

การพัฒนา mortar ที่ไม่ชอบน้ำสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ Development of Hydrophobic Mortar for 3D Printing

ณัฐณิชา สกลอารีย์^{1*} กฤษณะ สังข์ศิริ¹ จุฑามาศ ทวีสินธุ์¹ สิริกมล อัครมั่นคงเจริญ¹ ธนกร สุทธิอาภา²
วาราลักษณ์ แผ่นสุวรรณ² วีระชาติ ตั้งจิรภัทร¹ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*Corresponding author; E-mail address: natthanicha.hayati@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนา mortar ที่ไม่ชอบน้ำสำหรับใช้งานในกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้แคลเซียมสเตียเรต (CS) แทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราร้อยละ 10.0, 12.5 และ 15.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน นอกจากนี้ใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีน (PP) ขนาดความยาว 6 มม. ในปริมาณร้อยละ 0.2 และ 0.4 โดยปริมาตร ควบคุมความสามารถในการไหลของ mortar อยู่ระหว่าง 180 – 190 มม. โดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทำการทดสอบสมบัติในสภาวะสดและสภาวะแข็งตัวแล้วของ mortar ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว, การดูดซึมน้ำของ mortar, กำลังรับแรงอัด, มุมผิวสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว และความสามารถในการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ จากการศึกษาพบว่าการใช้แคลเซียมสเตียเรตในปริมาณมากขึ้นทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของ mortar นานขึ้น และกำลังรับแรงอัดลดลง อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนช่วยให้อัตราการดูดซึมน้ำของ mortar เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้แคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 15 ยังช่วยลดอัตราการดูดซึมน้ำของ mortar ได้ถึงร้อยละ 91.0 และมีมุมผิวสัมผัสเท่ากับ 142 องศา และการใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร่วมกับแคลเซียมสเตียเรต ส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซึมน้ำของ mortar และมุมผิวสัมผัสเล็กน้อย สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ แคลเซียมสเตียเรต ส่งผลให้พื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์มีความสามารถที่ไม่ชอบน้ำ และการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้เมื่อใช้ร่วมกับเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร้อยละ 0.2 ทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปของ mortar สำหรับการพิมพ์ 3 มิติดีขึ้น

คำสำคัญ: การพิมพ์ 3 มิติ, แคลเซียมสเตียเรต, มุมผิวสัมผัส, mortar ที่ไม่ชอบน้ำ, เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีน

Abstract

This article aims to develop hydrophobic mortar for 3D printing. Calcium stearate was used to replace hydraulic cement at the rates of 10, 12.5 and 15% by weight of binder. In addition, micro polypropylene fiber with a 6 mm length was used in

mixture at the rates of 0.2 and 0.4% by volume. The flowability of mortar was controlled between 180 – 190 mm by varying the water to binder ratio. Both fresh and hardened properties of mortar were investigated in terms of setting time, water absorption, compressive strength, contact angle, and printability of 3D mortar printing. The results showed that the setting time of mortar was increased, and the compressive strength was decreased with the increased of calcium stearate content. However, the use of micro polypropylene fiber could improve the compressive strength of mortar. Moreover, the contact angle was increased up to 142° and the water absorption of mortar was decreased by 91.0% when calcium stearate was presented in the mixture at 15%. The use of micro polypropylene fibers caused a slightly decreasing in the surface contact angle. For the 3D printability, calcium stearate gave hydrophobic and self-cleaning property on the printed sample surface. Additionally, the buildability of mortar for 3D printing was enhanced by incorporating 0.2% micro polypropylene fiber.

Keywords: 3D Printing, Calcium stearate, Contact angle, Hydrophobic mortar, Micro polypropylene fiber

1. คำนำ

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นกระบวนการอัตโนมัติที่สามารถสร้างรูปทรงเรขาคณิต ที่มีความซับซ้อนจากแบบจำลอง 3 มิติ ที่ละชั้น ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิต เช่น รถยนต์ การบินและอวกาศ และการแพทย์ เป็นต้น อุตสาหกรรมอาคารและการก่อสร้างเป็นอีกกลุ่มที่นำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมาประยุกต์ใช้ ร่วมกับวัสดุซีเมนต์ เป็นลักษณะการพิมพ์ 3 มิติ โดยอัดฉีดวัสดุซีเมนต์ผ่านหัวพิมพ์ทีละชั้น ซึ่งแตกต่างจากการใช้พลาสติก หรือวัสดุอื่นๆ [1] เนื่องจากวัสดุซีเมนต์มีความแข็งแรงสูง สามารถทนทานได้ดี ขึ้นงานจากการพิมพ์ 3 มิติ จึงสามารถรับแรงได้ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับงานคอนกรีตที่ต้องใช้เหล็กเสริม [2] เนื่องจากการก่อสร้าง

แบบดั้งเดิม ถูกตีกรอบการก่อสร้างด้วยการตั้งแบบหล่อ ใช้แรงงานบุคคล ระยะเวลาในการก่อสร้างนานและมีค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังมีเศษวัสดุ ก่อสร้างเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ในทางตรงกันข้าม การพิมพ์ 3 มิติ สามารถ สร้างสรรค์ชิ้นงานได้อย่างอิสระ มีระบบคอยควบคุมการผลิตที่เที่ยงตรงและ แม่นยำ จึงมีความรวดเร็วในการก่อสร้าง ช่วยลดปัญหาการขาดแคลน แรงงานบุคคล และขยะจากเศษวัสดุก่อสร้าง นอกจากนี้ยังช่วยส่งเสริม การรักษาสังแวดล้อม ด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ แทนที่ในปูนซีเมนต์ได้ อีกด้วย [3]

ความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างชั้น ถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับ โครงสร้างของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นกระบวนการที่อัดฉีดมอร์ตาร์ผ่านหัวพิมพ์ทีละชั้น รอยต่อระหว่างชั้น อาจเกิดรอยต่อเย็น (Cold joint) ซึ่งเป็นรอยต่อจากการพิมพ์มอร์ตาร์ต่อ จากมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้วหรือมอร์ตาร์สดที่เลยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ไปแล้ว ช่วงเวลาการพิมพ์ระหว่างชั้นที่นานอาจทำให้เกิดช่องว่างและโพรง ระหว่างชั้น ซึ่งเกิดจากการสูญเสียความชื้นที่พื้นผิว ทำให้แรงยึดเหนี่ยว ระหว่างชั้นลดลง รอยต่อของผิวหน้าระหว่างชั้น จึงเป็นปัญหาหนึ่งของ เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างชั้นที่อ่อนแอ ความ ทนทานต่อแรงเฉือนลดลง อีกทั้งนี้ยังมีโอกาสซึมผ่านทำให้ความทนทาน ของมอร์ตาร์ในระยะยาวลดลง [4-5] เพื่อลดปัญหาการซึมผ่านของพื้นผิว หรือบริเวณรอยต่อของชั้น เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ จึงต้องมี การปรับปรุงสมบัติของพื้นผิวก่อนนำไปใช้งาน

มอร์ตาร์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Mortar) เป็นการป้องกันพื้นผิว โดยมีมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวมากกว่า 90 องศา มอร์ตาร์ที่ไม่ชอบน้ำ จึงสามารถช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ [6] นอกจากนั้นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำยังม ีความสามารถทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) โดยการกำจัดฝุ่น หรือ อนุภาคที่ปนเปื้อนออกไป จากการตกกระทบหรือหยดน้ำที่กลิ้งไปมา [7] โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคลือบผิวกันน้ำก่อน การนำไปใช้งาน แต่ข้อเสียของวิธีนี้จำเป็นต้องดูแลตามอายุการใช้งานของ ผลิตภัณฑ์ นักวิจัยหลายท่านจึงพยายามดัดแปลงส่วนผสมที่มีส่วนประกอบ ของปูนซีเมนต์ด้วยการปรับปรุงให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือทำ ให้พื้นผิวมีมุมสัมผัสสูง สามารถลดการดูดซึมได้ถึงร้อยละ 80 แสดงให้เห็นถึง การกันน้ำและลดการซึมผ่านได้ดี นอกจากนั้นยังปรับปรุงความทนทานและ ยืดอายุการใช้งานของคอนกรีตได้อีกด้วย [8]

โดยจากการศึกษาของ Mehdi Nemati Char และคณะ [9] พบว่า แคลเซียมสเตียเรตช่วยให้คอนกรีตมีความที่บับน้ำและมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาอัตราส่วนผสมของวัสดุซีเมนต์ที่มีแคลเซียมส เตียเรตที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อพัฒนาพื้นผิวของ ชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ ให้เป็นพื้นผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ซึ่งสามารถกันน้ำและ ป้องกันการเกาะตัวของสิ่งสกปรก และอนุภาคต่าง ๆ ได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement, HC)

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) ที่มีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.07 และองค์ประกอบหลักทางเคมีตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
HC	16.0	3.2	3.7	72.0	2.6	1.1	0.4	0.4	0.6
CS	0.2	0.1	0.1	98.7	-	0.5	-	-	0.4

2.1.2 แคลเซียมสเตียเรต (Calcium stearate, CS)

แคลเซียมสเตียเรต มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ตามรูปที่ 1 จัดอยู่ในจำพวกสารผสมเพิ่มกันน้ำและสารลดแรงตึงผิว มีแคลเซียมเป็น ส่วนประกอบประมาณร้อยละ 6.6 -7.4 โดยน้ำหนักมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.08 และองค์ประกอบหลักทางเคมีตามตารางที่ 1



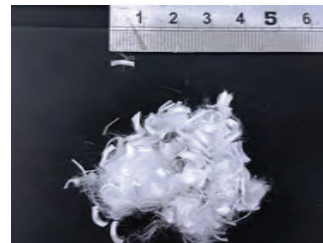
รูปที่ 1 แคลเซียมสเตียเรต

2.1.3 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ศึกษาคือ ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 (อนุภาคขนาด 0.60 ถึง 0.15 มม) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 โมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 1.72 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.84

2.1.4 เส้นใยไมโครโพลีพรอพิลีน (Micro polypropylene fiber, PP)

เส้นใยไมโครโพลีพรอพิลีน ตามรูปที่ 2 เป็นพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก จัดอยู่ในกลุ่มโพลีเอทิลีน มีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาว ใช้สำหรับควบคุมการหดตัว พลาสติกในระยะแรกและการแตกร้าวของคอนกรีตและมอร์ตาร์ได้ โดยมี สมบัติของเส้นใยแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 2 เส้นใยไมโครโพลีพรอพิลีน

ตารางที่ 2 สมบัติของเส้นใยไมโครโพลีพรอพิลีน

ชนิดของเส้นใย	Diameter (µm)	Length (mm)	Tensile Strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Density (g/cm ³)
PP	20	6	350	3-5	0.91

2.2 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ

นำแคลเซียมสเตียเรตเทนท์ที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 12.5, 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีน ขนาดความยาว 6 มม. ในปริมาณร้อยละ 0.2 และ 0.4 โดยปริมาตร กำหนดอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด เท่ากับ 1 : 1 โดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน Tay และ Tan [10] ได้แนะนำความสามารถในการไหลของส่วนผสมสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ควรอยู่ในช่วง 150 – 190 มม. งานวิจัยนี้จึงควบคุมความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์อยู่ระหว่าง 180 – 190 มม. อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนผสมมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ

Mix	Mix proportion (g)					W/C	Flow (mm)
	Cement	CS	Sand	Water	PP		
0CS	1500	-	1500	510	-	0.41	190
10CS	1350	150	1500	615	-	0.43	189
12.5CS	1315	185	1500	645	-	0.45	187
15CS	1275	225	1500	675	-	0.45	188
15CS0.2PP	1275	225	1500	675	2.6	0.45	184
15CS0.4PP	1275	225	1500	675	5.3	0.45	180

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบความสามารถในการไหล

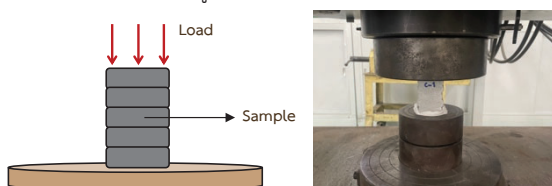
ความสามารถในการไหล บ่งบอกถึงความสามารถในการอัดฉีดของมอร์ตาร์ (Extrudability) สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ [11] การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1437 [12]

2.3.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่พอดีเพื่อรักษาความต่อเนื่องของการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ และเพื่อให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงเพียงพอในการรับน้ำหนักของชั้นที่ทับหลังจากถูกปล่อยจากหัวฉีด [11] การทดสอบการระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C807 [13]

2.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

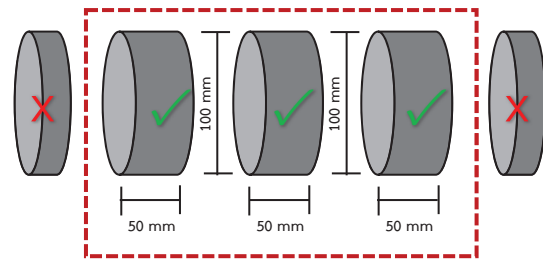
การทดสอบกำลังรับแรงอัดทำการทดสอบจากตัวอย่างจากการหล่อและตัวอย่างจากการพิมพ์ 3 มิติ โดยตัวอย่างจากการหล่อทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [14] ใช้ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม.³ ทดสอบที่อายุตัวอย่าง 1, 3, 7 และ 28 วัน และตัวอย่างจากการพิมพ์ทำการตัดตัวอย่างพิมพ์ขนาด 2.5 x 5 x 5 ซม.³ และทำการทดสอบที่อายุตัวอย่าง 28 วัน โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) โดยให้แนวแรงกดเป็นไปตามรูปที่ 3



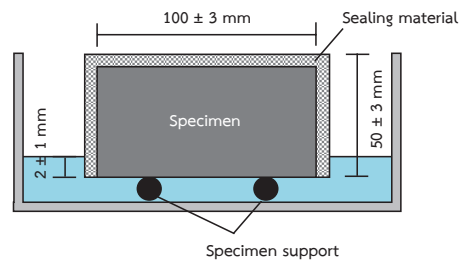
รูปที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างจากการพิมพ์ 3 มิติ

2.3.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

การทดสอบการดูดซึมน้ำเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาอัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลา ซึ่งมีพื้นผิวที่สัมผัสน้ำเพียงด้านเดียว โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1585 [15] ใช้ตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. โดยตัดตัวอย่างจากการหล่อมอร์ตาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ตามรูปที่ 4 และทำการทดสอบตามรูปที่ 5



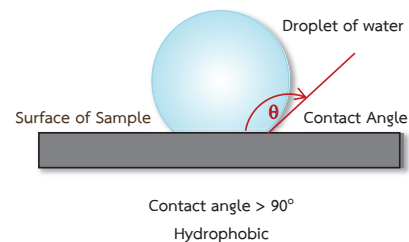
รูปที่ 4 การตัดตัวอย่างเพื่อเตรียมทำการทดสอบ



รูปที่ 5 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

2.3.5 การทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว

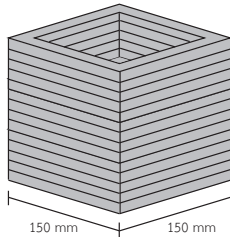
การทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle, θ) คือมุมที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของของเหลว กับพื้นผิววัสดุที่เป็นของแข็งดังรูปที่ 6 เมื่อของเหลวสัมผัสกับผิวของของแข็งจะเกิดความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของสารชนิดเดียวกัน (Adhesion force) ที่ทำให้ของเหลวกระจายตัว และแรงยึดเหนี่ยวของสารต่างชนิดกัน (Cohesion force) ที่พยายามทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลม ในกรณีที่มีมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา คือพื้นผิวมีการกระจายตัวไม่ดี หรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม บริเวณฐานของหยดของเหลวแตะกับพื้นผิวของของแข็งเล็กน้อย



รูปที่ 6 มุมสัมผัส (Contact angle, θ)

2.3.6 การพิมพ์ 3 มิติ

การพิมพ์ 3 มิติ เป็นการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ (Buildability) ซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการยุบตัวของมอร์ตาร์และน้ำหนักของชั้นที่ทับซ้อนกันหลังจากการฉีดขึ้นรูป [11] ทดสอบโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Delta พร้อมเครื่องปั๊มมอร์ตาร์เข้าสู่ที่อัดฉีด ใช้หัวฉีดรูปทรงกลมขนาด 25 มม และอัตราเร็วในการพิมพ์ 30 มม/วินาที สำหรับตัวอย่างพิมพ์เป็นกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 150 x 150 มม² จำนวน 15 ชั้น ตามรูปที่ 7 ทำการตรวจสอบจำนวนชั้นที่สามารถขึ้นได้ต่อเนื่องสูงสุด ความสมบูรณ์ของตัวอย่างพิมพ์และพื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์



รูปที่ 7 รูปแบบและขนาดตัวอย่างพิมพ์ 3 มิติ

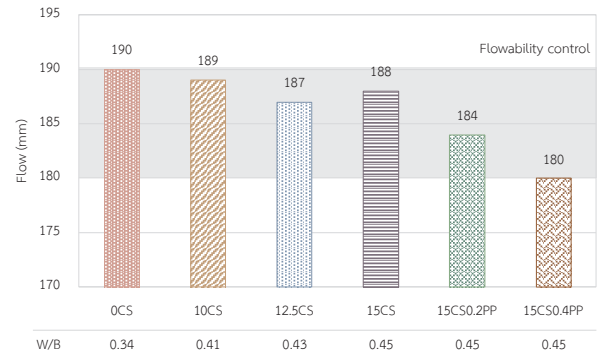
3. ผลการทดสอบ

3.1 ความสามารถในการไหล

รูปที่ 8 แสดงความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 10, 12.5 และ 15 ปริมาณความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 0.41, 0.43 และ 0.45 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mehdi Nemati Chari และคณะ [9] ระบุว่าการเพิ่มแคลเซียมสเตียเรตในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ความหนาแน่นและความสามารถในการทำงานของคอนกรีตลดลง พร้อมกับเพิ่มปริมาณอากาศในคอนกรีตสด สาเหตุเกิดจากขนาดอนุภาคของแคลเซียมสเตียเรตที่เล็กทำให้เกิดการเกาะติดกันและลดความสามารถในการไหลของคอนกรีตด้วยเหตุนี้จึงต้องเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อควบคุมความสามารถในการไหลให้อยู่ระหว่างช่วงที่กำหนดคือ 180 – 190 มม มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 15 มีค่าการไหลเท่ากับ 188 มม เมื่อเพิ่มเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร้อยละ 0.2 และ 0.4 โดยปริมาตร พบว่าค่าการไหลลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 184 และ 180 มม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Salahaldeen Alsadey [16] เนื่องจากเมื่อเพิ่มเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนเข้าไปในส่วนผสมของมอร์ตาร์ การกระจายตัวของเส้นใยจะสร้างโครงข่ายขนาดเล็กอยู่ทั่วในส่วนผสม สามารถกีดขวางการไหลของมอร์ตาร์ได้ ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ลดลง

สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ความสามารถในการไหล บ่งบอกถึงความสามารถในการอัดฉีดวัสดุซีเมนต์ (Extrudability) ความต่อเนื่องและคุณภาพของพื้นผิวภายหลังการกระบวนการอัดฉีด [11] เห็นได้ว่าทุกส่วนผสมของมอร์ตาร์กำหนดค่าการไหลให้อยู่ช่วงตั้งแต่ 180 – 190 มม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tay และ Tan [10] ที่แนะนำความสามารถในการไหลของส่วนผสมสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ควรอยู่ในช่วง 150 – 190

มม ทำให้ตัวอย่างพิมพ์มีความสม่ำเสมอและมีความสามารถในการขึ้นรูปมากขึ้น

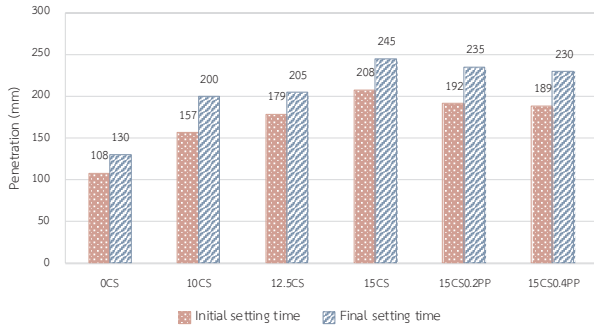


รูปที่ 8 ความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ

3.2 ระยะเวลาการก่อตัว

รูปที่ 9 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรต (OCS) มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 108 นาที แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 10, 12.5 และ 15 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 157, 179 และ 208 นาที ตามลำดับ เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เพื่อควบคุมความสามารถในการไหลให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร้อยละ 0.2 และ 0.4 ในส่วนผสมมอร์ตาร์ 15CS โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ลดลงเป็น 192 และ 189 นาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yangchen Xu และคณะ [17] ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนเป็นตัวกั้นระหว่างน้ำและอนุภาคของซีเมนต์ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง

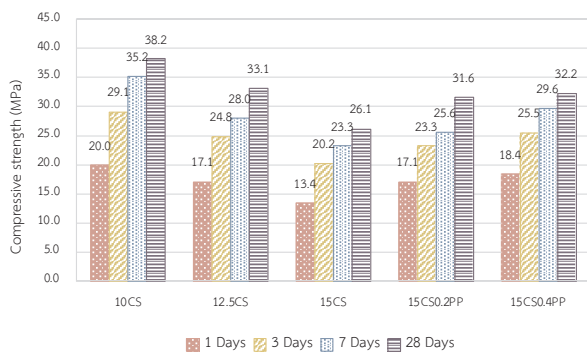
วัสดุสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ต้องใช้เวลาในการก่อตัวเพื่อรักษาความสามารถในการไหลอย่างต่อเนื่องระหว่างกระบวนการพิมพ์ และในขณะเดียวกันวัสดุซีเมนต์ต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่สามารถรับน้ำหนักของชั้นพิมพ์ถัดไป หากระยะเวลาในการก่อตัวสั้นเกินไป วัสดุซีเมนต์อาจเริ่มแข็งตัวภายในหัวฉีด ทำให้เกิดการอุดตันระหว่างกระบวนการอัดฉีด [18] ซึ่งงานวิจัยของ Zhang และคณะ [19] ได้แนะนำ ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ควรใช้เวลาก่อตัวเร็ว และกำลังรับแรงอัดสูงในช่วงต้น ซึ่งเห็นได้ว่าส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ไม่ชอบน้ำ มีระยะเวลาการก่อตัวที่นานเกินไป อาจส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่สามารถรับน้ำหนักของชั้นพิมพ์ถัดไป หรืออาจทำให้ความสูงของสิ่งพิมพ์ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 9 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ

3.3 กำลังรับแรงอัด

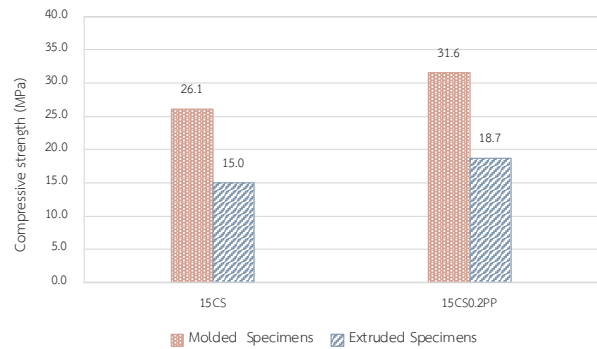
รูปที่ 10 แสดงผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างจากการหล่อ พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 10 (10CS) มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน เท่ากับ 20.0, 29.1, 35.2 และ 38.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 15 (15CS) มีกำลังรับแรงอัดลดลงเป็น 13.4, 20.2, 23.3 และ 26.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Maryoto และคณะ [20] ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณแคลเซียมสเตียเรตที่มากขึ้นทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนเพิ่มขึ้นและทำให้ความหนาแน่นลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร้อยละ 0.2 (15CS0.2PP) กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 17.1, 23.3, 25.6 และ 31.6 เมกะปาสคาล ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Salahaldeen Alsadey [16] เนื่องจากเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับมอร์ตาร์ด้วยการสร้างโครงข่ายที่ช่วยปรับโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์และมีความต้านทานต่อการแตกร้าวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดขนาดและความถี่ของรอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งทำให้เพิ่มกำลังรับแรงอัดและความทนทานของมอร์ตาร์ได้



รูปที่ 10 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จากของตัวอย่างจากการหล่อ

รูปที่ 11 แสดงผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างจากการพิมพ์ 3 มิติ เมื่อพิจารณาการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน พบว่า 15CS และ 15CS0.2PP มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 15.0 และ 18.7 เมกะปาสคาลตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

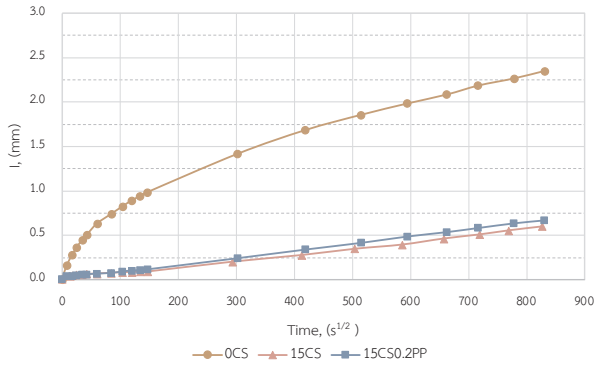
ของตัวอย่างจากการหล่อพบว่า ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทุกส่วนผสมมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ได้จากการหล่อร้อยละ 42.5 และ 40.8 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marczyk และคณะ [21] ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างพิมพ์ลดลงร้อยละ 40 - 57 เมื่อเทียบกับตัวอย่างจากการหล่อ เนื่องจากการหล่อตัวอย่างในแบบหล่อมีการบดอัดมอร์ตาร์เข้าสู่แบบหล่อ ซึ่งช่วยในการกระจายอนุภาคในมอร์ตาร์ให้สม่ำเสมอ นอกจากนี้แบบหล่อยังช่วยป้องกันไม่ให้มอร์ตาร์สูญเสีย น้ำ ซึ่งส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์มากขึ้น ในทางกลับกันการพิมพ์ 3 มิติเป็นกระบวนการที่อัดมอร์ตาร์ผ่านหัวพิมพ์เรียงต่อกันทีละชั้น ก่อให้เกิดโพรงอากาศและปริมาณรูพรุนที่สูงขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น ซึ่งส่งผลให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นและความสม่ำเสมอต่ำกว่าตัวอย่างจากการหล่อ [22]



รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างจากการพิมพ์ 3 มิติที่อายุ 28 วัน

3.4 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำกับเวลาของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ เมื่อพิจารณาอัตราการดูดซึมน้ำในช่วงต้นตั้งแต่วินาที 1 นาที จนถึง 6 ชั่วโมง มอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรต (0CS) มีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ $0.00669 \text{ mm/s}^{1/2}$ แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตร้อยละ 15 (15CS) มีอัตราการดูดซึมน้ำลดลงเป็น $0.00059 \text{ mm/s}^{1/2}$ ซึ่งสามารถลดอัตราการดูดซึมน้ำช่วงต้นได้ถึงร้อยละ 91 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ศศิธร และคณะ [23] ซึ่งพบว่าการใส่แคลเซียมสเตียเรตมากกว่าร้อยละ 9 สามารถลดอัตราการดูดซึมน้ำช่วงต้นได้ถึงร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร้อยละ 0.2 ในส่วนผสมมอร์ตาร์ 15CS (15CS0.2PP) อัตราการดูดซึมน้ำช่วงต้นเพิ่มขึ้นเป็น $0.00076 \text{ mm/s}^{1/2}$ ซึ่งสามารถลดอัตราการดูดซึมน้ำได้ร้อยละ 88.64 ในทางกลับกันเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ 15CS พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 28.19 เห็นได้ว่าเมื่อใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร่วมกับแคลเซียมสเตียเรตในส่วนผสมมอร์ตาร์ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนลงในคอนกรีตส่งผลต่อโครงสร้างภายในคอนกรีตโดยเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของรูพรุน จึงส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซึมน้ำ Karahan และ Atiş [24] ศึกษาเกี่ยวกับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เส้นใยพอลิพรอพิลีน พบว่ามีปริมาณโพรงขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเส้นใยพอลิพรอพิลีน ซึ่งความพรุนสัมพันธ์กับอัตราการดูดซึมน้ำ ดังนั้นเมื่อความพรุนในคอนกรีตเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

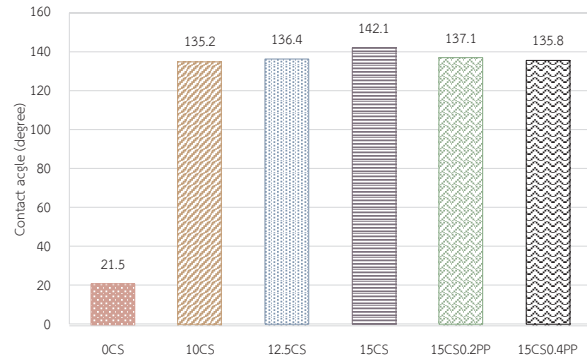


รูปที่ 12 อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ

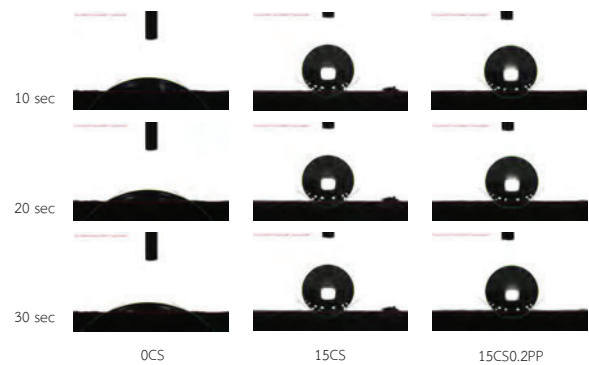
3.5 มุมผิวสัมผัส

รูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบมุมผิวสัมผัสกับพื้นผิวของมอร์ตาร์ที่เวลา 30 วินาที พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรต (OCS) มีมุมผิวสัมผัส 21.5 องศา แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรต ร้อยละ 10, 12.5 และ 15 มุมผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นเป็น 135.2, 136.4 และ 142.1 องศา ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ 14 หยดน้ำบนพื้นผิวสัมผัสของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยแคลเซียมสเตียเรต เป็นทรงกลมชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยแคลเซียมสเตียเรต ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมสเตียเรตเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวสัมผัสของมอร์ตาร์มีมุมผิวสัมผัสมากกว่า 90 องศา ซึ่งถือว่าเป็นมอร์ตาร์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Mortar) เนื่องจากแคลเซียมสเตียเรตเป็นสารที่มีพลังงานพื้นผิวดำ จึงส่งผลให้การดูดซึมน้ำเข้าสู่พื้นผิวดำและทำให้หยดน้ำสามารถคงรูปบนพื้นผิวได้

นอกจากนี้เมื่อเพิ่มเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร้อยละ 0.2 และ 0.4 ในส่วนผสมมอร์ตาร์ 15CS พบว่ามุมผิวสัมผัสลดลงเป็น 137.1 และ 135.8 องศา ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ 14 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหยดน้ำบนพื้นผิวสัมผัสของมอร์ตาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีน (15CS) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนมีผลกระทบต่อมุมผิวสัมผัสของมอร์ตาร์ เนื่องจากการใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนในส่วนผสมของวัสดุซีเมนต์ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างกัน ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassan Suiffi และ Anas El Maliki [25] ซึ่งทำการทดสอบผลกระทบของเส้นใยพอลิพรอพิลีนต่อความพรุนของคอนกรีต พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเส้นใยในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้รูพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับแคลเซียมสเตียเรตก็ส่งผลให้เป็นมอร์ตาร์ที่ไม่ชอบน้ำ ยิ่งไปกว่านั้นอีกหนึ่งคุณลักษณะของพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำคือ เป็นพื้นผิวที่มีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) เนื่องจากพื้นผิวสามารถกันน้ำและป้องกันการเกาะตัวของสิ่งสกปรก ฝุ่นละออง และอนุภาคอื่น ๆ เมื่อหยดน้ำสัมผัสกับพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ หยดน้ำจะเกาะตัวและพัดพาสิ่งสกปรก หรือเศษผงต่าง ๆ ออกไป [7]



รูปที่ 13 ผลการทดสอบมุมผิวสัมผัสของมอร์ตาร์ที่เวลา 30 วินาที



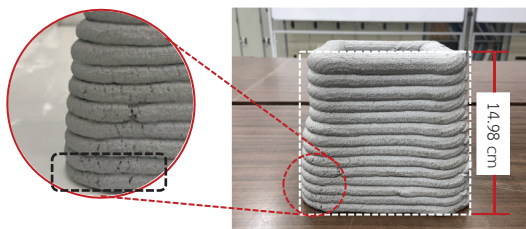
รูปที่ 14 หยดน้ำจากการทดสอบมุมผิวสัมผัสของมอร์ตาร์ที่เวลา 10, 20 และ 30 วินาที

3.6 ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

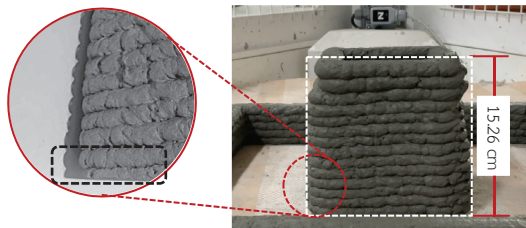
รูปที่ 15 ตัวอย่างพิมพ์ 3 มิติ ขนาด 150 x 150 ซม.² จำนวน 15 ชั้น เมื่อพิจารณาจำนวนชั้นที่สามารถขึ้นได้ต่อเนื่องสูงสุด พบว่า ตัวอย่างพิมพ์ OCS, 15CS และ 15CSO.2PP มีจำนวนชั้นที่สามารถพิมพ์ขึ้นรูป ได้ก่อนการยุบตัวเท่ากับ 8, 10 และ 15 ชั้น ตามลำดับ และความสูงของตัวอย่างพิมพ์หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์เท่ากับ 14.98, 15.26 และ 15.39 ซม ตามลำดับ โดยตัวอย่างพิมพ์เกิดการยุบตัวร้อยละ 2.7, 0.9 และ 0.1 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความสูงที่ถูกกำหนดไว้ 15.40 ซม จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เมื่อพิจารณาถึงความสมบูรณ์ของชิ้นงานโดยนำไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 9 พบว่าตัวอย่างพิมพ์ OCS และ 15CS ไม่เป็นไปตามมิติที่กำหนด ชั้นพิมพ์ชั้นที่หนึ่งยุบตัวลงเมื่อมีน้ำหนักของชั้นพิมพ์เพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกันตัวอย่างพิมพ์ 15CSO.2PP มีมิติเป็นไปตามรูปแบบที่กำหนด และสามารถขึ้นรูปได้มากถึง 15 ชั้น โดยเกิดการยุบตัวเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการใช้แคลเซียมสเตียเรตร่วมกับเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงเพียงพอที่สามารถขึ้นรูปต่อเนื่องได้มากที่สุด เนื่องจากการใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีน ทำให้ความเค้นที่วัสดุรับได้ในสภาวะพลาสติก (Yield stress) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อส่วนผสมของมอร์ตาร์ในสภาวะสด ให้สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiang และคณะ [26] ที่ทำการทดสอบผลกระทบของเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนต่อความสามารถขึ้นรูป พบว่าเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีน

ช่วยพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูป (Buildability) และลดอัตราการยุบตัวที่อาจจะเกิดขึ้นของตัวอย่างพิมพ์ 3 มิติ

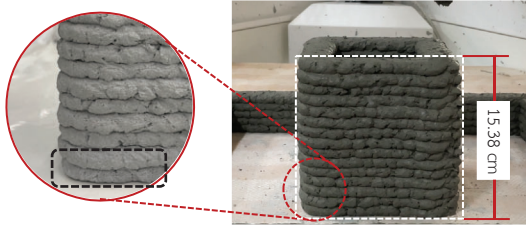
เมื่อพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของผิวระหว่างกระบวนการพิมพ์ พบว่าพื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์ที่มีแคลเซียมสเตียเรตไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างพิมพ์ที่ไม่มีแคลเซียมสเตียเรต แต่เมื่อพิจารณาพื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์และวางทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง พบว่าตัวอย่างพิมพ์ที่มีแคลเซียมสเตียเรตไม่เกิดฝุ่น อนุภาคที่ปนเปื้อน หรือคราบตะกอนบนพื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างพิมพ์ที่ไม่มีแคลเซียมสเตียเรต เนื่องจากการใช้แคลเซียมสเตียเรตในส่วนผสมของมอร์ตาร์ ช่วยปรับปรุงโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ให้มีความหนาแน่นที่มากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์ความสามารถที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งมีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง



ก) OCS



ข) 15CS



ค) 15CS0.2PP

รูปที่ 15 ตัวอย่างจากการพิมพ์ 3 มิติ

4. บทสรุป

4.1 มอร์ตาร์ที่ใช้แคลเซียมสเตียเรตแทนที่ในปูนซีเมนต์มีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น เพื่อให้ความสามารถในการไหลอยู่ในช่วงที่ควบคุม นอกจากนี้การใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนในส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้แคลเซียมสเตียเรต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คงที่พบว่าความสามารถในการไหลลดลงเล็กน้อย

4.2 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนในส่วนผสมมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ลดลงเล็กน้อย

4.3 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมสเตียเรตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีกำลังรับแรงอัดลดลง แต่ในทางกลับกันการใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนช่วยให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างพิมพ์ 3 มิติ มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างจากการหล่อประมาณ ร้อยละ 40 – 45

4.4 ปริมาณการแทนที่แคลเซียมสเตียเรตเพิ่มขึ้น ช่วยลดอัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์จากภายนอกได้ถึงร้อยละ 91.0 โดยมีแคลเซียมสเตียเรตในส่วนผสมมากถึงร้อยละ 15 นอกจากนี้การใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนร่วมกับแคลเซียมสเตียเรตในส่วนผสมมอร์ตาร์ ส่งผลกระทบบต่ออัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เล็กน้อย เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนในส่วนผสม

4.5 เมื่อปริมาณแคลเซียมสเตียเรตเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวสัมผัสของมอร์ตาร์มีผิวสัมผัสมากกว่า 90 องศา ซึ่งถือว่าเป็นมอร์ตาร์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Mortar) นอกจากนี้การใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนส่งผลให้มุมผิวสัมผัสของมอร์ตาร์ลดลงเล็กน้อย

4.6 ตัวอย่างพิมพ์ที่มีการใช้แคลเซียมสเตียเรตร่วมกับเส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีน เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งสามารถขึ้นรูปต่อเนื่องได้มากที่สุดถึง 15 ชั้น โดยความสูงของตัวอย่างพิมพ์คลาดเคลื่อนจากความสูงที่กำหนดไว้เล็กน้อย และคุณสมบัติของตัวอย่างพิมพ์เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนด สำหรับพื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่มีแคลเซียมสเตียเรตมีพื้นผิวระหว่างกระบวนการพิมพ์ไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม แต่พื้นผิวของตัวอย่างพิมพ์หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์และวางทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง มีความสามารถที่ไม่ชอบน้ำ และการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้การใช้เส้นใยไมโครพอลิพรอพิลีนในส่วนผสมมอร์ตาร์ ส่งผลให้มอร์ตาร์สามารถรับน้ำหนักของชั้นถัดไปได้มากขึ้น

5. ข้อเสนอแนะ

องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาพื้นผิวของชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ ให้เป็นพื้นผิวที่สามารถกันน้ำและป้องกันการเกาะตัวของสิ่งสกปรก ฝุ่นละอองและอนุภาคอื่นๆ โดยไม่จำเป็นต้องเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคลือบผิวกันน้ำก่อนการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถนำองค์ความรู้ไปศึกษาต่อในด้านของการหดตัวสำหรับชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากการหดตัวทำให้ชิ้นงานพิมพ์เกิดการแตกร้าว แคลเซียมสเตียเรตช่วยลดการดูดซึมน้ำ ทำให้การระเหยของน้ำน้อยลง ซึ่งอาจสามารถลดการหดตัวของมอร์ตาร์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนสนับสนุนมูลฐาน (Fundamental Fund 2566 : โครงการ เทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงและยั่งยืนสำหรับสำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Nisar Ahamed Noor Mohamed, Ming Jen Tan and Kah Fai Leon (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Proto*, 12, No. 3, pp. 261-276.
- [2] Bilal A. Baz Lafarge, Georges Aouad IMT, Nord Europe, Philippe Leblond and Omar Al-Mansouri (2020). Mechanical assessment of concrete – Steel bonding in 3D printed elements. *Construction and Building Materials*, 256, 119457.
- [3] Md. Aslam Hossain, Altynay Zhumabekova, Suvash Chandra Paul and Jong Ryeol Kim (2020). A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market. *Sustainability*, 12, 8492.
- [4] Venkatesh Naidu Nerella, Simone Hempel and Viktor Mechtcherine (2019). Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials*, 205, pp. 586-601.
- [5] Izabela Hager, Marcin Maroszek, Katarzyna Mróz, Rafał Kęsek, Marek Hebda, Leonid Dvorkin and Vitaliy Marchuk (2022). Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications. *Materials*, 15, 4112.
- [6] Medeiros, M. and Helene, P. (2007). Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. *Materials and Structures*, 41, pp. 59-71.
- [7] Bekir Sami Yilbas, Ghassan Hassan, Hussain Al-Qahtani, Naser Al-Aqeeli, Abdullah Al-Sharafi, Abdulrahman S. Al-Merbati, Turki N. Baroud and Johnny Adukwu Ebaika Adukwu (2019). Stretchable Hydrophobic Surfaces and Self-Cleaning Applications. *Scientific Reports*, 9, 14697.
- [8] Jihui Zhao, Xuan Gao, Siying Chen, Houquan Lin, Zhihao Li and Xiaojie Lin (2022). Hydrophobic or superhydrophobic modification of cement-based materials: A systematic review. *Composites Part B: Engineering*, 243, 110104.
- [9] Mehdi Nemati Chari, Ramin Naseroleslami and Mohammad Shekarchi (2019). The impact of calcium stearate on characteristics of concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20, pp. 1007–1020.
- [10] Yi Wei Daniel Tay, Ye QianMing and Jen Tan (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106968.
- [11] Chao Zhang, Venkatesh Naidu Nerella, Anurag Krishna, Shen Wang, Yamei Zhang, Viktor Mechtcherine and Nemkumar Banthia (2021). Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104155.
- [12] ASTM (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. ASTM C1437. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [13] ASTM (2021). Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle. ASTM C807. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [14] ASTM (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Mortars (Using 2-in or 50 mm Cube Specimens). ASTM C109/109M. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] ASTM (2020). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM C1585. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] Salahaldein Alsadey (2016). Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Mortar. *International Journal of Energy Science and Engineering*, Vol. 2, No.2, pp. 8-12.
- [17] Yangchen Xu, Haiming Chen, and Pengju Wang (2020). Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Alkali-Activated Slag Mortar. *Advances in Civil Engineering*, 4752841.
- [18] Fuyan Lyu, Dongliang Zhao, Xiaohui Hou, Li Sun and Qiang Zhang (2021). Overview of the Development of 3D-Printing Concrete: A Review. *Applied Sciences*, 11, 9822.
- [19] Jingchuan Zhang, Jialiang Wang, Sufen Dong, Xun Yu, and Baoguo Han (2019). A review of the current progress and application of 3 D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105533.
- [20] Agus Maryoto, Buntara Sthenly Gan, Nor Intang Setyo Hermanto and Rachmad Setijadi (2018). The Compressive Strength and Resistivity toward Corrosion Attacks by Chloride Ion of Concrete Containing Type I Cement and Calcium. *Stearate International Journal of Corrosion*, 2042510.

- [21] Joanna Marczyk, Celina Ziejewsk, Kinga Korniejenko, Michał Each, Witold Marzec, Mateusz Góra, Paweł Dziura, Andina Sprince, Magdalena Szechyńska-Hebda and Marek Hebda (2022). Properties of 3D Printed Concrete – Geopolymer Hybrids Reinforced with Aramid Roving. *Materials*, 15, 6132.
- [22] R.Kh. Mukhametrakhimov, and L.V. Lukmanova (2021). Structure and properties of mortar printed on a 3D printer. *Magazine of Civil Engineering*, 102, 10206.
- [23] ศศิธร ดิษเจริญ, ทวีช พูลเงิน, อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2565). ผลกระทบของแคลเซียมสเตียเรตที่มีต่อกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ไม่ชอบน้ำ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, 6 หน้า.
- [24] Okan Karahan and Cengiz Duran Atiş (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32, pp. 1044-1049.
- [25] Hassan Suiffi and Anas El Maliki (2021). The effect of using polypropylene fibers on the durability and fire resistance of concrete. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 58, pp. 296-307.
- [26] Quan Jiang a, Qiang Liu a b, Si Wu a, Hong Zheng a, Wenliang Sun (2022). Modification effect of nanosilica and polypropylene fiber for extrusion-based 3D printing concrete: Printability and mechanical anisotropy. *Additive Manufacturing*, 56, 102944.