http://journal.rmutp.ac.th/

การตรวจสอบความเป็นสารปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยโดยวิธีการบ่มเร่งกำลัง

สาโรจน์ ดำรงศีล*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

รับบทความ 13 กันยายน 2560; ตอบรับบทความ 21 พฤศจิกายน 2560

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจสอบความเป็นสารปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยโดยวิธีการบ่มเร่งกำลัง ศึกษากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (PBA-30) โดยมีอุณหภูมิบ่มเท่ากับ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นตัวแปรในการศึกษา เพื่อหาอุณหภูมิกับช่วงระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสต์ เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยด้วยวิธีบดร่วมในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.38 ผลการทดสอบพบว่าการบ่มเร่งกำลังซีเมนต์เพสต์ PBA-30 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ช่วงระยะเวลาบ่มเท่ากับ 5, 10 และ 45 ชั่วโมง มีกำลังอัดเทียบเท่ากับบ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ เนื่องจากการบ่มเร่งกำลังส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกรต (CS) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) พบว่าซีเมนต์เพสต์มีปริมาณ CS ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการบ่มเร่งกำลังเป็นแนวทางในการตรวจสอบความเป็นสารปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยภายในเวลา 48 ชั่วโมง

คำสำคัญ: ปอซโซลาน; เถ้าแกลบ; เถ้าลอย; กำลังอัด; บ่มเร่งกำลัง

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4020 4472, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: sarote.dum@rmutr.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

The Investigation of Pozzolanic Reaction of Rice Husk Ash Blended with Fly Ash by Accelerated Curing

Sarote Dumrongsil*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin
96 Moo 3, Salaya, Puttamonthon, Nakhon Pathom, 73170

Received 13 September 2017; Accepted 21 November 2017

Abstract

This paper presents the investigation of pozzolanic reaction of rice husk ash blended with fly ash by accelerated curing. The compressive strength of cement paste containing rice husk ash blended with fly ash at 30% by weight of cementitious material (PBA-30) was studied. The temperature curing at 60, 70 and 80 °C were parameter of test in order to determine the suitable temperature and curing period on strength development of cement paste. The ratio of rice husk ash to fly ash was 1:1 by weight and the ratio of water-to-binder (w/b) was 0.38. The test results found that the accelerated curing of PBA-30 at temperature of 60 °C for 5, 10 and 45 hours had comparable compressive strength to PBA-30 with normal curing at the age of 3, 7, and 28 days, respectively. As a result of accelerated curing, the calcium silicate (CS) which effect on strength development of cement paste was increased. According to the X-ray diffraction analysis, the calcium silicate content in cement paste was comparable. Therefore, it can be use accelerated curing to investigate the poozolanic reaction of rice husk ash blended with fly ash within 48 hours.

Keywords: Pozzolan; Rice Husk Ash; Fly Ash; Compressive Strength; Accelerated Curing

** Corresponding Author. Tel.: +668 4020 4472, E-mail Address: sarote.dum@rmutr.ac.th*

1. บทนำ

เถ้าแกลบที่เหลือจากการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่อนำความร้อนมาผลิตไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำมันพืชมีส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพเป็นวัสดุปอซโซลาน [1] เป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต พบว่าเถ้าแกลบจากโรงสีข้าว และเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวล เมื่อผ่านการบดละเอียดแล้วมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตได้ [2], [3] และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเถ้าแกลบให้ดีขึ้นโดยการผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา [4], [5] ศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต พบว่าเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยด้วยวิธีบดร่วมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยที่มอร์ตาร์และคอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์และคอนกรีตควบคุม โดยอ้างว่าเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอย ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) กับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกรตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) อันเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน

การตรวจสอบความเป็นสารปอซโซลานของวัสดุที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตนิยมใช้ค่าดัชนีกำลังเป็นเกณฑ์ซึ่งเป็นข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C 618 [6] ทดสอบในรูปของมอร์ตาร์ผสมปอซโซลานร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่ผสมปอซโซลาน ระยะเวลาในการประเมินความเป็นสารปอซโซลานจึงใช้เวลาไม่น้อยกว่า 28 วัน เนื่องจากมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมปอซโซลานจะพัฒนากำลังช้ากว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตที่ไม่ผสมปอซโซลาน แต่สามารถพัฒนากำลังเร็วขึ้นได้ ด้วยการบ่มเร่งกำลังซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิตเพราะสามารถถอดแบบได้รวดเร็ว โดยการเพิ่มอุณหภูมิบ่มทำให้กำลังของคอนกรีตผสมปอซโซลานในระยะแรกสูงขึ้น เป็นผลจากการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [7]–[9] สอดคล้องกับการศึกษาผลกระทบของการบ่มต่อการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยมีกำลังในระยะแรกสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิบ่มสูงขึ้น [10] และการศึกษาการบ่มเร่งกำลังทั้งมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอย รายงานผลการบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 40 ชั่วโมง สามารถใช้ทำนายกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ได้ [11] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบความเป็นสารปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยโดยวิธีการบ่มเร่งกำลังที่อุณหภูมิบ่มเท่ากับ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นตัวแปรในการศึกษา เพื่อหาอุณหภูมิกับช่วงระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นการยืนยันผลปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอย และเป็นแนวทางในการตรวจสอบความเป็นสารปอซโซลานของวัสดุที่มาจากหลายแหล่งได้เร็วขึ้น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 ปูนซีเมนต์ (PC) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.1.2 เถ้าแกลบ เป็นวัสดุที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำมันพืช จากโรงงานน้ำมันพืชไทย จังหวัดนครปฐม เถ้าแกลบมีลักษณะเป็นผงสีดำและเปียกชื้นก่อนใช้ต้องนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100±10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 600 ไมครอน เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนและเถ้าแกลบขนาดใหญ่

ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ออก แล้วเก็บใส่ถุงพลาสติกกันชื้น

2.1.3 เถ้าลอย เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นผงละเอียดสีเหลืองปนน้ำตาล และมีลักษณะอนุภาครูปทรงกลม

2.1.4 เถ้าแกลบผสมเถ้าลอย (BA) เป็นเถ้าแกลบและเถ้าลอยที่เตรียมไว้ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก แล้วบดร่วมกันด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 120 นาที โดยมีเหล็กเส้นกลมเป็นตัวบด เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบผสมเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	PC	BA
SiO_2	19.3	58.1
Al_2O_3	5.7	15.0
Fe_2O_3	3.1	5.7
CaO	64.9	5.3
SO_3	2.8	1.8
LOI	2.1	8.0
คุณสมบัติทางกายภาพ	**วัสดุ**	
	PC	BA
ความถ่วงจำเพาะ	3.16	2.17
ความละเอียด		
- ค้างตะแกรงเบอร์ 325, ร้อยละ	-	0.8
- พื้นที่ผิวจำเพาะ, ซม.^{2}/ก.	3,485	4,554
- ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50}, ไมครอน	20	17

2.2 ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์ในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้สัญลักษณ์ PPC PBA-30 และ PBA-50 ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.38 คงที่ทุกส่วนผสม

2.3 วิธีการศึกษา

2.3.1 การทดสอบกำลังอัด ใช้ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 25x25x25 มิลลิเมตร หลังจากหล่อตัวอย่างทดสอบแล้วเสร็จเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้ผ้าเปียกชื้นคลุมตัวอย่างทดสอบไว้ เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่ม โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. บ่มน้ำที่อุณหภูมิปกติ (25±2 องศาเซลเซียส) จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบครบกำหนดทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน โดยทดสอบซีเมนต์เพสต์ PPC, PBA-30 และ PBA-50 เพื่อตรวจสอบการพัฒนากำลังอัดเปรียบเทียบกับผลทดสอบของงานวิจัยที่ผ่านมา

2. บ่มเร่งกำลังที่อุณหภูมิน้ำคงที่เท่ากับ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวแปรในการศึกษา จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบครบกำหนดทดสอบกำลังอัดที่เวลา 6 12, 24 และ 45 ชั่วโมง ทั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบจะผ่านการบ่มน้ำที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำไปบ่มเร่งกำลังตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด โดยทดสอบเฉพาะซีเมนต์เพสต์ PBA-30

2.3.2 การวิเคราะห์สารประกอบ ใช้วิธีการวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Diffraction, XRD) เพื่อหาองค์ประกอบของสารในซีเมนต์เพสต์ โดยอัดชิ้นตัวอย่างทดสอบลงใน Sample Holder แล้วนำไปวิเคราะห์ผล ใช้รังสีเอ็กซ์ยิงกระทบกับตัวอย่างทดสอบให้ปริมาณรังสีสะท้อนกลับ ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดจะมีมุมสะท้อนในทิศทางที่ต่างกัน ผลทดสอบที่ได้แสดงในรูปของกราฟที่ระบุความเข้มเชิงปริมาณของสารประกอบต่าง ๆ ในตัวอย่างทดสอบ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่บ่มน้ำอุณหภูมิปกติ

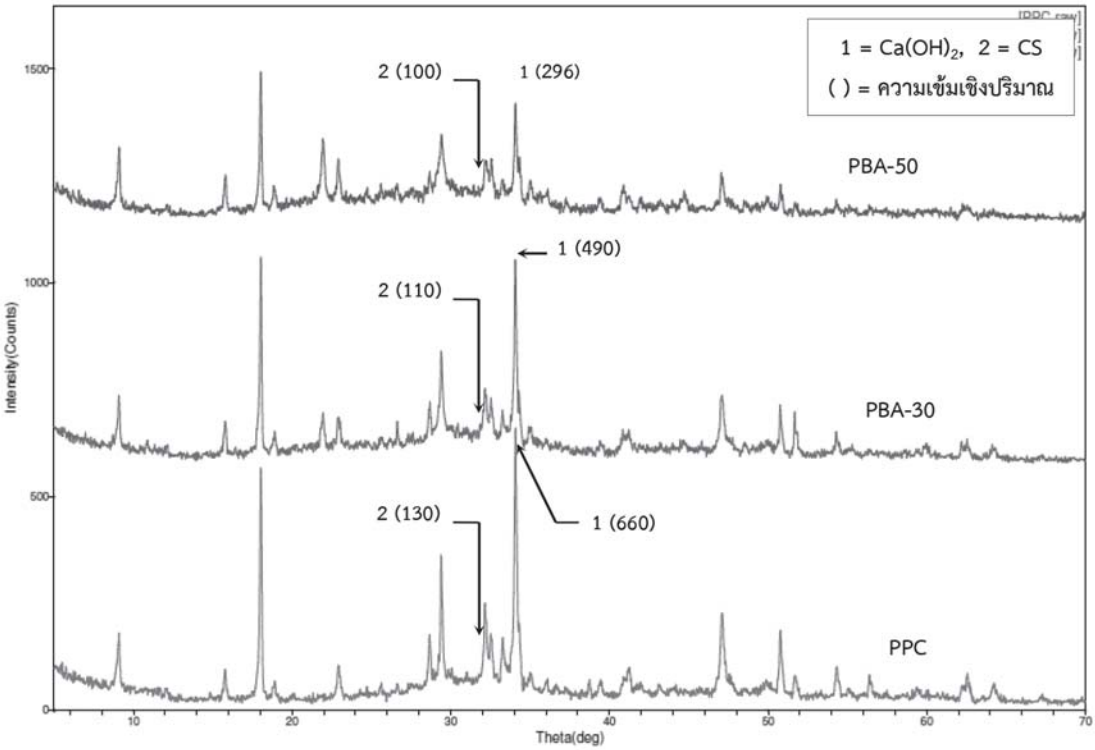
ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอย ทั้ง PBA-30 และ PBA-50

ที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน พบว่ามีกำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC และกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์จะลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ซีเมนต์เพสต์ PBA-30 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [4], [5] รายละเอียดผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2

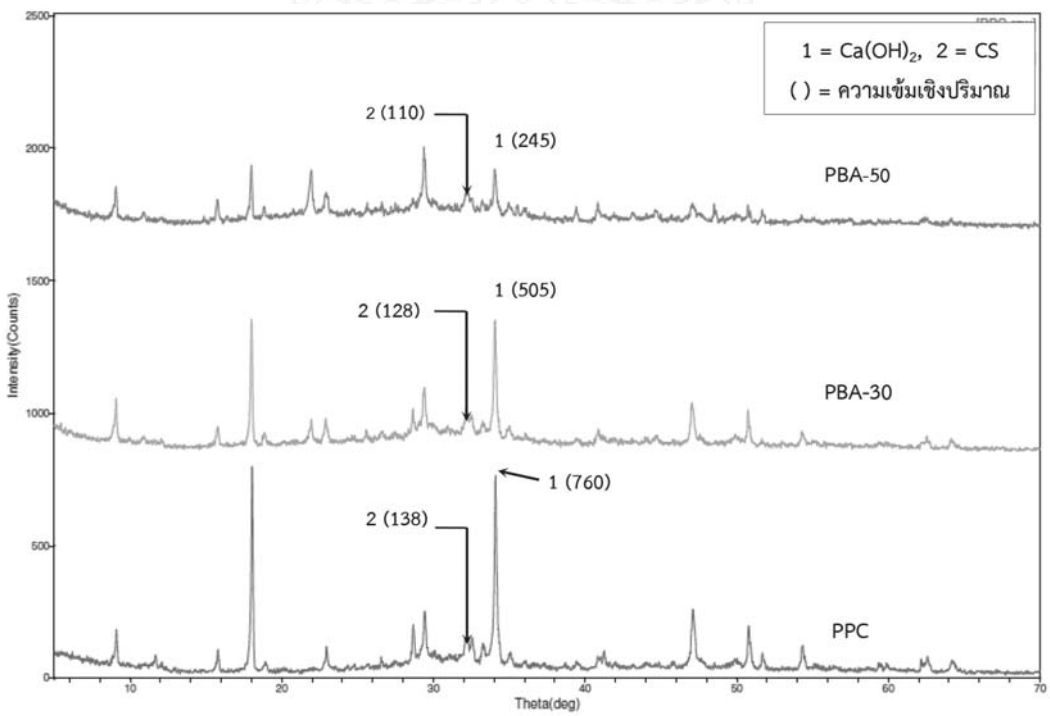
ตารางที่ 2 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์	กำลังอัด กก./ซม.^{2} (ดัชนีกำลัง ร้อยละ) อายุ		
	3 วัน	7 วัน	28 วัน
PPC	428 (100)	529 (100)	645 (100)
PBA-30	340 (79)	447 (84)	640 (99)
PBA-50	247 (57)	319 (60)	453 (70)

เมื่อพิจารณาดัชนีกำลัง พบว่าซีเมนต์เพสต์ PBA-30 และ PBA-50 ในช่วงแรกที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 5 เมื่อเวลาผ่านไปที่อายุ 28 วัน มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 15 ทำให้ซีเมนต์เพสต์ PBA-30 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอย โดยสังเกตได้จากกราฟแสดงผลการวิเคราะห์สารประกอบด้วยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ ความเข้มเชิงปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาบ่ม ขณะที่ซีเมนต์เพสต์ PBA-30 มีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ซีเมนต์เพสต์ PBA-50 มีปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลดลงตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น ส่วนสารประกอบแคลเซียมซิลิเกรต (Calcium Silicate; CS) ของซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC ที่อายุ 7 วัน มีปริมาณสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ PBA-30 และ PBA-50 จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอยมีกำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC แต่ที่อายุ 28 วัน สาร CS ของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 มีปริมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC จึงส่งผลให้กำลังอัดใกล้เคียงกัน ซึ่งงานศึกษาการวัดปริมาณ $Ca(OH)_2$ โดยวิธี XRD ของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว [12] สรุปว่าปริมาณ $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ แต่ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหิน ปริมาณ $Ca(OH)_2$ จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน โดยปริมาณ $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและจะลดลงจากการถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงพร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณ CS ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุบ่ม 28 วัน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีปริมาณใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน ปริมาณของ CS ที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน



รูปที่ 1 สารประกอบของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 2 สารประกอบของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

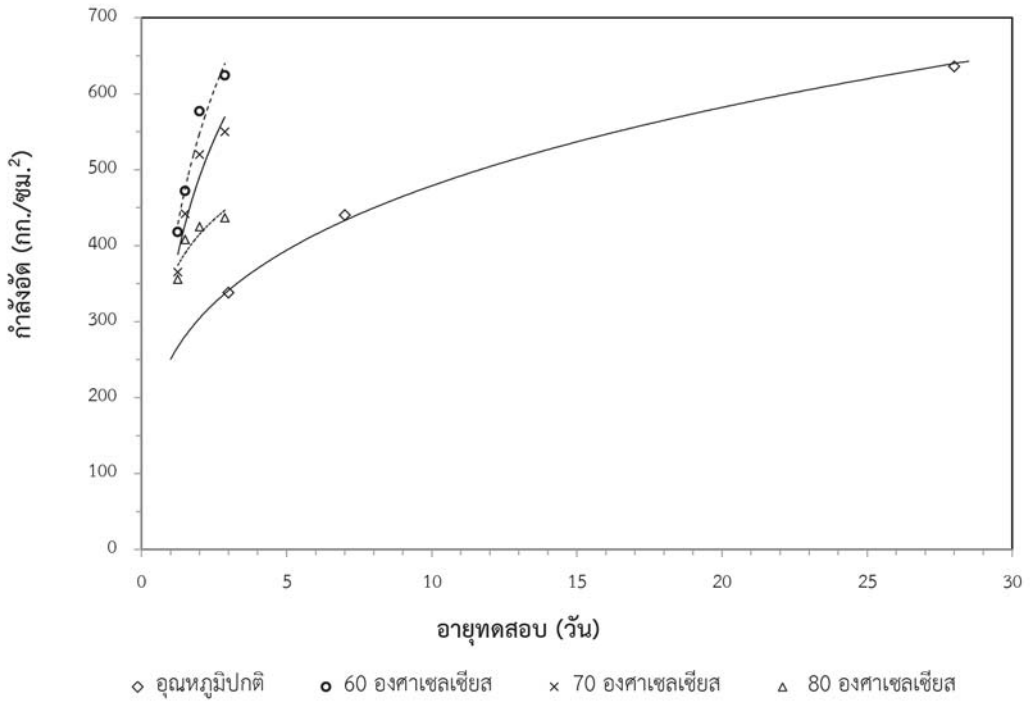
3.2 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่บ่มเร่งกำลัง

ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มเร่งกำลังที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ช่วงระยะเวลาบ่มเท่ากับ 6, 12, 24 และ 45 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ PBA-30

บ่มเร่งกำลัง (อุณหภูมิ)	กำลังอัด กก./ซม.^{2} ระยะเวลา (ชั่วโมง)			
	6	12	24	45
60 °C	418	472	577	628
70 °C	365	442	520	550
80 °C	356	408	425	437

ซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มเร่งกำลังทุกอุณหภูมิบ่มในงานวิจัยนี้มีกำลังสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการบ่มน้ำที่อุณหภูมิปกติ หรือกล่าวได้ว่าการบ่มเร่งกำลังมีผลต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสต์ โดยมีอัตราการพัฒนากำลังสูงขึ้นอย่างมากในช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการบ่ม ต่อจากนั้นอัตราการพัฒนากำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และที่ระยะเวลาบ่มเท่ากัน การพัฒนากำลังมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิบ่มเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ถัดมาคือ 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิบ่มที่ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อแปลงช่วงระยะเวลาบ่มเร่งกำลังจากชั่วโมงเป็นวัน แล้วนำไปเขียนกราฟแสดงการพัฒนากำลังอัดเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มน้ำอุณหภูมิปกติ ในรูปที่ 3 จะเห็นว่าอุณหภูมิบ่มที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีการพัฒนากำลังได้ดีกว่าอุณหภูมิบ่มที่ 80 องศาเซลเซียสอย่างชัดเจน สอดคล้องกับการศึกษาผลกระทบของการบ่มต่อกำลังของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นตัวได้ พบว่าที่อุณหภูมิบ่ม 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลาบ่ม 48 ชั่วโมง คอนกรีตพัฒนากำลังอัดสูงขึ้น เชื่อว่าเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณและอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน [13] และภายใต้ขอบเขตงานวิจัยนี้อุณหภูมิบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 โดยช่วงระยะเวลาบ่มที่ 5, 10 และ 45 ชั่วโมง มีแนวโน้มพัฒนากำลังอัดใกล้เคียงกับบ่มน้ำที่อุณหภูมิปกติที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งจะทำการทดสอบช่วงเวลาดังกล่าวต่อไป

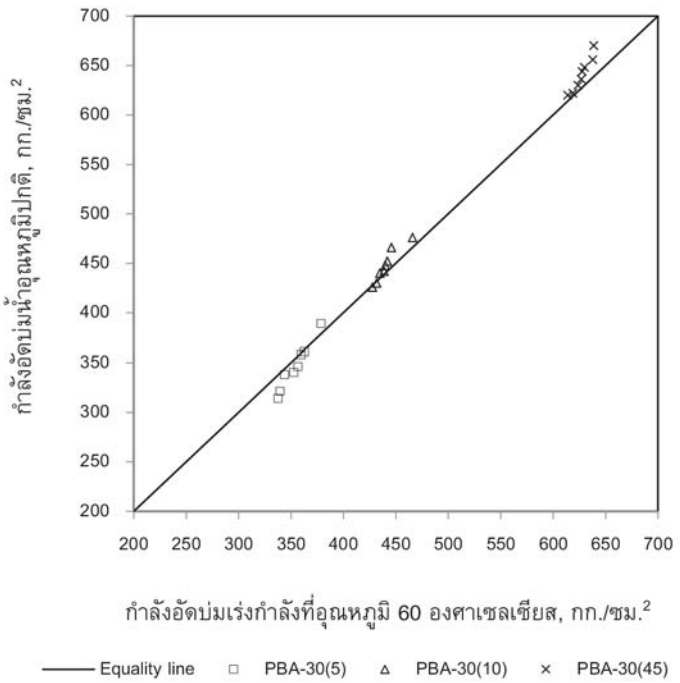


รูปที่ 3 การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ PBA-30

ผลการทดสอบซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มเร่งกำลังที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ช่วงระยะเวลาบ่มเท่ากับ 5 10 และ 45 ชั่วโมง (ใช้สัญลักษณ์ PBA-30(5) PBA-30(10) และ PBA-30(45) ตามลำดับ) พบว่ามีกำลังอัดเทียบเท่ากับซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่อายุ 37 และอายุ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงผลทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 เปรียบเทียบในตารางที่ 4 โดยซีเมนต์เพสต์ PBA-30(5) PBA-30(10) และ PBA-30(45) มีดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 104 98 และร้อยละ 98 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่ช่วงอายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ และกำลังอัดเทียบเท่าของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 แสดงในรูปการกระจายกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์จำนวนกลุ่มละ 8 ตัวอย่างทดสอบบนเส้น Equality line ในรูปที่ 4

ตารางที่ 4 กำลังอัดซีเมนต์เพสต์ PBA-30 เปรียบเทียบ

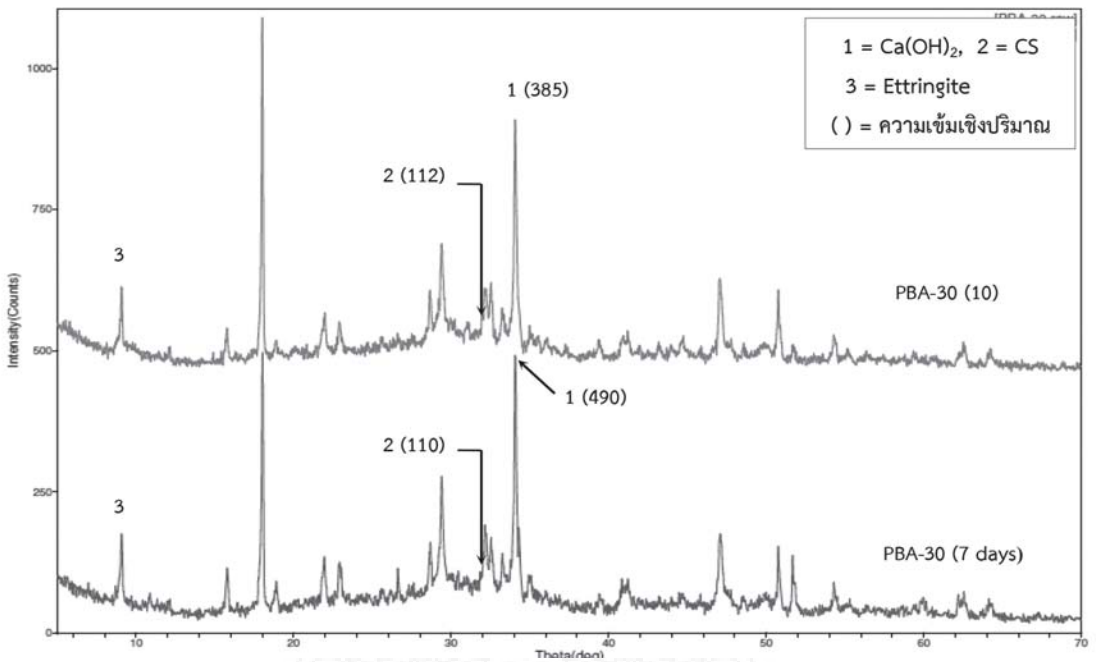
บ่มปกติ	**กำลังอัด กก./ซม.^{2} อายุ**		
	3 วัน	**7 วัน**	**28 วัน**
อุณหภูมิ 25 ℃	340 (100)	447 (100)	640 (100)
บ่มเร่งกำลัง	**กำลังอัด กก./ซม.^{2} อายุ**		
	5 ชั่วโมง	**10 ชั่วโมง**	**45 ชั่วโมง**
อุณหภูมิ 60 ℃	354 (104)	441 (98)	628 (98)



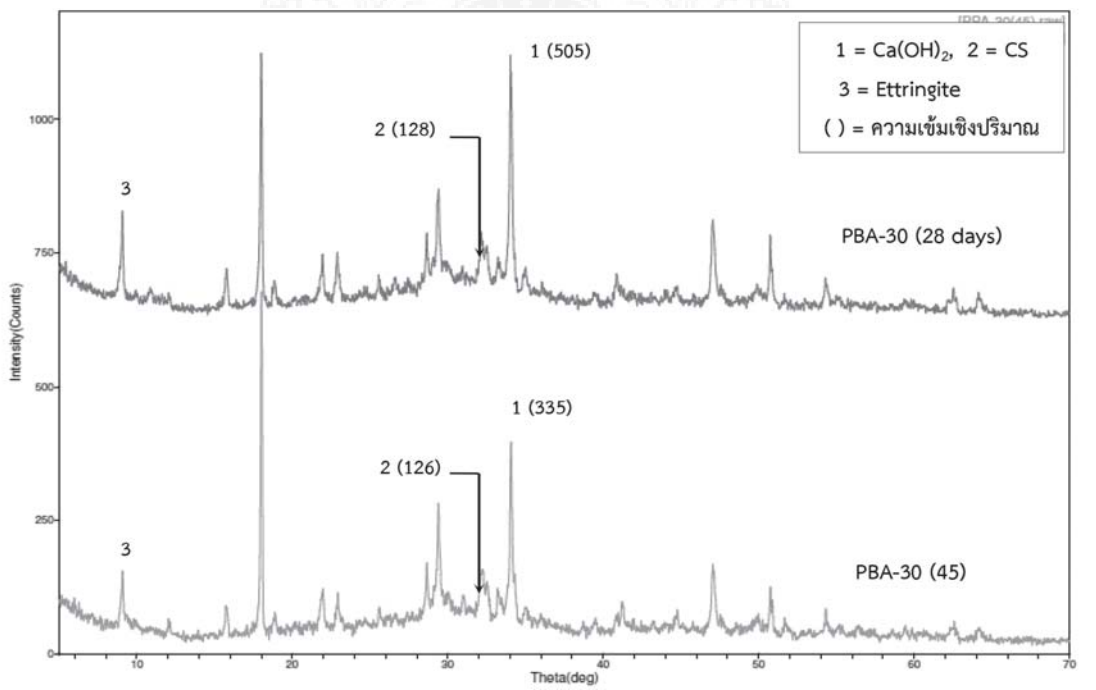
รูปที่ 4 การกระจายของผลทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ PBA-30

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 ที่อายุ 7 วัน เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ PBA-30(10) แสดงในรูปที่ 5 และปริมาณสารประกอบของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ PBA-30(45) แสดงในรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มเร่งกำลังมีปริมาณ $Ca(OH)_2$ ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มน้ำอุณหภูมิปกติ สอดคล้องกับ ผลการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยโดยวิธีการบ่มเร่งกำลัง [11] ซึ่งพบรูปแบบของกราฟจากการวิเคราะห์สารประกอบด้วยวิธี XRD แสดงปริมาณ $Ca(OH)_2$ สูงสุดของซีเมนต์เพสต์ที่บ่มเร่งกำลังด้วยน้ำร้อนต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มน้ำอุณหภูมิปกติเช่นเดียวกัน และสารประกอบ $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสต์ PBA-30(10) มีปริมาณต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ PBA-30(45) หรือกล่าวได้ว่า ปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ลดลงตามระยะเวลาบ่มเร่งกำลังที่เพิ่มขึ้น ตรงข้ามกับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกรต (CS) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มเร่งกำลังที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณสารประกอบ $Ca(OH)_2$ ที่ลดลง และปริมาณ CS ที่เพิ่มขึ้น จากการบ่มเร่งกำลังที่ระยะเวลา 45 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบซีเมนต์เพสต์ PBA-30(10) กับซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่อายุ 7 วัน และซีเมนต์เพสต์ PBA-30(45) กับซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน พบว่ามีปริมาณ CS ใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดเทียบเท่ากัน โดยปริมาณ CS ที่เพิ่มขึ้นจากการบ่มเร่งกำลังในช่วงแรกที่ระยะเวลาบ่ม 5–10 ชั่วโมง คาดว่าเป็นผลจากการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนการบ่มเร่งกำลังในช่วงระยะเวลาบ่ม 45 ชั่วโมง เป็นผลจากการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา กล่าวถึงผลของอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นต่อ

การพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นในระยะแรกของคอนกรีต เนื่องจากการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น [14] และการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย [15]

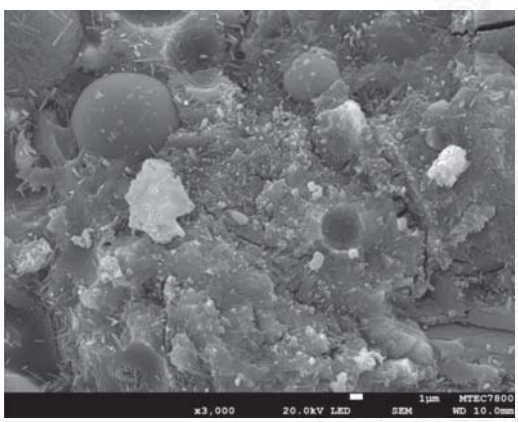


รูปที่ 5 ปริมาณสารประกอบของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 ที่อายุ 7 วัน เปรียบเทียบกับ PBA-30(10)

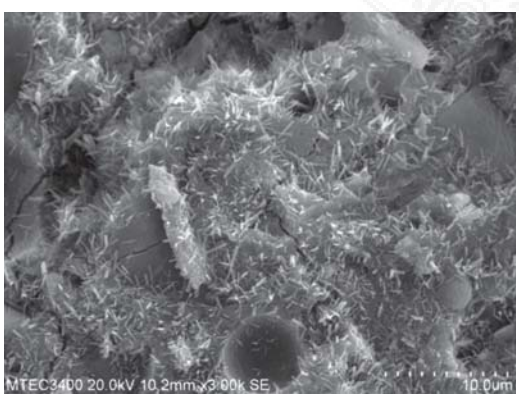


รูปที่ 6 ปริมาณสารประกอบของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับ PBA-30(45)

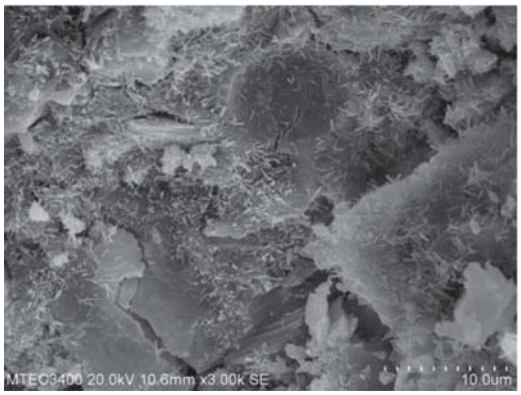
ผลจากการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยวิธี XRD พบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานที่สำคัญ ได้แก่ $Ca(OH)_2$ CS และ Ettringite เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ PBA-30 จากภาพถ่ายขยายขนาด 3,000 เท่า ในรูปที่ 7 ซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน พบอนุภาคของเถ้าลอยฝังในเนื้อซีเมนต์เพสต์ โดยมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นที่ผิวเถ้าลอยและพบผลิตภัณฑ์รูปเข็ม ซึ่งก็คือ Ettringite กระจายอยู่ทั่วไป รูปที่ 8 ซีเมนต์เพสต์ PBA-30(10) และรูปที่ 9 ซีเมนต์เพสต์ PBA-30(45) บ่มเร่งกำลังที่ระยะเวลาเท่ากับ 10 และ 45 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับบ่มน้ำที่อุณหภูมิปกติ แต่พบ Ettringite กระจายตัวหนาแน่นกว่า



รูปที่ 7 PBA-30 บ่มน้ำที่อุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 8 PBA-30(10) บ่มเร่งกำลังระยะเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 9 PBA-30(45) บ่มเร่งกำลังระยะเวลา 45 ชั่วโมง

4. สรุป

จากการศึกษาสรุปผลได้ ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์สารประกอบด้วยวิธี XRD ยืนยันผลปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอย ทำให้ซีเมนต์เพสต์ PBA-30 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม PPC

4.2 ซีเมนต์เพสต์ PBA-30 บ่มเร่งกำลังที่อุณหภูมิ 60 °C ช่วงระยะเวลาบ่มเท่ากับ 5 และ 10 ชั่วโมง มีกำลังอัดเทียบเท่ากับบ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่อายุ 3 และ 7 วัน ตามลำดับ คาดว่าเป็นผลจากการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนการบ่มเร่งกำลังในช่วงระยะเวลาบ่มเท่ากับ 45 ชั่วโมง มีกำลังอัดเทียบเท่ากับบ่มน้ำอุณหภูมิปกติที่อายุ 28 วัน เป็นผลจากการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลาน

4.3 มีความเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการบ่มเร่งกำลังเป็นแนวทางในการตรวจสอบความเป็นปอซโซลานของเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยภายใน 48 ชั่วโมง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย (งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2560) และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Sarote, T. Ronnakron, "Compressive strength drying shrinkage and heat of mortar containing rice husk ash," in *Proceeding of the 15th National Convention on Civil Engineering*, Thailand, 2010, pp. 207.

[2] C. Burachat, K. Tavisin, "Durability of concrete containing black RHA from rice mill," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 373–389, 2002.

[3] J. Chai, T. Weerachat, "Biomass ash: new pozzolan materials for concrete," *Civil Engineering Magazine,* vol. 19, Thailand, 2007, pp. 42–46.

[4] D. Sarote, T. Ronnakron, "Compressive strength and drying shrinkage of mortar containing rice husk ash blended fly ash," in *Proceeding of the 16th National Convention on Civil Engineering*, Thailand, 2011, pp.176.

[5] D. Sarote, "Effect rice husk ash blended with fly ash on mechanical properties of concrete," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, pp. 125–133, 2015.

[6] Standard Specification for Coad Fly Ash and raw or calcined national pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete, ASTM C 618, 2001.

[7] N. J. Gardner, "Effect of temperature on the early-age properties of type I, type II and type III/fly ash concrete with temperature," *ACI Materials Journal*, vol. 87, 1990.

[8] M. H. Ozkul, "Efficiency of accelerated curing in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1351–1357, 2001.

[9] H. Yazici, S. Aydin, H. yigiter and B. Baradan, "Effect of steam curing on class C high-volume fly ash concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1122–1127, 2005.

[10] S. Leelalertlaew, "Effect of accelerated curing condition on strength development of high strength mortar containing rice husk ash and pulverized fly ash," Thesis ST-00-06, Asian Institute of Technology, Thailand, 2000.

[11] S. Dechang, "Pozzolanic activity of PFA–an accelerated test method," Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden, 1986.

[12] S. Theerawat, "The measurement of calcium hydroxide and calcium silicate hydrate by TGA and XRD of hardened blended cement paste," Annual Concrete Conference 2, Thailand, 2006.

[13] F. A. Memon, M. F. Nurudin, S. Demie, and N. Shafiq, "Effect of curing condition on strength of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete," *International Scholarly and Scientific Research and Innovation*, vol. 5, pp. 342–345, 2011.

[14] P. Klieger, "Effect of mixing and and curing temperature on concrete strength," *Journal of American Concrete Institute*, vol. 54, pp. 1063–1081, 1958.

[15] J. Paya, J. Monzo, E. Peris-Mora, M. V. Borrachero, R. Tercero, and C. Pinillos, "Early-strength development of Portland cement mortars containing air classified fly ashes," *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 449–456, 1995.