การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์สำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เป็นสัดส่วนผสม

A Comparative Study of Portland Cement-Based Materials and Hydraulic Cement-Based Materials for 3D Printing Concrete

ประสาน ขันธรัตน์[1] วีรนันท์ มณีรัฐรุ่งเรือง[2] สลิลลาลัญ ตั้งเสถียร[3] และ ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์[4,*]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ.นครปฐม

**Corresponding author; E-mail address: totsawat.dau@mahidol.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันงานก่อสร้างยังคงมีปัญหาหลายอย่างที่ยังไม่ได้รับการแก้ไข เครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาในด้านของต้นทุนวัสดุและค่าแรงที่มีแนวโน้มจะสูงขึ้นในอนาคต เนื่องจากใช้แรงงานน้อยและไม่ต้องใช้ไม้แบบ อย่างไรก็ตาม ในการพิมพ์คอนกรีตจำเป็นต้องใช้วัสดุซีเมนต์ (Cementitious materials) สำหรับการพิมพ์โดยเฉพาะ โดยจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม อาทิ ความสามารถในก่อตัวและเสถียรภาพขณะพิมพ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบคอนกรีตสำหรับใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนโครงสร้าง 3 มิติ ที่ใช้ปูนซีเมนต์ 2 ชนิดที่แตกต่างกันเป็นส่วนผสม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนั้นมีข้อดีคือลดการปล่อยคาร์บอน (Carbon emission) ในขั้นการผลิตซึ่งนับว่าเป็นวัสดุที่มีความยั่งยืน โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ การไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัด จากนั้นจะวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของการใช้ปูนทั้ง 2 ชนิดในการพิมพ์ขึ้นรูปคอนกรีต

คำสำคัญ: เครื่องพิมพ์ 3 มิติ, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, วัสดุที่ยั่งยืน

Abstract

The issues related to construction remain unsolved. Three-dimensional (3D) printing concrete has capability to solve the problems such as cost materials and the need of skilled worker because this construction method is formless method. However, the technique requires specific concrete material for printing through print head, for example printability and stability. Therefore, this study is aiming to comparison of Portland cement-based material and Hydraulic cement-based material for 3D printing concrete. Hydraulic cement was selected due to less carbon emission that is sustainable material. Two cement materials were properly mix into concretes, then were carried out by flow table test, setting time test and compressive strength test. After that, the results were analyzed.

Keyword: 3D printing concrete, Portland cement, Hydraulic cement, Sustainable material

1. บทนำ

ในปัจจุบันธุรกิจการก่อสร้างมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการพัฒนา และปรับปรุงด้านการก่อสร้าง ส่งผลต่อความต้องการใช้ทรัพยากรการก่อสร้างมากยิ่งขึ้น ซึ่งทรัพยากรที่สำคัญในการก่อสร้างคือ “ปูนซีเมนต์” ที่โดยทั่วไปมีคุณสมบัติทนต่อสภาพแวดล้อม และมีอายุการใช้งานยาวนาน

ปัญหาภาวะโลกร้อนที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันมีปัจจัยสำคัญมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดภาวะก๊าซเรือนกระจกและโดยทั่วไปกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการเผาวัตถุดิบเพื่อเปลี่ยนให้เป็นปูนเม็ด จัดเป็นขั้นตอนที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นจำนวนมาก โดยประเทศไทยได้มีมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกในสาขากระบวนการทางอุตสาหกรรม และการใช้ผลิตภัณฑ์ (Industrial Processes and Product Use: IPPU) คือการกำหนดให้มีการใช้วัสดุแทนปูนเม็ดในการผลิตปูนซีเมนต์ [1] จากการศึกษาผู้วิจัยพบว่า สามารถใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอกลิก (Hydraulic Cement) ทดแทนได้ เนื่องจากปูนชนิดดังกล่าวนี้มีกระบวนการผลิตโดยการนำวัสดุใช้ทดแทนปูนซีเมนต์มาผลิตทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้ นอกจากการใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ยังต้องคำนึงถึงความรวดเร็วและประสิทธิภาพในการก่อสร้าง จึงได้มีการนำเทคโนโลยี เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing Concrete, 3DCP) มาประยุกต์ใช้ในงานการสร้าง ซึ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยการศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยีดังกล่าวได้เริ่มมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 จนถึงปัจจุบัน [2] โดยมุ่งเน้นด้านการกระบวนการออกแบบ ขั้นตอนการก่อสร้าง รวมถึงการใช้ทรัพยากรให้มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

งานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญในการเปรียบเทียบสัดส่วนผสมคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ โดยพิจารณาถึงความต้องการความข้น

เหลวที่เพื่อให้สามารถไหลผ่านท่อลำเลียงและฉีดผ่านหัวพิมพ์ได้ รวมถึงคอนกรีตดังกล่าวต้องมีระยะเวลาการก่อตัวสัมพันธ์กับความเร็วในการฉีดและการเคลื่อนตัวของหัวพิมพ์ นอกจากนั้นคอนกรีตที่ใช้ต้องมีกำลังรับแรงอัดที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกโครงสร้างได้ เพื่อความมั่นคงแข็งแรงและความปลอดภัยในโครงสร้างที่จะนำมาใช้งานจริงในอนาคต

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบสัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับใช้กับเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ แบ่งเป็น 2 สัดส่วนผสมดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1
2. คอนกรีตที่ใช้ปูนไฮดรอลิก

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในการวิจัยนี้มีวัสดุหลักประกอบไปด้วย (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (2) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (3) มวลรวมละเอียด และ(4) สารเคมีผสมเพิ่มชนิดที่ 1 และ 2 เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของซีเมนต์สำหรับใช้กับเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมตามที่ต้องการ อาทิเช่น ค่าความขนเหลวที่เหมาะสมที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้ รวมถึงค่ากำลังอัด โดยรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย มีดังนี้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ชนิดถุง ขนาดน้ำหนัก 50 กก. ใช้สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป อาทิเช่น งานอาคาร คอนกรีตเสริมเหล็ก [3]

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิดถุง ขนาดน้ำหนัก 50 กก. ใช้สำหรับงานโครงสร้างบ้านพักอาศัย อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนฐานราก เสา คาน พื้น และงานหล่อคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัด และความทนทานสูง [4]

ทรายละเอียด ก่อนนำมาทดลองผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบหาปริมาณความชื้น โดยทรายละเอียดมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 0.83 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry , SSD) ตามมาตรฐาน ASTM C128 จากนั้นทำการทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) ตามมาตรฐาน ASTM C33 เพื่อหาค่าโมดูลัสความละเอียด โดยผลทดสอบแสดงใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

มวลรวม	ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	โมดูลัสความละเอียด
ทรายละเอียด	0.83	2

สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้มีความเหมาะสมกับเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม 2 ชนิด โดยไม่สามารถเปิดเผยรายละเอียดได้ เนื่องจากอยู่ระหว่างการพัฒนา

สารผสมเพิ่มชนิดที่ 1 เป็นสารเคมีผสมเพิ่มที่เติมในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะของอนุภาคให้เป็นเนื้อเดียวกัน เพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำ และความหนืดของคอนกรีต รวมไปถึงชะลอการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้

สารผสมเพิ่มชนิดที่ 2 เป็นสารเคมีผสมคอนกรีตที่เติมลงในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำในส่วนผสม ช่วยให้คอนกรีตมีความข้นเหลวตามกำหนด และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศและเวลาการก่อตัวของคอนกรีต และมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ลดลง ทำให้มีสัดส่วนของปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น

2.2 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

จากการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตสำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยคำนึงถึงปัจจัยที่นำมาพิจารณาคืออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water-cement ratio, W/C) และปริมาณสารผสมเพิ่ม โดยชิ้นตัวอย่างสัดส่วนผสมแสดงได้ดังตารางที่ 2 [5]

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตมอร์ต้าร์ปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสม	น้ำ/ซีเมนต์ (กรัม/ลบ.ม.)	ซีเมนต์ (กรัม/ลบ.ม.)	มวลรวมละเอียด (กรัม/ลบ.ม.)	สารเคมีผสมเพิ่ม		น้ำ (กรัม/ลบ.ม.)
				สารชนิดที่1 (กรัม/ลบ.ม.)	สารชนิดที่2 (กรัม/ลบ.ม.)	
W400-28	0.28	1582	98	-	-	440
W400-28-H01		1582	98	0.04 (0.01%)	-	440
W400-28-H03		1582	98	0.13 (0.03%)	-	440
W350-28-H01		1491	242	0.04 (0.01%)	-	410
W300-28-H01		1384	410	0.04 (0.01%)	-	380
W270-27-H01-S5	0.27	1003	1014	0.03 (0.01%)	5.02 (0.50%)	270
W270-27-H37-S7		1003	1014	1.00 (0.37%)	7.00 (0.70%)	270
W400-30	0.3	1500	149	-	-	450
W400-30-H01		1500	149	0.04 (0.01%)	-	450
W400-30-H03		1500	149	0.13 (0.03%)	-	450

หมายเหตุ วัสดุซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่

(1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

(2) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และผู้วิจัยได้ปรับอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ให้มีเหมาะสมสำหรับใช้งานในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ คือ 0.27 0.28 และ 0.30 เพื่อให้มีค่าการไหลแผ่ที่ไม่มากจนเกินไป สามารถพิมพ์ขึ้นรูปได้ [6] รวมถึงได้มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้แก่ (1) สารผสมเพิ่มชนิดที่ 1 (2) สารผสมเพิ่มชนิดที่ 2 เพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณภาพคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานสำหรับเครื่องพิมพ์คอนกรีต 3 มิติ โดยการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดอันได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยมีขั้นตอนการผสมมอร์ต้าร์ดังนี้ นำซีเมนต์ผสมกับน้ำในหม้อผสมทันที จากนั้นเปิดเครื่องผสมที่ความเร็วระดับต่ำเป็นเวลา 1 นาที เติมทรายลงในเครื่องผสมโดยเติมปริมาณทีละน้อย จนกระทั่งครบเวลาที่ 1 นาที ปรับความเร็วการทำงานเครื่องผสมที่ความเร็วระดับสูง เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นหยุดการทำงานเครื่องผสม และทำการคลุกเคล้าส่วนที่ติดรอบหม้อให้ผสมลงในมอร์ต้าร์ จากนั้นพักทิ้งไว้เป็นเวลา 3 นาที เมื่อครบเปิดเครื่องทำงานเครื่องผสมที่ความเร็วระดับสูงเป็นเวลา 2 นาที

2.3. การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีต

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตใน 2 สภาวะ คือ (1) สภาวะสด (Fresh State) ได้แก่ ความสามารถในการไหลแผ่ และระยะเวลาในการก่อตัว (2) สภาวะแข็งตัวแล้ว (Hardened State) ได้แก่ กำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3

2.3.1. ความสามารถในการไหลแผ่

การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ เพื่อหาความสามารถในการทำงาน (Workability) ฉีดขึ้นรูปได้ โดยการทดสอบค่าการไหลแผ่ (Flow table) ของมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM C1437

2.3.2. ระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัว (Setting time) ของมอร์ต้าร์ เพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการลำเลียงของมอร์ต้าร์ในการฉีดขึ้นรูป ควบคู่ไปกับการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM C807

2.3.3. กำลังรับแรงอัด

สำหรับการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ของมอร์ต้าร์ เป็นการทดสอบที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน โดยใช้ชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109

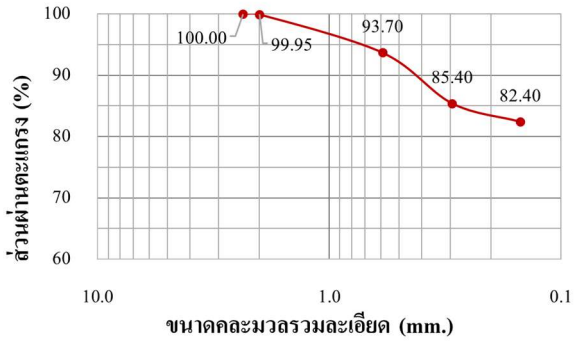
ตารางที่ 3 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

คุณสมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ
ค่าการไหลแผ่มอร์ต้าร์ (Flow table)	ASTM C1437
เวลาก่อตัวมอร์ต้าร์ (Setting time)	ASTM C807
กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)	ASTM C109

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผลทดสอบ

3.1. ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

รูปที่ 1 แสดงผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดคละมวลรวมละเอียดตามมาตราฐาน ผลการทดสอบพบว่า ทรายละเอียดที่เลือกใช้มีขนาดโดยประมาณเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการพิมพ์ในงานวิจัยนี้ เพราะสัดส่วนผสมดังกล่าวจะถูกนำไปใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีขนาดช่องเปิดของท่อลำเลียง 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ขนาดคละมวลรวมละเอียด

3.2. การทดสอบการไหลแผ่

รูปที่ 2 และ ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่าการไหล่แผ่ของมอร์ต้าร์ ทางผู้วิจัยได้เลือกตัวอย่างมา 3 สัดส่วนผสม จากทั้งหมด 10 สัดส่วนผสม เนื่องจากมีผลทดสอบค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 40-60 มม. ซึ่งเป็นค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยมีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.27 และ 0.28 ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.28 มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการไหลแผ่ที่มากกว่ามอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ในทางกลับกันที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.27 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมากกว่ามอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการไหลแผ่มอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ชนิดแตกต่างกัน

ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ (Flow table Test) (มม.)				
ตัวอย่าง	น้ำต่อซีเมนต์	ปูนซีเมนต์		ร้อยละความต่างของตัวอย่าง
		ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ไฮดรอลิก	
W400-28	0.28	89.1	58.8	34.1
W400-28-H01		88.1	59.1	32.92
W270-27-H01-S5	0.27	46.9	91.75	48.88

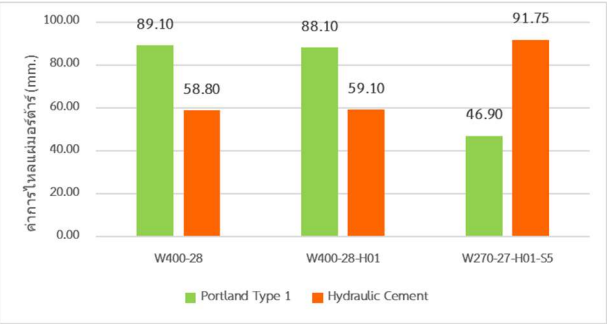
จากตารางที่ 4 สามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดังนี้

(1) W400-28 ชิ้นตัวอย่างผสมด้วยปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการไหลแผ่มากกว่า ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ร้อยละ 34.10 ดังที่กล่าวไปข้างต้นว่าการพิมพ์คอนกรีตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติในงานวิจัยนี้ ต้องการค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 40 – 60 มม. ดังนั้นสัดส่วนผสมนี้จึงเหมาะสำหรับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

(2) W400-28-H01 ชิ้นตัวอย่างผสมด้วยปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการไหลแผ่มากกว่า ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ร้อยละ 32.92 ดังนั้นสัดส่วนผสมนี้เหมาะสำหรับปูนไฮดรอลิก

(3) W270-27-H01-S5 ชิ้นตัวอย่างผสมด้วยปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการไหลแผ่น้อยกว่ากว่า ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ร้อยละ 48.88 ดังนั้นสัดส่วนผสมนี้เหมาะสำหรับปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ที่เล็กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ค่าการไหลแผ่น้อย แต่เมื่อใส่สารผสมเพิ่มชนิดที่ 2 ลงไป สารผสมเพิ่มดังกล่าวไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคปูนทำให้ค่าการไหลแผ่สูงขึ้นมาก



รูปที่ 2 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบปูนซีเมนต์ 2 ชนิด

3.3. การทดสอบการก่อตัว

จากรูปที่ 3 และ ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นถึงค่าระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าร์ โดยมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีค่าระยะเวลาก่อตัวแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยชิ้นตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.28 และมีการใส่สารเคมีผสมเพิ่มชนิดที่ 1 มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวที่นานกว่า มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิค แต่เมื่อมีการผสมสารเคมีชนิด 2 (ชิ้นตัวอย่าง W270-27-H01-S5 และ W270-27-H37-S7) ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจะสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 5 ค่าระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ชนิดแตกต่างกัน

ผลการทดสอบค่าระยะเวลาการก่อตัว (Setting time Test) (นาที)				
ตัวอย่าง	น้ำต่อซีเมนต์	ปูนซีเมนต์		ร้อยละความต่างของตัวอย่าง
		ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ไฮดรอลิก	
W400-28	0.28	58.11	77.78	25.29
W400-28-H01		67.26	86.25	22.02
W270-27-H01-S5	0.27	90	118.2	23.86

จากตารางที่ 5 ทราบได้ว่า ผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีสัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ 2 ชนิดแตกต่างกันให้ค่าระยะเวลาก่อตัวที่ต่างกันดังนี้

(1) W400-28 ชิ้นตัวอย่างผสมด้วยปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าระยะเวลาก่อตัวเร็วกว่า ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ร้อยละ 25.29

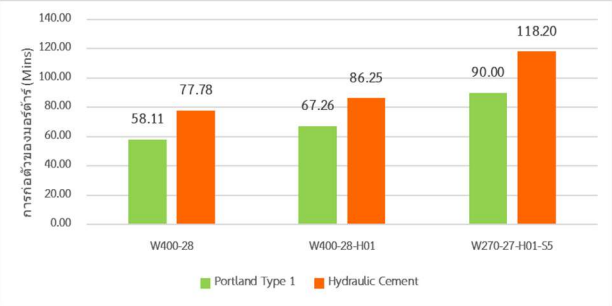
(2) W400-28-H01 ชิ้นตัวอย่างผสมด้วยปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าระยะเวลาก่อตัวเร็วกว่า ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ร้อยละ 22.02

(3) W270-27-H01-S5 ชิ้นตัวอย่างผสมด้วยปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าระยะเวลาก่อตัวเร็วกว่า ชิ้นตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ร้อยละ 23.86

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอร์เนต ($CaCO_3$) มากกว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกอยู่ประมาณ 2-3 เท่า ส่งผลให้ช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวได้ และเมื่อเพิ่มสารผสมเพิ่มชนิดที่ 2 ยิ่งทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวสูงยิ่งขึ้น

จากการทดสอบค่าการไหลแผ่ และ ระยะเวลาการก่อตัวทำให้สรุปได้ว่า สัดส่วนผสม W400-28, W400-H01เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และส่วนผสม W270-27-H01-S5 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมีค่าการไหลแผ่

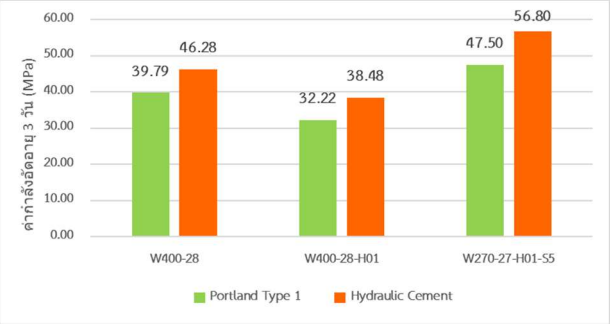
ในช่วง 40-60 มม. และค่าระยะเวลาก่อตัวในช่วง 30-180 นาที ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบปูนซีเมนต์ 2 ชนิด

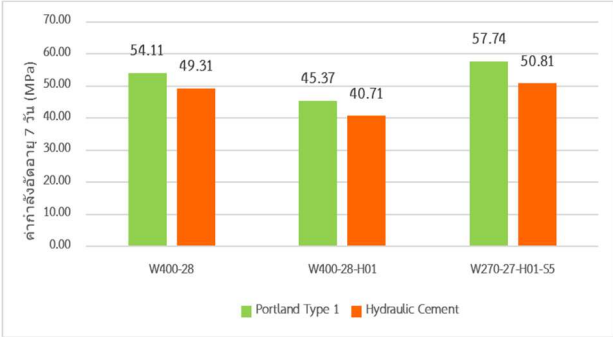
3.4. การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดรับแรงช่วงอายุ 3 และ 7 วัน แสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ โดยแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ 2 ชนิด



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์อายุบ่ม 3 วัน เปรียบเทียบปูนซีเมนต์ 2 ชนิด

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 3 วัน พบว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของปูนไฮดรอลิกมีความสามารถในการรับแรงอัดสูงกว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณ $CaCO_3$ ในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่สูงกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์อายุบ่ม 7 วัน เปรียบเทียบปูนซีเมนต์ 2 ชนิด

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 7 วัน ซึ่งเป็นเวลาที่คอนกรีตสามารถคาดการณ์ผลการทดสอบที่ 28 วัน โดยพบว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของปูนไฮดรอลิกมีความสามารถในการรับแรงอัดน้อยกว่าชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก พบว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าการไหลแผ่น้อยกว่าเนื่องจากมีขนาดอนุภาคของเม็ดปูนที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 แต่เนื่องจากมีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอร์เนต ($CaCO_3$) ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มการยึดเกาะที่ดีสามารถยับยั้งการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์อีกทั้งเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวให้นานขึ้น [7-8]

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์สำหรับการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่สัดส่วนผสมเดียวกัน สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ (Flow table) ตามมาตรฐาน ASTM C1437

ชิ้นตัวอย่าง W400-28 และ W400-28-H01 ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าการไหลแผ่น้อยกว่าเนื่องจากมีขนาดอนุภาคของเม็ดปูนที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 แต่เนื่องจากมีปริมาณของ $CaCO_3$ ที่มากกว่าเมื่อใส่สารผสมเพิ่มชนิดที่ 2 (ตัวอย่าง W270-27-H01-S5) จึงทำให้ค่าการไหลแผ่เพิ่มสูงขึ้น

(2) ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าร์ (Setting time) ASTM C807

จากตารางที่ 5 แสดงค่าการไหลแผ่ของ 4 ส่วนผสม ที่ได้เลือกมาพบว่าชิ้นส่วนตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนไฮดรอลิกมีระยะเวลาการก่อตัวที่นานกว่า เนื่องจากปริมาณ $CaCO_3$

(3) การกดทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C109

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่สัดส่วนผสมเดียวกัน ผลการทดสอบพบว่า ปูนไฮดรอลิกมีปริมาณ $CaCO_3$ ที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้มีกำลังอัดในช่วงต้นที่อายุ 3 วันสูงกว่า

การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ปูนซีเมนต์	สัดส่วนผสมที่เหมาะสม
ไฮดรอลิก	W400-28
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	W270-27-H01-S5

จากผลการศึกษานี้พบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ต้องมีการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม อีกทั้งปูนไฮดรอลิกมีการใช้สารทดแทนอื่นแทนเม็ดปูนทำให้ลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันบริหารจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารอ้างอิง

[1] จักรกริสน์ แซ่เล้า. (2564). เทคโนโลยีการก่อสร้างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก.สืบค้น 1 มีนาคม 2566, จากhttps://www.ensyndrome.com.

[2] Y.W.D. Tay, B. Panda, S.C. Paul, N.A. Noor Mohamed, M.J. Tan, K.F. Leong. (2017). 3D printing trends in the building and construction industry. Virtual and Physical Prototyping 12(3), 1080/1745275.

[3] TPI Polene Public Company Limited. ปูนซีเมนต์ ทีพีไอ. สืบค้น 1 มีนาคม 2566, จาก https://tpipolene.co.th/en/cement-en.

[4] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594- 2556 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. (2556). กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

[5] วรกร ศรีพิพัฒน์, วิชิตพงศ์ สหัสสพล, วิชชุพันธ์ ลือพงศ์ไพจิตร, วรัญญา เจริญยิ่ง. (2563). การก่อสร้างสมัยใหม่ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต). สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย.

[6] R.A. Buswella, W.R. Leal de Silvab, S.Z. Jonesc, J. Dirrenbergerd, 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, Cement and Concrete Research. 112 (2018) 37-49.

[7] สุรสิทธิ์ เพาะบุญ, (2562). ผลกระทบของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติของคอนกรีต(วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต). สาขาวิศวกรรมศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประเทศไทย

[8] Concrete Technology CPAC. (2000). Cement. สืบค้น 25 มีนาคม 2566, จาก https://The concrete Products and Aggregate Co. , Ltd.