

การใช้ประโยชน์ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำกันเตาจีโอพอลิเมอร์ : การศึกษาสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางแร่ และโครงสร้างทางโมเลกุล

สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ^{1*}

มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ต.ชมพู อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 521000

และ ธนากร ภูเงินขำ²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถ.สุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานการศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ถ้ำกันเตาเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยศึกษาสมบัติด้านระยะเวลาการก่อตัว การพัฒนากำลังรับแรงอัด องค์ประกอบทางแร่ และโครงสร้างทางโมเลกุลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ทั้งนี้แทนที่ถ้ำกันเตาด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นของเหลวในทุกส่วนผสม โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.5 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวของถ้ำกันเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ลดลงอย่างชัดเจน ขณะที่กำลังรับแรงอัดของถ้ำกันเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอัตราส่วนการแทนที่ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำกันเตาที่ร้อยละ 30 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์สูงสุด ขณะที่ผลการทดสอบขององค์ประกอบทางแร่และโครงสร้างทางโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สอดคล้องกับพฤติกรรมของกำลังรับแรงอัด เนื่องจากการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ถ้ำกันเตาสามารถเพิ่มผลผลิตภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ / ถ้ำกันเตา / กากแคลเซียมคาร์ไบด์ / กำลังรับแรงอัด / องค์ประกอบทางแร่ / โครงสร้างทางโมเลกุล

* Corresponding Author : yim_kachan@yahoo.com, hanjitsuwan@gmail.com

¹ อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

² อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

Utilization of Calcium Carbide Residue in Bottom Ash Geopolymer : Study on Mechanical, Mineral Composition and Molecular Structure Properties

Sakonwan Hanjitsuwan^{1*}

Lampang Rajabhat University, Tambon Chompoo, Muang, Lapang 52100

and Tanakorn Phoo-ngernkham²

Rajamangala University of Technology Isan, Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Abstract

This article reports the use of calcium carbide residual (CCR) to replace bottom ash (BA) as precursors for the manufacturing of geopolymer mortar. Setting time, strength development, mineral composition and molecular structure of the geopolymer material were studied. BA was replaced by CCR at 0, 10, 20, and 30% by weight of binder. Sodium silicate (NS) and 10-molar sodium hydroxide (NH) solutions were used as liquid alkaline in all mixes. Constants NS/NH ratio of 2.0, liquid/binder ratio of 0.7, sand to binder ratio of 1.5 and ambient-temperature curing were used in all cases. The results showed that the setting time of BA geopolymer mortar decreased while the compressive strength of BA geopolymer mortar increased as CCR replacement ratio increased. The CCR replacement at 30% gave the highest strength development of geopolymer material. The results belonging to the mineral composition and molecular structure of the geopolymer pastes corresponded with the compressive strength behavior results. This is because the use of CCR to replace BA can enhance the production of the reaction products within the geopolymer system.

Keywords : Geopolymer / Bottom Ash / Calcium Carbide Residue / Compressive Strength / Mineral Composition / Molecular Structure

* Corresponding Author : yim_kachan@yahoo.com, hanejitsuwan@gmail.com

¹ Lecturer, Program in Civil Technology, Faculty of Industry Technology.

² Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

1. บทนำ

เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นวัสดุพลอยได้อีกชนิดหนึ่งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบทางเคมีเช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย อีกทั้งยังมีการนำมาใช้ประโยชน์ในงานวัสดุก่อสร้างค่อนข้างน้อย ดังนั้น การจัดการเพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ในการนำเถ้าก้นเตามาใช้ประโยชน์ คือ การใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ (geopolymer) ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ใช้พลังงานในการผลิตที่สูง และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศน้อยกว่าซีเมนต์ [1-4] แต่อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ [5-7] รายงานไว้ว่า จีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าก้นเตามีกำลังอัดที่ค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิปกติแนวโน้มนคล้ายกับจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย และงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย [8-11] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ในส่วนผสมส่งผลทางบวกทั้งด้านสมบัติเชิงกลและสมบัติทางจุลภาคต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ในส่วนผสมเพื่อพัฒนาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาให้ได้กำลังที่ดีที่อุณหภูมิปกติ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซอะเซทิลีน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง [12-13] ซึ่งเป็นการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนในการผลิตเช่นเดียวกันกับการใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา โดยจากผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงให้เห็นว่ามีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก ดังนั้นกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเป็นแหล่งให้แคลเซียมในระบบจีโอพอลิเมอร์ได้ เพื่อทำให้วัสดุสามารถก่อตัวและรับกำลังอัดที่อุณหภูมิปกติได้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณางานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เถ้าก้นเตาวัสดุตั้งต้นสำหรับผลิตจีโอพอลิเมอร์ [5, 14] แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตามีสมบัติด้านกำลังที่ดีเมื่อทำให้เถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคเล็กทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม การทำให้เถ้าก้นเตามีขนาดที่เล็กด้วยการบดเป็นการทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพื่อปรับปรุงสมบัติของเถ้าก้นเตาก่อนนำมาใช้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านการคัดขนาดให้มีขนาดอนุภาคปานกลางมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อลดการใช้พลังงานในการบดวัสดุ โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา เพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่มีขนาดปานกลาง เพื่อให้สามารถนำวัสดุดังกล่าวมาใช้งานได้ที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะเป็นการเพิ่มทางเลือกในการนำวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในงานวัสดุก่อสร้าง ผลการศึกษาทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและสามารถเลือกส่วนผสมมาใช้กับประเภทของงานได้อย่างเหมาะสม และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าก้นเตาที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด และองค์ประกอบทางแร่ และโครงสร้างโมเลกุลของเถ้าก้นเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเถ้าก้นเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย เถ้าก้นเตา (BA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 และทรายแม่น้ำ (RS) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) โดยการยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปในตัวอย่างซึ่งธาตุต่างๆ ในตัวอย่างทดสอบจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์และคายพลังงานออกมาเป็นค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ พบว่า ร้อยละขององค์ประกอบทาง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	SO ₃	LOI
BA	26.17	15.79	14.21	28.51	2.98	1.43	1.05	0.25	0.31	0.12	1.50	7.68
CCR	5.94	3.42	-	86.14	0.36	0.10	0.39	-	-	-	0.87	2.79

เคมีของเถ้าก้นเตาประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา แคลเซียมออกไซด์ ขณะที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก-ข) พบว่าเถ้าก้นเตา (รูปที่ 3 ก) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกของแร่ควอตซ์ อะนอร์ไทท์ อัลไบท์ แคลเซียมคาร์บอเนต เพอร์ริคออกไซด์ และยิปซัม และความไม่มีผลึกที่มุมระหว่าง 20-30 องศา สำหรับแคลเซียมคาร์ไบด์ (รูปที่ 3 ข) ประกอบด้วยผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ควอตซ์ แคลเซียมคาร์บอเนต และอะลูมินิต สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางแร่ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถสรุปได้ว่าแคลเซียมภายในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก

สารละลายต่างที่ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ประกอบด้วย 13.45% Na₂O, 32.39% SiO₂ และ 54.16% H₂O

3.2 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 เถ้าก้นเตาถูกแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.7 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.0 และ 1.5 ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนผสม

การผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยผสมเถ้าก้นเตา กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และทรายให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมของเหลวลงไปในส่วนผสมแล้วผสมต่อเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกันสำหรับสารละลายต่างที่ใช้ในส่วนผสม คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะผสมให้เข้ากันก่อนนำไปใช้เป็นส่วนของเหลวในส่วนผสม

3.3 การทดสอบตัวอย่าง

3.3.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยเครื่องมือไอแคท ประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM C191 [15]

3.3.2 การทดสอบกำลังอัด

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทลงแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [16] หลังจากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกอีกครั้ง และเก็บไว้ที่อุณหภูมิปกติ จนครบอายุการบ่ม 28 และ 90 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

3.3.3 การทดสอบองค์ประกอบทางแร่ และโครงสร้างทางโมเลกุล

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบองค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD (X-ray diffraction) และโครงสร้างทางโมเลกุลด้วยเทคนิค FTIR spectroscopy (Fourier transform infrared spectroscopy) ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ เตรียมด้วยการบดจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ให้เป็นผงละเอียด

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของเก้าอี้เตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

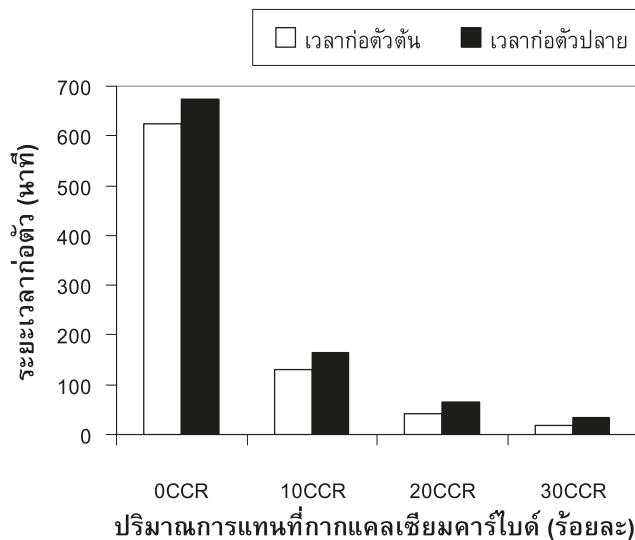
Mixture	BA (g)	CCR (g)	RS (g)	NH (g)	NS (g)
0.7BA0CCR	100	-	150	23.3	46.7
0.7BA10CCR	90	10	150	23.3	46.7
0.7BA20CCR	80	20	150	23.3	46.7
0.7BA30CCR	70	30	150	23.3	46.7

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของเก้าอี้เตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 1

พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ของ BA0CCR, BA10CCR, BA20CCR และ BA30CCR มีค่าเท่ากับ 625, 130, 43 และ 18 นาที ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวปลายมีค่าเท่ากับ 675, 165, 65 และ



รูปที่ 1 ระยะเวลาการก่อตัวของเก้าอี้เตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์

35 นาที ตามลำดับ จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเก้าอี้เตาเพิ่มขึ้น เหตุผลหนึ่ง อาจเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ที่มีในองค์ประกอบของ กากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและ อะลูมินาในเก้าอี้เตาเกิดเป็นผลผลิตของสารประกอบแคลเซียม ซิลิเกตไฮดรอกไซด์คล้ายกับผลผลิตในระบบของเก้าอี้เตา จีโอพอลิเมอร์ผสมปูนซีเมนต์ [9, 17-18] ทำให้ระยะเวลา

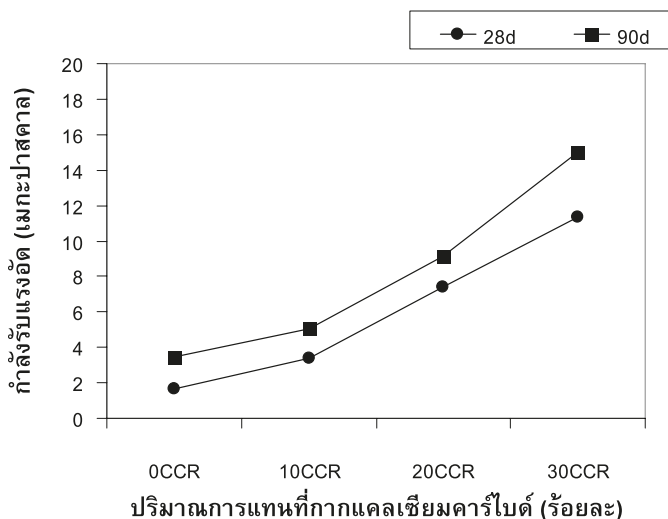
การก่อตัวของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อ เทียบกับส่วนผสมที่ไม่มี การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุ จีโอพอลิเมอร์จากเก้าอี้เตากรณีที่ไม่มีการแทนที่ด้วยกาก แคลเซียมคาร์ไบด์กับการใช้เก้าอี้เตาเป็นวัสดุตั้งต้นตาม รายงานวิจัยของ Hanjitsuwan และคณะ [19] พบว่า การ ใช้เก้าอี้เตาตั้งเดิมเป็นวัสดุตั้งต้นมีระยะเวลาการก่อตัวและ ระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 30 และ 58 นาที จะ

เห็นได้ว่าค่าระยะเวลาการก่อตัวมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากประเภทและลักษณะเฉพาะของวัสดุตั้งต้นต่างกัน และขนาดอนุภาคของวัสดุตั้งต้นเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกัน การทราบระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุจะทำให้สามารถเลือกส่วนผสมได้เหมาะสมกับประเภทของการใช้งาน

4.2 กำลังรับแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัดของเอ็กกันเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า ค่ากำลัง

รับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ของ BA0CCR, BA10CCR, BA20CCR และ BA30CCR มีค่าเท่ากับ 1.7, 3.4, 7.4 และ 11.4 เมกะปาสคาล ขณะที่อายุ 90 วัน กำลังรับแรงอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 3.5, 5.5, 9.1 และ 15.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเอ็กกันเตาเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น ดังแสดงในตารางที่ 1 อาจเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดของเอ็กกันเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์

สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเอ็กกันเตาเกิดเป็นผลผลิตของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตคล้ายกับผลการทดสอบของ Phoo-ngernkham และคณะ [20] ที่ได้มีการรายงานไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์ส่งผลเชิงบวกสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ และเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก 28 วัน เป็น 90 วัน พบว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดทุกปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเอ็กกันเตา อาจเนื่องจากระบบสามารถเกิดผลผลิตมากขึ้นทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์

เพสต์ ขณะเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและเอ็กกันเตา ดังรายงานวิจัยของ Rattanasak และ Chindaprasit [7] พบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เอ็กกันเตาเป็นวัสดุตั้งต้น เนื่องจากเอ็กกันเตามีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าเถ้าลอย ค่ากำลังอัดที่อายุตัวอย่าง 28 วันของเอ็กกันเตาจีโอพอลิเมอร์เมื่อบ่มตัวอย่างที่ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เท่ากับ 14.0 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าส่วนผสมของ BA0CCR

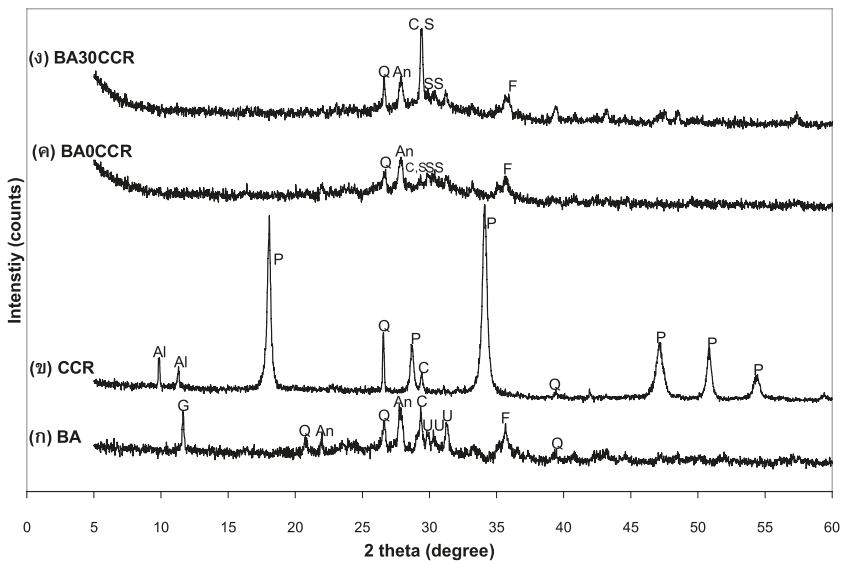
เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน ที่มีค่าเท่ากับ 1.7 เมกะปาสคาล อาจเนื่องจากความแตกต่างของขนาดอนุภาคเถ้ากันเตาตั้งต้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามที่ส่วนผสมของ BA30CCR เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน มีค่าเท่ากับ 11.4 เมกะปาสคาล แสดงให้เห็นว่าการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่เถ้ากันเตาช่วยพัฒนากำลังรับแรงอัดให้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Rattanasak และ Chindaprasirt [7] ที่มีการบ่มตัวอย่างเถ้ากันเตาจีโอพอลิเมอร์ที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยด้านการลดพลังงานในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์

เมื่อพิจารณาถึงการใช้ประโยชน์เถ้ากันเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับการใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง จะเห็นได้ว่า กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมของ BA30CCR ที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 11.4 เมกะปาสคาล ซึ่งในเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าสามารถประยุกต์ใช้เป็นคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักสำหรับกำแพงภายนอก และ

กำแพงภายในตามมาตรฐาน มอก. 57-2533 [21] ได้ที่กำหนดให้ชั้นคุณภาพที่ 28 วัน กำลังต้านแรงอัดต่ำสุดของอิฐแต่ละก้อน เฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 5.5 เมกะปาสคาล และชั้นคุณภาพ ค ที่ 28 วัน กำลังต้านแรงอัดต่ำสุดของอิฐแต่ละก้อนเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 4.0 เมกะปาสคาล แต่อย่างไรก็ตามยังคงต้องพิจารณาถึงผลการทดสอบอื่นร่วมด้วย

4.3 องค์ประกอบทางแร่

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าหนักเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกส่วนผสมที่มีการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้ากันเตาร้อยละ 0 และ 30 ในการศึกษาองค์ประกอบทางแร่เปรียบเทียบกับวัสดุตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า เถ้ากันเตา (รูปที่ 3 ก) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกของแร่ควอตซ์ (SiO₂) อะนอร์ไทท์ (CaAl₂Si₂O₈) อัลไซท์ (Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al)₂O₆) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) เฟอร์ริคออกไซด์ (Fe₂O₃) และยิปซัม (CaSO₄·2H₂O)



รูปที่ 3 องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุตั้งต้น และเถ้ากันเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ (ก) เถ้ากันเตา

(ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (ค) เมื่อมีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ร้อยละ 0

(ง) เมื่อมีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ร้อยละ 30

(P=portlandite, Q=quartz, U=auguite, An=Anorthite, G=Gypsum, F=ferric oxide,

C=calcium carbonate, Al=aluminite, S=calcium silicate hydrate)

และมีความไม่เป็นผลึกที่มุม 20-30 องศา สำหรับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (รูปที่ 3 ข) ประกอบด้วยผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ควอตซ์ แคลเซียมคาร์บอเนต และอะลูมิเนียม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 4.17\text{H}_2\text{O}$) เมื่อเต้ากันเตาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ และมีการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเต้ากันเตาร้อยละ 0 และ 30 (รูปที่ 3 ค-ง) องค์ประกอบในเต้ากันเตาจะถูกชะละลายและเกิดปฏิกิริยาเคมี และพบ board peak ที่แสดงถึงส่วนที่ไม่มีผลึกที่มุมประมาณ 25-35 ซึ่งช่วงดังกล่าวบ่งบอกความเป็นออสติฐานของจีโอพอลิเมอร์ [7, 8, 22-24] และพบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตคล้ายกับสารประกอบในปูนซีเมนต์ [25] อาจเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับซิลิกาหรืออะลูมินาจากเต้ากันเตา อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 3 ยังคงพบผลึกอะนอร์ไทท์ ควอตซ์ แคลเซียมคาร์บอเนตของเต้ากันเตาดั้งเดิมที่ไม่เกิดปฏิกิริยา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ตั้งต้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบส่วนผสมที่แทนที่กากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0 และ 30 พบว่า ส่วนผสมที่แทนที่ร้อยละ 30 มีส่วนออสติฐานมากกว่า และพบผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตมากขึ้น สอดคล้องกับความสามารถในการรับกำลังอัดที่สูงกว่า

4.4 โครงสร้างทางโมเลกุล

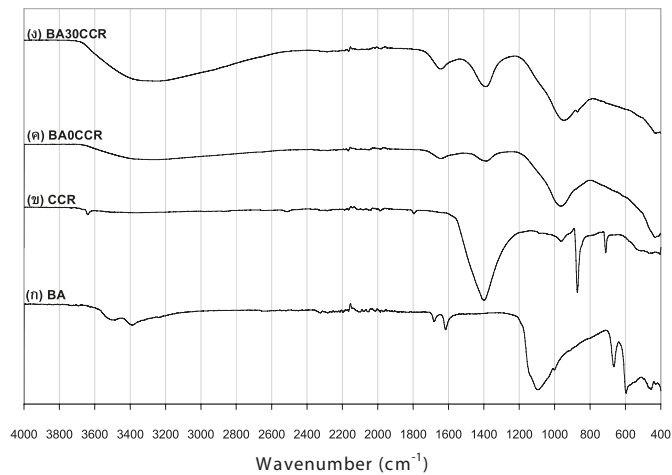
จากผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของเต้ากันเตากากแคลเซียมคาร์ไบด์ตั้งต้น และเต้าหนัก จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 0 และ 30 ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและตำแหน่งของสเปกตรัมจากเต้ากันเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ตั้งต้นเทียบกับเต้ากันเตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ แสดงให้เห็นว่าเต้ากันเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ตั้งต้นสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นวัสดุใหม่ได้ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยของปริมาณการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเต้าหนักร้อยละ 0 (รูปที่ 4 ค) และร้อยละ 30 (รูปที่ 4 ง) พบว่า รูปแบบของสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกันให้ผลไปในทางเดียวกัน และทุกตำแหน่งของสเปกตรัมมีความกว้างมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีการแทนที่ร้อยละ 30 (รูปที่ 4 ง) ซึ่งให้เห็นว่าการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ใน

เต้ากันเตาส่งผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นวัสดุใหม่ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางโมเลกุลสอดคล้องกับองค์ประกอบทางแร่ และกำลังรับแรงอัด ตามลำดับ

การปรากฏสเปกตรัมที่ตำแหน่งต่างๆ ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ (ภาพที่ 4 ค-ง) บ่งชี้ถึงรายละเอียด คือ ที่ตำแหน่ง 3450 และ 1650-1600 cm^{-1} ของ O-H stretching และ O-H bending หลังจากวัสดุตั้งต้นทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างในระบบ ตำแหน่งดังกล่าวมีปริมาณเพิ่มขึ้น [26] ขณะที่ตำแหน่ง 1460 cm^{-1} แสดงถึงการมีสารประกอบคาร์บอเนต [27] ซึ่งในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ตั้งต้นมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบตั้งแสดงได้จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ รูปที่ 3 ข และผลวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลในรูปที่ 4 ข นอกจากนี้ยังคงพบแคลเซียมคาร์บอเนตในส่วนผสมของ BA0CCR และ BA30CCR ทั้งในผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่และผลวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลส่วนตำแหน่ง 1200-950 cm^{-1} บอกลถึงการเกิด Si-O-Si stretching แสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไร้เชซัน จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ตัวอย่างหลังการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากโครงสร้างหลักของจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของพันธะ Si-O-Si หรือ Al-O-Si ตำแหน่งที่ 460 cm^{-1} เกิด O-Si-O bending แสดงว่ายังคงมีควอตซ์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ [20, 22] และที่ 670 cm^{-1} เกิด S=O ในเต้ากันเตาดั้งเดิม ซึ่งสัมพันธ์กับการมีผลึกแอนไฮไดรต์ ในผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ [22] ซึ่งในงานวิจัยนี้มีรูปแบบและตำแหน่งของสเปกตรัมของเต้าหนักตั้งต้นและเต้าหนักเมื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มคล้ายกับงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [6] และ Boonserm และคณะ [28] ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่และกำลังรับแรงอัด ตามลำดับ

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาของการใช้เต้ากันเตาที่ขนาดอนุภาคปานกลางสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง สามารถสรุป



รูปที่ 4 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุตั้งต้น และเก้าอี้เตาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์
(ก) เก้าอี้เตา (ข) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (ค) เมื่อมีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์
แทนที่ร้อยละ 0 (ง) เมื่อมีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ร้อยละ 30

ได้ ดังนี้

1) การเพิ่มขึ้นของปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในเก้าอี้เตาจากร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ส่งผลทำให้ ค่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลง และค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ใน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาภายในระบบของ จีโอพอลิเมอร์

2) ส่วนผสมที่มีการแทนที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ในเก้าอี้เตาที่ร้อยละ 0 และ 30 แสดงถึงส่วนอ่อนฐานของ จีโอพอลิเมอร์ ผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต และผลึก ของเก้าอี้เตาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจากผลวิเคราะห์องค์ประกอบ ทางแร่ และการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลปรากฏสเปกตรัม ที่ตำแหน่ง 1200-950 ซม.⁻¹ บ่งบอกถึงความสามารถ ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งผลวิเคราะห์ ที่ได้จากทั้งสองเทคนิคเป็นไปในแนวทางเดียวกัน และ สนับสนุนผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุเก้าอี้เตา จีโอพอลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะเทคโนโลยี วิศวกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง งบรายได้ประจำ

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ตามสัญญาเลขที่ 008/2559 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปางที่ อนุเคราะห์เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

1. Mclellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., Riessen, A.V. and Corder, G.D., 2011, "Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement," *Journal of Cleaner Production*, 19 (9-10), pp. 1080-1090.
2. Zhuang, X.Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C.H., Tong, D.S., Yang, H.M., Yu, W.H. and Wang, H., 2016, "Fly Ash-based Geopolymer : Clean Production, Properties and Applications," *Journal of Cleaner Production*, 125, pp. 253-267.
3. Homsriprasert, W. and Chatveera, B., 2015, "Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar Cured with Electric Oven," *KMUTT Research and Development Journal*, 38 (1), pp. 3-18. (In Thai)

4. Jiranon, P., Kuengjuk, T., Khemkumnert, N., Muhumud, T. and Piyaphanuwat, R., 2016, "Effects of Curing Temperature and Alkali Concentration on Compressive Strength of Geopolymer Synthesized from Ceramic Waste," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (4), pp. 533-546. (In Thai)
5. Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P. and Pimraksa, K., 2009, "Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar," *Journal of Hazardous Materials*, 168 (1), pp. 44-50.
6. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W. and Rattanasak, U., 2009, "Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers," *Waste Management*, 29 (2), pp. 539-543.
7. Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P., 2008, "A Comparative Study on Properties of Geopolymeric Materials from Coal Ash," *KMUTT Research and Development Journal*, 31 (2), pp. 371-381. (In Thai)
8. Phoo-ngernkham, T. and Hanjitsuwan, S., 2014, "Factors of Alkali Solutions Affecting Physical Properties and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement," *The Journal of Industrial Technology*, 10 (3), pp. 61-72. (In Thai)
9. Guo, X., Shi, H., Chen, L. and Dick, W.A., 2010, "Alkali-activated Complex Binders from Class C Fly Ash and Ca-containing Admixtures," *Journal of Hazardous Materials*, 173 (1-3), pp. 480-486.
10. Suwan, T. and Fan, M., 2014, "Influence of OPC Replacement and Manufacturing Procedures on the Properties of Self-cured Geopolymer," *Construction and Building Materials*, 73, pp. 551-561.
11. Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridditirud, C., Hatanaka, S. and Chindaprasirt, P., 2015, "High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement for Use as Repair Material," *Construction and Building Materials*, 98, pp. 482-488.
12. Munsrakest, V., 2011, Strength Development in Concrete Block Manufactured from Calcium Carbide Residue and Fly Ash, Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, School of Engineering, Suranaree University of Technology. (In Thai)
13. Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A. and Disfani, M.M., 2014, "Calcium Carbide Residue : Alkaline Activator for Clay-fly Ash Geopolymer," *Construction and Building Materials*, 69, pp. 285-294.
14. Chotetanorm, C., Chindaprasirt, P., Sata, V., Rukzon, S. and Sathonsaowaphak, A., 2013, "High-Calcium Bottom Ash Geopolymer : Sorptivity, Pore Size, and Resistance to Sodium Sulfate Attack," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (1), pp. 105-111.
15. American Society for Testing and Material, 2008, "ASTM C191 Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01, Philadelphia. (DOI : 10.1520/C0191)
16. American Society for Testing and Material, 2002, "ASTM C109 Standard Test Method of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01, Philadelphia. (DOI : 10.1520/C0109__C0109M-16A)
17. Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Pangdaeng, S. and Sinsiri, T., 2013, "Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Pastes with Portland Cement as an Additive," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20 (2), pp. 214-220.
18. Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata,

- V. and Chindaprasirt, P., 2014, "Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive," *Materials and Design*, 53, pp. 269-274.
19. Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T. and Chindaprasirt, P., 2013, "Influence of Fineness of High Calcium Fly Ash on Properties of Geopolymer Paste," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (4), pp. 399-408. (In Thai).
20. Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S. and Chindaprasirt, P., 2016, "Influence of Sand to Binder Ratio on Properties of Geopolymer Mortar Containing Portland Cement," *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (2), pp. 127-137. (In Thai).
21. TIS. 57-2530, 1987, Standard for Hollow Load-bearing Concrete Masonry Units, Thai Industrial Standards, pp. 1-11.
22. Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S. and Cao, T., 2011, "High Strength Geopolymer using Fine High Calcium Fly Ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (3), pp. 264-270.
23. Hanjitsuwan, S., Chindaprasirt, P. and Pimraksa, K., 2011, "Electrical Conductivity and Dielectric Property of Fly Ash Geopolymer Pastes," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18, pp. 94-99.
24. Vargas, A.S.D., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., De Silva, F.J., Pavao, B. and Veit, H., 2011, "The Effects of Na₂O/SiO₂ Molar Ratio, Curing Temperature and Age on Compressive Strength, Morphology and Microstructure of Alkali-activated Fly Ash-based Geopolymers," *Cement and Concrete Composite*, 33 (6), pp. 653-660.
25. Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U., 2010, "Utilization of Blended Fluidized Bed Combustions (FBC) Ash and Pulverized Coal Combustion (PCC) Fly Ash in Geopolymer," *Waste Management*, 30, pp. 667-672.
26. Panias, D., Giannopoulou, I.P. and Perraki, T., 2007, "Effect of Synthesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymer," *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 301, pp. 246-254.
27. Barbosa, V.F.F., Mackenzie, K.J.D. and Thaumaturgo, C., 2000, "Synthesis and Characterization of Materials based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica : Sodium Polysialate Polymer," *Inorganic Materials*, 2 (4), pp. 309-317.
28. Boonserm, K., Sata, V., Pimraksa, K. and Chindaprasirt, P., 2012, "Improved Geopolymerization of Bottom Ash by Incorporating Fly Ash and using Waste Gypsum as Additive," *Cement and Concrete Composites*, 34, pp. 819-824.

