



Journal of Thailand Concrete Association

วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ผลกระทบของชนิดของสารลดน้ำพิเศษต่อสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตา
ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน

EFFECT OF TYPES OF SUPERPLASTICIZER ON PROPERTIES OF PASTE AND MORTAR MADE WITH A BINDER OF BOTTOM ASH AND CALCIUM CARBIDE RESIDUE

อรรคเดช อับดุลมาติน¹ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received: October 10, 2015

Received Revised Form:

December 15, 2015

Accepted: December 22, 2015

ABSTRACT :

This research investigated the effect of melamine sulphonate (MS) and polycarboxylate (PC) superplasticizers on properties of paste and mortar using ground bottom ash (GBA) mixed with ground calcium carbide residue (GCR) as a binder. The optimum proportion between GBA:GCR was determined and it was found that the optimum proportion was 70:30 by weight to obtain the highest compressive strength. The effects of MS and PC superplasticizers on normal consistency and setting times of GBA-GCR pastes and compressive strengths of GBA-GCR mortars were investigated. The results showed that at the same dosage, PC superplasticizer could decrease more effectively the water demand at normal consistency than MS superplasticizer. The setting times of GBA-GCR pastes were between 235 to 390 min. However, the setting time of paste was shorter with the increased of PC superplasticizer dosage between 0.2 to 1.0% by weight of binder. With 0.2% by weight of binder, MS superplasticizer could reduce the setting time of paste but the setting time tended to increase with the increased of MS superplasticizer dosage from 0.5% to 1.0% by weight of binder. The highest compressive strength of GBA-GCR mortar at 90 days was 206 ksc. In addition, the mortar containing PC superplasticizer had higher compressive strength than that of mortar containing MS superplasticizer, especially at a low water to binder ratio (w/b ratio of 0.45) of mortar. As the results, GBA and GCR can be used as a new binder and the workability of the binder could be improved by using superplasticizer. Moreover, use of PC superplasticizer could decrease setting times of paste and gave better compressive strength of mortar than that with MS superplasticizer. Moreover, there was little or no significant difference for the cost of using both superplasticizers when the w/b ratio and flow of both mortars were kept the same.

**Corresponding Author,*

Email address:

³ *chai.jat@kmutt.ac.th*

KEYWORDS: Binder, bottom ash, calcium carbide residue, pozzolan, superplasticizer

1. บทนำ

เป็นที่รู้กันอย่างกว้างขวางว่าในปัจจุบันอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นสาเหตุหลักในการสร้างปัญหาภาวะเรือนกระจกจากรายงานขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) [1] พบว่าทุกการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะปล่อยก๊าซ CO₂ สูงขึ้นบรรยากาศประมาณ 845 กิโลกรัม ในแต่ละปีประเทศไทยบริโภคปูนซีเมนต์เฉลี่ยประมาณ 464 กิโลกรัม/คน หรือประมาณ 30 ล้านตันต่อปี [2] ทำให้มีการปล่อยก๊าซ CO₂ เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยสูงถึง 25 ล้านตันต่อปี ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยจำนวนมากเสนอการลดการใช้ปูนซีเมนต์ไม่ว่าจะเป็นการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในประเทศไทย เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน [3-6] หรือการใช้วัสดุประสานชนิดอื่นทดแทนปูนซีเมนต์ [7-10] สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้วัสดุประสานชนิดใหม่ที่ได้จากเถ้าถ่านเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อเสนอเป็นอีกทางเลือกสำหรับการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

ในปัจจุบันประเทศไทยได้ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย หลังจากการเผาถ่านหินทำให้เกิดผลพลอยได้ เช่น เถ้าถ่านหินและเถ้าถ่านเตา สำหรับเถ้าถ่านหินได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ ในทางกลับกันเถ้าถ่านเตาต้องนำไปทิ้ง ซึ่งในแต่ละปีจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก เฉพาะที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะพบว่ามีเถ้าถ่านเตาประมาณ 1.4 ล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มการทิ้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าถ่านเตาเกิดจากการหลอมรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินและมีถ่านหินที่เผาไหม้ไม่หมดปะปนรวมอยู่ด้วยทำให้มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี แต่เมื่อนำเถ้าถ่านเตามาบดให้ละเอียดพบว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี [11]

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปทิ้งรอบๆบริเวณที่ตั้งโรงงานเนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีสภาวะความเป็นด่างสูงจึงส่งผลต่อมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น มลภาวะทางกลิ่น และพื้นดินบริเวณโดยรอบที่ทิ้งมีความเป็นด่างสูงทำให้ไม่สามารถทำการเกษตรได้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ประกอบไปด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ประมาณร้อยละ 90 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับวัสดุที่มีซิลิกาหรืออลูมินาออกไซด์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีความแข็งแรงเช่นเดียวกับกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [12] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองนำเอา

เถ้าถ่านเตาละเอียดมาใช้ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อเป็นวัสดุประสานชนิดใหม่

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาที่ผ่านมา [10, 13] พบว่าวัสดุประสานที่ทำจากวัสดุปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีกำลังอัดในระยะต้นต่ำจึงเสนอการใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำลง เพื่อให้กำลังอัดสูงขึ้นโดยยังมีความสามารถในการเทเท่าเดิม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการใช้สารลดน้ำพิเศษ 2 ชนิดคือสารลดน้ำพิเศษประเภท melamine sulphonate และประเภท polycarboxylate ต่อสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์ เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้สารลดน้ำพิเศษให้เหมาะสมกับวัสดุประสานที่ใช้เถ้าถ่านเตาร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์

2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าถ่านเตาจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง และกากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีนจากจังหวัดสมุทรสาคร

สำหรับเถ้าถ่านเตานำมาบดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเรียกว่า GBA และกากแคลเซียมคาร์ไบด์นำมาบดจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเรียกว่า GCR ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ ลำปางให้สะอาด ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.54

สารลดน้ำพิเศษที่ใช้มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 494 [14] ประเภท F จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ สารประกอบประเภท melamine sulphonate (MS) และสารประกอบประเภท polycarboxylate (PC) ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารลดน้ำพิเศษ MS และ PC เท่ากับ 8.0 และ 7.0 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.24 และ 1.12 กก/ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้สารลดน้ำพิเศษ MS และ PC ไม่เกินร้อยละ 3.0 และร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

2.2 สมบัติของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมีของ OPC, GBA และ GCR แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า OPC มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 65.4, 20.9, 4.8, และ 3.4 ตามลำดับ โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 2.9 เมื่อพิจารณา GBA พบว่ามีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อยู่ที่ร้อยละ 70.1 (35.6+19.6+14.9) ส่วนปริมาณ SO_3 และ LOI เท่ากับร้อยละ 1.7 และ 3.6 ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกับวัสดุปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [15] นอกจากนี้ ยังพบว่า GBA มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับเถ้าถ่านหิน (fly ash) เนื่องจากการเผาถ่านหินเช่นกัน แต่มีค่า LOI ที่สูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากในเถ้าถ่านหินมีปริมาณเถ้าที่เผาไหม้ไม่หมดหลงเหลืออยู่และอาจมีความชื้นปนเข้ามาในระหว่างการเก็บตัวอย่าง ขณะที่เถ้าถ่านหินมี SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO และ LOI เท่ากับร้อยละ 33.4, 18.7, 15.03, 20.0, และ 0.2 ตามลำดับ [3] ส่วนองค์ประกอบทางเคมีหลักของ GCR คือ CaO ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 59.8 ค่า LOI ของ GCR มีค่าสูงถึงร้อยละ 26.9 อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบ LOI ใช้อุณหภูมิในการทดสอบสูงถึง 750 ± 50 องศาเซลเซียส [16] ซึ่งทำให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) สลายตัวเป็น CaO และ H_2O [8] ทำให้มี LOI สูง

สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า OPC, GBA และ GCR มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15, 2.75, และ 2.66 ตามลำดับ ปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20.00, 3.95, และ 9.85 ตามลำดับ และขนาดของอนุภาคเฉลี่ย (median particle size, d_{50}) ค่าเท่ากับ 14.70, 2.40, และ 2.87 ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะ, ปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของ GBA ในงานวิจัยนี้มีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaturapitakul และ Cheerarot [11] ในขณะที่ GCR มีค่าความถ่วงจำเพาะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rattanashotinunt และคณะ [10] และ Makaratat และคณะ [13]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี	GCR	GBA	OPC	Fly Ash [3]
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	5.2	35.6	20.9	33.4
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	2.5	19.6	4.8	18.7
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.0	14.9	3.4	15.0
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	59.8	18.7	65.4	20.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.0	1.7	2.7	5.2
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.1	2.4	1.3	2.0
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.4	1.2	0.3	1.3
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.3	2.3	0.4	2.9
การสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	26.9	3.6	2.9	0.2

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	ปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 (%)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50} (ไมโครเมตร)
OPC	3.15	20.00	14.70
GBA	2.75	3.95	2.40
GCR	2.66	9.85	2.87

2.3 ส่วนผสมมอร์ตาร์

ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเป็น 1:2.75 โดยน้ำหนัก และควบคุมค่าการไหลแผ่อยู่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ผันแปรส่วนผสมระหว่างเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (GBA:GCR) ใน

อัตราส่วนส่วนร้อยละ 50:50, 60:40, 70:30, และ 80:20 โดยน้ำหนัก เพื่อหาส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดดังตารางที่ 3

หลังจากได้ส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่าง GBA:GCR แล้วจึงใช้ส่วนผสมดังกล่าวมาศึกษาผลกระทบของสารลดน้ำพิเศษ MS และ PC ตลอดทั้งการทดสอบ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65, 0.55, และ 0.45 สำหรับมอร์ตาร์ควบคุม (CT) ใช้ OPC เป็นวัสดุประสาน มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.65 และไม่มีการใส่สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสม ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 4

สำหรับขั้นตอนการผสมเป็นการประยุกต์ขั้นตอนการผสมที่ระบุไว้โดย ASTM C305 [19] กล่าวโดยย่อคือผสม GBA และ GCR เข้าด้วยกัน เติมน้ำเพียงครึ่งหนึ่งในส่วนผสมแล้วเดินเครื่องผสมเป็นเวลาครึ่งนาทีแล้วจึงใส่ทรายเข้าไปในส่วนผสมเมื่อครบ 2 นาทีนับตั้งแต่เริ่มผสม นำน้ำอีกครึ่งหนึ่งผสมกับสารลดน้ำพิเศษแล้วจึงเติมลงในส่วนผสมเดินเครื่องผสมต่อเนื่องอีก 2 นาที และหยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นเดินเครื่องผสมอีกครั้งเป็นเวลา 1 นาที เมื่อเสร็จสิ้นการผสมจึงทดสอบค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 105-115 จากนั้นจึงเทมอร์ตาร์เข้าแบบหล่อขนาด 50 x 50 x 50 ซม. ทำการถอดแบบภายหลังจากหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมอร์ตาร์ทั้งหมดไปป้อนในน้ำปูนขาวอิ่มตัวจนกระทั่งถึงวันทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, และ 90 วัน โดยกำลังอัดที่ได้ในแต่ละอายุการทดสอบมาจากการเฉลี่ยของมอร์ตาร์จำนวน 5 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

มอร์ตาร์	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					ค่าการไหลของมอร์ตาร์ (%)
	GBA	GCR	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ (PC)	
50B50C	50	50	275	65	0.73	106
60B40C	60	40	275	65	0.62	108
70B30C	70	30	275	65	0.52	107
80B20C	80	20	275	65	0.36	111

หมายเหตุ: B หมายถึง เถ้าก้นเตาที่บดละเอียด, C หมายถึง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่บดละเอียด, ตัวเลขข้างหน้าตัวอักษร B หรือ C หมายถึง ปริมาณร้อยละวัสดุโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตัวอย่างเช่น 60B40C หมายถึง ส่วนผสมมีเถ้าก้นเตาร้อยละ 60 และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของชนิดของสารลดน้ำพิเศษ PC และ MS

มอร์ตาร์	ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							ค่าการไหลของมอร์ตาร์ (%)
	OPC	GBA	GCR	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำพิเศษ		
						PC.	MS.	
CT	100	-	-	275	65	-	-	114
65BC-PC	-	70	30	275	65	0.5	-	108
65BC-MS	-	70	30	275	65	-	1.4	111
55BC-PC	-	70	30	275	55	1.2	-	107
55BC-MS	-	70	30	275	55	-	2.7	109
45BC-PC	-	70	30	275	45	1.9	-	106
45BC-MS	-	70	30	275	45	-	3.9	106

หมายเหตุ : BC หมายถึงมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน; MS และ PC หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้สารลดน้ำพิเศษน้ำ polycarboxylate และ melamine sulphonate ตามลำดับ, ตัวเลขด้านหน้าตัวอักษร BC หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ตัวอย่างเช่น 65BC-PC หมายถึง มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานและใช้สารลดน้ำพิเศษ polycarboxylate โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 เป็นต้น

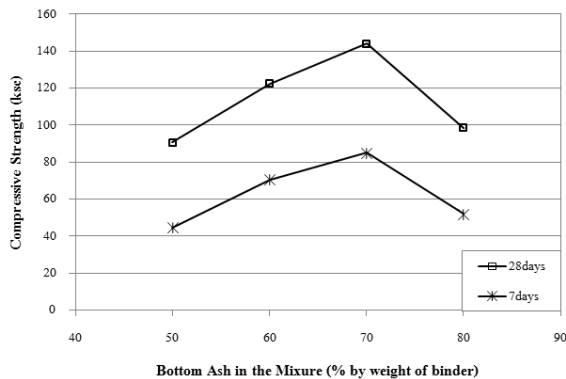
2.3 สมบัติของเพสต์

สำหรับการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวของเพสต์ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C187 [17] และ ASTM C 191 [18] ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณอัตราส่วนระหว่าง GBA ต่อ GCR ที่ได้จากส่วนผสมที่ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงที่สุด (จากส่วนผสมในหัวข้อ 2.3) คือ GBA ร้อยละ 70 และ GCR ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ศึกษาผลกระทบของสารลดน้ำพิเศษ PC และ MS ที่มีต่อเพสต์โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ PC และ MS ในปริมาณร้อยละ 0.2, 0.5, และ 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดระหว่างเถ้าก้นเตาและกากเคลือบผิวคาร์ไบด์ในช่วงการศึกษานี้

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์และปริมาณร้อยละ GBA ในส่วนผสม ซึ่งแสดงว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มี GBA และ GCR เป็นวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 45 ถึง 85 กก/ชม² ที่อายุ 7 วันและมีค่าเพิ่มเป็น 91 ถึง 144 กก/ชม² ที่อายุ 28 วันโดยมอร์ตาร์ 70B30C มีกำลังอัดเท่ากับ 85 และ 144 กก/ชม² ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด คือมีปริมาณ GBA ร้อยละ 70 และ GCR ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งอัตราส่วนผสมนี้มีค่าเหมือนกับอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าถ่านหินกับ GCR เป็นวัสดุประสาน [7, 12, 13] ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ GBA มีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกับเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้ พบว่าปริมาณ CaO ที่สูง (CaO เท่ากับร้อยละ 18.7) ใน GBA ทำให้ใช้ปริมาณของ GCR น้อยลง เมื่อเทียบกับการใช้เถ้ากลบ, เถ้าขานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน ร่วมกับ GCR เป็นวัสดุประสานที่ใช้ปริมาณ GCR เท่ากับร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก [8-10]



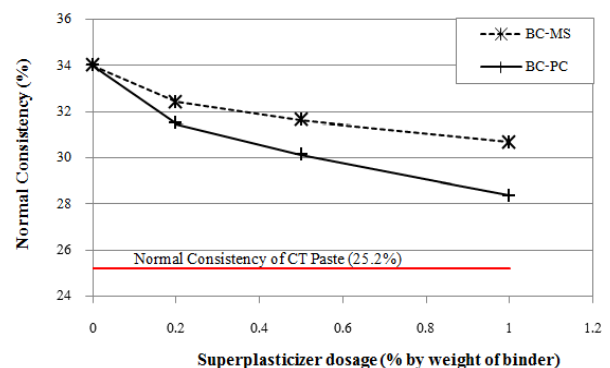
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์กับปริมาณร้อยละของเถ้าก้นเตาในส่วนผสมโดยน้ำหนัก

3.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ที่ทำให้ความชื้นเหลวปกติ

ผลการทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่า เพสต์ที่ใช้ OPC เป็นวัสดุประสาน (เพสต์ CT) มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 25.2 ขณะที่เพสต์ BC (ใช้ GBA ร้อยละ 70 ร่วมกับ GCR ร้อยละ 30 เป็นวัสดุประสาน) มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 34.0 เนื่องจากวัสดุทั้งสองคือ GBA และ

GCR มีความต้องการน้ำสูงซึ่งเกิดจากลักษณะของอนุภาคของวัสดุทั้งสองที่มีผิวขรุขระเป็นเหลี่ยมมุม และมีความพรุน [8, 11] นอกจากนี้ ขนาดของวัสดุประสานที่ละเอียดทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่งผลถึงความต้องการน้ำในการเคลือบพื้นผิวมากขึ้น และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคบริเวณผิวของวัสดุประสานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษเข้าไปในส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าสามารถลดปริมาณน้ำที่เหมาะสมลงมาเหลือร้อยละ 28.35 สำหรับสารลดน้ำพิเศษ PC และลดลงเหลือร้อยละ 30.7 สำหรับสารลดน้ำพิเศษ MS

รูปที่ 2 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ BC มีค่าลดลงเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษเข้าไปในส่วนผสม เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของสารลดน้ำพิเศษ PC ที่ลดแรงตึงผิวของน้ำในส่วนผสม ทำให้น้ำไหลตัวได้ดีขึ้น ลดปัญหาการเกาะตัวเกาะกะ (steric hindrance) ที่ผิวให้น้อยลง ส่งผลให้ใช้น้ำในส่วนผสมลดลง ขณะที่สารลดน้ำพิเศษ MS ทำให้เกิดการผลักกันของโมเลกุลน้ำเนื่องจากประจุไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ทำให้น้ำในส่วนผสมกระจายตัวได้ดีขึ้น และส่งผลให้ใช้น้ำในส่วนผสมลดลงเช่นกัน [20-22] โดยพบว่าสารลดน้ำพิเศษ PC มีประสิทธิภาพในการลดน้ำได้มากกว่าสารลดน้ำพิเศษ MS ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการไหล (flow ability) สอดคล้องกับผลการศึกษาของณัฐฉัตรและบุรณัต [23] ซึ่งพบว่าสารลดน้ำพิเศษประเภท polycarboxylate มีค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่ดีกว่าสารลดน้ำพิเศษที่มีสารประกอบหลักเป็น melamine sulphonate ในปริมาณการใช้ที่เท่ากัน นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าการไหลของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากขึ้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์กับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

3.3 ระยะเวลาการก่อตัว

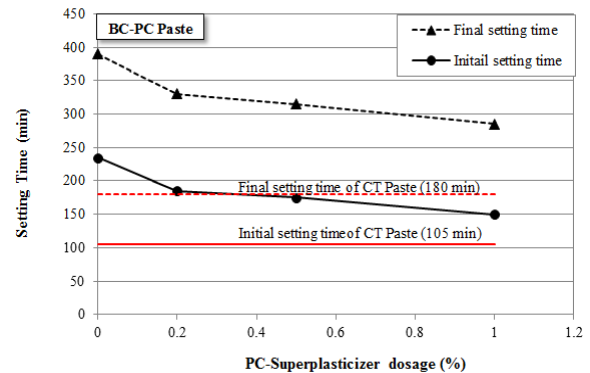
ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ BC-PC แสดงในรูปที่ 3 พบว่าเพสต์ CT มีเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 105 นาทีและการก่อตัวระยะปลายเท่ากับ 180 นาที ขณะที่เพสต์ BC มีเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเท่ากับ 235 และ 390 นาที ตามลำดับ ซึ่งเวลาการก่อตัวของเพสต์ CT เร็วกว่าเพสต์ BC ประมาณ 2.2 เท่า ทั้งเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของเพสต์ BC เป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเกิดจาก $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 หรือ Al_2O_3 และน้ำ แล้วจึงก่อตัวและแข็งตัว ขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดจากปูนซีเมนต์ ผสมกับน้ำแล้วซีเมนต์เพสต์สามารถก่อตัวได้โดยตรง [8] นอกจากนี้เป็นที่ทราบดีว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [24] จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ CT เร็วกว่าของเพสต์ BC

การเติมสารลดน้ำพิเศษ PC ในปริมาณร้อยละ 0.2, 0.5, และ 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้เวลาการก่อตัวระยะต้นของเพสต์ BC-PC ลดลง คือเท่ากับ 185, 175, และ 150 นาที และลดลงเหลือ 330, 315, และ 285 นาที สำหรับการก่อตัวระยะปลาย ตามลำดับ โดยแนวโน้มการลดลงสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 3 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการลดลงของปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวทำให้เวลาในการก่อตัวเร็วขึ้น [25, 26]

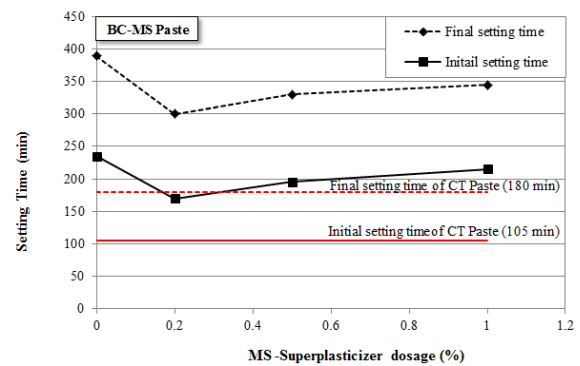
สำหรับระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ BC-MS แสดงในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ MS ปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 170 นาที ขณะที่เวลาการก่อตัวระยะปลายเท่ากับ 300 นาที แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษ MS เป็นร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายมีแนวโน้มมากขึ้น แสดงว่าสารลดน้ำพิเศษ MS หน่วงการก่อตัวของเพสต์ อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวยังคงน้อยกว่าเพสต์ BC ที่ไม่ได้เติมสารลดน้ำพิเศษ

สารลดน้ำพิเศษทั้งสองประเภททำให้ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง แต่ยังคงนานกว่าระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ CT ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน โดยระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ BC ที่มีสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมทั้งระยะต้นและระยะปลายอยู่ในช่วงที่ ASTM C150 [27] กำหนดไว้คือ เวลาการก่อตัวระยะต้นต้องไม่น้อยกว่า 45 นาที และเวลาการก่อตัวระยะปลายไม่เกิน 375 นาที นอกจากนี้ระยะเวลาการก่อตัวจะ

เร็วขึ้นหรือช้าลงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในส่วนผสม อย่างไรก็ตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้อยู่ในช่วงร้อยละ 0.2 ถึง 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หากใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่มากกว่านี้อาจส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผลในการศึกษาครั้งนี้เกิดจากส่วนผสมระหว่าง GBA ต่อ GCR เท่ากับ 70:30 เท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดอาจส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์มีการเปลี่ยนแปลงต่างออกไป



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ PC



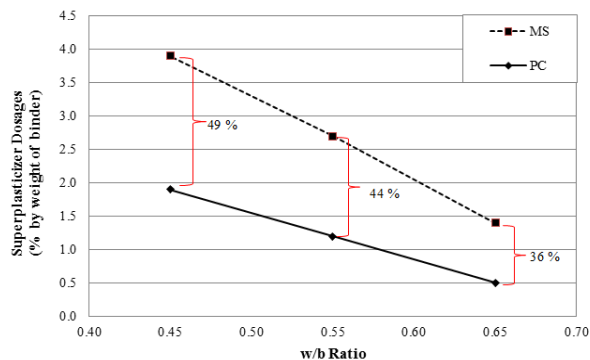
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ MS

3.4 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมมอร์ตาร์

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมเพื่อคงค่าการไหลของมอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105 ถึง 115 โดยมอร์ตาร์ CT ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มีค่าการไหลเท่ากับ 114 โดยไม่ต้องเติมสารลดน้ำพิเศษ ขณะที่มอร์ตาร์ BC ทุกส่วนผสมต้องเติมสารลดน้ำพิเศษเพื่อคงค่าการไหลให้อยู่ในช่วงที่กำหนดเนื่องจากวัสดุทั้งสองคือ GBA และ

GCR มีผิวขรุขระเป็นเหลี่ยมมุมทำให้เพิ่มแรงเสียดทานระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวมละเอียด นอกจากนี้ความพรุนของวัสดุประสานยังทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำสูงขึ้น [8, 11] ปริมาณสารลดน้ำพิเศษทั้งสองชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่ามีการใช้เกินปริมาณแนะนำจากผู้ผลิต (ไม่เกินร้อยละ 0.8 สำหรับสารลดน้ำพิเศษ PC และไม่เกินร้อยละ 3.0 สำหรับสารลดน้ำพิเศษ MS) อย่างไรก็ตามสำหรับมอร์ตาร์ 45BC ที่ใส่สารลดน้ำพิเศษประเภท PC และ MS ร้อยละ 1.9 และ 3.9 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ พบว่ายังไม่ส่งผลต่อการแข็งตัวของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBA ร่วมกับ GCR เป็นวัสดุประสาน ซึ่งสังเกตจากการถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 24 ชั่วโมง และสามารถนำไปม้วนในน้ำปูนขาวอิมมิดิเอตได้โดยที่มอร์ตาร์ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในตารางที่ 3 พบว่าความต้องการสารลดน้ำพิเศษขึ้นอยู่กับ GCR มากกว่า GBA กล่าวคือ เมื่อปริมาณ GCR มากขึ้นทำให้ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมเพิ่มขึ้น

รูปที่ 5 พบว่าเมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมยิ่งน้อยยิ่งทำให้ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษระหว่าง PC และ MS พบว่าสารลดน้ำพิเศษ PC ใช้ปริมาณที่น้อยกว่าสารลดน้ำพิเศษ MS เพื่อให้ได้ค่าการไหลอยู่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ในส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐภูมิและบุรณัตร์ [23] นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณร้อยละความแตกต่างของการใช้ของสารลดน้ำพิเศษ PC มีค่าน้อยกว่าปริมาณการใช้ของสารลดน้ำพิเศษ MS อยู่ประมาณร้อยละ 36 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และมีค่าเพิ่มเป็นร้อยละ 44 และ 49 เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงเป็น 0.55 และ 0.45 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

3.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 5 โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (มอร์ตาร์ CT) เท่ากับ 228 และ 307 กก/ซม² ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 315 และ 322 กก/ซม² ที่อายุ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ขณะที่มอร์ตาร์ BC มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 139 ถึง 189 กก/ซม² ที่อายุ 28 วันหรือประมาณร้อยละ 45 ถึง 61 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ CT เมื่ออายุเพิ่มเป็น 60 และ 90 วัน พบว่ามอร์ตาร์ BC มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 153 ถึง 196 กก/ซม² หรือประมาณร้อยละ 49 ถึง 62 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ CT และ 156 ถึง 206 กก/ซม² หรือประมาณร้อยละ 48 ถึง 64 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ

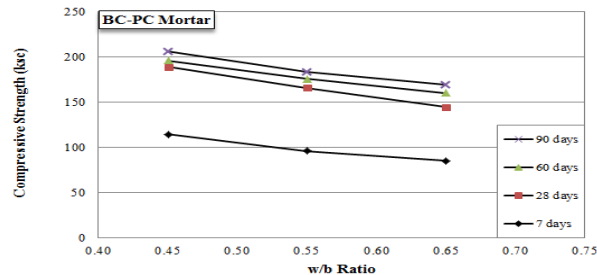
ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ GBA ร่วมกับ GCR เป็นวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดแก่มอร์ตาร์ได้โดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์ แม้ว่าจะมีกำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เนื่องจากกำลังอัดที่เกิดขึ้นในมอร์ตาร์ CT มาจากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรเอต (CSH) เป็นหลัก โดย CSH ที่เกิดขึ้นในมอร์ตาร์ CT เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดขึ้นได้เร็วกว่า CSH ที่เกิดขึ้นในมอร์ตาร์ BC ที่อาศัยปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเกิดขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยสามารถสังเกตได้จากการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์

รูปที่ 6a และ รูปที่ 6b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของ BC-PC และ BC-MS มอร์ตาร์ตามลำดับกำลังอัดของ BC มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังอัดของวัสดุประสานชนิดนี้ การเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมทำให้มีปริมาณน้ำอิสระในเฟสเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดโพรงมากขึ้น ทำให้กำลังอัดลดลงเช่นเดียวกับวัสดุประสานที่เป็นปูนซีเมนต์ [13, 28]

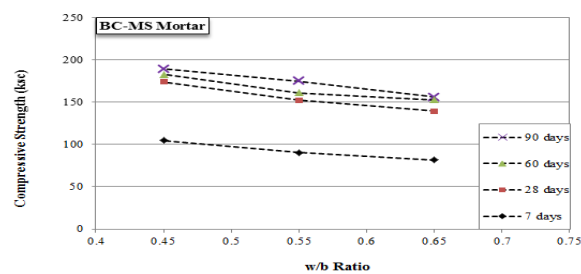
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์	กำลังอัด (กก/ซม ²)-ร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (%)			
	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CT	228-100	307-100	315-100	322-100
65BC-PC	85-37	145-47	160-51	169-53
65BC-MS	82-36	139-45	153-49	156-48
55BC-PC	96-42	166-54	176-56	184-57

55BC-MS	88-40	152-50	161-51	175-54
45BC-PC	114-50	189-61	196-62	206-64
45BC-MS	105-46	174-57	183-58	189-59



รูปที่ 6a มอร์ตาร์ BC-PC



รูปที่ 6b มอร์ตาร์ BC-MS

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานของ BC-PC และ BC-MS มอร์ตาร์

การพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBA และ GCR เป็นวัสดุประสานพบว่า ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในช่วง 7 ถึง 28 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลง จนเกือบคงที่ไปจนถึงอายุ 90 วัน ซึ่งการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55, และ 0.65 มีลักษณะการเพิ่มคล้ายๆ กันคือ เพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วในช่วง 28 วัน แรก หลังจากนั้นกำลังอัดจึงเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงซึ่งแตกต่างจาก ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่ใช้ GBA แทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งเห็นชัดเจน มากขึ้นในอายุปลายของมอร์ตาร์ [11] เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่เกิดขึ้นต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อน แล้วจึงทำปฏิกิริยา SiO_2 และ Al_2O_3 จาก GBA ขณะที่กำลังอัดที่เกิด จากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง GBA กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใน GCR เกิดขึ้นหลังจากที่น้ำเข้าไปทำปฏิกิริยา ทำให้มีการพัฒนา กำลังอัดมากขึ้นในช่วงอายุต้นและค่อยๆ ช้าลงตามปริมาณการลดลง ของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาในช่วงอายุปลาย

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของสารลดน้ำพิเศษทั้งสองชนิดต่อ กำลังอัดของมอร์ตาร์พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 มอร์ตาร์ที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ PC มีกำลังอัดช่วงอายุต้นสูง กว่ามอร์ตาร์ที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ MS เพียงเล็กน้อย เมื่อลด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงเหลือ 0.55 และ 0.45 พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ PC ยังมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ สารลดน้ำพิเศษ MS โดยความแตกต่างของกำลังอัดของมอร์ตาร์ ในช่วงอายุต้นเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารลดน้ำ พิเศษ PC ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง GBA และ GCR ที่สมบูรณ์กว่าเมื่อเทียบกับสารลดน้ำพิเศษ MS ซึ่งผลดังกล่าว เกิดขึ้นเช่นเดียวกันในกรณีปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [23, 29] ผลการทดสอบนี้ระบุได้ว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ GBA ผสมร่วมกับ GCR เป็นวัสดุประสาน ควรใช้สารลดน้ำพิเศษ PC เพราะทำให้ กำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้งอายุต้นและอายุปลายดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ สารลดน้ำพิเศษ MS เมื่อควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและ ค่าการยุบตัวที่เท่ากัน

3.6 ความคุ้มค่าต่อการใช้งาน

เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในการใช้สารลดน้ำพิเศษทั้งสอง ชนิดต่อ 1 กิโลกรัมของวัสดุประสานตามตารางที่ 6 พบว่าราคาไม่ แตกต่างกันมากนักแม้ว่าจะใช้ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษที่ แตกต่างกันกล่าวคือมอร์ตาร์ BC ใช้สารลดน้ำพิเศษ PC ใน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และ 0.55 มีราคาต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ MS ประมาณ 0.13 และ 0.07 บาท/กก. ของวัสดุประสานตามลำดับ ขณะที่มอร์ตาร์ BC ที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 พบว่าเมื่อใช้สารลดน้ำ พิเศษ PC และ MS มีราคาเท่ากับ 1.52 และ 1.48 บาท/กก. ของ วัสดุประสาน ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการใช้ สารลดน้ำพิเศษทั้งสองชนิดมีค่าใช้จ่ายไม่แตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญ โดยส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (w/b เท่ากับ 0.45) การใช้สารลดน้ำพิเศษ MS มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าเมื่อ เทียบกับการใช้สารลดน้ำพิเศษ PC อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้ งานควรพิจารณาถึงผลกระทบต่อสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีต หรือมอร์ตาร์ประกอบด้วยเช่น กำลังอัด, ความร้อนจากปฏิกิริยา, ปริมาณฟองอากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 6 ราคาต้นทุนในการใช้สารลดน้ำพิเศษทั้งสองชนิด

	ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ	ราคา
--	---------------------	------

มอร์ตาร์	(โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)		(บาท/กก. ของวัสดุประสาน)	
	PC	MS	PC	MS
65BC	0.5	1.4	0.40	0.53
55BC	1.2	2.7	0.96	1.03
45BC	1.9	3.9	1.52	1.48

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) GBA ที่บดละเอียดมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ GCR ที่บดละเอียดซึ่งอยู่ในรูปของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้ โดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ GBA ต่อ GCR เท่ากับร้อยละ 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงที่สุด

2) เพสต์ BC มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ความชื้นเหลวปกติเท่ากับร้อยละ 34 ซึ่งมากกว่าเพสต์ CT ที่เท่ากับร้อยละ 25.2 การใช้สารลดน้ำพิเศษสามารถลดปริมาณน้ำที่เหมาะสมลงได้ตามปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าสารลดน้ำพิเศษ PC สามารถลดปริมาณน้ำที่เหมาะสมในเพสต์ BC ได้มากกว่าสารลดน้ำพิเศษประเภท MS เมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน

3) เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ BC นานกว่าเพสต์ CT อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ BC ที่มีสารลดน้ำในส่วนผสมยังคงอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM C150 [27]

4) การใช้สารลดน้ำพิเศษ PC สามารถลดระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ BC ได้ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารลดน้ำพิเศษระหว่างร้อยละ 0.2 ถึง 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับสารลดน้ำพิเศษ MS สามารถลดระยะเวลาการก่อตัวลงเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แต่ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารลดน้ำพิเศษ MS ร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

5) การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในส่วนผสมของมอร์ตาร์ BC ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน

6) กำลังอัดของมอร์ตาร์ BC-PC มีค่าสูงกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ BC-MS เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน โดยความแตกต่างของกำลังอัดเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อ

กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและค่าการไหลของมอร์ตาร์ที่เท่ากัน ต้นทุนในการใช้สารลดน้ำพิเศษทั้งสองชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้โครงการทุนพัฒนาอาจารย์และบุคลากรสำหรับสถาบันอุดมศึกษาในเขตพัฒนาเฉพาะกิจจังหวัดชายแดนภาคใต้ประจำปีการศึกษา 2557 และจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2553, The Study Carbon Intensity Value of Cement Industry, Steel Industry, and Power Industry, [online], Available: http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/seminar/presentation/2010/221110SummaryJGSEE.pdf [Accessed on 2015, December1].
- [2] สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย, 2015, Thailand Cement Manufacturing Association, [online], Available: <http://www.thaicma.or.th/cms/> [Accessed on 2015, December1].
- [3] ปานเทพ จุลนิพิฐวงศ์ และ สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, 2014, "A Study on Effect of Strength Acceleration Compound on Properties of Concrete and Mortar", วารสารสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, Vol. 2, No. 1, pp. 17-29.
- [4] ประจักษ์ ทุลกสิกร, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2014, "Strength and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Rice Husk Ash", วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, Vol. 2, No. 1, pp. 8-16.
- [5] รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2554, "การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุง กำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่34, ฉบับที่4, หน้า 369-381.

[6] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546, "วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่26, ฉบับที่ 4 หน้า 459-473.

[7] ปิตินันต์ กร้ามาตร, สุริยาติ มาตัญญู, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เภฬิศดาร, 2539, "การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหิน", วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่7, ฉบับที่2, หน้า 65-75.

[8] Jaturapitakkul, C. and Roongreung, B., 2003, "Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 470-475.

[9] สุทธินันท์ แอเดียว, ณัฐพงศ์ มกระธัช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2553, "การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินและผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสาน". การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, หน้า 186.

[10] Rattanashotinunt, C., Thairit, P., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul, C., 2013, "Use of Calcium Carbide Residue and Bagasse Ash Mixtures as a New Cementitious Material in Concrete", Materials & Design, Vol. 46, pp. 106-111.

[11] Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 48-53.

[12] Somna, K., Jaturapitakkul, C., and Kajitvichyanukul, P., 2010, "Microstructure of Calcium Carbide Residue-Ground Fly Ash Paste", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 298-304.

[13] Makaratat, N., Jaturapitakkul, C., and Laosamathikul, T., 2010, "Effects of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Binder on Mechanical Properties of Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, No. 11, pp. 1164-1170.

[14] American Society for Testing and Materials, 2015, ASTM C494: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02.

[15] American Society for Testing and Materials, 2015, ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02.

[15] American Society for Testing and Materials, 2013, ASTM C311: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02.

[16] American Society for Testing and Materials, 2013, ASTM C311: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02.

[17] American Society for Testing and Materials, 2011, ASTM C187: Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.01.

[18] American Society for Testing and Materials, 2013, ASTM C191 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.01.

[19] American Society for Testing and Materials, 2013, ASTM C305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.01.

[20] Winnefeld, F., Becker, S., Pakusch, J., and Götz, T., 2007, "Effects of the Molecular Architecture of Comb-Shaped Superplasticizers on Their Performance in Cementitious Systems", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 29, No. 4, pp. 251-262.

[21] Li, Y., Yang, C., Zhang, Y., Zheng, J., Guo, H., and Lu, M., 2014, "Study on Dispersion, Adsorption and Flow Retaining Behaviors of Cement Mortars with Tpeg-

Type Polyether Kind Polycarboxylate Superplasticizers", Construction and Building Materials, Vol. 64, pp. 324-332.

[22] Palacios, M., Houst, Y.F., Bowen, P., and Puertas, F., 2009, "Adsorption of Superplasticizer Admixtures on Alkali-Activated Slag Pastes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 39, No. 8, pp. 670-677.

[23] ณัฐวุฒิ กองม่วง และบุรฉัตรฉัตรวีระ, 2554, "ผลของน้ำยาผสมคอนกรีตประเภทเอฟ ชนิดลดน้ำอย่างมากต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่34, ฉบับที่3, หน้า 257-278.

[24] Khedr, S.A. and Abou-Zeid, M.N., 1994, "Characteristics of Silica-Fume Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 357-375.

[25] Toledano-Prados, M., Lorenzo-Pesqueira, M., González-Fontebo, B., and Seara-Paz, S., 2013, "Effect of Polycarboxylate Superplasticizers on Large Amounts of Fly Ash Cements", Construction and Building Materials, Vol. 48, pp. 628-635.

[26] Andrade, L., Rocha, J., and Cheriaf, M., 2009, "Influence of Coal Bottom Ash as Fine Aggregate on Fresh Properties of Concrete", Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 2, pp. 609-614.

[27] American Society for Testing and Materials, 2015, ASTM C150: Standard Specification for Portland Cement, In Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.01.

[28] Behnood, A. and Ziari, H., 2008, "Effects of Silica Fume Addition and Water to Cement Ratio on the Properties of High-Strength Concrete after Exposure to High Temperatures", Cement and Concrete Composites, Vol. 30, No. 2, pp. 106-112.

[29] Jolicoeur, C. and Simard, M.-A., 1998, "Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-Chemical Concepts", Cement and Concrete Composites, Vol. 20, No. 2, pp. 87-101.