



สมบัติของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอย

PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE MIXED WITH CALCIUM CARBONATE POWDER AND FLY ASH

พงศกร พรหมสวัสดิ์^{1*} บุรฉัตร ฉัตรวีระ² และกฤษฎดา เสือเอี่ยม³

¹อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

²รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

*Corresponding author: p.pongsakon@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอย โดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต อัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอย อัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก กำหนดปริมาณวัสดุผง 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง เท่ากับ 0.28 คงที่ทุกส่วนผสม ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตสด ความสามารถในการทำงานได้ กำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยสูงขึ้น ในขณะที่ความกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมร่วมผงแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น โดยคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองผสมร่วมวัสดุผงสามชนิด (FA20CC5) สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 75.28 MPa ที่อายุ 120 วัน

คำสำคัญ: คอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง, แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย, ความสามารถในการทำงานได้, กำลังอัด

ABSTRACT

The objective of this research was to study the properties of Self-Compacting Concrete (SCC) mixed with calcium carbonate and fly ash. Portland cements type 1 was replaced by calcium carbonate at ratios of 5%, 10% and 20% by weight and fly ash at ratios of 20%, 30%, and 50% respectively. The total powder material content was 550 kg/m³ and water to powder ratio was kept constant at 0.28 for all mixtures. Properties of SCC including, workability, compressive strength and drying shrinkage were tested. The results indicated that SCC workability was increased by increasing fly ash content. At the same time, compressive strength was decreased by increasing calcium carbonate content. SCC mixtures mixed with a ternary blend of powder materials (FA20CC5) had compressive strength as high as 75.28 MPa at 120 days.

KEYWORD: Self-Compacting Concrete, Calcium Carbonate, Fly Ash, Workability, Compressive Strength

Pongsakon Promsawat^{1*} Burachat Chatveera² and Gritsada Sua-iam³

¹Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

³Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

1. บทนำ

ปัจจุบันนวัตกรรมการประยุกต์ใช้วัสดุคอนกรีตในกระบวนการก่อสร้างมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก เป้าหมายเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานและแก้ปัญหาข้อจำกัดบางประการในการใช้งานคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้าง คอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองหรือคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ (Self-Compacting Concrete, SCC) เป็นหนึ่งในนวัตกรรมคอนกรีตเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการในการใช้งานและตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานคอนกรีต [1] ด้วยคุณสมบัติการไหลด้วยตัวเองและสามารถแทรกตัวระหว่างเหล็กเสริมโดยไม่ต้องทำการจี้เขย่า จากแนวคิดของวิศวกรชาวญี่ปุ่นที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงในการแก้ปัญหาคาราคาแกลนแรงงานที่มีคุณภาพฝีมือและทักษะในงานก่อสร้าง จนส่งผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีต [2] ทำให้คอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งนี้เพื่อพัฒนาสมรรถนะในการทำงานและแก้ไขข้อจำกัดทางด้านราคาของคอนกรีต เนื่องจากมีอัตราการใช้ปูนซีเมนต์สูงในส่วนผสมและมีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อช่วยให้คอนกรีตไหลตัวได้ดีส่งผลต่อราคาของคอนกรีตที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตในงานก่อสร้างทั่วไป [3] ดังนั้นการสร้างแนวทางในการศึกษาเพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมด้วยการแทนที่จากวัสดุผงอื่นจะช่วยเสริมให้คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตนเองได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นทั้งยังมีส่วนช่วยลดปัญหาคุณภาพสิ่งแวดล้อมจากการใช้งานคอนกรีตได้ในอนาคต การพัฒนาคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตนเองในปัจจุบันจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุผลพลอยได้ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม [4] และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การนำเอาแกลบที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตนเอง เมื่อมีการแทนที่แกลบในอัตราส่วนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตลดลง [5] แต่ในทางกลับกันเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินปูนในส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง พบว่าสามารถเพิ่มความหนืดและปรับปรุงคุณลักษณะในการไหลของคอนกรีตรวมถึงการแยกตัวของคอนกรีตลดลง [6] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการผสมรวมกันของวัสดุเหลือทิ้งหรือวัสดุผงที่มีศักยภาพหลายชนิดรวมกัน เพื่อเป็นการนำคุณสมบัติที่ดีของวัสดุแต่ละประเภทมาประสานกันเป็นการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตนเองให้ดียิ่งขึ้น เช่น การนำเอาปาล์มน้ำมันและเถ้าลอย มาผสมรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตนเอง พบว่าคอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัยสูงขึ้นและมีคุณสมบัติในการต้านทานการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากการผสมกันของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ซึ่งมีศักยภาพของวัสดุที่แตกต่างกันช่วยส่งผลให้เกิดการปรับปรุงพฤติกรรมบางประการในส่วนผสมของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น [7]

การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมและศักยภาพของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง โดยการผสมรวมวัสดุผงที่มีศักยภาพอย่างเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยการแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากเถ้าลอยเป็นผลผลิตพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้าถ่านหินซึ่งมีศักยภาพเชิงปริมาณสูงมากในประเทศไทย ในขณะที่ผงแคลเซียมคาร์บอเนต มีคุณสมบัติและจุดเด่นที่แตกต่างจากเถ้าลอยเมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตแต่ยังคงมีราคามีราคาสูง สำหรับคอนกรีตตัวอย่างที่ได้ในการศึกษาจะทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตสด ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด กำลังรับแรงอัดประลัย และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ทั้งนี้เป็นการนำจุดเด่นของวัสดุผงทั้งสามชนิดมาผสมรวมกัน และเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตไหลอัดแน่นได้ด้วยตนเองส่งผลต่อการสร้างความเชื่อมั่นในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตนเองทั้งในเชิงประสิทธิภาพการทำงานของคอนกรีตและประสิทธิผลของค่ากำลังอัดประลัย ประกอบกับเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งที่มีศักยภาพเชิงปริมาณในประเทศมาช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มทางการตลาดและเป็นผลทางอ้อมในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement; OPC) ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C150 [8]
2. เถ้าลอย (Fly Ash; FA) ผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จ.ลำปาง
3. ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate: CC)
4. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58 โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.50 และอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.46
5. มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 20 มิลลิเมตร และมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69 โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.61 และอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.34
6. น้ำประปา ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง ในช่วง 6-7
7. สารเคมีผสมเพิ่ม ประเภทสารลดน้ำจำนวนมากชนิดคาร์บอกซีเลต ตามมาตรฐาน ASTM C494 [10]

2.2 อัตราส่วนการผสม

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นด้วยตนเอง ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม และผงแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม ปริมาณส่วนผสมต่อปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองให้เป็นไปตามข้อกำหนด จึงทำการผสมสารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำจำนวนมากชนิดโพลีคาร์บอกซีเลต (Polycarboxylate-based Superplasticizer) ในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมรวม

ตารางที่ 1 ร้อยละสัดส่วนผสมของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

ส่วนผสม	ปริมาณส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
	ปริมาณวัสดุผสมโดยรวม					ทราย	หิน	สารเคมีผสมเพิ่ม
	ปริมาณรวม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	(%) การแทนที่	เถ้าลอย	ผงแคลเซียมคาร์บอเนต			
Control	550	550	-	-	-	815	720	2%
FA20CC5	550	412.5	25	110	27.5	815	720	2%
FA20CC10	550	385	30	110	55	815	720	2%
FA20CC20	550	330	40	110	110	815	720	2%
FA30CC5	550	357.5	35	165	27.5	815	720	2%
FA30CC10	550	330	40	165	55	815	720	2%
FA30CC20	550	275	50	165	110	815	720	2%
FA50CC5	550	247.5	55	275	27.5	815	720	2%
FA50CC10	550	220	60	275	55	815	720	2%
FA50CC20	550	165	70	275	110	815	720	2%

2.3 วิธีการทดสอบ

1. ทดสอบความสามารถในการทำงานได้ ประกอบไปด้วย ความสามารถในการไหลแผ่ (Slump Flow) เวลาที่ใช้ในการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร (T_{50cm} Slump flow) การไหลผ่านกรวยรูปทรงวี (V-Funnel) การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (J-ring) และการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในกล่องรูปทรงแอล (L-Box) ตามมาตรฐาน ASTM C1611, ASTM C1621 และ EFNARC [11-13]

2. ทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะคอนกรีตสด ตามมาตรฐาน ASTM C138 [14]

3. ทดสอบหาปริมาณฟองอากาศ (Air Content) ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะคอนกรีตสด ตามมาตรฐาน ASTM C231 [15]

4. ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ตามระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 120 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [16]

5. ทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองหลังจากครบอายุการบ่มตามกำหนด โดยทำการวัดการหดตัวสูงสุดที่ระยะเวลา 60 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C426 [17]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

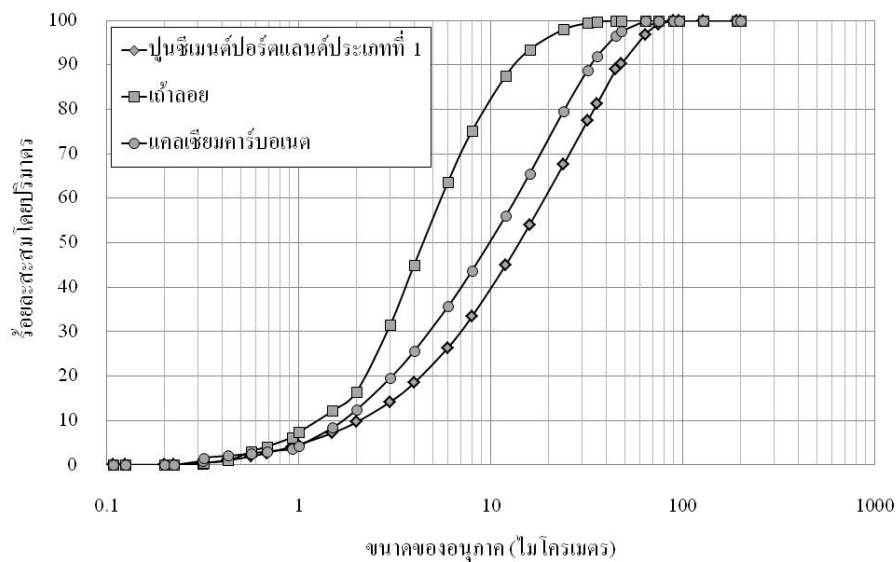
การทดสอบหาค่าองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ดังแสดงผลในตารางที่ 2 พบว่าพบวาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบหลักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 65.02 ส่วนเถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ร้อยละ 33.42 และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) มีองค์ประกอบหลักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 52.91 โดยมวลของวัสดุ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

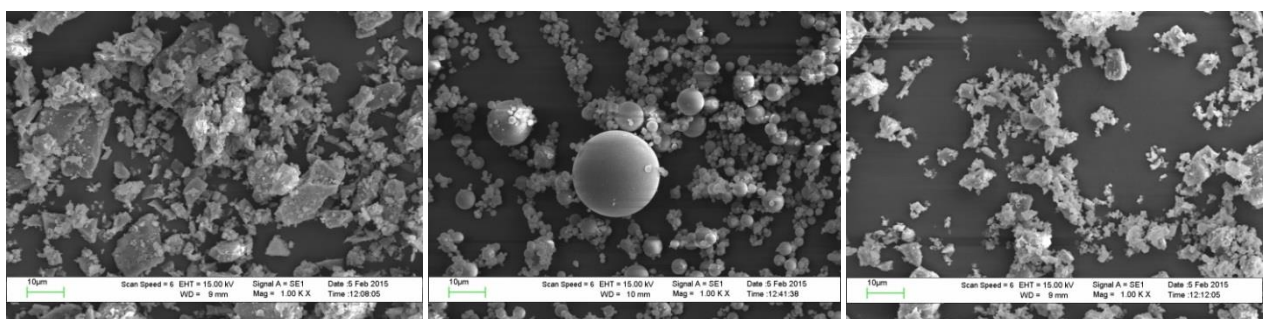
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าลอย	ผงแคลเซียมคาร์บอเนต
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.48	33.43	1.20
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	5.29	18.29	0.42
ไออนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.31	13.23	0.18
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.02	20.84	52.91
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.86	2.59	1.17
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.41	2.42	0.07
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.17	1.12	0.07
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.73	4.79	0.11

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าลอย	ผงแคลเซียมคาร์บอเนต
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (ร้อยละ)	0.82	1.20	42.46
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.54	2.70
พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm ² /g)	3475	5001	5348
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	20.02	6.31	14.10



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของวัสดุประสาน



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

(ข) เถ้าลอย

(ค) ผงแคลเซียมคาร์บอเนต

รูปที่ 2 รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงแคลเซียมคาร์บอเนต

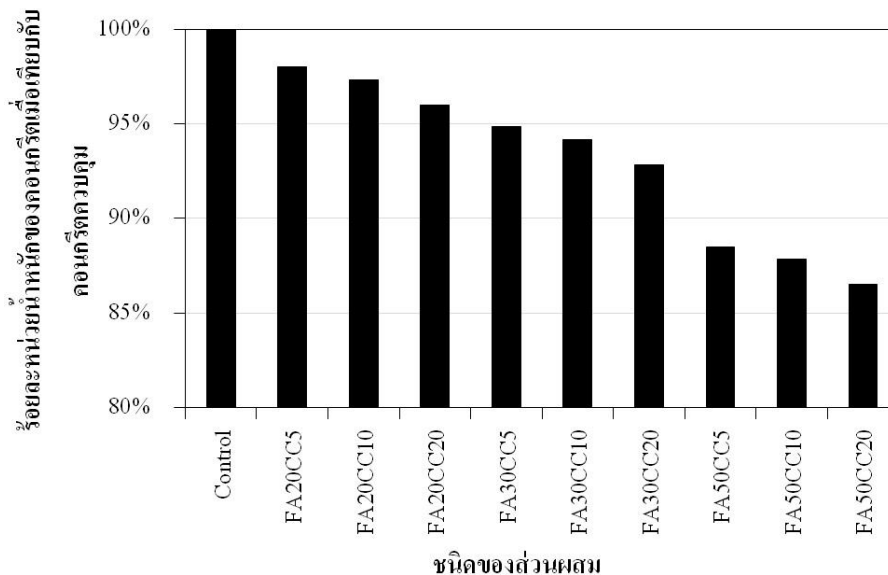
จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ ร้อยละ 0.82 พื้นที่ผิวจำเพาะ 3475 cm²/g และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20.02 μm ส่วนเถ้าลอยมีการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ ร้อยละ 1.20 พื้นที่ผิวจำเพาะ 5001 cm²/g และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.31 μm ส่วน และแคลเซียมคาร์บอเนตมีการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้

ร้อยละ 42.46 พื้นที่ผิวจำเพาะ 5348 cm^2/g และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14.10 μm ดังตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดคละของวัสดุประสานทั้งสามพบว่าเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด รองลงมาได้แก่แคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด แสดงในรูปที่ 1 ส่วนภาพถ่ายขยายรูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงแคลเซียมคาร์บอเนต ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงในรูปที่ 2

3.2 สมบัติของคอนกรีตสด

3.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง พบว่าคอนกรีตควบคุมมีหน่วยน้ำหนัก 2,404 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยทุกอัตราส่วนผสมที่มีการนำเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมอยู่ในช่วง 2,350-2,084 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมอยู่ในช่วงร้อยละ 98.0-86.5 ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากผลของความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน [1, 3, 5] โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะสูงสุด รองลงมาได้แก่แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำสุดตามลำดับ โดยคอนกรีตมีค่าหน่วยน้ำหนักลดลงในลักษณะแปรผกผันกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่สูงขึ้น

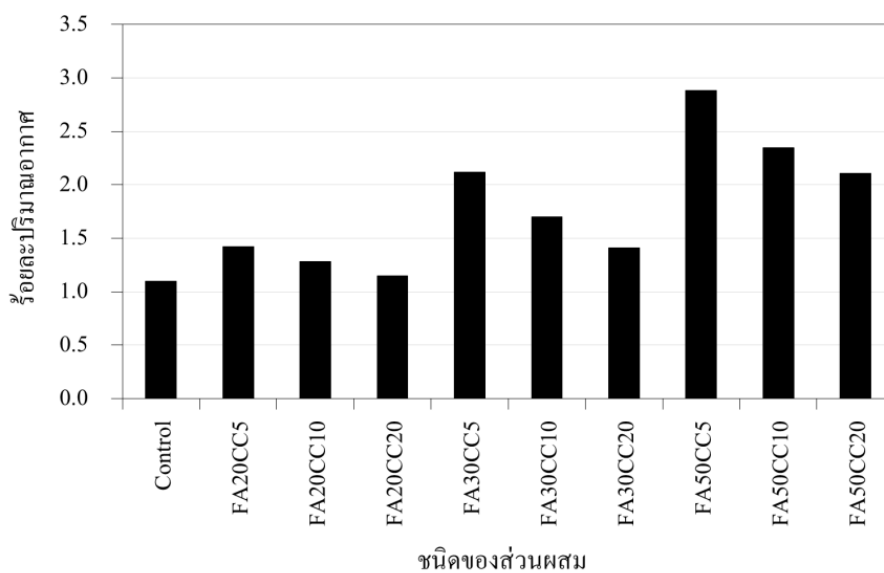


รูปที่ 3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

3.2.2 ปริมาณอากาศ

การทดสอบปริมาณอากาศของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองแสดงในรูปที่ 4 คอนกรีตควบคุมมีปริมาณอากาศร้อยละ 1.10 ซึ่งสอดคล้องกับธรรมชาติทั่วไปของเนื้อคอนกรีตที่ไม่มีการเติมสารกักกระจายฟองอากาศจะมีโพรงอากาศอยู่ประมาณร้อยละ 0.5-2.0 โดยปริมาตร [18] และเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าอัตรา

การแทนที่ด้วยถ้ำลอยเพิ่มมากขึ้นคอนกรีตจะมีปริมาณอากาศเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะอนุภาคของถ้ำลอยที่มีลักษณะค่อนข้างกลมส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในส่วนผสมเพิ่มขึ้น [19] ตลอดจนปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นสูงนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตอีกด้วยเนื่องจากฟองอากาศจะช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวของอนุภาค แต่ด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศภายในเนื้อคอนกรีตที่มากเกินไปอาจส่งผลทำให้เกิดปริมาณโพรงอากาศที่มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งย่อมส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้ลดลง ในขณะที่เมื่อมีการเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้ปริมาณอากาศมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กเข้าไปเติมแทรกในช่องว่างส่งผลให้ปริมาณอากาศภายในเนื้อคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลง [20-21]



รูปที่ 4 ปริมาณอากาศในคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

3.3 ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด

ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง ประกอบไปด้วยคุณสมบัติความสามารถในการไหลเติมแทรก ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง และความสามารถในการต้านทานการแยกตัว ทั้งนี้ตามมาตรฐาน ASTM C1611, ASTM C1621 และ EFNARC [11-13] จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยคอนกรีตควบคุมมีระยะเวลาไหลผ่านเส้นผ่านศูนย์กลาง 750 มิลลิเมตร เวลาของการไหลถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มิลลิเมตร เท่ากับ 3.40 วินาที การไหลผ่านสิ่งกีดขวางด้วยอุปกรณ์วงแหวน J-Ring และกล่องรูปทรงแอลพบว่ามีระยะเวลาไหลเท่ากับ 10.2 มิลลิเมตรและค่าอัตราส่วนระยะพิงค์ตามมาตรฐานกำหนดมีค่า (H_2/H_1) เท่ากับ 0.80 การไหลแบบเติมแทรกในเครื่องทดสอบแบบทรงวีใช้ระยะเวลาในการไหลจนหมดเท่ากับ 11.59 วินาที

ตารางที่ 4 ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต

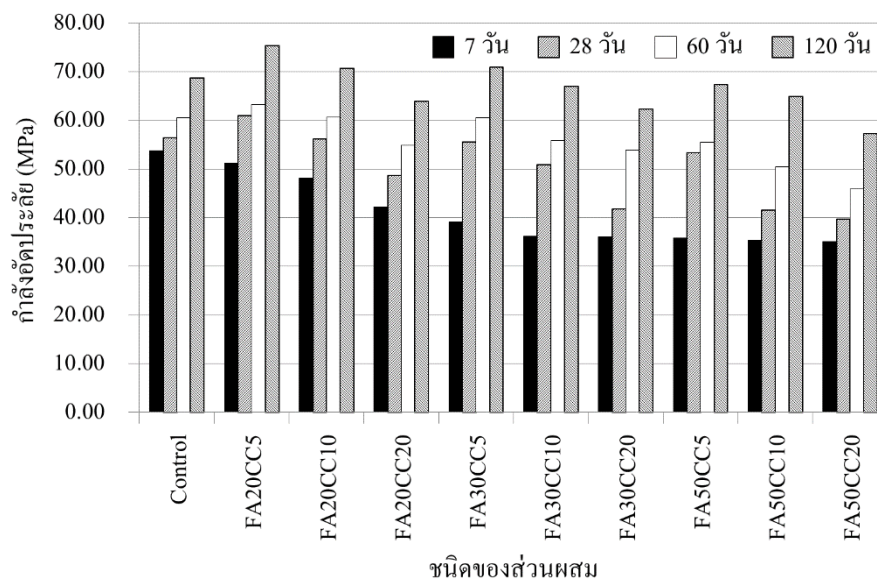
ส่วนผสม	ความสามารถในการเติมแทรก		ความสามารถในการไหลผ่าน สิ่งกีดขวาง		ความสามารถในการ ต้านทานการแยกตัว
	Slump Flow	T _{50cm} Slump Flow	J-ring Flow	L- box Flow	V-funnel Flow
Control	750.00	3.40	10.2	0.80	11.59
FA20CC5	707.50	3.56	9.3	0.96	11.06
FA20CC10	670.00	4.35	10.2	0.93	10.42
FA20CC20	653.50	4.50	10.4	0.81	8.45
FA30CC5	760.00	3.30	8.8	0.99	11.28
FA30CC10	700.00	3.58	9.5	0.97	10.08
FA30CC20	680.50	3.59	9.9	0.86	9.51
FA50CC5	777.00	3.15	9.0	0.98	11.42
FA50CC10	760.00	3.35	9.4	0.96	11.39
FA50CC20	743.50	3.49	9.2	0.91	11.08
เกณฑ์มาตรฐาน[11-13]	650-800 mm.	2-5 sec	0-50 mm	0.8-1.0 (h2/h1)	6-12 sec

ในขณะที่อัตราการแทนที่สูงที่สุด (FA50CC20) พบว่ามีระยะเวลาไหลผ่านเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง 743.5 มิลลิเมตร เวลาของการไหลถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มิลลิเมตร เท่ากับ 3.49 วินาที การไหลผ่านสิ่งกีดขวางด้วยอุปกรณ์วงแหวน J-Ring และกล่องรูปทรงแอลพบว่ามีระยะเวลาไหลเท่ากับ 9.2 มิลลิเมตรและค่าอัตราส่วนระยะพิทักตามมาตรฐานกำหนดมีค่า (H_2/H_1) เท่ากับ 0.91 การไหลแบบเติมแทรกในเครื่องทดสอบแบบทรงวงรีใช้ระยะเวลาในการไหลจนหมดเท่ากับ 11.08 วินาที จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองพบว่าเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลดีขึ้น ระยะเวลาในการไหลถึงระยะที่กำหนดลดลง รวมถึงมีระยะทางในการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากพิจารณาขนาดอนุภาคของเถ้าลอย (รูปที่ 2(ข)) มีลักษณะทรงกลมช่วยให้การไหลดีขึ้นได้ ในขณะเดียวกันเมื่อทำการผสมรวมผงแคลเซียมคาร์บอเนตในส่วนผสมเพิ่มขึ้นพบว่าคอนกรีตใช้ระยะเวลาในการไหลเพิ่มขึ้น รวมถึงมีระยะทางในการไหลลดลง เนื่องจากลักษณะอนุภาครูปทรงเหลี่ยมมุม (รูปที่ 2(ค)) ของผงแคลเซียมคาร์บอเนต และผลจากความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ตลอดจนค่าร้อยละเนื่องจากการเผาไหม้ที่สูงกว่าเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลต่อการดูดกลืนน้ำ ทำให้ความสามารถในการไหลลดลง [22]

3.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองแสดงผลดังรูปที่ 5 พบว่าคอนกรีตมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตจนถึง 120 วัน ทั้งนี้คอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 53, 56,60 และ 68 MPa ตามลำดับ โดยอัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 และผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงสุดถึง 61 และ 75.28

MPa ที่อายุ 28 วันและ 120 วัน ตามลำดับ อัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50 และผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงสุดถึง 40 และ 57 MPa ที่อายุ 28 วันและ 120 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้การพัฒนากำลังอัดแปรผกผันกับการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของวัสดุเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากเมื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์จากผลของการแทนที่ด้วยวัสดุผงที่เพิ่มขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อการศึกษาไฮดรชันของคอนกรีต รวมถึงจากการผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยซึ่งมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ส่งผลทำให้ปริมาตรของวัสดุผงเพิ่มมากขึ้นด้วยตามปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้น ตลอดจนทั้งผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยมีความละเอียดสูงมากส่งผลให้เกิดการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันทุกส่วนผสมปริมาณน้ำที่หายไปจากผลของการผสมวัสดุผงส่งผลต่อความสมบูรณ์ของการทำปฏิกิริยาเคมีของน้ำกับปูนซีเมนต์ [20-21] และอาจเกิดช่องว่างภายในของเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วทำให้ความต้านทานการอัดของคอนกรีตลดต่ำลง [23] และในอัตราส่วนผสมเดียวกันเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตที่อายุการบ่มมากกว่า 60 วันพบว่าคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีเนื่องจากการพัฒนากำลังอัดของวัสดุปอซโซลานที่มีการเกิดปฏิกิริยาในการพัฒนากำลังในช่วงอายุการบ่มที่เพิ่มสูงขึ้น [24] ทั้งนี้พบว่าคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองที่ใช้ในกระบวนการศึกษาทุกอัตราส่วนผสมมีค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มากกว่า 40 MPa (>400 ksc) ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ในปัจจุบัน

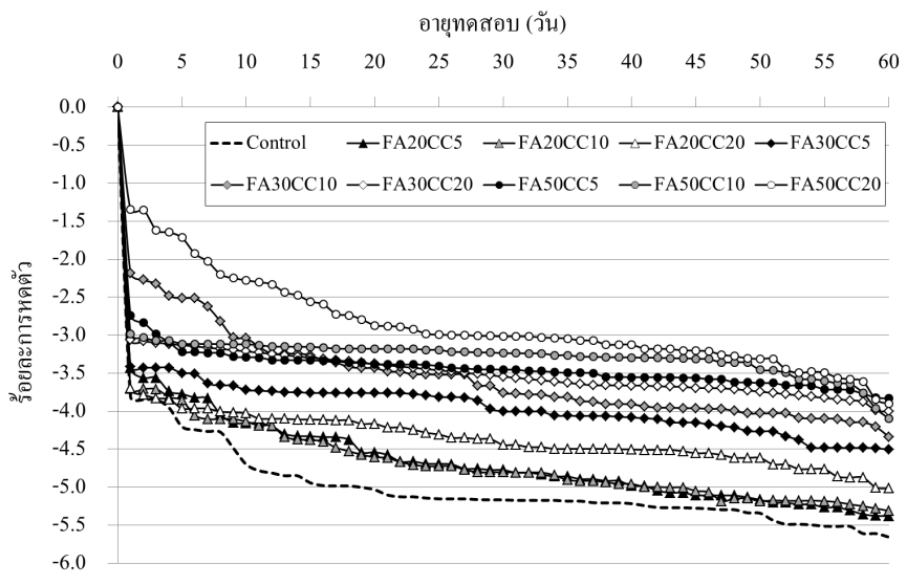


รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

3.5 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

การวัดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนที่สูง ย่อมส่งผลให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำในส่วนผสมสูงขึ้นตามไปด้วยส่งผลต่อความยืดหยุ่นของคอนกรีต รวมถึงลักษณะอนุภาคของวัสดุผงที่ก่อให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อของคอนกรีต [25] เมื่ออายุการบ่มของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและเกิดการระเหยของน้ำที่สะสมอยู่ภายในช่องว่างทำให้คอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการหดตัวแสดงผลดังรูปที่ 6 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีแนวโน้มการหดตัวแบบแห้งสูงสุด ทั้งนี้เมื่อ

นำเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตเข้ามาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 การหดตัวแบบแห้งมีแนวโน้มลดลง โดยอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีแนวโน้มการหดตัวแบบแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยามีค่าลดลง รวมถึงการสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลารีก็ลดลงตามไปด้วย ประกอบกับผลของการดูดซึมน้ำที่มากขึ้นเนื่องจากวัสดุผงทำให้น้ำที่มีเหลืออยู่ภายในเนื้อซีเมนต์เพศ์ถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้มีการหดตัวที่น้อยลง รวมถึงเป็นผลของการขยายตัวซึ่งมาจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₂) ที่มีอยู่ในเถ้าลอย [26]



รูปที่ 6 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

4. สรุป

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีแนวโน้มลดลงในขณะที่ปริมาณอากาศมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อผสมรวมผงที่แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณอากาศมีแนวโน้มลดลง
2. ปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการทำงาน ได้มีแนวโน้มที่ดีขึ้น ในขณะที่เมื่อทำการผสมร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนตความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง
3. การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงเมื่ออายุของการบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดประลัยมากกว่า 40 MPa โดยอัตราส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 120 วัน สูงสุดถึง 75.28 MPa
4. การหดตัวแบบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อนำเถ้าลอยและผงแคลเซียมคาร์บอเนตมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยอายุการบ่มของคอนกรีตและอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีแนวโน้มการหดตัวแบบแห้งลดลง

5. จากผลการทดลองเป็นแนวทางเบื้องต้นให้ได้ปริมาณการใช้งานวัสดุผงที่เหมาะสม ทั้งนี้จากการนำไปใช้งานจริงผู้ผลิตจะต้องทำการปรับอัตราส่วนโดยปริมาตรใหม่อีกครั้งเนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่แตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยและเครื่องมือปฏิบัติการสำหรับการทดสอบสมบัติพื้นฐานตัวอย่างวัสดุประสาน บริษัท สุรินทร์ ออมย่า เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี รวมทั้งรองศาสตราจารย์.ดร.ณัฐ ภาณุกุล ที่ได้ให้คำแนะนำ คุณณัฐวุฒิ กองม่วง และนักศึกษาที่ช่วยเตรียมตัวอย่างและการทดสอบจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษดา เสือเอี่ยม และ ณัฐ ภาณุกุล. ผลของวัสดุผงผสมร่วมสามชนิดในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในสภาวะคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2556, ปีที่ 36 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม, หน้า 127-147
- [2] Okamura H. and Ouchi M. Self-compacting concrete, *Journal of Advance Concrete Technology*, 2003, Vol. 1, No. 1, pp. 5-15.
- [3] Sua-iam G. and Makul N. Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal Fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete, *Journal of Cleaner Production*, 2014, 78 (2014), pp. 184-194.
- [4] Liu M. Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash, *Construction and Building Materials*, 2010, Vol. 24, No. 7, pp. 1245-1252.
- [5] Sua-iam G. and Makul N. The use of residual rice husk ash from thermal power plant as cement replacement material in producing self-compacting concrete, *Advanced Materials Research*, 2012, Vol. 415-417, pp. 1490-1495.
- [6] Uysal M. and Yilmaz K., Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2011, Vol. 33, No. 7, pp. 771-776.
- [7] สำเร็จ รักซ้อน และ ปริญญญา จินดาประเสริฐ. กำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมในระบอบวัสดุประสานสามชนิด, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2551, ปีที่ 31 ฉบับที่ 4 ตุลาคม – ธันวาคม, หน้า 859-869
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM C150-07, 2007, *Standard Specification for Portland Cement*. Annual Book of ASTM Standard. Volume 4.01.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C33/C33M-11, 2011, *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Annual Book of ASTM Standard. Volume 4.02.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C494/C494M-10a, 2010, *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. Annual Book of ASTM Standard. Volume 4.02.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM 1611/C1611M-14, 2017, *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. Annual Book of ASTM Standard. Volume 4.02.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM 1621/C1621M – 14, 2017, *Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring*. Annual Book of ASTM Standard. Volume 4.02.
- [13] EFNARC. *Specification and guidelines for self-compacting concrete*, Surrey, UK., February, 2002.

- [14] American Society for Testing and Materials. ASTM C318/C318M-17a, 2017, *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content Gravimetric) of Concrete*. Annual Book of ASTM Standard. Volume4.02.
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM C231/C231M-17a, 2017, *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. Annual Book of ASTM Standard. Volume4.02.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM C39/C39M-10, 2011, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standard. Volume4.02.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM C426-16, 2017, *Standard Test Method for Linear Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units*. Annual Book of ASTM Standard. Volume4.02.
- [18] บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน). *คู่มืออินทรีย์คอนกรีต*, พิมพ์ครั้งที่ 4 บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน), 2552
- [19] พงศกร พรหมสวัสดิ์ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ. พฤติกรรมการไหลของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยลิกไนต์, *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก*, 2560, ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, หน้า 52-61.
- [20] P.Krstulovic, N.Kamenic and K.Popovic. A New Approach in Evaluation of Filler Effect in Cement Effect on Strength and Workability of Mortar and Concrete, *Cement and Concrete Research*, 1994, Vol. 24.4, pp. 721-727.
- [21] กฤติยา แก้วมณี, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และ คมสันต์ มีธนาถาวร. คุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต, *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, 2558, ปีที่ 3 ฉบับที่ 2, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, หน้า 8-16.
- [22] Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A. and Uyulgan B. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, *Cement and Concrete Research*, 2006, Vol.36, pp. 1719-1726.
- [23] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พงศกร พรหมสวัสดิ์. ผลกระทบของการแทนที่เถ้าขานอ้อยในมวลรวมละเอียดต่อคุณสมบัติทางกลของปูนฉาบ, *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2552, ปีที่ 20 ฉบับที่ 1, หน้า 59-68.
- [24] Siddique R., Aggarwal P. and Aggarwal Y. Influence of wate/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash, *Construction and Building Materials*, 2012, Vol.29, pp. 73-81.
- [25] Rodriguez-Camacho. Importance of Using The Natural Pozzolana on Concrete Durability, *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol. 32, pp. 1851-1858.
- [26] ปิติสานต์ กร้ามาตร. คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน, *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553, 58.