ke ̨sek, R., Hebda, M., Dvorkin, L., Marchuk, V. (2020). Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications. *Materials* , *15*, 4112. https://doi.org/10.3390/ma15124112

[2] Ganchai T., Patiphat J., Satish P., Somnuk T., Chalermwut S., (2020) . Experimental and numerical investigation of 3D-printed mortar walls under uniform axial compression. Construction and building materials. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129552

[3] Venkatesh N., Martin K., Viktor M., (2020). Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability. Automation in construction. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102986

[4] Worakan S., Wichitipong S., Vitchuphan L.,Warunya C., (2020). 3D concrete printing for Modern construction.

[5] Brandy N. Diggs-McGee, Eric L. Kreiger, Megan A. Kreiger. (2019). Print time vs. elapsed time: A temporal analysis of a continuous printing operation for additive constructed concrete. Additive manufacturing. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.008

[6] Daniel G. Soltan, Victor C. li,. (2018). A selft-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. Cement and concrete Composite. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017

[7] Tan, H., Ma, B., Peng, Y., Jian, S., Zhi, Z., Guo, Y., . . . He, X. (2018). Effect of hydroxypropyl-methyl cellulose ether on rheology of cement paste plasticized by polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials, 160*, 341-350. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.010

[8] เอกสารทางวิชาการของคอนกรีตผสมเสร็จซีแพค,. (2002). บริษัทผลิตซ์และวัสดุก่อสร้าง

[9] American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.* West

Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/C0128-15

[10] American Society for Testing and Materials. (2006). *ASTM C136-06, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.* West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/C0136-06

[11] American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM C305-14, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/C0305-14

[12] American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C1437-15, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.* West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/C1437-15

[13] American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C807-13, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle.* West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/C0807-13

[14] American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C109 / C109M-16, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/C0109_C0109M-16