

ผลของต่างและอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากของเสียในอุตสาหกรรมเซรามิก

จิรนนท์ พันโท¹ ธนวัฒน์ เครืองจักร¹ นงลักษณ์ เข้มก่าเหน็ด¹ ธีระวุฒิ มูฮำหมัด²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

และ รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี) ตำบลรางบัว อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี 70150

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของต่างและอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากบิสกิต ซึ่งเป็นของเสียในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยมีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 4.31 โดยโมล และใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่มีอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15 0.2 0.25 และ 0.3 โดยโมล เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน และบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 2 และ 3 วัน ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงสุด ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 และสภาวะที่เหมาะสมในการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์จากบิสกิต คือ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ซึ่งสามารถใช้แทนก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน ได้ โดยก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกยังพบ Sodium Aluminum Silicate ($\text{Na}_{1.84}\text{Al}_2\text{Si}_{2.88}\text{O}_{9.68}$) ในก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และพบ Potassium Aluminum Hydride (KAlH_4) และ Muscovite ($\text{KAl}_2\text{SiO}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) ในก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

คำสำคัญ : กำลังรับแรงอัด / จีโอพอลิเมอร์ / โซเดียมไฮดรอกไซด์ / โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ / บิสกิตเซรามิก

* Corresponding Author : rungroj.piy@kmutt.ac.th

1 นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
2 อาจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี

Effects of Curing Temperature and Alkali Concentration on Compressive Strength of Geopolymer Synthesized from Ceramic Waste

Jiranon Panto¹ Thanawat Kuengjuk¹ Nongluk Khemkumnert¹ Teerawut Muhummud²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thungkhru, Bangkok 10140

and Rungroj Piyaphanuwat^{3*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi (Ratchaburi), Rang Bua, Chom Bueng, Ratchaburi 70150

Abstract

This research investigated the effects of alkali concentration and curing temperature on the properties of synthetic geopolymer made from ceramic waste biscuit. Sodium hydroxide (NaOH) and Potassium hydroxide (KOH) were used as alkali activator at the $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ and $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ratios of 0.15, 0.20, 0.25 and 0.30 by mole; curing was made at the room temperature (around 30°C) for 3, 7, 14, and 28 days and at higher curing temperatures of 50 and 70°C for 1, 2, and 3 days. The experimental results showed that the maximum compressive strength was achieved when $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ and $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ at the ratios of 0.20 and 0.3, respectively, were used. The optimum curing condition for the geopolymer made from biscuit was 70°C for 2 days, which gave similar results as curing at room temperature for 14 days. The compressive strength of geopolymer activated by sodium hydroxide was higher than that activated by potassium hydroxide. In addition, from the XRD results, the crystal of sodium aluminum silicate ($\text{Na}_{1.84}\text{Al}_2\text{Si}_{2.88}\text{O}_{9.68}$) was found in geopolymer activated by sodium hydroxide, and those of potassium aluminum hydride (KAlH_4) and Muscovite ($\text{KAl}_2\text{SiO}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) were found in geopolymer activated by sodium hydroxide.

Keywords : Strength / Geopolymer / Sodium Hydroxide / Potassium Hydroxide / Ceramic

* Corresponding Author : rungroj.piy@kmutt.ac.th

¹ Bachelor's degree Student, Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

² Lecturer, Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

³ Assistant Professor, Ratchaburi Learning Park.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากเซรามิกถูกนำมาใช้เป็นเครื่องใช้ต่างๆ ภายในบ้านหลายชนิด เช่น ภาชนะสำหรับใส่อาหาร เครื่องตกแต่งบ้านทั้งภายใน และภายนอก โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้การผลิตเซรามิกคือ ดิน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการผลิตเซรามิกในรูปแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของดินที่จะนำมาใช้ เช่น ดินขาวจะถูกนำมาใช้ในการผลิตเซรามิกประเภทปอชเลนซ์ ใช้ในการผลิตภาชนะ และเครื่องประดับภายในบ้าน ดินเหนียวในแถบราชบุรี สามารถนำมาใช้ในการผลิตโอ่ง กระถางต้นไม้ เครื่องประดับสวนได้ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมเซรามิกประเภทปอชเลนซ์ ดินขาวจะถูกนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกต่างๆ จากนั้นนำมาทำการอบแห้งด้วยความร้อนซึ่งในขั้นตอนการเคลื่อนย้าย หรือการเพิ่มอุณหภูมิในเตาเผาอาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายได้ ซึ่งเรียกผลิตภัณฑ์ที่เกิดความเสียหายว่า บิสกิต ซึ่งไม่สามารถที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากจะต้องนำมาทำการบดให้ละเอียด อีกทั้งยังทำให้ลักษณะทางกายภาพ และความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ที่ผลมลดลง ดังนั้น ในปัจจุบันจึงได้มีการกอบกึ่งเศษบิสกิตเป็นจำนวนมาก ทำให้ทางโรงงานต้องเสียพื้นที่ในการกอบกึ่ง และค่าใช้จ่ายในการขนย้ายไปทิ้งในแหล่งฝังกลบเป็นจำนวนมาก

ปัจจุบันวัสดุก่อสร้างประเภท คอนกรีต คอนกรีตมวลเบา บล็อกประสาน อิฐบล็อก จะใช้ปูนซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเช่น ฝุ่นจากการระเบิดภูเขา หรือการบดวัตถุดิบ ก๊าซเรือนกระจก อีกทั้งในการเผาปูนซีเมนต์ยังต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,450 – 1,500 องศาเซลเซียส ทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงในการเผาในปริมาณมาก ดังนั้น ในปัจจุบันจึงได้มีการลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงโดยการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรมที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอชเลนซ์มาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนหรือการใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์แทนปูนซีเมนต์ [1-4] จีโอพอลิเมอร์คือวัสดุที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ภายใต้สภาวะที่มีความเป็นต่างสูง ได้สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มี

สมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเถ้าลอยดินขาวตะกอนดินประปาและกากที่เหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวที่ได้จากธรรมชาติ และดินตะกอนประปามาทำการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้สูญเสียเชื้อเพลิงในการเตรียม [5-9] ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากบิสกิต ซึ่งเป็นของเสียในอุตสาหกรรมเซรามิกที่มีซิลิกอน (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักและถูกเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 – 1,500 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษานิตของสารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่าง และอุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

บิสกิตเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกที่เกิดจากกระบวนการเผา ซึ่งได้มาจากบริษัท ภัทราเซรามิก จำกัด (มหาชน) อ.หนองแค จ.สระบุรี จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่อง Los Angeles Aberration เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีร้อยละค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาทำวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของบิสกิตด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ด้วยเครื่อง Wavelength-Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (ยี่ห้อ Bruker รุ่น S4 Explorer, USA) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของบิสกิตมีค่าเท่ากับ 4.31 โดยโมล ส่วนสารกระตุ้นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เป็นสารประเภทต่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้้นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ยี่ห้อ Univar ที่มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก และมีลักษณะเป็นเม็ดมาละลายในน้ำให้ได้ความเข้มข้นตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ตามลำดับเท่ากับ 0.15 0.20 0.25 และ 0.30 โดยโมล ก่อนนำมาผสม

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของบิสกิตเซรามิก

องค์ประกอบทางเคมี	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
ร้อยละโดยน้ำหนัก	67.90	27.92	0.49	2.81	0.16	0.23	0.48

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษาจะนำบิสกิตมาทำการผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นของอัตราส่วน Na₂O/SiO₂ และ K₂O/SiO₂ ตามลำดับเท่ากับ 0.15 0.20 0.25 และ 0.30 โดยโมล ทำการปรับอัตราส่วนผสมของสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้งสองชนิด โดยคำนวณปริมาณซิลิกินไดออกไซด์ (SiO₂) จากบิสกิตในหน่วยของโมล และคำนวณ Na₂O และ K₂O จากสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในหน่วยของโมล จากนั้นนำปริมาณสารที่ได้จากการคำนวณมาทำการผสมน้ำก่อน แล้วจึงนำมาผสมกับบิสกิตที่ผ่านการบด โดยผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-06 [10] จากนั้นเทลงแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร สูง 7 เซนติเมตร และทำการสั่นด้วยโต๊ะสั่นคอนกรีตเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นทำการหุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยน้ำทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดออกจากแบบหล่อ จากนั้นนำจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ไปทำการบ่ม โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 3 7 14 28 และ 56 วัน และการบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 และ 3 วัน ด้วยตู้อบไฟฟ้า (ยี่ห้อ Binder รุ่น RedLine, Germany)

2.3 การทดสอบ

ก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผ่านการบ่มครบตามระยะเวลาจะนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D1633-07 [11] ด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว Unconfined Compressive Strength (ยี่ห้อ ELE International รุ่น G-128-25-3605, Canada) โดยใช้ก้อนตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 6 ก้อนต่อหนึ่งชุดทดลอง และนำผลการทดสอบที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นทำการ

วิเคราะห์ โครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) (ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Discover, USA)

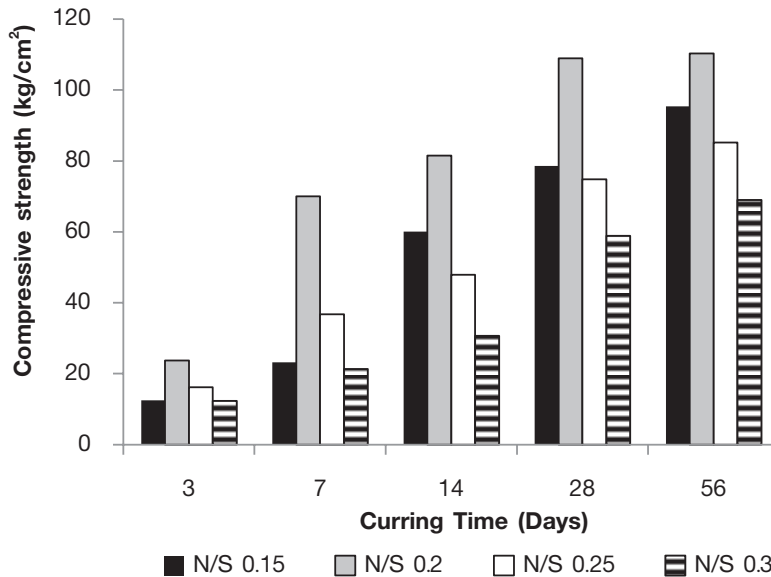
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 1 แสดงการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตที่ใช้สารกระตุ้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของ Na₂O/SiO₂ (N/S) และ K₂O/SiO₂ (K/S) ตามลำดับเท่ากับ 0.15 0.20 0.25 และ 0.30 โดยโมล จากรูปจะเห็นว่า การพัฒนา กำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน Na₂O/SiO₂ เท่ากับ 0.15 โดยโมล มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน เท่ากับ 12.50 ± 0.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 78.60 ± 0.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ Na₂O/SiO₂ เป็น 0.20 โดยโมล พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดทุกอายุการบ่มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 109 ± 0.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจากปริมาณ NaOH ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มการชะละลายไอออนของ Si⁴⁺ และ Al³⁺ ออกมาจากบิสกิต ทำให้ปริมาณ Al(OH)₄⁻ และ Si(OH)₅⁻ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โรเซชันเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น [3, 5-9] แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Na₂O/SiO₂ เป็น 0.25 และ 0.30 โดยโมล พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณไอออนของ Si⁴⁺ และ Al³⁺ ถูกชะละลายออกมามากขึ้น ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นอะลูมิโนซิลิเกตเจล ประกอบกับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์

ในก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มาก ทำให้อะลูมิโนซิลิเกตเจลาเกิด การตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถขัดขวางการเกิด ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ เป็นผลให้ค่ากำลังรับ

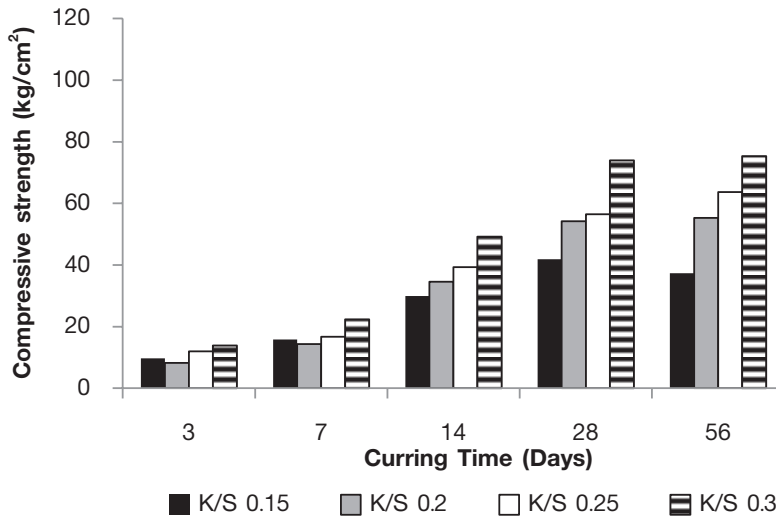
แรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากบิสกิตที่ใช้ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 และ 0.30 โดยโมล มีค่าลดลง [5, 8, 9]



รูปที่ 1 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตที่มีการ กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 2 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อน จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์บิสกิต ที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณ อัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าก่อน จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตทุกอัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุ 7 วัน มีค่าต่ำกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่อัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15 โดยโมล ก้อนจีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลัง รับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 42 ± 0.22 กิโลกรัมต่อ

ตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เป็น 0.3 โดยโมล ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 74 ± 0.34 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่ม ขึ้นตามอัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เนื่องจากความเข้มข้นของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะละลายออกมาจากบิสกิต เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น [8, 12]



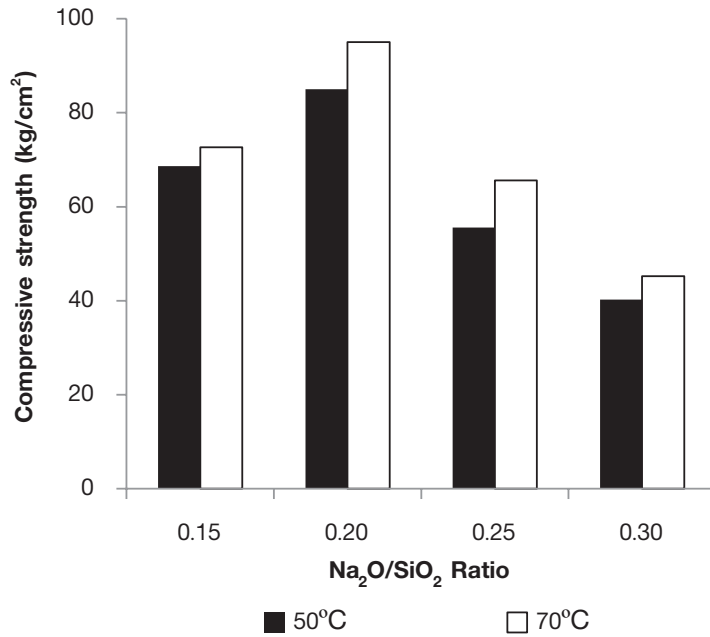
รูปที่ 2 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าก้อนที่มีการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากतिकิริยาของแคตไอออนไฮดรอกไซด์ของ Na^+ มากกว่า K^+ ซึ่งทำให้สามารถชะละลายซิลิกอนไดออกไซด์ออกมาได้มากกว่า ส่งผลให้อัตราการชะละลายสารอะลูมิเนียมซิลิเกตจากบิสกิตได้มากกว่าการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ [12-14] นอกจากนี้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของ Na-O สูงกว่า K-O ทำให้ในสายพอลิเมอร์เกิดพันธะที่มีความแข็งแรงกว่า จึงเป็นผลให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ [14, 15]

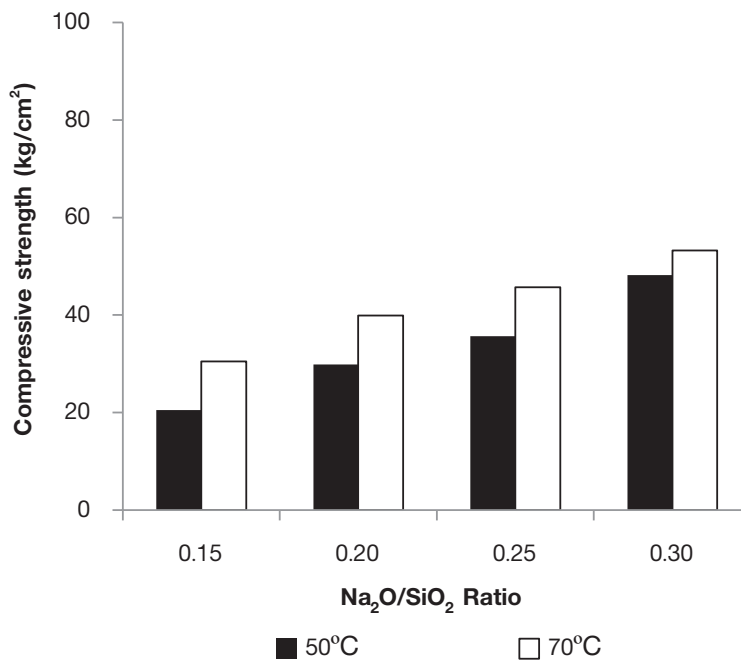
3.2 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

การกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันนอกจากจะใช้สารเคมีประเภทต่างแล้ว ยังสามารถใช้ความร้อนในการบ่มในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำ

ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ที่อัตราส่วนต่างๆ มาทำการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (รูปที่ 3) ผลการศึกษาพบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์ทั้งที่มีการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ทุกอัตราส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะชะละลายไอออนของ Si^{4+} และ Al^{3+} ออกมาจากบิสกิต ทำให้ปริมาณ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ และ $\text{Si}(\text{OH})_5^-$ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15 โดยโมล จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 69 ± 0.33 และ 72 ± 0.45 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน และมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 85 ± 0.12 และ 95 ± 0.56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 โดยโมล ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 และ 0.30 โดยโมล ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง



ก) กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

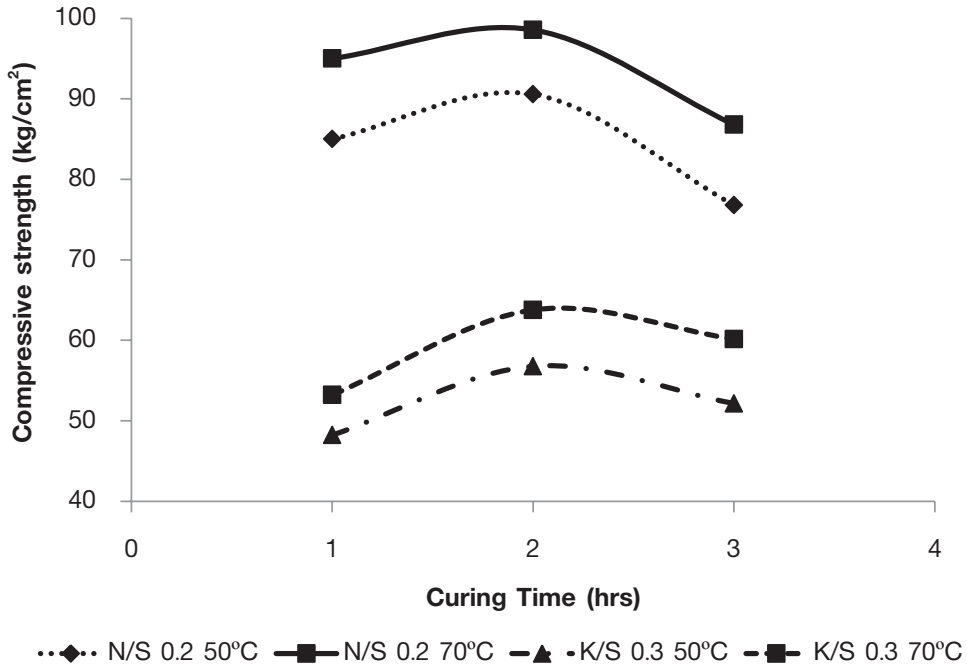


ข) กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 3 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

ก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการบ่ม และอัตราส่วน K_2O/SiO_2 เพิ่มขึ้นเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน (24 ชั่วโมง) ส่วนก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน K_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.15 โดยโมล มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 20 ± 0.33 และ 30 ± 0.48 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน K_2O/SiO_2 เป็น 0.3 โดยโมล ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 48.2 ± 0.44 และ 53 ± 0.52 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การบ่มที่ก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน สามารถทำให้ก่อนจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน จากรูปที่ 3 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 โดยโมล และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน K_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 โดยโมล ที่อุณหภูมิการบ่ม 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำก่อนจีโอพอลิเมอร์ทั้งสองอัตราส่วน มาทำการศึกษาผลของระยะเวลาในการบ่มก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 3 วัน

จากรูปที่ 4 เมื่อระยะเวลาการบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ของก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 โดย โมล และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน K_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 โดยโมล เพิ่มขึ้นเป็นเวลา 2 และ 3 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก่อนจีโอพอลิเมอร์ทั้งสองอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจากก่อนจีโอพอลิเมอร์มีความเข้มข้นต่าง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสม ซิลิกอนและอะลูมิเนียมถูกชะละลายออกจากผิวของบิลกิตอย่างรวดเร็ว และทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างภายใต้สภาวะการบ่มที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โรเซชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เจลของสารประกอบที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับไอออนของออกซิเจนเกิดเป็นคอร์ดินেন্টแบบสี่แขนกับออกซิเจน และเกิดการรวมตัวของโมโนเมอร์ (monomer) และโอลิโกเมอร์ (oligomers) ได้โครงข่ายของอะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งสามารถแทรกตัวภายในช่องว่างระหว่างโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ทำให้มีรูพรุนลดลง [16-19] ส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่การบ่ม 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 และ 3 วัน มีค่าเท่ากับ 1610, 1694 และ 1638 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 โดยโมล และ 1555, 1605 และ 1588 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีการผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน K_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 โดยโมล



รูปที่ 4 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส

เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 3 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการระเหยน้ำในก้อนจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำที่เป็นตัวพาสารละลายต่างมาทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์-ไรเซชันภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์สิ้นสุดลงเป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง [6] นอกจากนี้ Chindaprasirtet และคณะ Phoo-ngernkham และคณะ [19-21] ยังรายงานว่า การบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยโดยใช้ความร้อนบ่มที่ระยะเวลานานเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์อย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ยังส่งผลให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ก่อตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งทำให้โครงสร้างมีความพรุนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การบ่ม

ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูง เป็นเวลานานอาจจะทำให้น้ำเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะทำให้เกิดรอยร้าวชั้นที่ผิวหน้า หรือภายในก้อนตัวอย่าง (รูปที่ 5) ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง

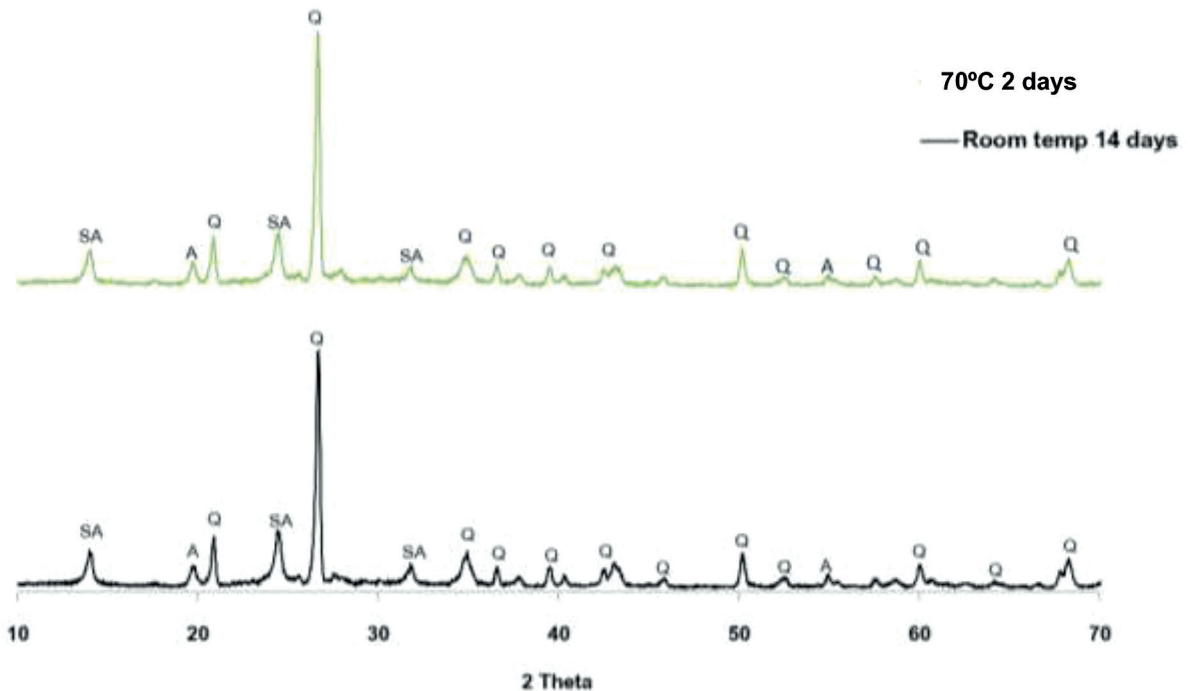


รูปที่ 5 รอยแตกร้าวของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส

3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากของเสียในอุตสาหกรรมเซรามิค

ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากบิสกิตพบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 ทั้งที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ดังนั้นจึงนำก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดมาทำการศึกษาคโครงสร้างผลึก โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน กับก้อนที่บ่มที่

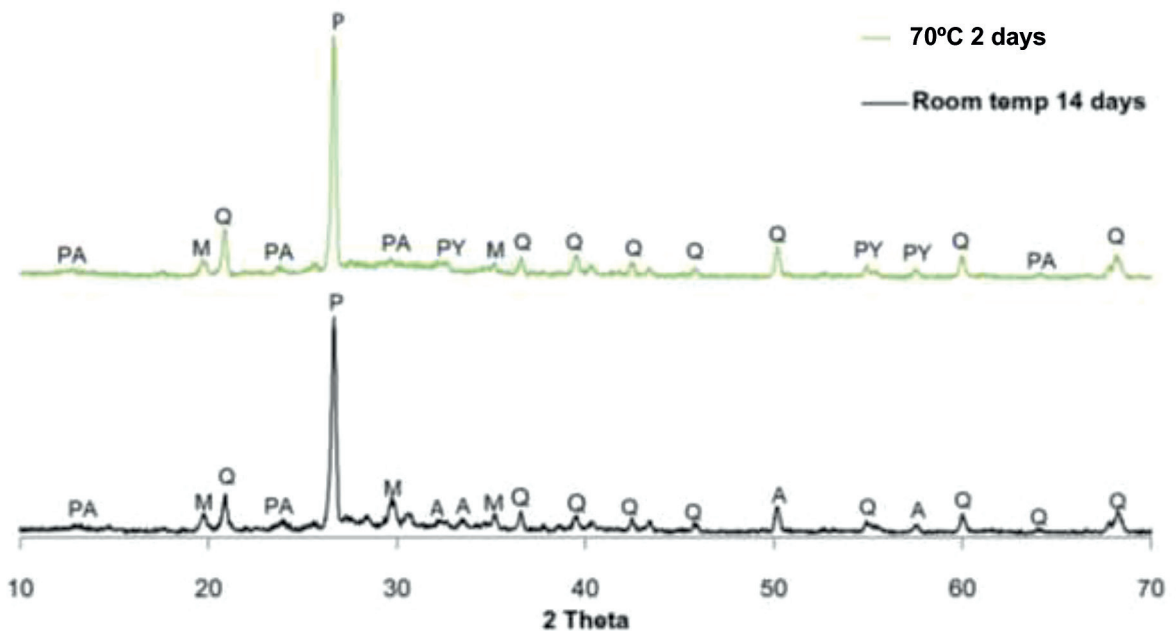
70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 ผลการศึกษาพบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง และบ่มที่อุณหภูมิการบ่มเป็น 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน (48 ชั่วโมง) พบ Quartz (SiO_2) และ Aluminum Silicate Oxide (Al_2SiO_5) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ และยังพบ Sodium Aluminum Silicate ซึ่งเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์-ไรเซชัน ซึ่งสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ได้ [22 - 24]



รูปที่ 6 โครงสร้างความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากบิสกิตที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 Q = Quartz (SiO_2), A = Aluminum Silicate Oxide (Al_2SiO_5), SA = Sodium Aluminum Silicate ($\text{Na}_{1.84}\text{Al}_2\text{Si}_{2.88}\text{O}_{9.68}$)

ส่วนก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน K_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน และบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน (รูปที่ 7) พบ Quartz (SiO_2) และ Aluminum Silicate Oxide (Al_2SiO_5) เหมือนกับก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนั้นยังพบผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยา คือ Potassium Aluminum Hydride, Muscovite ซึ่งเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดจากการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการกระตุ้นปฏิกิริยา

ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duxson และคณะ [7] พบว่า Sodium Aluminum Silicate ซึ่งเป็นโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์จากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีความเป็นระเบียบมากกว่าจีโอพอลิเมอร์จากโพแทสเซียม (Potassium Aluminum Hydride และ Muscovite) เนื่องจากโซเดียม (Na^+) มีรัศมีไอออนเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) ทำให้ความยาวพันธะระหว่าง Na-O ของไฮเดรตโซเดียมน้อยกว่าความยาวของพันธะ K-O ของไฮเดรตโพแทสเซียม ซึ่งทำให้โซเดียมมีความแข็งแรงของพันธะสูงกว่าโพแทสเซียม [16] นอกจากนั้นโพแทสเซียมมีไฮเดรชันสเฟียร์เล็กกว่าโซเดียม ทำให้ปริมาณน้ำอิสระในก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณสูงกว่าการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ [5, 25-27]



รูปที่ 7 โครงสร้างความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากบิสกิตที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน K_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 Q = Quartz (SiO_2), A = Aluminum Silicate Oxide (Al_2SiO_5), PA = Potassium Aluminum Hydride ($KAlH_4$), M = Muscovite ($KAl_2SiO_3AlO_{10}(OH)_2$)

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากบิสกิตพบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 โดยโมลมีค่ากำลังรับแรงอัดของสูงสุด ส่วนก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เพิ่มขึ้น และเมื่อนำก้อนจีโอพอลิเมอร์มาทำการบ่มที่ 50 และ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 2 และ 3 วัน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์จากบิสกิต คือ การบ่มที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน โดยในการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกมีการพบ Sodium Aluminum Silicate ($\text{Na}_{1.84}\text{Al}_2\text{Si}_{2.88}\text{O}_{9.68}$) ในก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และพบ Potassium Aluminum Hydride (KAlH_4) กับ Muscovite ($\text{KAl}_2\text{SiO}_5\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) ในก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงกว่าการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยก้อนจีโอพอลิเมอร์จากบิสกิตที่บ่มที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน สามารถใช้ทดแทนก้อนจีโอพอลิ-เมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วันได้

5. เอกสารอ้างอิง

1. Phoo-ngernkham, T. and Sinsiri, T., 2011, "A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Natural Zeolite," *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (1), pp. 31-144. (In Thai)
2. Rittirut, C., PoSri, P., Apinet, S. and Jindaprasert, P., 2016, "Loess Stabilization with Fly Ash-Based Geopolymer for Resistant to Soaked," *Proceeding of the 21st National Convention on Civil Engineering*, Songkhla, Thailand, pp. 639-644.

(In Thai)

3. Phoo-ngernkham, T., Harnjitsuwan, S., Theamlom, K. and Jindaprasert, P., 2016, "Innovation of Repair Material from Fly Ash-Portland Cement Geopolymer Containing Nano-SiO₂ and Nano-Al₂O₃ as an additive," *Proceeding of the 21st National Convention on Civil Engineering*, Songkhla, Thailand, pp. 602-605. (In Thai)
4. 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.
5. Onsaeng, C., 2013, "Effect of SiO₂/Al₂O₃ and Alkali Types on Strength Development of Geopolymer from Water Treatment Sludge," *Proceeding of the 17th National Convention on Civil Engineering (Civil Engineering for Integrated Developments)*, Udonthani, Thailand, pp. ENV12-1- ENV12-4. (In Thai)
6. Jantawong, K., 2014, "Effect of Curing Temperature and Alkali Concentration on Properties of Geopolymer Synthesized from Water Treatment Residue," *Proceeding of the 1st National Conference on Phetchabun Rajabhat University*, Phetchabun, Thailand, pp. 1-8. (In Thai)
7. Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M. and Deventer, J.S.J., 2007, "The Effect of Alkali and Si/Al Ratio on the Development of Mechanical Properties of Metakaolin-based Geopolymer," *Journal of Colloids and Surfaces*, 292, pp. 8-20.
8. Komnitsas, K., Zaharaki, D. and Perdikatsis, V., 2009, "Effect of Synthesis Parameter on the Compressive Strength of Low-calcium Ferronickel Slag Inorganic Polymers," *Journal of Hazardous Materials*, 161, pp. 760-768.
9. Naprarath, W., Suwimol, A. and Kwannate, S., 2014, "Strength and Microstructure of Water

Treatment Residue - based Geopolymer Containing Heavy Metals,” *Construction and Building Materials*, 50, pp. 486-491.

10. American Society for Testing and Materials, 2006, “ASTM C 305-06 : Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency,” *Annual Book of ASTM Standard*.

11. American Society for Testing and Materials, 2007, “ASTM D1633-00: Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders (Withdrawn 2016),” *Annual Book of ASTM Standard*.

12. Homsriprasert, W. and Chatveera, B., 2016, “Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks,” *KMUTT Research and Development Journal*, 39 (2), pp. 271-286. (In Thai)

13. Homsriprasert, W. and Chartveera, 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)

14. Chalee, W., and Charoenprom, K., 2012, “Evaluation of Sulfate Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete,” *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 157-171. (In Thai)

15. Phoo-ngernkham, T. and Sinsiri, T., 2011, “A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Natural Zeolite,” *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (1), pp. 31-44. (In Thai)

16. Hanjitsuwan, S., 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)

17. Pimraksa, K., Chindaprasit, P., Rungchet, A.,

Sagoe-Crentsil, K. and Sato, T., 2011, “Lightweight Geopolymer made of Highly Porous Siliceous Materials with Various $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Ratios,” *Journal of Materials Science and Engineering : A*, 528, pp. 6616-6623.

18. Messler, G.L. and Tarr, D.A., 2004, *Inorganic Chemistry*, 3rd ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey.

19. Chindaprasit, P., Chareerat, T. and Sirivivananon, V., 2007, “Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer,” *Cement and Concrete Composites*, 29, pp. 224-229.

20. Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Chindaprasit, 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. Phoo-ngernkham, T. and Sinsiri, T., 2011, “A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Natural Zeolite,” *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (1), pp. 31-44. (In Thai)

22. Rattanasak, U., Chalee, W. and Chindaprasit, P., 2006, “Study of Leaching of Lignite Fly Ash and Strength of Fly Ash Based-geopolymer,” *KMUTT Research and Development Journal*, 29 (4), pp. 437-446. (In Thai)

23. Pankhet, K. and Rattanasak, U., 2010, “Effect of Admixture on the Properties of Fly Ash Geopolymer,” *KMUTT Research and Development Journal*, 33 (2), pp. 121-132. (In Thai)

24. Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G. and Sagoe-Crentsil, K. and Sanjayan, J.G., 2008, “Factor Affecting the Performance of Metakaolin Geopolymers Exposed to Elevated Temperatures,” *Journal of the Materials Science*, 43, pp. 824-831.

25. Bakharev, T., 2006, “Thermal Behaviour

of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing,” *Cement and Concrete Research*, 36 (6), pp. 1134-1147.

26. Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Koval-chuk, G., Ordonez, L.M. and Naranjo, M.C., 2007, “OPC-Fly Ash Cementitious Systems : Study of Gel Binders Produced during Alkaline Hydration,” *Journal of*

Materials Science, 42 (9), pp. 2958-2966.

27. Makul, N. and Chatveera, B., 2013, “Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar : Influence of Fly Ash Sources and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) / Sodium Hydroxide (NaOH) Ratios.” *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (1), pp. 99-125. (In Thai).