

การพัฒนากำลังอัดของเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

Strength Development of Bottom Ash Geopolymer Containing Calcium Carbide Residue

ธนกร ภูเงินข้า^{*1} สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง อ.เมือง จ.ลำปาง 52100

Tanakorn Phoo-ngernkham^{*1} Sakonwan Hanjitsuwan²

¹Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan,
Amphur Muang, Nakhon Ratchasima 30000

²Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Amphur Muang, Lampang 52100

Tel : 044-233-000 ext. 3211 E-mail: tanakorn.ph@muti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าหนักร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สารละลายต่างที่ใช้เป็นของเหลว ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 และบ่มที่อุณหภูมิปกติ ทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มลดลง ขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคที่มีความแน่นตัว และพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ ตัวอย่างเช่น ปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าหนักร้อยละ 30 ให้ค่าระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลายเท่ากับ 18 และ 35 นาที ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 11.4 เมกะปาสกาล

คำหลัก เถ้าหนัก กากแคลเซียมคาร์ไบด์ จีโอโพลิเมอร์

กำลังรับแรงอัด โครงสร้างทางจุลภาค

Abstract

This article presented the strength development of bottom ash (BA) geopolymer containing calcium carbide residue (CCR). The CCR was used to replace BA at the dosages of 0%, 10%, 20% and 30% by weight of binder. The alkali solution for using as liquid alkali were sodium silicate (Na_2SiO_3) and 10 molar sodium hydroxide (NaOH) solutions. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 2.0, liquid/binder ratio of 0.70, sand to binder ratio of 1.5, and cured at ambient temperature were used in all mixes. Test results indicated that the setting time of BA geopolymer containing CCR tended to decrease whereas compressive strength tended to increase. The results corresponded to microstructure analysis which made a dense matrix. Also, calcium silicate hydrate (C-S-H) was found in X-ray diffractometry patterns. For instance, the CCR replacement at 30% gave the initial and final setting at 18 and 35 min, and highest compressive strength at 11.4 MPa, respectively.

Keywords: bottom ash, calcium carbide residue, geopolymer, compressive strength, microstructure

1. บทนำ

ในปัจจุบันจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง จีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถรับแรงได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ [1] วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ ดินขาว เถ้าถ่านหิน เป็นต้น [2-6]

เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา (bottom ash) เป็นส่วนที่อยู่ก้นเตาเผา ซึ่งจัดเป็นวัสดุพลอยได้อีกชนิดหนึ่งที่ได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักเหมือนกับเถ้าลอย ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุตั้งต้นที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เถ้าหนักมีสีดํา อนุภาคมีขนาดใหญ่ มีความพรุนสูง และมีสวนอนสัณฐานน้อย [7] อนุภาคขนาดใหญ่ถือเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน เถ้าหนักเป็นวัสดุตั้งต้นที่ยังคงมีการนำมาใช้ศึกษาเป็นวัสดุตั้งต้นในการทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ค่อนข้างน้อย จากงานวิจัยของ Sathonsaowaphak และคณะ [8] พบว่าขนาดอนุภาคเถ้าหนักเล็กลงส่งผลดีต่อกำลังรับแรงอัด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดยังคงมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ [4]

การพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิปกติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานก่อสร้างจริง มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของการเติมสารผสมเพิ่มที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ [9-15] ต่อสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจากวิจัยเหล่านี้พบว่า การเติมสารผสมเพิ่มที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยได้ที่อุณหภูมิปกติ ดังเช่นงานวิจัยของ Pangdaeng และคณะ

[15] และ ธนากร ภูเงินขำ และสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ [16] พบว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยสามารถก่อตัวและรับกำลังได้ที่อุณหภูมิปกติ เนื่องด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตคล้ายกับผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และเกิดขึ้นร่วมกับสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตหรือผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์ภายในเนื้อวัสดุ นอกจากนี้ยังมีวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซอะเซทิลีนที่สามารถใช้เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ได้คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเริ่มมีงานวิจัยที่ศึกษาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ในงานซีเมนต์ [17-19] และงานวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [20-21] ซึ่งถือเป็นการนำวัสดุพลอยได้มาใช้ประโยชน์ และเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดี

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ ศึกษาปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีต่อสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าหนัก ผลการทดลองที่ได้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นและเป็นแนวทางในการนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ในงานวัสดุก่อสร้างต่อไป

2. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

2.1 วัสดุและส่วนผสม

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ เถ้าหนัก (BA) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยเถ้าหนักเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก ในปริมาณร้อยละ 26.17, 15.79 และ 28.51 ตามลำดับ ขณะที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน โดยมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 86.14 และในการศึกษาครั้งนี้จะใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ใช้เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ให้กับส่วนผสมของเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์ เถ้าหนักมีความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคของเท่ากับ 2.12 และ 32.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคของเท่ากับ 2.25 และ 21.2 ไมโครเมตรตามลำดับ

ส่วนสารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่องค์ประกอบของ โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 13.45 ซิลิการ้อยละ 32.39 และ น้ำร้อยละ 54.16

ขณะที่ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะใช้ อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนทรายต่อ วัสดุประสานเท่ากับ 1.5 และปริมาณการแทนที่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเกณฑ์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 สำหรับกระบวนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้น ด้วยผสมเข้ากัน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และทรายให้ เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมของเหลว (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียม-ซิลิเกต) ลงไปในส่วนผสมแล้วผสมต่อเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับสารละลายต่างที่ใช้ใน ส่วนผสม คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ สารละลายโซเดียมซิลิเกตจะผสมให้เข้ากันก่อนนำไปใช้ เป็นของเหลวในส่วนผสม

2.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัด

หลังจากกระบวนการผสม ทำการเทวัสดุผสมลงใน แบบหล่อสำหรับทดสอบการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C191 [22] สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะเท จีโอโพลิเมอร์ลงในแบบหล่อนขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร กระบวนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับ แรงอัดดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 [23] ตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์จะแกะออกจากแบบหล่อเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อ ป้องกันความชื้นและเก็บรักษาตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิปกติ จนครบอายุ 28 วัน โดยค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิ-เมอร์จะใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ก้อนตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม

2.3 การทดสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ หลังจากการ ทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน จะเลือกชิ้นส่วน ตัวอย่างจากตรงกลางของก้อนตัวอย่างขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างวางบนที่วางตัวอย่างและ

เคลือบทอง แล้วทำการทดสอบที่ 15 กิโลโวลต์ และ กำลังขยายเท่ากับ 3,000 เท่า

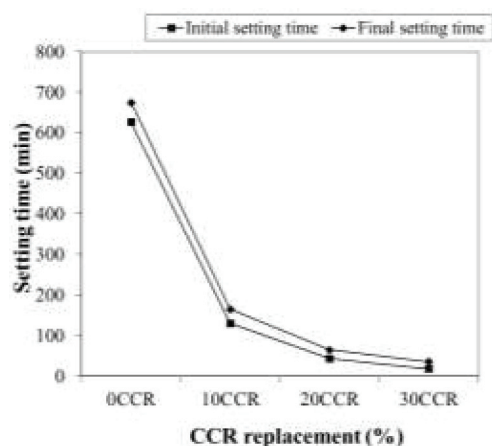
2.4 การทดสอบองค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ องค์ประกอบทางแร่ของจีโอโพลิเมอร์ หลังจากการ ทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน จะนำตัวอย่างจีโอ-โพลิเมอร์มาบดให้เป็นผงละเอียด และนำไปทดสอบด้วย เครื่อง X-Ray diffraction (XRD) ตั้งแต่มุม 5 ถึง 60 องศา

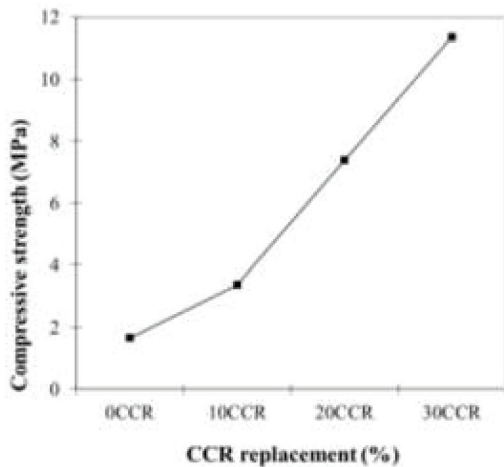
3. ผลการวิจัย

3.1 ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัด

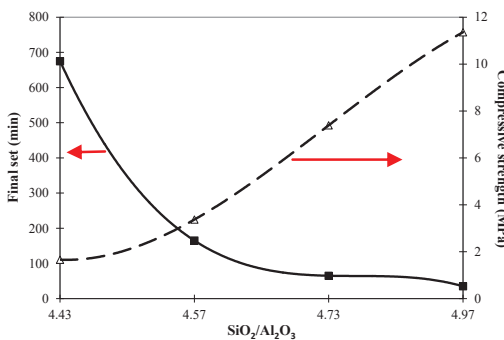
ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัด ของแท่งนักจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลง ขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการ แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยระยะเวลาการก่อตัว ปลายของแท่งนักจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีค่าเท่ากับ 675, 165, 65 และ 35 นาที ตามลำดับ ส่วน กำลังรับแรงอัดของแท่งนักจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสม กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีค่า เท่ากับ 1.7, 3.4, 7.4 และ 11.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



รูปที่ 1 ระยะเวลาการก่อตัวของแท่งนักจีโอโพลิเมอร์ที่แทนที่ด้วย กากแคลเซียมคาร์ไบด์



รูปที่ 2 กำลังอัดของแท่งหักจีโอโพลิเมอร์ที่แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของแท่งหักจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาของวัสดุตั้งต้น

การแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในแท่งหักเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 จะมีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 4.43, 4.57, 4.73, 4.97 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยปกติแล้วอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายต่างในส่วนผสมเพื่อเกิดเป็นผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์เจล (N-A-S-H) ดังที่ได้รายงานไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [5-6] แต่อย่างไรก็ตามระบบของจีโอโพลิเมอร์ที่มีแคลเซียมออกไซด์ภายในระบบจะมีความแตกต่างกับระบบของจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผาหรือเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ [24] สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนที่ในแท่งหัก โดยแคลเซียม

ออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาในแท่งหัก และเกิดเป็นผลผลิตของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต-ไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (C-A-S-H) จึงส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของระบบจีโอโพลิเมอร์มากกว่าระบบของจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผาหรือเถ้าลอยแคลเซียมต่ำที่อุณหภูมิปกติ เนื่องด้วยระบบแคลเซียมสูงจะมีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าระบบแคลเซียมต่ำ [25]

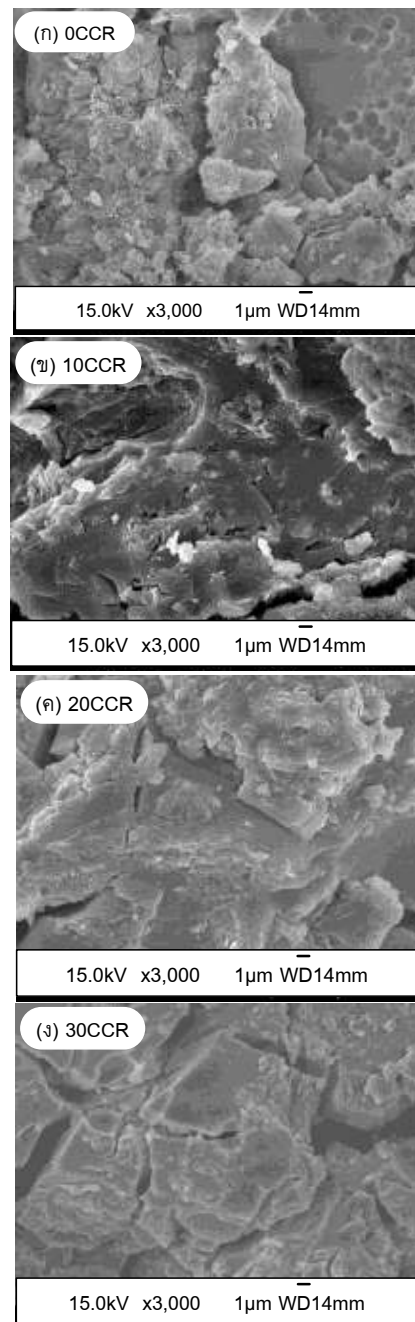
เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบจะเห็นว่าปริมาณการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในแท่งหักร้อยละ 30 จะมีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 4.97 สามารถให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 11.36 เมกะปาสคาล อย่างไรก็ตามอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่เหมาะสมภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้น กรณีเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าระหว่าง 3.2-3.7 [24] และดินขาวเผาจีโอโพลิเมอร์มีค่าระหว่าง 3.0-3.8 [5-6] และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาก่อตัวของแท่งหักจีโอโพลิเมอร์จากงานวิจัยนี้ พบว่า มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ และคณะ [26] ซึ่งใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น โดยมีระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวปลายเท่ากับ 30 และ 58 นาที ตามลำดับ การเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันระหว่างระบบเถ้าลอยและแท่งหักอาจเนื่องจากขนาดอนุภาคและลักษณะเฉพาะของวัสดุตั้งต้นที่ต่างกัน จึงส่งผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ และเมื่อเปรียบเทียบผลกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ เท่ากับร้อยละ 30 และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุ-ประสานเท่ากับ 0.7 จะมีค่าประมาณ 14 เมกะปาสคาล [27] ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยนี้ที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์เล็กน้อย

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ พบว่า แท่งหักจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 10 มีระยะเวลาการก่อตัวที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งจากงานวิจัยของ Badogiannis และคณะ [28] รายงานว่าระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 140 นาที ขณะที่แท่งหักจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 20 และ 30 มีค่าระยะเวลาการก่อ

ตัวที่รวดเร็วกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วขึ้นเป็นข้อดีในการถอดแบบที่เร็วขึ้นทำให้สามารถขึ้นรูปบล็อกแบบไม่รับน้ำหนักและแบบรับน้ำหนักได้หลายครั้งในช่วงเวลา 1 วัน

3.2 โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้านักจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเถ้านักจีโอโพลิเมอร์ (รูป 4ก) ประกอบด้วยเถ้านักที่ไม่มีการทำปฏิกิริยาฝังอยู่ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ และเนื้อเพสต์มีลักษณะไม่แน่นตัวหรือการจับตัวของเนื้อเพสต์แบบหลวมๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 2) ที่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อมีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (รูปที่ 4ข-4ง) พบว่า ปริมาณเถ้านักที่ไม่ทำปฏิกิริยามีน้อยลง และลักษณะของเนื้อเพสต์มีแนวโน้มเป็นเนื้อเดียวกันมากตามปริมาณการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้านักมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 2) ที่กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้านักล้วน การที่เนื้อเพสต์ของเถ้านักจีโอโพลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มแน่นขึ้น อาจเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้านักได้ ทำให้ระบบของจีโอโพลิเมอร์จะมีปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล (N-A-S-H) [10, 29] ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของเถ้านักจีโอโพลิเมอร์ได้ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Phoo-ngernkham และคณะ [11] และ Phoo-ngernkham และคณะ [13] ซึ่งดำเนินการปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้านักด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และตะกอนเตาถลุงเหล็ก ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณของแคลเซียมออกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกอนเตาถลุงเหล็กสามารถปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ได้

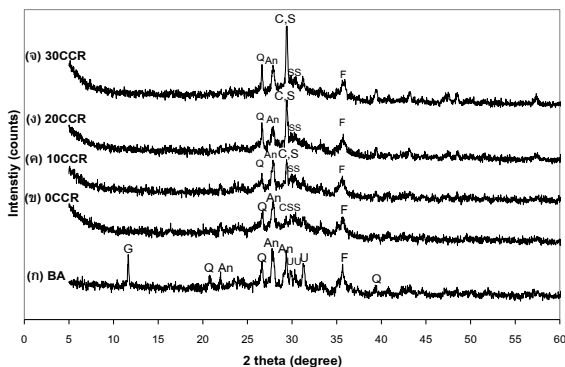


รูปที่ 4 โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเถ้านักจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์

3.3 องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD

ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเถ้านัก และเถ้านักจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้านักร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า เถ้านักตั้งต้น (รูปที่ 5ก) ประกอบด้วยผลึกของแร่ควอตซ์ (SiO_2) อะนอร์ไทท์

($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) อัลไบท์ ($\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$) เฟอริคออกไซด์ (Fe_2O_3) และยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และมีความไม่เป็นผลึกที่มุม 20-30 องศา เมื่อมีการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 (รูปที่ 5ข-5ง) ถ้ำหนักจะถูกชะละลายด้วยสารละลายอัลคาไลน์และเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้พบส่วนอสัณฐานที่มุมประมาณ 25-35 ซึ่งช่วงมุมดังกล่าวบ่งบอกความเป็นอสัณฐานของจีโอโพลิเมอร์ [30, 31] และพบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) คล้ายกับสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [30] อาจเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับซิลิกาหรืออะลูมินาจากถ้ำหนัก อย่างไรก็ตามยังคงพบผลึกอะนอร์ไทท์ ควอตซ์ ของถ้ำหนักตั้งต้นที่ไม่เกิดปฏิกิริยา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์



รูปที่ 5 องค์ประกอบทางแร่ของถ้ำหนักจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Q=quartz, An= anorthite, U= augite, C=calcium carbonate, F=ferric oxide G= gypsum, S=calcium silicate hydrate)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบส่วนผสมที่แทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะพบว่าส่วนผสมที่แทนที่ร้อยละ 30 มีแนวโน้มของส่วนอสัณฐานมากกว่า จึงส่งผลต่อความสามารถในการพัฒนากำลังอัดของถ้ำหนักจีโอโพลิเมอร์ได้มากกว่าส่วนผสมอื่น ซึ่งผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 2 แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hanjitsuwan และคณะ [32] ได้มีการรายงานจากผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมไว้ว่า การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักร้อยละ 30 มีแนวโน้มการเกิดสารประกอบ

คาร์บอเนต ดังนั้น จากผลการทดสอบกำลังอัด (รูปที่ 2) ถึงแม้ว่าการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาทั้งผลการทดสอบของระยะเวลาการก่อตัวกำลังอัด และโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักร้อยละ 20 เป็นปริมาณการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนักและแบบรับน้ำหนักได้

4. สรุป

จากผลการศึกษาปริมาณการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักจีโอโพลิเมอร์เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นแหล่งให้แคลเซียมได้ โดยระยะเวลาบ่มมีแนวโน้มลดลง ขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคที่มีความแน่นตัว และพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ส่วนผสมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบล็อกแบบไม่รับน้ำหนักได้ คือ การแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 3.4 เมกะปาสคาล โดยมีระยะเวลาก่อตัวบ่มเท่ากับ 165 นาที ขณะที่ส่วนผสมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบล็อกแบบรับน้ำหนักได้ คือ การแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำหนักร้อยละ 20 และ 30 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 7.4 และ 11.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยมีระยะเวลาก่อตัวบ่มเท่ากับ 65 และ 35 นาที ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี งบรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ตามสัญญาเลขที่ 008/2559 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาเทคโนโลยี ภาควิชา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits, J. 2008. Geopolymer chemistry and applications. Institute Geopolymer, Saint Quentin.
- [2] Bakharev, T. 2006. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 36(6): 1134-47.
- [3] Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3): 224-229.
- [4] 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): 539-543.
- [5] Silva, P.D. and Sagoe-Crentsil, K. 2008. Medium-term phase stability of $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ geopolymer systems. *Cement and Concrete Research*, 38(6): 870-876.
- [6] Silva, P.D. and Sagoe-Crentsil, K. 2009. The role of Al_2O_3 , SiO_2 and Na_2O on the amorphous→crystalline phase transformation in geopolymer systems. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 45(1): 63-71.
- [7] 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(7): 819-824.
- [8] Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P. and Pimraksa, K. 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *Journal of Hazardous Materials*, 168(1): 44-50.
- [9] Guo, X., Shi, H., Chen, L. and Dick, W.A. 2010a. Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 173: 480-486.
- [10] Guo, X., Shi, H. and Dick, W.A. 2010b. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2): 142-147.
- [11] 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): 214-220.
- [12] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N. and Chindaprasirt, P. 2016. Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, In Press.
- [13] Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S. and Chindaprasirt, P. 2015. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, 91: 1-8.
- [14] Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridthirud, C., Hatanaka, S. and Chindaprasirt, P. 2016. Compressive strength, bending and fracture characteristics of high calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement cured at ambient temperature. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4): 1263-1271.
- [15] 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: 269-274.
- [16] ธนากร ภูเงินขำ และ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ, 2557. การศึกษาปัจจัยของสารละลายต่างต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 10(3): 61-72.
- [17] Horpibulsuk, S., Munsrakes, V., Udomchai, A., Chinkulkijniwat, A. and Arulrajah, A. 2014. Strength of sustainable non-bearing masonry units manufactured from calcium carbide residue and fly ash. *Construction and Building Materials*, 71: 210-215.
- [18] Horpibulsuk, S., Phetchuay, C. and Chinkulkijniwat, A. 2012. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2): 184-193.
- [19] Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Chinkulkijniwat, A. and Cholaphatsorn, A. 2013. Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash. *Soils and Foundations*, 53(4): 477-486.
- [20] Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C. and Udomchai, A. 2016. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer. *Applied Clay Science*, 127-128: 134-142.
- [21] 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: 285-294.
- [22] ASTM C191, 2002. Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle. *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.01.
- [23] ASTM C109, 2002. 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.
- [24] Chindaprasirt, P., Silva, P.D., Sagoe-Crenstil, K. and Hanjitsuwan, S. 2012. Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, 47: 4876-4883.
- [25] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S. 2008. Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7): 1305-1314.
- [26] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ, ธนากร ภูเงินขำ และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ. 2556. สมบัติของเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 9(2): 97-106.
- [27] ธนากร ภูเงินขำ และ สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ. 2560. ผลกระทบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติทางกายภาพของเถ้าหนักซีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 24(3), ตอนบรรณาธิการพิเศษ (กันยายน-ธันวาคม 2560).
- [28] Badogiannis, E., Kakali, G., Dimopoulou, G., Chaniotakis, E. and Tsivilis, S. 2005. Metakaolin as a main cement constituent: exploitation of poor Greek kaolins. *Cement & Concrete Composites*, 27: 197-203.
- [29] Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindaprasirt, P. 2011. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6): 2118-2124.

- [30] Chindapasirt, P. and Rattanasak, U., 2010. Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer. *Waste Management*, 30(4): 667-672.
- [31] Hanjitsuwan, S., Chindapasirt, P. and Pimraksa, K. 2011. Electrical conductivity and dielectric property of fly ash geopolymer pastes. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18(1): 94-99.
- [32] Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T. and Damrongwiriyanupap, N. 2016. Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, Accepted for publication.