

อิทธิพลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะเทศบาลต่อสมบัติของคอนกรีตสด และกำลังอัดของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

Influence of Municipal Solid Waste Ash as a Replacement of Cement on Fresh Properties and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete

นันทชัย ชุศลปี* และ จุฑามาศ ลักษณกิจ

Nuntachai Chusilp* and Chuthamat Laksanakit

Received: 3 March 2020, Revised: 12 September 2020, Accepted: 4 November 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมเถ้าขยะเทศบาลนครหาดใหญ่ ในสภาวะคอนกรีตสด ประกอบด้วย ความสามารถในการไหล ความต้านทานการแยกตัว และความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง โดยชุดทดสอบ Slump flow V-Funnel และ L-Box ตามลำดับ และในสภาวะแข็งตัวแล้วโดยการทดสอบกำลังอัด วัสดุประสานใช้เถ้าขยะเทศบาลแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน 0.40 ส่วนผสมคอนกรีตใช้น้ำยากันซึมและน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์เป็นสารผสมเพิ่ม แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์ จากผลการทดสอบพบว่ารูปแบบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดและกำลังรับแรงอัดของทั้ง 2 แบบแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยค่า Slump flow ลดลงต่ำสุดที่การแทนที่ร้อยละ 10 เมื่อมีการแทนที่เพิ่มขึ้นคอนกรีตสดใช้เวลาไหลผ่าน V-funnel เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความหนืดสูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วน L-Box ลดลง นอกจากนี้พบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขยะเทศบาลในส่วนผสมของคอนกรีตอัตราร้อยละ 15 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของคอนกรีตควบคุม

คำสำคัญ: คอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง, เถ้าขยะเทศบาลนครหาดใหญ่, คอนกรีตสด, กำลังอัด

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อทราย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2/4 Ratchadamnoen-nok Road, Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): nuntachai.c@rmutsv.ac.th

ABSTRACT

The research aims to study workability of self-compacting concrete (SCC) integrating with Hat Yai Municipal's solid waste ash as a replacement of cement., segregate resistance and passing ability were tested by using slump flow, V-funnel and L-box methods, respectively. The compressive strength of the hardened concrete was presented. The municipal solid waste ash was used as a binder replacing the Portland cement type 1 at varying weight percentages of 0%, 5%, 10% and 15%, and the binder ratio at 0.40. The waterproof and superplasticizer were also used as concrete admixture. According to concrete admixture, two designs of experiment were done- admixture with superplasticizer and without superplasticizer. The results show that there is no significant difference ($p>0.05$) between workability patterns of the two types. The 10% replacement of cement gives the lowest slump. The higher percentage of waste ash as a replacement increase, the flow time of V-funnel increases. This higher viscosity, as a result, decreases the L-box ratio. Moreover, it was found that at curing age of 28 days, the replacement of cement with municipal waste ash mixed with 15 percent of concrete can result in a higher compressive strength which is roughly the same as the control mixture.

Key words: self-compacting concrete, municipal solid waste ash, fresh concrete, compressive strength

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างซึ่งเป็นภาคส่วนที่มีมูลค่าและอิทธิพลสูงต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย การลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตถือเป็นการลดต้นทุนและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง ที่ผ่านมามีการนำวัสดุประเภทเถ้าจากธรรมชาติ เถ้าลอย และเถ้าขยะซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาแทนที่ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าจากแหล่งต่างๆ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะอนุภาคแตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและความคงทนของคอนกรีต การนำเถ้ากลับซึ่งมีซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตในสถานะสดและทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต่อเนื่องอย่างช้าๆ ในระยะเวลาต่อมา และส่งผลต่อสมบัติเชิงกล

ของคอนกรีตในสถานะแข็งตัว (Sua-Iam and Makul, 2013; Sua-Iam and Makul, 2012; Zerbino *et al.*, 2011) การศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุยึดประสานในคอนกรีตของ (Chindapasert *et al.*, 2008) พบว่าเถ้าลอยช่วยปรับปรุงให้สมบัติเชิงกลและความทนทานดีขึ้น (Kroehong *et al.*, 2016) พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยให้คอนกรีตมีค่าการนำความร้อนลดลง นอกจากเถ้าจากธรรมชาติและเถ้าลอยแล้ว มีการนำเถ้าขยะซึ่งเป็นผลพลอยได้จากเตาเผาขยะของชุมชนซึ่งมีปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างการศึกษาของ (Puangmanee, 2004; Tradtarntip, 2005; Ngarmkham, 2016; Chusilp *et al.*, 2017) พบว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมเถ้าขยะสูงกว่าร้อยละ 20 ทำให้กำลังอัดลดลง ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าขยะในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ยังมี

รายงานวิจัยที่นำเถ้าลอยขยะมาผสมกับซีเมนต์และดินลูกรังเพื่อผลิตบล็อกประสานสามารถรับแรงอัดได้ตามเกณฑ์ล้อยกรับน้ำหนักของ มอก. ซึ่งพบว่า ค่าการแพร่ความร้อนมีค่าต่ำลง (Lerskittikuliyotin, 2017) สอดคล้องกับการศึกษาของ (Garcia-Lodeiro *et al.*, 2016) ที่พบว่า การนำเถ้าหนักจากขยะเทศบาลมาเป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮบริดช่วยให้การพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในระดับดี (สูงกว่า 32.5 MPa)

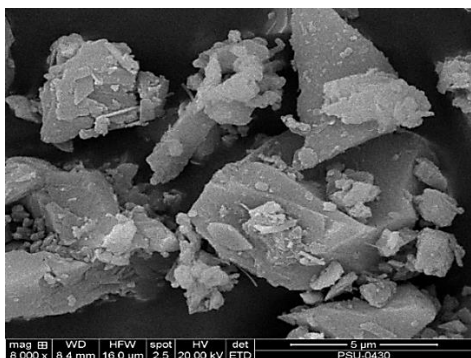
นอกจากนี้ในการก่อสร้างยังมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น กำลังแรงงานที่หายาก ระยะเวลาในการทำงาน ความสามารถของแรงงานในการทำงาน คอนกรีตผ่านโครงสร้างที่ซับซ้อน และงบประมาณ จึงได้มีการพัฒนาคอนกรีตไหลอัดแน่นตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) ซึ่งเป็นนวัตกรรมหนึ่งของคอนกรีตเทคโนโลยีซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมและยอมรับในอุตสาหกรรมก่อสร้าง (Okamura *et al.*, 1993; Okamura and Ouchi, 2003; Maekawa and Noguchi, 2008; Attchayawuth *et al.*, 2015) เพื่อมาแก้ปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้น คอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีคุณสมบัติในการไหลแผ่เข้าแบบได้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป ไม่ต้องจี้เขย่าและไม่เกิดการแยกตัวของส่วนผสม สมบัติของคอนกรีตสดจึงเป็นเกณฑ์สำคัญที่ชี้วัดความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้เถ้าขยะเทศบาลแทนที่ซีเมนต์ในบางส่วน เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีต

เป็นการนำผลพลอยได้จากการจัดการขยะที่มีเพิ่มมากขึ้นทุกปีมาใช้ประโยชน์และลดการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะที่มีผลต่อสมรรถนะความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดและกำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

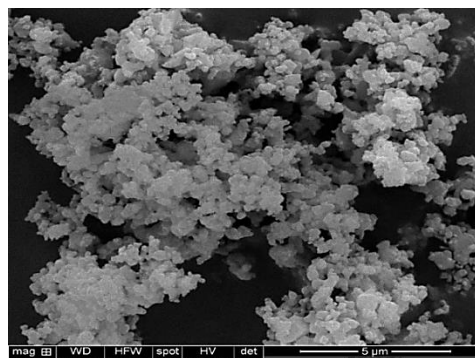
วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย วัสดุเชื่อมประสาน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขยะจากเตาเผาขยะเทศบาลนครหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เมื่อถ่ายภาพที่ กำลังขยายขนาด 8,000 เท่า พบว่า ลักษณะสีฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนหลายเหลี่ยมที่มีผิวขรุขระ มีขนาดเล็กใหญ่ปะปนกัน ส่วนเถ้าขยะมีลักษณะสีฐานเป็นทรงกลม ดังภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ วัสดุมวลรวม นำทรายแม่น้ำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียด นำหินมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ส่วนน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตเป็นน้ำประปา และใช้สารเคมีผสมเพิ่มในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตได้แก่ น้ำยากันซึมและน้ำยาชูเปอร์พลาสติกไซเซอร์



ภาพที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
กำลังขยายขนาด 8,000 เท่า



ภาพที่ 2 เถ้าขยะเทศบาล
กำลังขยายขนาด 8,000 เท่า

2. อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC) หรือ “คอนกรีต SCC” จะใช้เถ้าขยะเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.40 และใช้น้ำยากันซึมเพื่อช่วยให้มีความสามารถในการทำงานและช่วยลดอัตราการ

ซึมผ่านของน้ำในปริมาณ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม โดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบที่ผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซออร์ (SP) และแบบที่ไม่ผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซออร์ (NSP) อย่างละ 4 อัตราส่วนผสม รวมทั้งสิ้น 8 อัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 1 แต่ละอัตราส่วนผสมบ่มที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาล

อัตราส่วนผสม	วัสดุประสาน		มวลรวม		W/B	น้ำ	น้ำยากันซึม	น้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซออร์	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าขยะเทศบาล	ทราย	หิน					
	(กก/ม ³)	% (กก/ม ³)	(กก/ม ³)	(กก/ม ³)		(กก/ม ³)	(กก/ม ³)	(กก/ม ³)	
SCC1-W0-NSP*	660	0	0	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W0-SP**	660	0	0	977	561	0.40	257	6.58	0.07
SCC1-W5-NSP	627	5	22.34	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W5-SP	627	5	22.34	977	561	0.40	257	6.58	0.07
SCC1-W10-NSP	594	10	44.68	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W10-SP	594	10	44.68	977	561	0.40	257	6.58	0.07
SCC1-W15-NSP	561	15	67.02	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W15-SP	561	15	67.02	977	561	0.40	257	6.58	0.07

หมายเหตุ : * อัตราส่วนควบคุมของแบบที่ผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซออร์ (SP)

** อัตราส่วนควบคุมของแบบที่ไม่ผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซออร์ (NSP)

3. อุปกรณ์และวิธีทดลอง

3.1 ทดสอบสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน และสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต

3.1.1 วิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมคอนกรีต โดยการวิเคราะห์หาสารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) รุ่น Empyrean ยี่ห้อ PANalytical และวิเคราะห์หองค์ประกอบธาตุของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) รุ่น Zetium ยี่ห้อ PANalytical

3.1.2 ทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสานจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ด้วยเครื่องทดสอบ Blaine air permeability test ตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials (ASTM) C204 (ASTM, 2005)

3.1.3 ทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคแขวนลอยโดยใช้เลเซอร์ (Laser particle size analyzer, LPSA) รุ่น ANALYSETTE 22 NanoTec ยี่ห้อ FRITSCH

3.1.4 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานตามมาตรฐาน ASTM C188 (ASTM, 2001c) โดยขจัดมาตรฐานเลขเซอร์ลิเยร์

3.1.5 ขนาดละเอียดของมวลรวม คือวิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus) ตามมาตรฐาน ASTM C33-01 (ASTM, 2001a)

3.2. ทดสอบสมบัติของคอนกรีตสด

3.2.1 การไหลแผ่ (Slump flow) ASTM C1611 (ASTM, 2011) ดังภาพที่ 3 (ก) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตหลังจากเกิดการเสีรูปร่างใน 2 ทิศทาง เพื่อหาค่าเฉลี่ย เหน้การเปรียบเทียบที่ยอมรับได้มีค่าอยู่ระหว่าง 480 ถึง 680 มิลลิเมตร

3.2.2 การทดสอบความต้านทานการแยกตัวหรือความหนืดด้วยเครื่องทดสอบรูปตัววี (V-funnel flow test) ตามมาตรฐาน European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC) (EFNARC, 2002) ภาพที่ 3 (ข) โดยเทคอนกรีตลงในเครื่องทดสอบแล้วปล่อยให้ไหล 5 นาที จากนั้นจึงทำการเปิดช่องด้านล่างเพื่อปล่อยคอนกรีตให้ไหลออกและจับเวลาจนกว่าคอนกรีตจะไหลออกหมด วัดระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปล่อยคอนกรีตจนกระทั่งเห็นแสงลอดผ่านจุดปล่อยเมื่อมองจากด้านบนในหน่วยวินาที โดยผลที่ได้คือครรชนิษฐ์วัดความสามารถต้านทานการแยกตัวหรือความหนืด ซึ่งคอนกรีต SCC ที่มีคุณลักษณะดีจะใช้ระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel ประมาณ 6-12 วินาที

3.2.3 การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวดิ่งด้วยชุดทดสอบ L-box ตามมาตรฐาน EFNARC (EFNARC, 2002) กำหนดให้อัตราส่วนของระยะ H2/H1 ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 - 1.0 ดังภาพที่ 3 (ค)

3.3 ทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test) ของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขี้เถ้าเทศบาลที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 (ASTM, 2001b) ทำการทดสอบแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ แล้วจึงนำค่าแรงอัดประลัย (P)หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (A) เพื่อคำนวณหาค่ากำลังอัด (f'_c) ตามสมการที่ 1

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$



ภาพที่ 3 การทดสอบคอนกรีตสด (ก) การทดสอบการไหลแผ่ (Slump flow)

(ข) การทดสอบความต้านทานการแยกตัวด้วยเครื่องมือทดสอบรูปตัววี (V-funnel flow test)

(ค) การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวดิ่งด้วยเครื่องทดสอบ L-box

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต SCC

ผลการทดสอบสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขยะเทศบาล) ดังตารางที่ 2 และ 3 พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 62.39 รองลงมาคือซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ร้อยละ 20.95 และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ร้อยละ 4.24 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d₅₀) 18.8 ไมโครเมตร (ดูภาพที่ 4) และพื้นที่ผิวจำเพาะ 3,681 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ขณะที่เถ้าขยะเทศบาลมีโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ร้อยละ 28.26 โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ร้อยละ 14.69 และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ร้อยละ 13.86 เป็นองค์ประกอบหลัก มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d₅₀) 18.9 ไมโครเมตร (ดูภาพที่ 4) และพื้นที่ผิวจำเพาะ 5,272 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงว่าอนุภาคของเถ้าขยะเทศบาลมีความละเอียดกว่า

สำหรับมวลรวมละเอียด (ทราย) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.67 อัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.80 ความชื้นร้อยละ 1.02 โมดูลัสความละเอียด 2.72 และขนาดคละของอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.15 - 9.5 มิลลิเมตร (ดูภาพที่ 5) มวลรวมหยาบ (หิน) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.76 มีอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.7 ความชื้นร้อยละ 1.01 และค่าโมดูลัสความละเอียด 7.42 มีขนาดระหว่าง 4.75 - 25.4 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 3 และภาพที่ 5

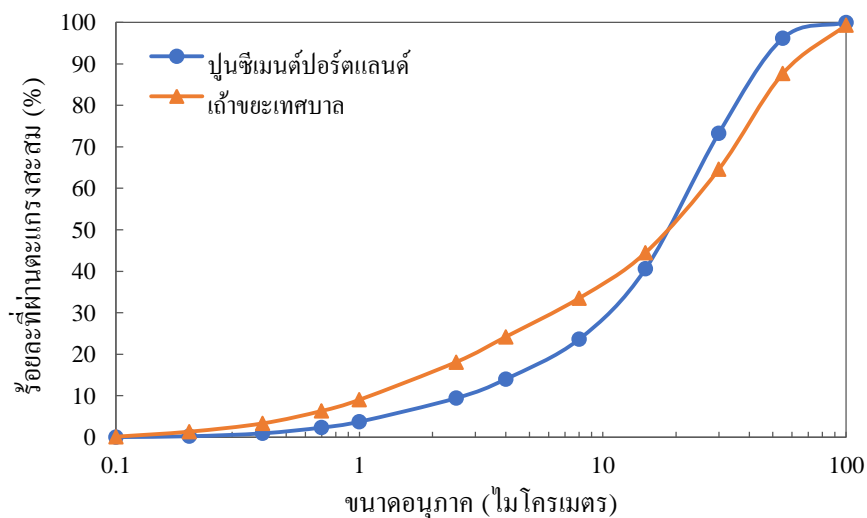
ผลการทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) แสดงดังภาพที่ 6 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบธาตุสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Nguyen *et al.*, 2016) โดยมี C₃S (Alite) และ C₂S (Belite) ปริมาณสูงในช่วงมุมกวาด 32 - 35 องศา ส่วนเถ้าขยะเทศบาลที่ใช้ในงานวิจัยก็ให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Wu *et al.*, 2012) โดยพบว่าไม่มีโซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์ในปริมาณที่สูงในช่วงมุมกวาด 28 - 32 องศา เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

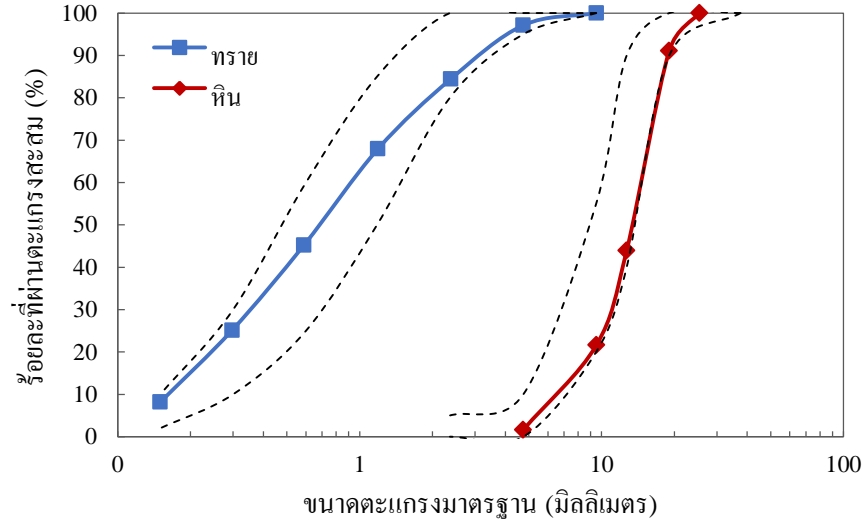
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าขี้เตา
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.95	0.79
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	4.24	0.23
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	2.92	0.31
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	62.39	3.62
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.24	0.33
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	-	14.69
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.86	28.26
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	4.43	13.86

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต

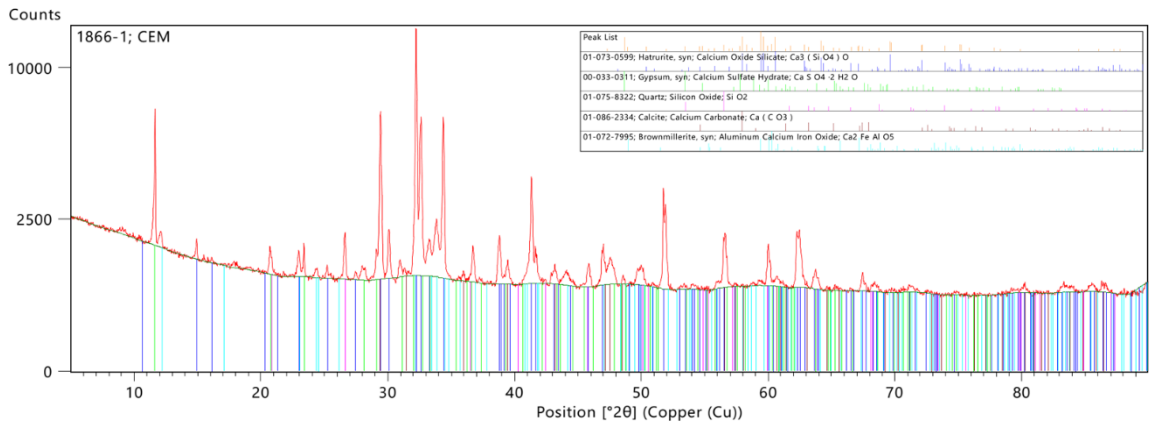
สมบัติทางกายภาพ	วัสดุประสาน			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าขี้เตา	ละเอียด (ทราย)	หยาบ (หิน)
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.14	2.67	2.76
ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%)	-	-	1.8	0.7
ร้อยละความชื้น (%)	-	-	1.02	1.01
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d ₅₀ (มิลลิเมตร)	18.8×10 ⁻³	18.8×10 ⁻³	0.6	12.7
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตร/กรัม)	3,681	5,272	-	-
โมดูลัสความละเอียด	-	-	2.72	7.42



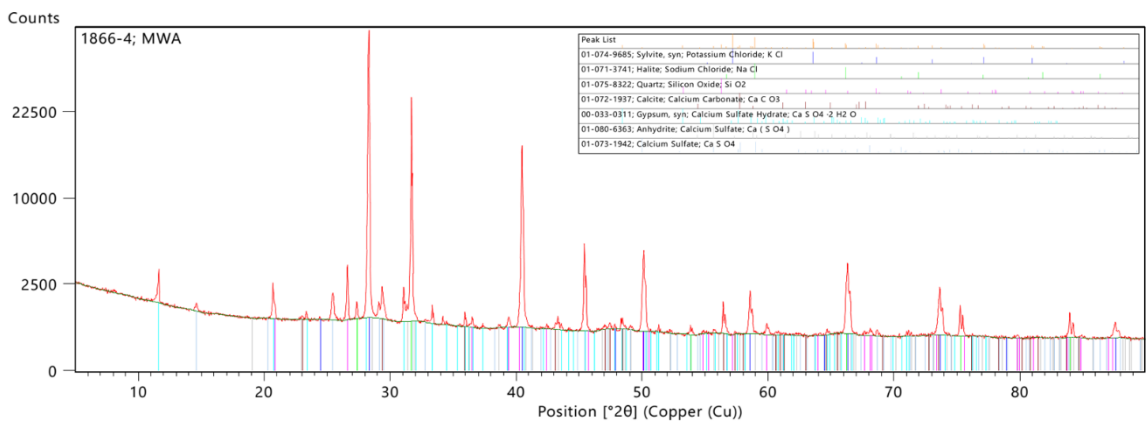
ภาพที่ 4 การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขี้เตา



ภาพที่ 5 การกระจายขนาดคละของมวลรวม

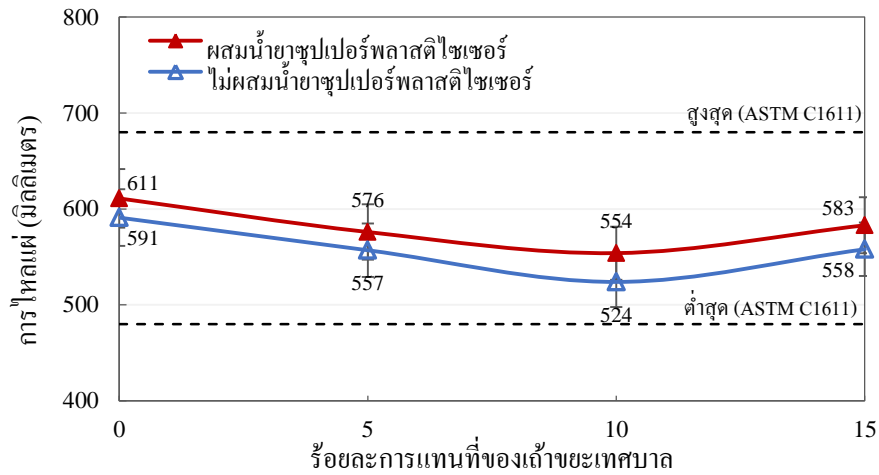


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

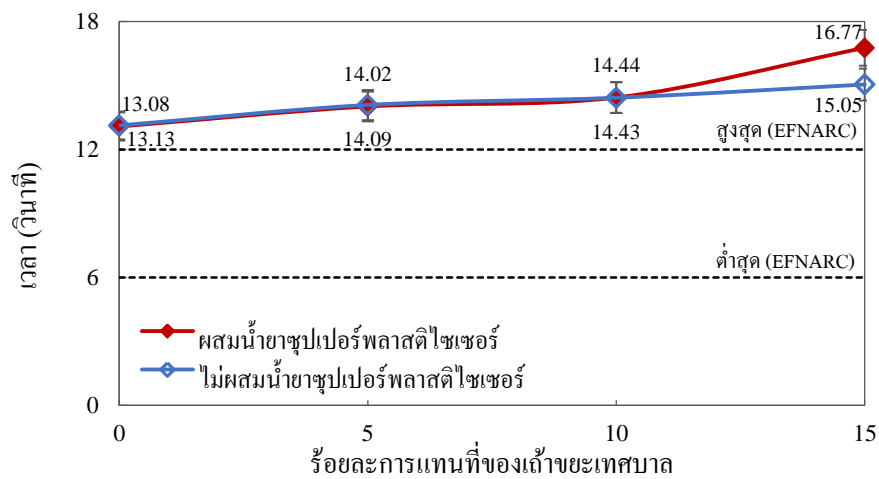


(ข) เถ้าขยะเทศบาล

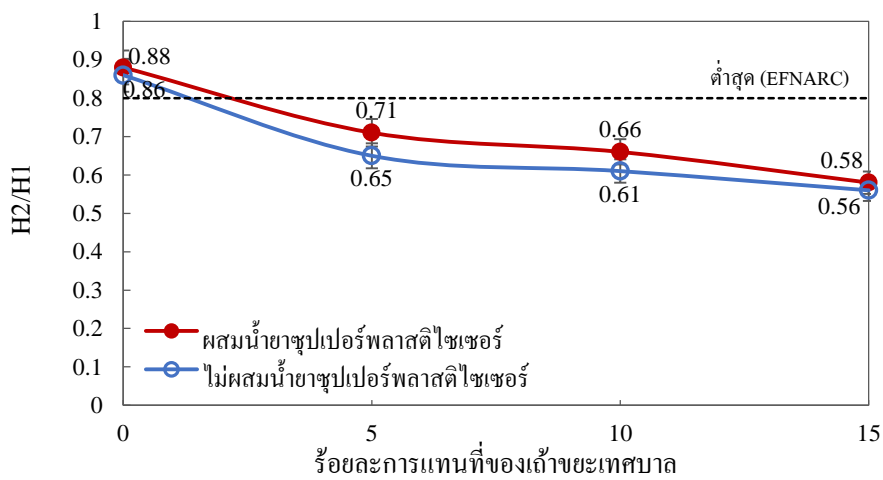
ภาพที่ 6 สารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)



ภาพที่ 7 การไหลแผ่ Slump flow ของคอนกรีตสดผสมเถ้าขยะเทศบาล



ภาพที่ 8 ความต้านทานการแยกตัว V-funnel ของคอนกรีตสดผสมเถ้าขยะเทศบาล



ภาพที่ 9 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนของคอนกรีตสดผสมเถ้าขยะเทศบาล

2. ผลการทดสอบคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาล

2.1 การไหลแผ่ (Slump flow test)

จากภาพที่ 7 พบว่าคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาลแบบที่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 554-611 มิลลิเมตร และแบบไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 524-591 มิลลิเมตร จัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASTM C1611 (ASTM, 2011) โดยการไหลแผ่ของคอนกรีต SCC ทั้ง 2 แบบ มีค่าลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าขยะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าขยะเทศบาลมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นและมีผลต่อเนื้อให้ระยะการไหลแผ่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt and Jaturapitakkul (2009) โดยมีค่าต่ำสุดที่การแทนที่ร้อยละ 10 ซึ่งต่ำกว่าค่าการไหลแผ่ของอัตราส่วนควบคุม (SCC1-W0-SP และ SCC1-W0-NSP) คิดเป็นประมาณร้อยละ 6 และ 11 ตามลำดับ การไหลแผ่ของคอนกรีต SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์ และร้อยละการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2.2 ความต้านทานการแยกตัว (V-funnel flow test)

จากภาพที่ 8 พบว่าคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาลใช้เวลาในการไหลอยู่ในช่วง 13.08-16.77 วินาที ซึ่งนานกว่าเวลาตามมาตรฐาน ENFARC (ENFARC, 2002) เห็นได้ชัดว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ($W/B = 0.40$) ส่งผลให้คอนกรีต SCC ใช้เวลาในการไหลนานขึ้น นั่นหมายความว่ามีความหนืดเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีต SCC มีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกตัวในขณะเทเข้าแบบ นอกจากนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสานต่ำ ประกอบกับเถ้าขยะมีขนาดอนุภาคละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าขยะเทศบาลจึงต้องการน้ำในการหล่อลื่นอนุภาคสูงกว่าปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามความต้านทานการแยกตัวของคอนกรีต SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ร้อยละการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาลส่งผลต่อความแตกต่างของความต้านทานการแยกตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.3 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-box)

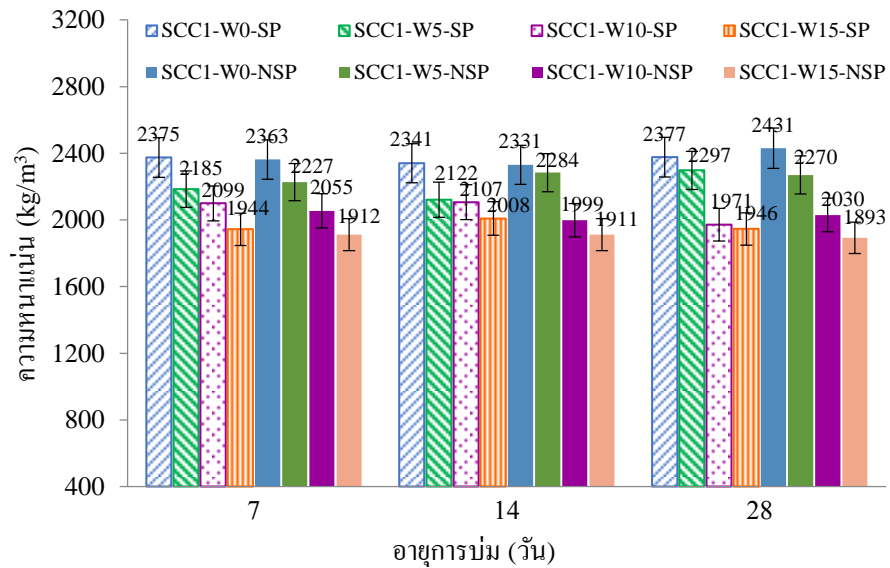
จากภาพที่ 9 พบว่าคอนกรีต SCC แบบที่ผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์มีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน ($H2/H1$) อยู่ในช่วง 0.56-0.88 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ของ ENFARC (ENFARC, 2002) ยกเว้นอัตราส่วนผสมควบคุม SCC1-W0-SP และ SCC1-W0-NSP และมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่เถ้าขยะเทศบาล การลดลงของสัดส่วน $H2/H1$ แสดงว่าอัตราส่วนผสมค่อนข้างหนืดและมีแนวโน้มจะไหลเข้าแบบได้ไม่ดี การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนของคอนกรีต SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่การแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาลส่งผลต่อความแตกต่างของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับคุณสมบัติความต้านทานการแยกตัว

3. ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาลที่แข็งตัวแล้ว

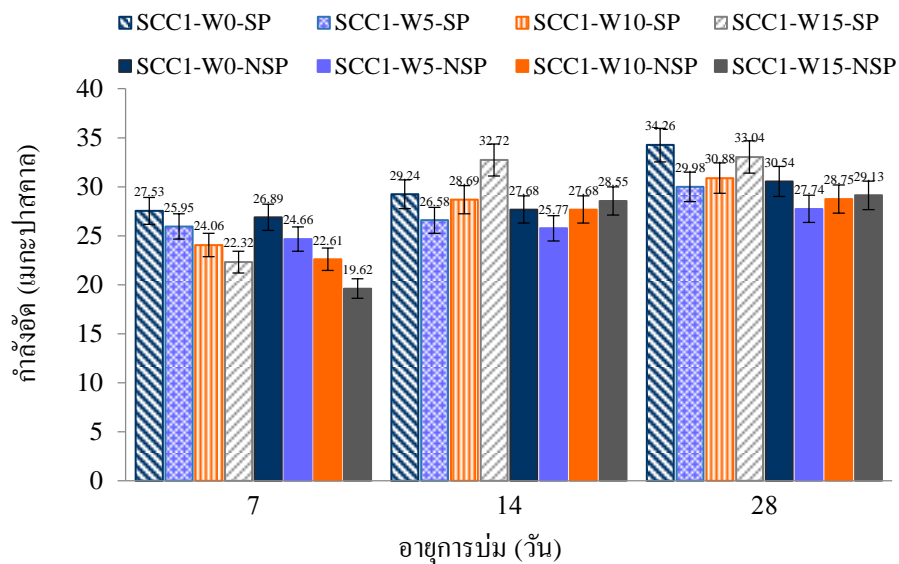
ความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะ แสดงดังภาพที่ 10 พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีต SCC มีค่าลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่ด้วย

เถาขยายมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถาขยายมีค่าความตึงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ลดน้อยลง

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กับไมโซน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไอโซเซอร์และระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่ 7 14 และ 28 วัน ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 10 ความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ผสมเถาขยายเทศบาลที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 11 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

4. ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต SCC ผสม เถ้าขยะเทศบาลที่แข็งตัวแล้ว

จากภาพที่ 11 พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน คอนกรีต SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์มีกำลังอัดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของร้อยละการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาล เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่ม 14 วัน คอนกรีต SCC ทั้ง 2 แบบมีรูปแบบการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นแบบแปรผันตรง กล่าวคือที่ร้อยละการแทนที่มากกำลังอัดพัฒนาได้มาก เนื่องจากเถ้าขยะเทศบาลมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็กมากทำให้สามารถแทรกตามช่องว่างของมวลรวมได้ดี โดยเถ้าขยะจะทำหน้าที่วัสดุเติมแทรก (Filler material) ประกอบกับหลังจากอายุการบ่ม 7 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของส่วนผสมคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น และส่งผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงระยะเวลาดังกล่าว โดยอัตราส่วนผสมคอนกรีตแบบผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์ที่การแทนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มเป็น 26.58 เมกะปาสคาล 28.69 เมกะปาสคาล 32.72 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนที่อายุการบ่ม 28 วัน การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต SCC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยอัตราส่วนผสมที่การแทนที่ร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงสุด 33.04 เมกะปาสคาล ต่ำกว่ากำลังอัดของอัตราส่วนควบคุมประมาณร้อยละ 4 สำหรับอัตราส่วนผสมแบบไม่ผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์มีรูปแบบการพัฒนา กำลังอัดคล้ายคลึงกันแต่โดยภาพรวมมีกำลังอัดต่ำกว่าแบบผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์ แตกต่างกับผลการศึกษาของ (Puangmanee, 2004) ที่พบว่ากำลังอัดของก้อนคอนกรีตผสมเถ้าขยะจากเตาเผาขยะมูลฝอยชุมชนของจังหวัดภูเก็ตมีค่าลดลงเมื่อการแทนที่เถ้าขยะสูงขึ้น (Chusilp *et al.*, 2017) ที่สรุปไว้ว่าเถ้าขยะเทศบาลเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงกว่าร้อยละ 10 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และการค้นพบของ (Sua-iam and Makul, 2013) ที่พบว่าคอนกรีตชนิดอัดตัวได้ที่ผสมเถ้าแกลบไม่บดเมื่อปริมาณเถ้าแกลบสูงขึ้น (เกินกว่าร้อยละ 20) กำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา เนื่องจากต้องการมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานเป็นคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

สรุป

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต

ค่าความละเอียดของเถ้าขยะ ซึ่งเป็นเถ้าจากกระบวนการเผาขยะ มีลักษณะอนุภาครูปร่างกลม และมีค่าความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นผลดีในการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพราะเถ้าขยะจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าขยะมีช่องว่างในคอนกรีตลดลง ถึงแม้ว่าเถ้าขยะเทศบาลจะมีค่าสารประกอบออกไซด์หลัก คือ โปแทสเซียมออกไซด์ ซัลเฟอร์ ไตรออกไซด์ และโซเดียมออกไซด์ ก่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณสารประกอบออกไซด์ โปแทสเซียมออกไซด์ และโซเดียมออกไซด์ (K_2O+Na_2O) หรือเรียกว่าปริมาณอัลคาไล มีปริมาณร้อยละรวมกันสูงเกือบร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก การใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณสูงกว่า 560 กก/ม³ ในส่วนผสมคอนกรีต SCC พบว่าสารอัลคาไลในดังกล่าวในเถ้าขยะเทศบาลยังไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตในช่วงอายุของการทดสอบแต่อย่างใด

2. ผลการวิเคราะห์สมบัติของคอนกรีตสด SCC

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถการไหลคอนกรีตสด SCC ที่ไม่ผสมเถ้าขยะเทศบาล

(อัตราส่วนคอนกรีตควบคุม) และ ที่ผสมเถ้าขยะเทศบาล แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซุปลอปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ พบว่าอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมมีความสามารถในการไหลที่ดีกว่า อัตราส่วนผสมของเถ้าขยะในทุกอัตราส่วน และความสามารถในการไหลจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าขยะ เนื่องจากเถ้าขยะมีค่าความละเอียดของพื้นผิวสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงทำให้เถ้าขยะมีความต้องการดูดซึมน้ำสูง และการผสมน้ำยาซุปลอปเปอร์พลาสติกไซเซออร์มีอิทธิพลต่อความสามารถในการไหลเพียงเล็กน้อย

3. ผลการวิเคราะห์กำลังอัดของคอนกรีต SCC ที่แข็งตัวแล้ว

ผลกำลังอัดของอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมมีกำลังอัดมากกว่าอัตราส่วนที่ผสมเถ้าขยะในทุกอัตราส่วน และคอนกรีตแบบผสมน้ำยาซุปลอปเปอร์พลาสติกไซเซออร์มีผลกำลังอัดมากกว่าแบบที่ไม่ผสมน้ำยาซุปลอปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ แต่เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ผสมเถ้าขยะในแต่ละอัตราส่วน พบว่า ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าขยะเทศบาล เนื่องจากเถ้าขยะเทศบาลมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ช่องว่างในคอนกรีต SCC จึงถูกแทนที่ด้วยเถ้าขยะเทศบาล การทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมแทรกของเถ้าขยะเทศบาลจึงส่งผลถึงการรับกำลังอัด ในคอนกรีต SCC ที่ผสมเถ้าขยะในปริมาณร้อยละ 15 มีความหนาแน่นต่ำกว่าอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 25 ในขณะที่มีกำลังอัดต่ำกว่าอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมเพียงเล็กน้อย (โดยเฉลี่ยร้อยละ 5)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัยนี้จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. 2001a. ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2001b. ASTM C39. Standard Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2001c. ASTM C188. Standard Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2005. ASTM C204. Standard Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2011. ASTM C1611. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM International, Philadelphia.
- Attachaiyawuth, A., Tanaka, K., Rath, S. and Ouchi, M. 2015. Air-enhanced self-compactability of fresh concrete with effective mixing method, pp. 1069-1074. *In Proceedings of the Japan Concrete Institute*. Japan Concrete Institute, Chiba.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. 2008. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials* 22(5): 932-938.
- Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. 2009. *Cement, Pozzolan and Concrete*. 2nd ed. Thai Concrete Association, Bangkok. (in Thai)

- Chusilp, N., Ngarmkham, S. and Anusiri, M. 2017. Effects of municipal waste ash on the durability and mechanical properties of concrete, pp. 91-96. *In Proceeding of The 22nd National Convention on Civil Engineering*. Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. (in Thai)
- EFNARC. 2002. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. EFNARC, Surrey.
- Garcia-Lodeiro, I., Carcelen-Taboada, V., Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A. 2016. Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator. **Construction and Building Materials** 105: 218-226.
- Kroehong, W., Sangpaen, S., Sitkanarak, P. and Wilairat, J. 2016. Mechanical properties, microstructure and thermal conductivity of concrete block containing fly ash. **KMUTT Research and Development Journal** 39(3): 407-425. (in Thai)
- Lerskittikulyotin, P. 2017. The development of interlocking block with fly ash from solid waste to reduce the environmental impact. Master Thesis (Civil Engineering), Silpakorn University. (in Thai)
- Maekawa, K. and Noguchi, T. 2008. Self-compacting concrete in Japan, pp. 72-91. *In International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*. Japan Concrete Institute, Japan Prestressed Concrete Engineering Association, and International Federation for Structural Concrete, Tokyo.
- Ngarmkham, S. 2016. Effects of municipal waste ash on the durability and mechanical properties of concrete. Master Thesis (Civil Engineering), Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- Nguyen, H.A., Chang, T.P. and Dung, N.T. 2016. Sulfate Resistance of Low Energy SFC No-cement Mortar. **Construction and Building Materials** 102: 239-243.
- Okamura, H. and Ouchi, M. 2003. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology (ACT)** 1(1): 5-15.
- Okamura, H., Maekawa, K. and Ozawa, K. 1993. **High Performance Concrete**. Gihodo Publishing, Japan Society of Civil Engineers, Japan.
- Puangmanee, S. 2004. Feasibility study of using fly ash from Phuket municipal solid waste incinerator to produce hollow non-load-bearing concrete masonry units. Master Thesis (Civil Engineering), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Sua-Iam, G. and Makul, N. 2012. The use of residual rice husk ash from thermal power plant as cement replacement material in producing self-compacting concrete. **Advanced Materials Research** 415-417(2012): 1490-1495.
- Sua-Iam, G. and Makul, N. 2013. Properties of self-compacting concrete incorporating high volume unground rice husk ash. **Research and Development Journal** 24(4): 20-27. (in Thai)

- Tradartip, S. 2005. Utilization of municipal solid waste incinerator fly ash as a partial aggregate replacement in cement mortars. Master Thesis (Civil Engineering), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Wu, K., Schutter, G.D., Guo, X. and Ye, G. 2012. Experimental study on alinite ecocement clinker preparation from municipal solid waste incineration fly ash. **Materials and Structures** 45: 1145-1153.
- Zerbino, R., Giaccio, G. and Isaia, G.C. 2011. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction and Building Materials** 25(1): 371-378.