

## ผลของการเผาที่อุณหภูมิสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้วลอยแคลเซียมสูง

วันโชค เครือหงษ์<sup>1\*</sup> ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์<sup>1</sup> ณรงค์เดช อินทร์ต้นชัยกิจ<sup>2</sup>  
สมบูรณ์ พันเลิศจันรรจ์<sup>2</sup> และ ธรรมบุญ บุญบำรุง<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

\* Corresponding Author: wunchock\_k@hotmail.com

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

<sup>3</sup> นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

### ข้อมูลบทความ

### บทคัดย่อ

#### ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 7 มิถุนายน 2561

แก้ไข : 12 พฤศจิกายน 2561

ตอบรับ : 25 มีนาคม 2562

#### คำสำคัญ :

จีโอพอลิเมอร์ / แก้วลอย /

สมบัติทางกล / โครงสร้างจุลภาค /

อุณหภูมิสูง

บทความนี้รายงานผลของการเผาที่อุณหภูมิสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้วลอยแคลเซียมสูงซึ่งเตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 นำจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 ถึง 800 องศาเซลเซียสมาทดสอบกำลังอัด กำลังดัด และโครงสร้างจุลภาค พบว่า การเผาจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสทำให้สีของก้อนตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป เมื่อใช้อุณหภูมิการเผาที่ 800 องศาเซลเซียสตัวอย่างเกิดรอยร้าว กำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่าร้อยละ 25 และ 9 ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ ความพรุนของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้วลอยแคลเซียมสูงหลังการเผาที่อุณหภูมิสูงมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกระจายของโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่และโพรงอากาศของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ซึ่งเผาที่อุณหภูมิสูงมีปริมาณมากขึ้น ขณะที่โพรงคาปิลารีขนาดกลางและโพรงเจลมมีปริมาณลดลง การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เสียหายมีรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นและโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์เจลดกทำลาย

---

## Effect of High-Temperature Exposure on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Paste

Wunchock Kroehong<sup>1\*</sup>, Sattawat Haruehansapong<sup>1</sup>, Narongdej Intaratchaiyakit<sup>2</sup>,  
Somboon Phanlertchamnan<sup>2</sup> and Thammanun Boonbamrung<sup>3</sup>

Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus, Phayathai Road, Pathumwan,  
Bangkok 10330

\* Corresponding Author: [wunchock\\_k@hotmail.com](mailto:wunchock_k@hotmail.com)

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

<sup>3</sup> Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

---

### Article Info

### Abstract

---

#### Article History:

Received: June 7, 2018

Revised: November 12, 2018

Accepted: March 25, 2019

---

#### Keywords:

Geopolymer / Fly Ash /

Mechanical Properties /

Microstructure /

High Temperatures

This paper presents the results on the effect of high-temperature exposure on selected properties of high-calcium fly ash geopolymer paste. Ten-molar sodium hydroxide at sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) to sodium hydroxide (NaOH) ratio of 2.0 and liquid/binder ratio of 0.60 was used as liquid alkaline activator. Compressive strength, flexural strength and microstructure of geopolymer paste after exposure to temperatures of 200 - 800°C were determined. The results showed that the paste color changed after exposure to a temperature equal to or higher than 600°C; heating the specimens to 800°C led to cracks. The compressive strength and flexural strength of the paste heated to 800°C were 25% and 9% of those of the control sample, respectively. Porosity of the high-calcium fly ash geopolymer paste increased with increasing temperature. In addition, larger capillary pores and air-void pore size distribution of the geopolymer paste increased, while the medium capillary pores and gel pore size distribution decreased. Geopolymer paste exposed to 800°C suffered damaged porous structure and the geopolymer gel structure was destroyed.

---

## 1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างเมื่อโครงสร้างคอนกรีตถูกเพลิงไหม้ความร้อนจะแพร่กระจายเข้าสู่โครงสร้างส่งผลให้เกิดทำลายทางกายภาพทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเกิดรอยร้าวและแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง [1, 2] จากรายงานพบว่าคอนกรีตซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และ 550 องศาเซลเซียสมีกำลังอัดลดลงร้อยละ 15-40 และ 55-70 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ [3, 4] นักวิจัยจึงได้ศึกษาวัสดุประสานที่มีความสามารถในการทนไฟเพิ่มขึ้นและพบว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถทนไฟได้ดีกว่าคอนกรีต [5-7] จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน รายงานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Glukhovsky [8] Davidovits [9] อธิบายว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุที่มี  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบหลักเตรียมโดยการกระตุ้นไฟให้แตกตัวโดยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูงได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) หรือสารละลายโพแทสเซียม ( $\text{KOH}$ ) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการก่อตัวและให้กำลังอัดได้ จีโอพอลิเมอร์ใช้เป็นวัสดุยึดประสานและทดแทนปูนซีเมนต์ได้ นอกจากนี้มีรายงานว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มีการปล่อยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศลดลงถึงร้อยละ 80-90 เมื่อเทียบกับการผลิตปูนซีเมนต์ [15] อีกทั้งยังพบว่าจีโอพอลิเมอร์ใช้พลังงานในการผลิตต่ำกว่าร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ [16] นักวิจัยยังได้ศึกษาวัสดุพอลิโพรพิลีนและพบว่าสามารถนำมาใช้ผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้ เช่น แก้วลอย แคลเซียมต่ำ [10] แก้วปาล์มน้ำมัน [11] แก้วกลบ [12] และดินขาวเผา [13] อย่างไรก็ตาม วัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุตั้งต้นที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำจึงต้องใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา [14]

จากการศึกษาการทนไฟพบว่าจีโอพอลิเมอร์ทนไฟกว่าคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ [17, 18] เนื่องจากโครงสร้างหลักของจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของพันธะอะลูมินาและซิลิกาอย่างเหนียวแน่นทำให้มีความสามารถทนไฟ [19] นอกจากนี้ โครงสร้างที่เป็นโพรงของจีโอพอลิเมอร์เพสต์นั้นแน่นกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง [7] นักวิจัยได้ศึกษาผลของอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ  $\text{Si/Al}$  พบว่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อสมบัติทนไฟของจีโอ-

พอลิเมอร์กำลังอัดสูงที่สุดของจีโอพอลิเมอร์ที่การเผาอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสมี  $\text{Si/Al}$  เท่ากับ 1.75 [20]

Zhang และคณะ [21] ศึกษาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แก้ลรอยแคลเซียมต่ำพบว่ากำลังอัด กำลังดัด กำลังดึงและกำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 100 องศาเซลเซียสหลังจากนั้นกำลังลดลงที่อุณหภูมิการเผา 300-700 องศาเซลเซียสจากการศึกษาของ Duan และคณะ [7] พบว่าคอนกรีตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เผาที่อุณหภูมิสูงนอกจากนี้ความพรุนและขนาดโพรงวิกฤตก็ให้ผลในทิศทางเดียวกันจากการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุทนไฟ เช่น อิฐจีโอพอลิเมอร์ทนไฟ [22] พบว่าจีโอพอลิเมอร์แก้ลรอยแคลเซียมสูงสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทนไฟ และผนังทนไฟได้

แก้วลอย (Fly ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินจากการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับประเทศไทยเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากการศึกษาของ Chindaprasit และคณะ [23] พบว่ามีแก้วลอยประมาณปีละ 3 ล้านตัน ในการใช้แก้วลอยเป็นวัสดุตั้งต้นพบว่าการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 องศาเซลเซียสจะให้กำลังต่ำ จึงต้องเร่งอุณหภูมิการบ่มไปที่ประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส [14] สำหรับแก้วลอยในประเทศไทยเป็นแก้วลอยแคลเซียมสูงมีปริมาณแคลเซียมมากกว่าร้อยละ 15 [24, 25] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแก้วลอยแคลเซียมสูงมีผลต่อการทำปฏิกิริยาเนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วยในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไร้เซชันทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และจีโอพอลิเมอร์เจลส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ [26, 27] นอกจากนี้ การศึกษาของ Hanjitsuwan และคณะ [28] ซึ่งศึกษาแก้วลอยแคลเซียมสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ยังพบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มผลผลิตภายในระบบจีโอพอลิเมอร์ทำให้โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีความแน่นและส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น หลังจากนั้น Lee และ Lee [29] พบว่า C-A-S-H และ N-A-S-H เกิดปฏิกิริยาร่วมกันเป็น N-C-A-S-H เจลส่งผลในทางบวกต่อสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีความสามารถทนไฟได้ดีกว่าคอนกรีต นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของจีโอพอลิเมอร์แก้ลรอยแคลเซียมต่ำที่เผา

ที่อุณหภูมิสูงมากพอสมควร [30-32] ในขณะที่ในประเทศไทย แก้วลอยส่วนใหญ่เป็นแก้วลอยแคลเซียมสูง การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้วลอยแคลเซียมสูงยังมีค่อนข้างน้อย

ในงานวิจัยนี้เตรียมตัวอย่างเป็นเพสต์เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างและทดสอบโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เป็นการทดสอบตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงผลของมวลรวมในการทดสอบ ดังนั้นจึงศึกษากำลังอัด กำลังตัดและโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสซึ่งผลการทดสอบที่ได้ทำให้เข้าใจผลของวัสดุประสานต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่เผาที่อุณหภูมิสูง สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างต่างๆ เป็นวัสดุก่อสร้างทนไฟ นอกจากนี้ ยังช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตปูนซีเมนต์รวมถึงลดปัญหาเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้ง

## 2. วัสดุและการทดสอบ

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในที่นี้ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นแก้วลอย (Fly Ash, FA) จากการเผาถ่านหินที่โรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง มีความถ่วงจำเพาะ 2.13 ลักษณะสีเทาปนน้ำตาลเป็นแก้วลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 33.4 17.8 และ 11.9 ตามลำดับและ  $\text{CaO}$  ร้อยละ 17.0 จากการวิเคราะห์ Scanning Electron Microscopy (SEM) ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคทรงกลมขนาดของอนุภาคเฉลี่ย 21.4 ไมครอน

### 2.2 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

การผสมจีโอพอลิเมอร์เพสต์ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนผสมสารละลายต่าง ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ ) ต่อแก้วลอย (Fly Ash, FA) เท่ากับ 0.6

### 2.3 การทดสอบกำลังอัด

หล่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มิลลิเมตรและห่อตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้นหลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ

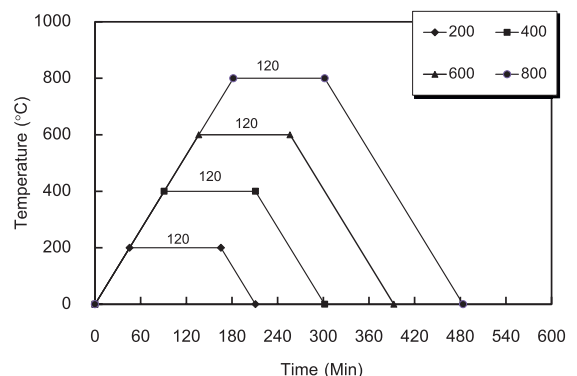
ห้อง 25-30 องศาเซลเซียสทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน ส่วนการทดสอบกำลังอัดเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงใช้ตัวอย่างการบ่มที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [33]

## 2.4 การทดสอบกำลังตัด

หล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ลงในแบบขนาด  $40 \times 40 \times 160$  มิลลิเมตรห่อด้วยแผ่นพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้นหลังจากถอดแบบที่ 24 ชั่วโมง หุ้มด้วยแผ่นพลาสติกและเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการที่ 25-30 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบที่ 28 วันแล้วนำไปทดสอบที่อุณหภูมิห้องและหลังการเผาด้วยอุณหภูมิสูง สำหรับผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C348 [34]

## 2.5 การเผาขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง

นำตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วันที่ใช้ทดสอบกำลังอัดและกำลังตัดจัดวางในเตาเผา โดยจัดช่องว่างระหว่างตัวอย่างให้เหมาะสมการเผาขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงแสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 4.4 องศาเซลเซียสต่อนาที [35] ช่วงสองตั้งอุณหภูมิคงที่ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที [35] เมื่อความร้อนลดลงถึงอุณหภูมิห้องจึงนำก้อนตัวอย่างออกจากเตาเผาหลังจากนั้นทดสอบกำลังอัดและกำลังตัด



รูปที่ 1 การทดสอบการเผาขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง

## 2.6 การทดสอบขนาดโพรงของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

ทดสอบขนาดโพรงของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ด้วยเครื่องมือ Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) โดยนำตัวอย่างที่มีขนาดประมาณ 3-5 มม. ใส่ในแท่งตัวอย่าง (Penetrometer) แล้วปรับให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และนำแท่งตัวอย่างไปซังน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูงเพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

## 2.7 การทดสอบด้วยวิธีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

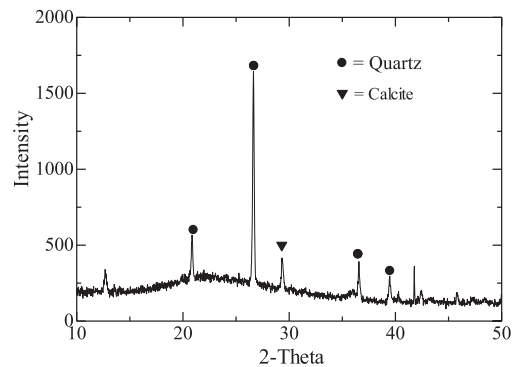
ทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำและไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง JSM-6460LA Model Scanning Electron Microscope (JEOL, Japan)

## 3. ผลการศึกษา

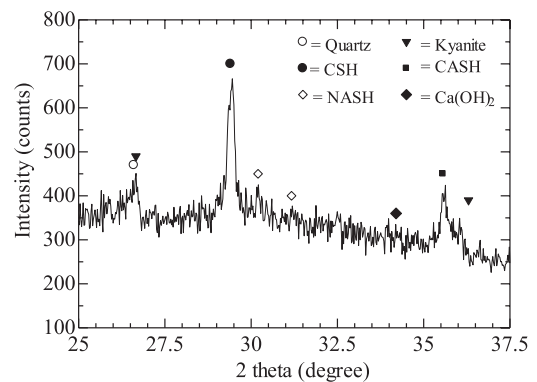
### 3.1 องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ แก้าลอยและแก้าลอยแคลเซียมสูง

รูปที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้าลอยและแก้าลอยแคลเซียมสูง โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2 ก) พบว่าแก้าลอยประกอบไปด้วย Quartz และ Calcite ที่ไม่เป็นผลึก นอกจากนี้พบพีคกระจายอยู่ระหว่างมุม 20-30 องศา สำหรับรูปที่ 2 ข) แสดงจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้าลอยแคลเซียมสูง (GP) พบว่าแคลเซียมออกไซด์ในแก้าลอยทำปฏิกิริยากับซิลิเกตได้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ C-S-H และแคลเซียมอลูมินาซิลิเกตไฮดรอกไซด์ปรากฏพีคที่มุม 29.36 และ 35.58 องศาตามลำดับนอกจากนี้พบพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่มุม 34.20 องศาซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อแก้าลอยทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้อลูมิเนตซิลิเกตไฮดรอกไซด์หรือจีโอพอลิเมอร์โรเซชัน N-A-S-H ปรากฏพีคที่มุม 30.20 และ 31.17 องศา อย่างไรก็ตามการบ่มที่อุณหภูมิห้องที่ 25-30 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดพีคของสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต หรือ Kyanite ที่มุม 26.66 และ 36.30 องศาซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chindaprasirt และ

Rattanasak [36] ซึ่งพบว่าการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิกลางวันประมาณ 35 องศาเซลเซียสและกลางคืนอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียสพบพีค Kyanite ที่มุมประมาณ 35-36 องศาการใช้แก้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นผสมจีโอพอลิเมอร์ทำให้ได้ C-S-H และ C-A-S-H ส่งผลในการทำปฏิกิริยาร่วมกับปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์โรเซชัน N-A-S-H เป็นปฏิกิริยา N-C-A-S-H ซึ่งแสดงความเป็นอสัณฐานที่มุม 25-36 องศา ความเป็นอสัณฐานของจีโอพอลิเมอร์ที่มุมดังกล่าวส่งผลต่อการกักตัวของจีโอพอลิเมอร์เนื่องจากการทำปฏิกิริยาร่วมทำให้มีความแน่นของเนื้อเพสต์นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาของ Chindaprasirt และ Rattanasak [22] พบว่าจีโอพอลิเมอร์แก้าลอยแคลเซียมสูงบ่มด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีผลดีต่อระบบจีโอพอลิเมอร์ในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทนไฟ



ก) แก้าลอย



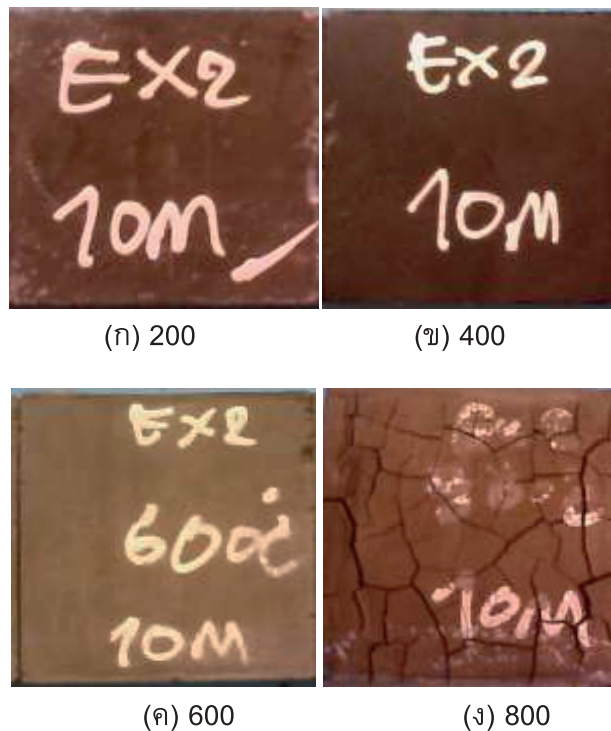
ข) จีโอพอลิเมอร์เพสต์

รูปที่ 2 องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้าลอยและแก้าลอยแคลเซียมสูง

### 3.2 ลักษณะทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาอุณหภูมิสูง

ลักษณะทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาอุณหภูมิสูงแสดงดังรูปที่ 3 พบว่าการเผาจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิ 200 และ 400 องศาเซลเซียสไม่ทำให้สีของก้อนตัวอย่างเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้อุณหภูมิการเผาที่ 600 องศาเซลเซียสทำให้สีของก้อนตัวอย่างเปลี่ยนแปลงเป็นสีเทาและเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มเป็น 800 องศาเซลเซียสสีของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เปลี่ยนแปลงเป็นสีแดงเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิด

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $Fe_2O_3$  ในถ้ำลอยสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ [6, 35] เมื่อพิจารณา ร้อยรั้วพบว่า เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เพสต์เกิดรอยแตกกว้างขนาดประมาณ 1-2 มม. การปรากฏ ร้อยรั้วเกิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้จีโอพอลิเมอร์เจลขยายตัวและเมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้เกิดการหดตัวของตัวอย่างส่งผลให้เกิดการแตกร้าวที่ผิวของเพสต์ [35, 37] ดังนั้นการเผาจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสส่งผลให้สีตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์เปลี่ยนแปลงไปและเริ่มปรากฏรอยแตกกว้างเกิดขึ้นในเพสต์

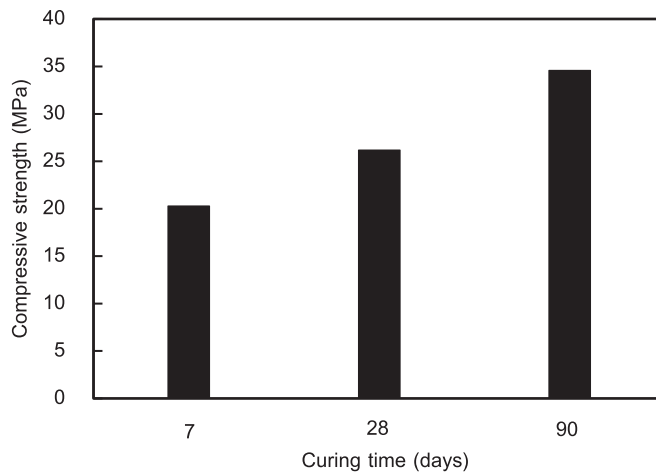


รูปที่ 3 ภาพถ่ายลักษณะทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาอุณหภูมิสูง

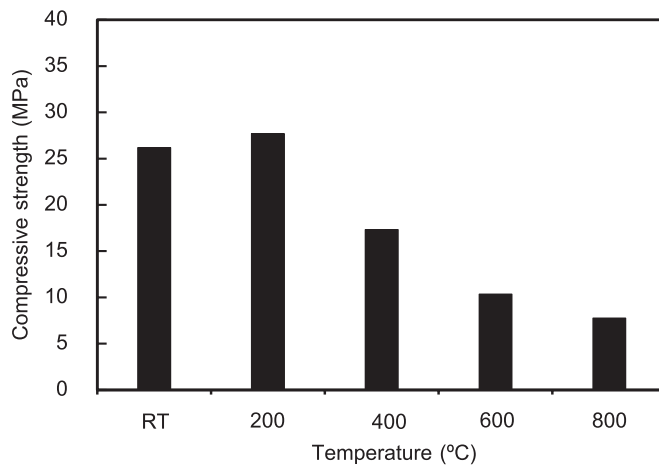
### 3.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วันกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่าเท่ากับ 20.326.2 และ 34.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สอดคล้องกับ

ผลการศึกษาของ Hanjitsuwan และคณะ [38] ซึ่งรายงานว่าการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมออกไซด์ส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และทำปฏิกิริยาร่วมกับจีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิที่เผาต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิที่เผาต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 27.7 17.3 10.4 และ 7.8 เมกะปาสคาล หรือร้อยละ 105.7 66.2 39.5 และ 29.6 ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ควบคุม (RT) ตามลำดับ กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาว่าจีโอ-

พอลิเมอร์เพสต์ที่เผาที่ 200 องศาเซลเซียส มีกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้เถ้าลอยบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยามีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้นส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดของเพสต์ [7, 19] เมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียสกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ลดลงอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิการเผาเพิ่มเป็น 800 องศาเซลเซียสกำลังอัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากกำลังอัดที่ลดลงเกิดจากอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ใน

โครงสร้างผลึก C-S-H C-A-S-H และ N-A-S-H เจลพยายามระเหยออกจากจีโอพอลิเมอร์เพสต์ซึ่งทำให้เกิดแรงดันส่งผลให้โพรงของจีโอพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นนักวิจัยมีการศึกษาโดยใช้วิธี Thermogravimetric analysis (TGA) จากผลการศึกษาของ Kroehong และคณะ [39] พบว่าอุณหภูมิการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสลายตัวของ C-S-H และ C-A-S-H ซึ่งส่งผลหลักต่อกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์นอกจากนี้ Chindaprasirt และ Rattanasak [40] พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสลายตัวของ  $Ca(OH)_2$  และเมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 750 องศาเซลเซียสทำให้เกิดการสลายตัวของ  $CaCO_3$  ได้เป็นสาร  $CaO$  และ  $CO_2$  นอกจากนี้ การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสทำให้เพสต์ถูกทำลายซึ่งส่งผลให้เกิดการขยายตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ [41] สอดคล้องกับผลการศึกษาว่าที่อุณหภูมิการเผา 400 และ 600 องศาเซลเซียส กำลั้งอัดลดลงอย่างรวดเร็วสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Abdulkareem และคณะ [35] ซึ่งพบว่ากำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาที่ 400 และ 600 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับร้อยละ 62.2 และ 43.5 ของจีโอพอลิเมอร์ควบคุมตามลำดับ นอกจากนี้ Zhang และ คณะ [6] พบว่าจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก่ลดยืดแคลเซียมต่ำที่เผาที่ 800 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับร้อยละ 25 ของจีโอพอลิเมอร์ควบคุมซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

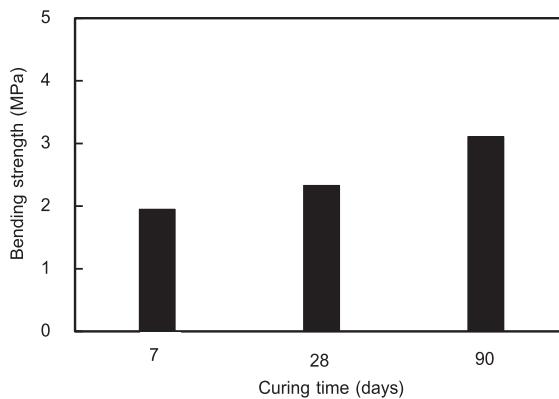
### 3.4 กำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

รูปที่ 6 แสดงกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์พบว่าอายุการบ่ม 7 28 และ 90 วันกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่าเท่ากับ 2.0 2.3 และ 3.1 เมกะปาสคาลตามลำดับ กำลั้งอัด

มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มผลการศึกษาของ Phoo-ngernkham และคณะ [24] รายงานว่าแคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุตั้งต้น ซึ่งทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตเป็นผลดีต่อกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์

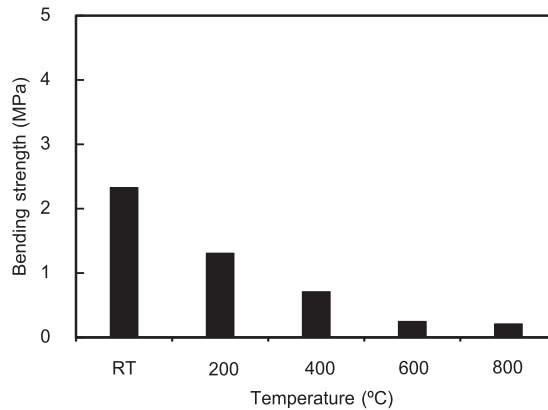
รูปที่ 7 แสดงผลของอุณหภูมิที่เผาต่อกำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 28 วันพบว่ากำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์อุณหภูมิ การเผาที่ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 1.3 0.7 0.3 และ 0.2 เมกะปาสคาลหรือประมาณร้อยละ 56.2 30.5 10.7 และ 9.0 ของจีโอพอลิเมอร์ควบคุมตามลำดับ เพราะว่าการเผาตัวอย่างเพสต์ทำให้น้ำในโครงสร้างผลึกของ C-S-H C-A-S-H และ N-A-S-H เจลระเหยเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสทำให้ C-S-H และ C-A-S-H เกิดการสลายตัวส่งผลต่อการรับกำลั้งอัด ขณะที่อุณหภูมิการเผาที่ 450 องศาเซลเซียสทำให้  $Ca(OH)_2$  สลายตัวและเมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 750 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสลายตัวของ  $CaCO_3$  ได้เป็นสาร  $CaO$  และ  $CO_2$  [39] เมื่อเพสต์ผ่านการเผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เนื้อเจลถูกทำลาย ซึ่งส่งผลเกิดการแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ทำให้ความสามารถในการรับกำลั้งอัดลดลง [41] จากผลการศึกษาของ Zhang และคณะ [6] พบว่ากำลั้งรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์อุณหภูมิการเผาที่ 800 องศาเซลเซียสมีค่าประมาณร้อยละ 8 ของกำลั้งอัดควบคุม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปที่ 5 และรูปที่ 7 พบว่ากำลั้งอัดมีค่าลดลงมากกว่ากำลั้งอัด เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้โครงสร้างโพรงภายในของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีรอยร้าวในเพสต์ทำให้กำลั้งรับแรงอัดค่อนข้างเปราะกว่าการรับกำลั้งอัด [21]



รูปที่ 6 กำลั้งอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์





รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิที่เผาต่อกำลังดัดของอีพ็อกซีเรซินที่อายุการบ่ม 28 วัน

### 3.5 ความพรุนและการกระจายตัวของโพรงของอีพ็อกซีเรซิน

ความพรุนและการกระจายตัวของโพรงอีพ็อกซีเรซินแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าความพรุนทั้งหมดของอีพ็อกซีเรซินที่เผาที่ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.0 31.5 34.7 และ 38.9 ความพรุนของอีพ็อกซีเรซินที่มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 15 27 และ 42 ของ

อีพ็อกซีเรซินที่ควบคุมตามลำดับความพรุนอีพ็อกซีเรซินเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิทำให้น้ำระเหยเกิดแรงดันในเนื้อพาสต์ เมื่ออุณหภูมิการเผาที่ 400-800 องศาเซลเซียสส่งผลให้ C-S-H C-A-S-H และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  สลายตัวทั้งหมด [41] การสลายตัวของสารประกอบในเนื้อพาสต์ทำให้เกิดช่องว่างที่เพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิการเผาที่ 800 องศาเซลเซียสเนื้อเจลของพาสต์ถูกทำลายส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวและมีความพรุนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย

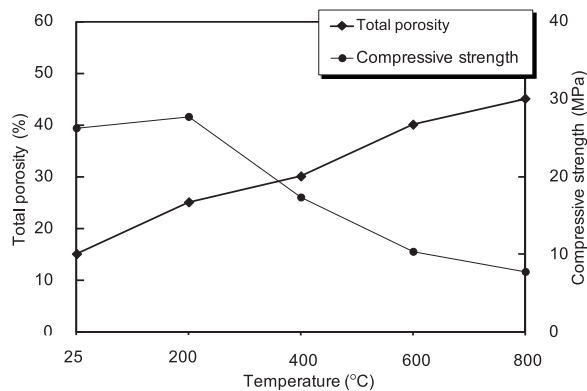
องค์ประกอบหลักทางเคมี	FA (%)
$\text{SiO}_2$	33.4
$\text{Al}_2\text{O}_3$	17.8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	11.9
CaO	17.0
MgO	2.1
$\text{Na}_2\text{O}$	1.5
$\text{K}_2\text{O}$	2.4
$\text{SO}_3$	3.6
LOI	2.1
$(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	63.1

## ตารางที่ 2 ความพรุนและการกระจายตัวของโพรงจีโอพอลิเมอร์เฟสดี

Temperature (°C)	Porosity at 28 days (%)				
	Total pore	Gel pore	Medium capillary pore	Large capillary pore	Extra large pore
25	27.5	21.7	27.3	45.0	6.0
200	29.0	19.2	29.7	44.3	6.8
400	31.5	10.2	23.6	56.2	10.0
600	34.7	2.7	22.8	63.2	11.2
800	38.9	1.2	11.3	74.1	13.4

เมื่อพิจารณาการกระจายของโพรงจีโอพอลิเมอร์เฟสดีพบว่า ขนาดของโครงสร้างโพรงแบ่งออกเป็นสี่ประเภทคือ โพรงเจล (Gel Pore) ที่มีขนาดโพรงเล็กกว่า 10 นาโนเมตร โพรงคาปิลารีขนาดกลาง (Medium Capillary Pore) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 10–50 นาโนเมตร โพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large Capillary Pore) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 50 นาโนเมตร –

10 ไมครอน และโพรงอากาศ (Air Void) คือโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอนโครงสร้างโพรงของเฟสดีส่วนใหญ่เป็นโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่รองลงมาเป็นโพรงคาปิลารีขนาดกลาง นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นทำให้ปริมาณโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่และโพรงอากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้นขณะที่โพรงคาปิลารีขนาดกลางและโพรงเจลมีปริมาณลดลง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างพุนและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เฟสดีที่เผาอุณหภูมิสูง

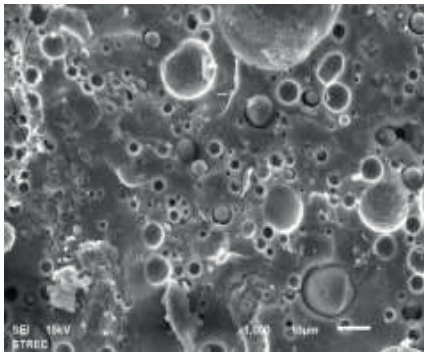
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพุนและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เฟสดีที่เผาอุณหภูมิสูงพบว่าความพุนของจีโอพอลิเมอร์เฟสดีมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาสูงขึ้น ขณะที่กำลังอัดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามจีโอพอลิเมอร์เฟสดีที่เผาที่ 200 องศาเซลเซียสมีกำลังอัดสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์เฟสดีควบคุมเล็กน้อย

เนื่องจากแก้วลอยบางส่วนยังไม่ทำปฏิกิริยาและเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ส่งผลการทำปฏิกิริยาของแก้วลอยสมบูรณ์ขึ้น นอกจากนี้ ทำให้โครงสร้างโพรงคาปิลารีขนาดกลางมีความละเอียดทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

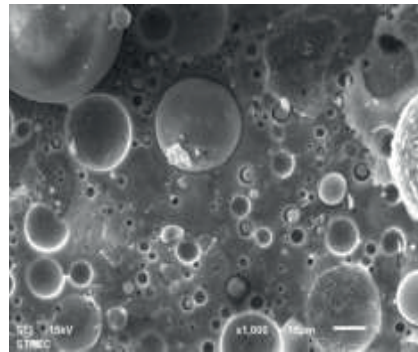
### 3.6 ภาพขยาย Fractured Surface ของ จีโอพอลิเมอร์เพสต์

ภาพขยาย Fractured Surface ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แสดงดังรูปที่ 9 เมื่อพิจารณารูปที่ 9 ก) พบว่าลักษณะถ้ำลอยจีโอพอลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วยอนุภาคถ้ำลอยที่ทำให้ปฏิกิริยา ไม่ทำปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยาบางส่วน การทำปฏิกิริยาของถ้ำลอยทำให้เกิดจีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในรูปที่ 9 ข) ซึ่งแสดงตัวอย่างของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาที่ 200 องศาเซลเซียส

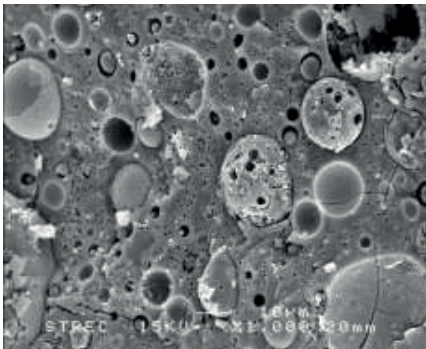
โครงสร้างโพรงมีขนาดเล็กลดลงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเพสต์ควบคุมสำหรับรูปที่ 9 ค) ตัวอย่างที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์เพสต์เริ่มปรากฏมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กจากการสลายตัวของปฏิกิริยาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตกรณีการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ดังในรูปที่ 9 ง) พบรอยแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 9 จ) ที่อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียสพบว่า จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีรอยแตกร้าวที่มีขนาดกว้างและโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ถูกทำลาย [35]



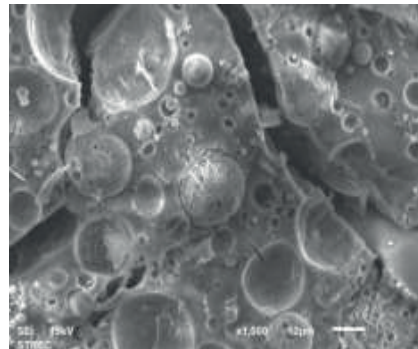
(ก) อุณหภูมิห้อง



(ข) 200



(ค) 400



(ง) 600

รูปที่ 9 ภาพขยาย Fractured Surface ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาอุณหภูมิสูง

## 4. สรุปผล

จากผลการศึกษาค้นคว้าของการเผาที่อุณหภูมิสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ถ้ำลอยแคลเซียมสูง สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ลักษณะทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ถ้ำลอย

แคลเซียมสูงที่เผาที่ 600 องศาเซลเซียสมีสีของก้อนตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปและเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มเป็น 800 องศาเซลเซียสตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าว

2) กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ถ้ำลอยแคลเซียมสูง

ที่เผาที่ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 105.7 66.1 39.5 และ 29.6 ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ควบคุมตามลำดับ ขณะที่กำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผา ที่ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับร้อยละ 56.2 30.5 10.7 และ 9.0 ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ควบคุม

3) ความพรุนของจีโอพอลิเมอร์เพสต์แก้ล้อยแคลเซียมสูง มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้น นอกจากนี้ โพรงส่วนใหญ่ ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เป็นโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่และโพรง อากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โพรงคาปิลารีขนาดกลางและ โพรงเจลมีปริมาณลดลง

4) จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่เผาที่ 200 องศาเซลเซียสมีลักษณะ ทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ ตัวอย่างควบคุม เมื่ออุณหภูมิการเผาเป็น 400 องศาเซลเซียส จีโอพอลิเมอร์เพสต์เริ่มปรากฏรูพรุนและรอยแตกร้าวขนาด เล็กนอกจากนี้ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสพบว่า รอยแตกร้าวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีขนาดกว้างขึ้น และเมื่อ อุณหภูมิการเผาเป็น 800 องศาเซลเซียสจีโอพอลิเมอร์เพสต์ เสียหายมีรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นและโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์เจลถูก ทำลาย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลตะวันออกสัณฐานที่ ง 34/2560 ขอขอบคุณคณะ วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ วิทยาเขตอุเทนถวาย สาขาวิศวกรรมโยธาที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการ ดำเนินการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Shoaib, M.M., Ahmed, S.A. and Balaha, M.M., 2001, "Effect of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars," *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1533-1538.
2. Seleem, H.E.D.H., Rashad, A.M. and Elsokary, T., 2011, "Effect of Elevated Temperature on Physico-mechanical Properties of Blended/Cement Concrete," *Construction and Building Materials*, 25, pp. 1009-1017.
3. L, P.C., 1992, "Fire Damaged Concrete-up Close,"

*Concrete Repair Digest*.

4. AH, G., 1983, Experiences from Evaluating Fire-damaged Concrete Structures Fire Safety of Concrete Structures, American Concrete Institute.
5. Cheng, T.W. and Chiu, J.P., 2003, "Fire-Resistant Geopolymer Produced by Granulated Blast Furnace Slag," *Minerals Engineering*, 16, pp. 205-210.
6. Zhang, H.Y., Kodur, V., Qi, S.L., Cao, L. and Wu, B., 2014, "Development of Metakaolin-Fly Ash Based Geopolymers for Fire Resistance Applications," *Construction and Building Materials*, 55, pp. 38-45.
7. Duan, P., Yan, C., Zhou, W. and Luo, W., 2016, "Thermal Behavior of Portland Cement and Fly Ash-Metakaolin-Based Geopolymer Cement Pastes," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, pp. 2261-2269.
8. Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E. and Maltseva, O., A. and Fernández-Jiménez, A., 2014, "A Review on Alkaline Activation: New Analytical Perspectives," *Materiales de Construcción*, 64, pp. 150-160.
9. Davidovits, J., 1999, "Chemistry of Geopolymeric Systems. Terminology," *Proceedings of Geopolymer 99 Conference*, Saint-Quentin, pp. 9-40.
10. Xie, T. and Ozbakkaloglu, T., 2015, "Behavior of Low-calcium Fly and Bottom Ash-based Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature," *Ceramics International*, 41, pp. 5945-5958.
11. Ranjbar, N., Mehrli, M., Behnia, A., Alengaram, U.J. and Jumaat, M.Z., 2014, "Compressive Strength and Microstructural Analysis of Fly Ash/Palm Oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar," *Materials and Design*, 59, pp. 532-539.
12. Sturm, P., Gluth, G.J.G., Brouwers, H.J.H. and Kühne, H.C., 2016, "Synthesizing One-part Geopolymers from Rice Husk Ash," *Construction and Building Materials*, 124, pp. 961-966.

13. Mo, B.-H., Zhu, H., Cui, X.-M., He, Y. and Gong, S.-Y., 2014, "Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-based Geopolymers," *Applied Clay Science*, 99, pp. 144-148.
14. Bakharev, T., 2006, "Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing," *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 1134-1147.
15. J., D., 1999, "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology," *Proceedings of Second International Conference on Geopolymers*, Saint-Quentin, pp. 9-40.
16. Z. Li, Z.D. and Zhang, Y., 2004, "Development of Sustainable Cementitious Materials," *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, pp. 55-76.
17. Kong, D.L.Y. and Sanjayan, J.G., 2010, "Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete," *Cement and Concrete Research*, 40, pp. 334-339.
18. Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G. and Sagoe-Crentsil, K., 2007, "Comparative Performance of Geopolymers Made With Metakaolin and Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures," *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 1583-1589.
19. Hussin, M.W., Bhutta, M.A.R., Azreen, M., Ramadhansyah, P.J. and Mirza, J., 2015, "Performance of Blended Ash Geopolymer Concrete at Elevated Temperatures," *Materials and Structures*, 48, pp. 709-720.
20. Lahoti, M., Wong, K.K., Yang, E.-H. and Tan, K.H., 2018, "Effects of Si/Al Molar Ratio on Strength Endurance and Volume Stability of Metakaolin Geopolymers Subject to Elevated Temperature," *Ceramics International*, 44, pp. 5726-5734.
21. Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L. and Wang, F., 2016, "Thermal Behavior and Mechanical Properties of Geopolymer Mortar After Exposure to Elevated Temperatures," *Construction and Building Materials*, 109, pp. 17-24.
22. Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U., 2018, "Fire-resistant Geopolymer Bricks Synthesized from High-calcium Fly Ash with Outdoor Heat Exposure," *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, pp. 1097-1103.
23. Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V., 2007, "Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer," *Cement and Concrete Composites*, 29, pp. 224-229.
24. 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, pp. 127-137. (In Thai)
25. 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)
26. 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, pp. 214-20.
27. Guo, X., Shi, H. and Dick, W.A., 2010, "Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer," *Cement and Concrete Composites*, 32, pp. 142-147.
28. 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)
29. Lee, N.K. and Lee, H.K., 2015, "Reactivity and Reaction Products of Alkali-activated, Fly Ash/Slag Paste," *Construction and Building Materials*, 81, pp.

303-312.

30. Wei, J. and Meyer, C., 2014, "Sisal Fiber-reinforced Cement Composite With Portland Cement Substitution by a Combination of Metakaolin and Nanoclay," *Journal of Materials Science*, 49, pp. 7604-7619.

31. Raut, A.N. and Gomez, C.P., 2016, "Thermal and Mechanical Performance of Oil Palm Fiber Reinforced Mortar Utilizing Palm Oil Fly Ash as a Complementary Binder," *Construction and Building Materials*, 126, pp. 476-483.

32. Sá Ribeiro, R.A., Sá Ribeiro, M.G., Sankar, K. and Kriven, W.M., 2016, "Geopolymer-bamboo Composite—A Novel Sustainable Construction Material," *Construction and Building Materials*, 123, pp. 501-507.

33. 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 Standards*, Vol.04.01.

34. ASTM C348.,2002, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.01.

35. Abdulkareem, O.A., Mustafa Al Bakri, A.M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I. and Saif, A.e.A., 2014, "Effects of Elevated Temperatures on the Thermal Behavior and Mechanical Performance of Fly Ash Geopolymer Paste, Mortar and Lightweight Concrete," *Construction and Building Materials*, 50, pp. 377-387.

36. Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U., 2017, "Synthesis of Polypropylene Fiber/High-Calcium Fly Ash Geopolymer with Outdoor Heat Exposure," *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, pp. 1985-1992.

37. Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z., 2014, "Effect of Fire Exposure on Cracking, Spalling and Residual Strength of Fly Ash Geopolymer Concrete," *Materials and Design*, 63, pp. 584-592.

38. Hanjitsuwan, S. and Phoo-ngernkham, T., 2017, "Utilization of Calcium Carbide Residue in Bottom Ash Geopolymer : Study on Mechanical, Mineral Composition and Molecular Structure Properties," *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (3), pp. 461-471. (In Thai)

39. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2011, "Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness on the Microstructure of Blended Cement Paste," *Construction and Building Materials*, 25, pp. 4095-4104.

40. Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U., 2017, "Characterization of the High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar with Hot-Weather Curing Systems for Sustainable Application," *Advanced Powder Technology*, 28, pp. 2317-2324.

41. Behera, P., Baheti, V., Milityk, J. and Louda, P., 2018, "Elevated Temperature Properties of Basalt Microfibril Filled Geopolymer Composites," *Construction and Building Materials*, 163, pp. 850-860.