

บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมี ของเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส

1) ลักษณะทางกายภาพ

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส พบว่า ลักษณะทั่วไปของเถ้าลอยมีสีเทา ซึ่งสีของเถ้าลอยอาจไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับต่อสมบัติทางวิศวกรรม แต่อาจเป็นตัวบ่งชี้ว่าเถ้าลอยมาจากแหล่งที่แตกต่างกัน หรือมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา และปริมาณเหล็กต่างกัน หรือผ่านกระบวนการเผาที่แตกต่างกัน (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2547) และเมื่อนำไปทดสอบหาความละเอียดโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ผลการทดสอบพบว่า มีร้อยละ ค้าง เท่ากับ ร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดค่อนข้างสูง และเมื่อทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C188 ของเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.5

2) ลักษณะทางเคมี

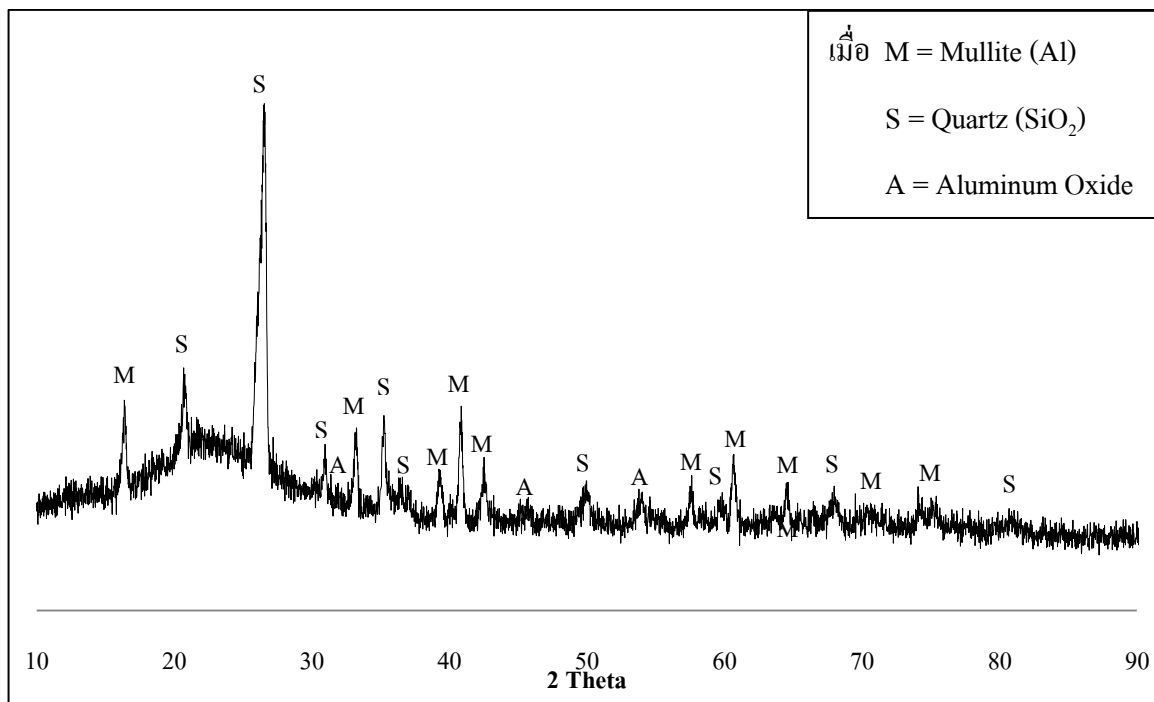
ตามมาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ เถ้าลอย Class F และ Class C โดยเถ้าลอย Class F ได้มาจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัส ส่วนเถ้าลอย Class C ได้มาจากการเผาถ่านหินประเภทซับบิทูมินัส หรือลิกไนต์ ในการแบ่งเถ้าลอยตามองค์ประกอบทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด โดยพิจารณาจากปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งผลรวมขององค์ประกอบทั้ง 3 ชนิดนี้ สูงกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 70 ตามมาตรฐาน ASTM C618 จัดเป็นเถ้าลอย Class F แต่ถ้าผลรวมขององค์ประกอบทั้ง 3 ชนิด มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 50 จัดเป็นเถ้าลอย Class C (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2547) เมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ด้วยเทคนิค XRF ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า เถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัสมี SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 62.3 และ 27.4 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.3 โดยน้ำหนัก และมีแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 0.888 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถจัดเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส เป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ตามข้อกำหนดของ ASTM C618 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hardjito, et al. (2008) ที่ศึกษาความแข็งแรง และเวลาก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ

(Class F) จากโรงไฟฟ้า Sejingkat ประเทศมาเลเซีย พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยมี SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 59.9 และ 24.7 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยบิทูมินัส ด้วยเทคนิค XRF

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO_2	62.3
Al_2O_3	27.4
Fe_2O_3	4.36
TiO_2	1.47
K_2O	1.24
CaO	0.888
P_2O_5	0.559
MgO	0.422
Na_2O	0.371
SO_3	0.284
BaO	0.158
SrO	0.140
ZrO_2	0.117
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	2.3

เมื่อนำเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัสไปศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า เถ้าลอยมีลักษณะของโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งประกอบไปด้วยควอตซ์ (Quartz) มุลไลต์ (Mullite) และอลูมินั่มออกไซด์ (Aluminum Oxide) โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในการหาองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเทคนิค XRF ที่ประกอบด้วย SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดสอบ XRD ของ Poon (2003) ที่รายงานว่า เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสจากฮ่องกงที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ พบผลึกควอตซ์ และมุลไลต์ และมีค่ามุม 2 Theta เท่ากับ 23 องศา

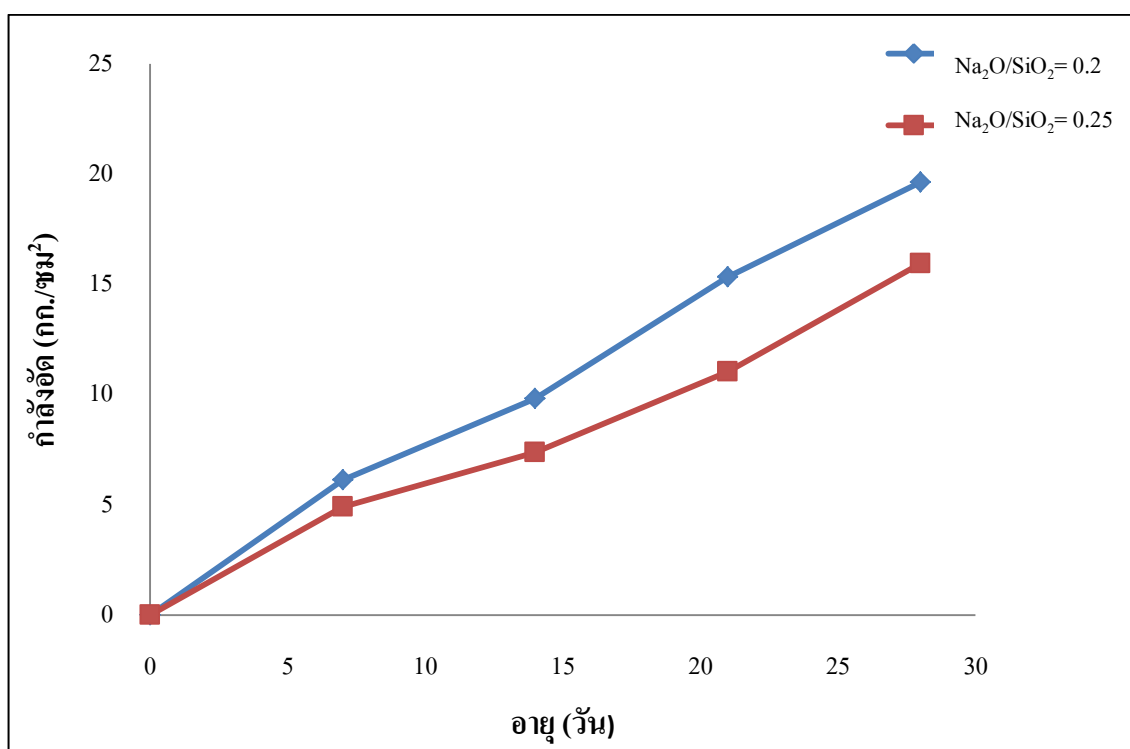


รูปที่ 4.1 โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของแก้วของถ่านหินปิทูมินัส

4.2 ผลของการพัฒนากำลังอัดของอีโพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากแก้วของถ่านหินปิทูมินัส

การสังเคราะห์อีโพอลิเมอร์จากแก้วของถ่านหินปิทูมินัส ที่มีการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 และ 0.25 โดยโมล ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 30 – 35 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7, 14, 21, และ 28 วัน ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนอีโพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากแก้วของถ่านหินปิทูมินัส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า การพัฒนากำลังอัด ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 14, 21 และ 28 วัน ทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10, 16 และ 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่าง โดยใช้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยโมล พบว่า การบ่มที่อายุ 7 วันแรก มีค่าเท่ากับ 5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 14, 21 และ 28 วัน ทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 8, 12 และ 16 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้น ก้อนอีโพอลิเมอร์สังเคราะห์มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อผสมแก้วของถ่านหินปิทูมินัสกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้สารละลายโซเดียม

ไฮดรอกไซด์เข้าไปชะละลายสารประกอบซิลิกอน และอะลูมิเนียม ออกมาจากผิวของแก้วลอยของ ถ่านหินปิทูมินัสในลักษณะโครงสร้าง Tetrahedral หรือทรงสี่หน้า เมื่อปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โมเลกุลของน้ำจะถูกดึงออกมาเพื่อให้ซิลิกา และอะลูมินาเกิดการเชื่อมต่อกันโดย ใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน และควบแน่นกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และกระจายตัวอยู่ใน ลักษณะที่เชื่อมขวางกัน ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะทำให้การเชื่อมขวางกันของ โครงข่าย อะลูมิโนซิลิเกตเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zuhua, et al. (2009) ที่ศึกษาการสังเคราะห์ก้อนจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา ซึ่งพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง แบบธรรมชาติ ทำให้ค่ากำลังอัดสามารถพัฒนาเพิ่มขึ้นหลังจากเพิ่มระยะเวลาในการบ่มมากกว่า 7 วัน



รูปที่ 4.2 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยของถ่านหินปิทูมินัส บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน

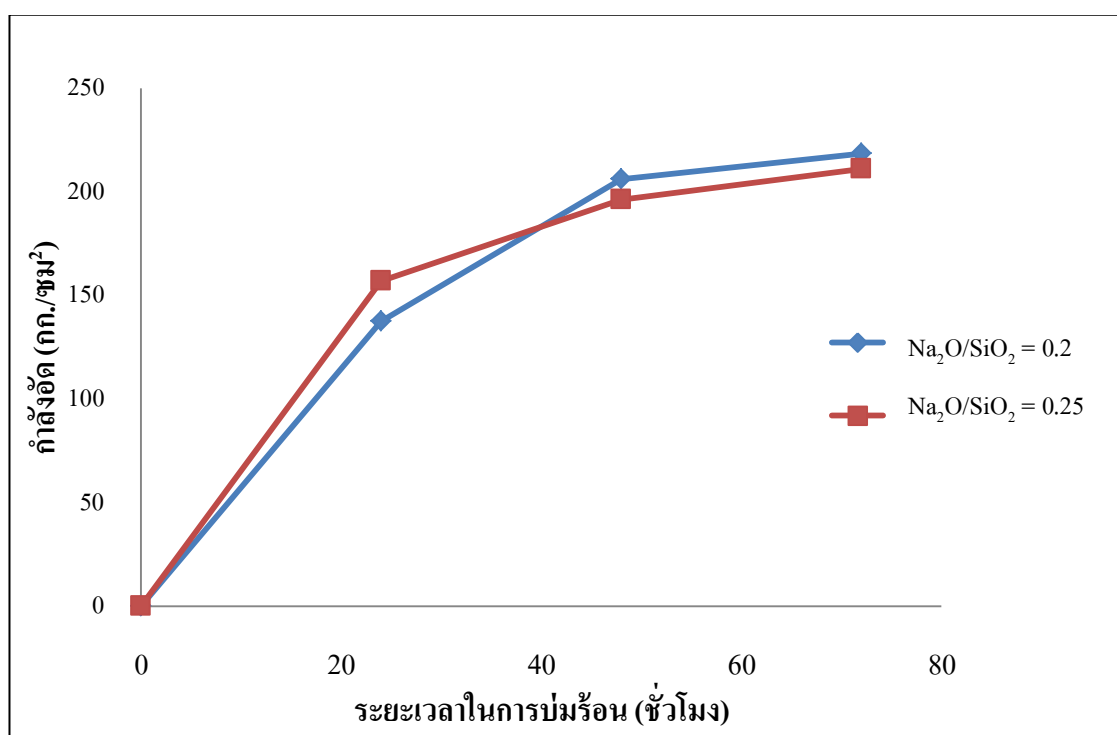
เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากแก้วลอยของถ่านหินปิทูมินัส ที่ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 และ 0.25 โดยโมล ที่การบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน พบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล มีค่ากำลังอัด สูงกว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยโมล ทุกอายุการบ่ม เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา และทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น ส่งผลเกิดการชะสารประกอบซิลิกอน และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ออกมามาก ทำให้อัตราการเกิดอะลูมิเนียมซิลิเกตเจลเพิ่มขึ้น และอาจส่งผลให้สารละลายอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดการอิมิตัว (De Vergas, et al., 2011) กลายเป็นโพลิเมอร์ในรูปแบบที่มีน้ำเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่จากการควบแน่น ซึ่งกระบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่สะสมระหว่างการชะละลาย จึงเกิดเป็นโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งอาจต้องเพิ่มระยะเวลาในการบ่มให้นานขึ้นเพื่อปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกจากโครงสร้าง จึงเป็นสาเหตุทำให้สารประกอบหลักบางส่วนที่เกิดจากการชะออกมาในปริมาณมากยังไม่เกิดปฏิกิริยา และสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดการตกตะกอน และอาจเกิดการตกตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากการรวมตัวกันของไฮดรอกไซด์ กับ Al^{3+} ได้เป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในเฟสของแข็งและเกิดการตกตะกอน (Davitdovits, 2008) และขัดขวางการควบแน่น ทำให้อัตราการควบแน่นของสายจีโอพอลิเมอร์ต่ำ ส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ลดลง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของชาลีนิ อ่อนแสง และคณะ (2555) ที่ศึกษาผลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา และชนิดของด่างต่อการพัฒนา กำลังอัดของก๊อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปา พบว่าก๊อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.2 มีการพัฒนา กำลังอัดสูงสุด แสดงให้เห็นว่าก๊อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่ใช้อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.2 โดยโมล เป็นสถานะต่างที่เหมาะสมต่อการพัฒนา กำลังอัด

4.3 ผลของอุณหภูมิ และเวลาในการบ่ม ต่อการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส

การศึกษาผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาในการบ่มของก๊อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัสผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.2 และ 0.25 โดยโมล และบ่มด้วยความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 ก๊อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.2 โดยโมล บ่มด้วยความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในช่วงการบ่มที่ 24 ชั่วโมงแรก โดยมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 138 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าความชันของการพัฒนา กำลังอัด เท่ากับ 5.75 และเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 48 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 207 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าความชันในการพัฒนา กำลังอัด เท่ากับ 2.9 และที่อายุการบ่ม 72 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 219 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความชันในการพัฒนา กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 0.5 แสดงให้เห็นว่า การพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 50

องศาเซลเซียส สำหรับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล สามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงการบ่ม 24 ชั่วโมงแรก และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 48 และ 72 ชั่วโมง การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่ลดลง เนื่องจากการใช้ความร้อนในการบ่มก่อนจีโอพอลิเมอร์ เป็นการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และเร่งให้น้ำเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว จากภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์ และที่ผิวหน้าของก้อนจีโอพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกสูง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มให้นานขึ้นเป็น 48 และ 72 ชั่วโมง เป็นการเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา หรือยังทำปฏิกิริยาอย่างไม่หมด และการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของก้อนจีโอพอลิเมอร์อาจทำให้โครงสร้างภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจึงทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Van, et al. (2003) ที่รายงานว่า การบ่มก่อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ส่งผลทำให้โครงสร้างของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลามบ่มที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำในการทำปฏิกิริยา (dehydration) อย่างรวดเร็ว และจะส่งผลให้การพัฒนาโครงสร้างเจลของจีโอพอลิเมอร์เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการหลงเหลือน้ำไว้ในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อย จึงจำเป็นต่อการทำปฏิกิริยาและการป้องกันการแตกร้าวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

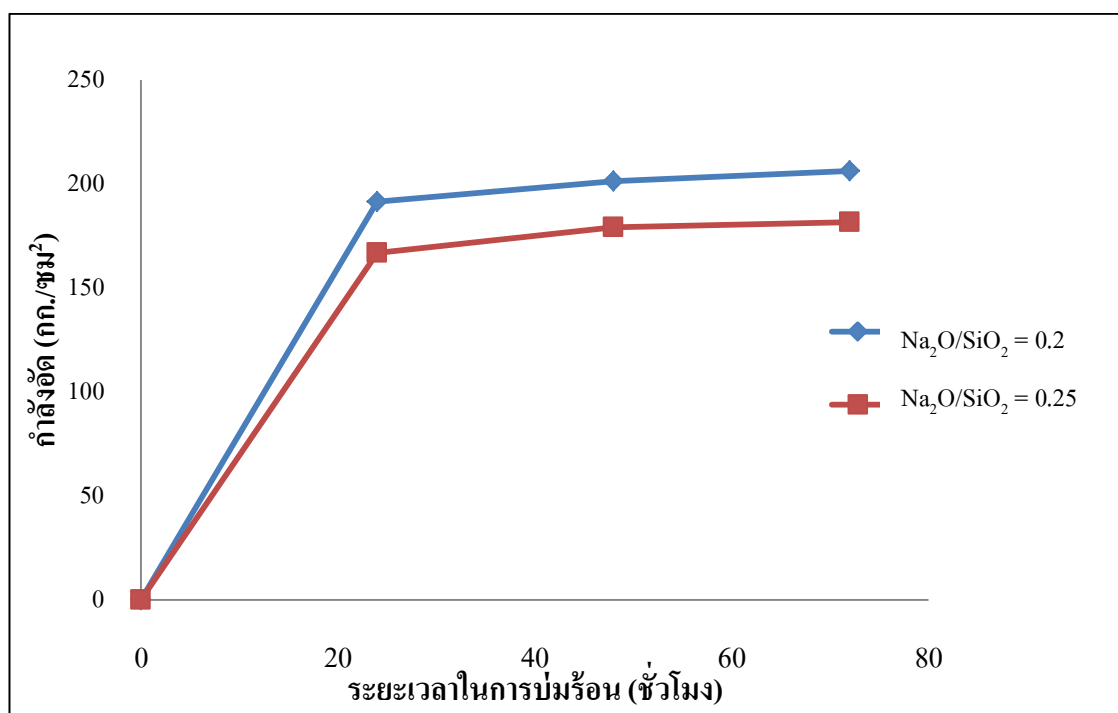
ก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล ที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุการบ่ม 28 วัน เนื่องจากการใช้ความร้อนในการบ่มก่อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ จะช่วยเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และเร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำภายในก่อนจีโอพอลิเมอร์ ทำให้สามารถแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดในช่วงต้นสูง ทั้งนี้การบ่มก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนจีโอพอลิเมอร์แข็งตัวช้ากว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิสูง โดยกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ของการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะดำเนินไปอย่างช้าๆ ต้องใช้ระยะเวลานานจึงสามารถพัฒนา กำลังอัด ดังนั้น การใช้ความร้อนมาช่วยในการบ่ม เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยอุณหภูมิจะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาการชะละลาย และการควบแน่นเกิดได้เร็วขึ้น (Cheng and Chiu, 2003) ทำให้สามารถลดระยะเวลาในการบ่มให้สั้นลง และสอดคล้องกับงานวิจัยของฟองจันทร์ จิราสิต และคณะ (2548) ที่ศึกษาผลกระทบของวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์จากเถ้าถ่านหิน โดยทำการบ่ม ก่อนจีโอพอลิเมอร์ด้วยเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 100 และ 200 องศาเซลเซียส และเตาอบความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่า สภาพะในการบ่มเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ โดยเมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตร และขนาดของโพรงของก่อนจีโอพอลิเมอร์ลดลง และมีลักษณะของผลึกที่มีโครงสร้างซับซ้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การพัฒนา กำลังอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เป็นอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยโมล และบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง (รูปที่ 4.3) พบว่า ที่ระยะเวลาในการบ่ม 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 158 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 197 และ 212 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การพัฒนา กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มเช่นเดียวกับที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล โดยมีค่าความชันของการพัฒนา กำลังอัดที่ระยะเวลาในการบ่ม 24 ชั่วโมง เท่ากับ 6.6 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้ค่าความชันมีค่าลดลง เท่ากับ 1.9 และ 0.6 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การบ่มก่อนจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง กับการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ทุกอายุการบ่ม เนื่องจากการบ่มด้วยร้อนจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และช่วยเร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ก่อนจีโอพอลิเมอร์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดในช่วงต้นของการบ่มด้วยความร้อน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ถึงร้อยละ 90

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดสำหรับการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 และ 0.25 โดยโมล พบว่า ค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาบ่ม 24 ชั่วโมง ของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยโมล มีค่าสูงกว่าค่ากำลังอัด ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 48 และ 72 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำกว่า ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล ทั้งนี้เนื่องจากการความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงร่วมกับการใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ ทำให้มีการทำให้เกิดการชะลิดคอน และอะลูมิเนียม ออกจากเกล็ดลอยของถ่านหินบิทูมินัส และทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็วและ การใช้ความร้อนในการบ่มเพื่อเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็ว จะช่วยเร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 24 ชั่วโมงแรก แต่อาจมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์บางส่วนที่ยังทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็วไม่หมด ทำให้โครงสร้างมีความพรุน และอาจส่งผลให้เจลอะลูมิเนียมซิลิเกต เกิดการตกตะกอนในช่วงอายุต้น (Somma, et al., 2011) ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจึงเป็นการกระตุ้นปฏิกิริยาในส่วนที่ยังทำปฏิกิริยาไม่หมด และในส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา และการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้น้ำในก้อนจีโอพอลิเมอร์ระเหยอย่างรวดเร็ว (Chindaprasirt, et al., 2005) ทำให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์แข็งมากขึ้น แต่โครงสร้างภายในมีความพรุนจากการทำปฏิกิริยาในช่วงแรก ส่งผลให้พัฒนาค่ากำลังอัดมีค่าลดลง

จากนั้นทำการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเกล็ดลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 มีการพัฒนากำลังอัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 192 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำให้มีค่าความชันของการพัฒนากำลังอัด เท่ากับ 8 จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 202 และ 207 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และมีค่าความชัน เท่ากับ 0.4 และ 0.04 แสดงให้เห็นว่าการใช้ความร้อนในการบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความร้อนจะเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์เร็วและเร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำ ทำให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มให้นานขึ้น ความร้อนจะกระตุ้นในส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาของเกล็ดลอย จึงส่งผลต่อค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Swanepoel และ Strydom (2002) การศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่มของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเกล็ดลอยผสมดินขาวเผา โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต พบว่า สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของก้อนจีโอพอลิเมอร์ลดลง เนื่องมาจากการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างในระหว่างการบ่มด้วยความร้อน

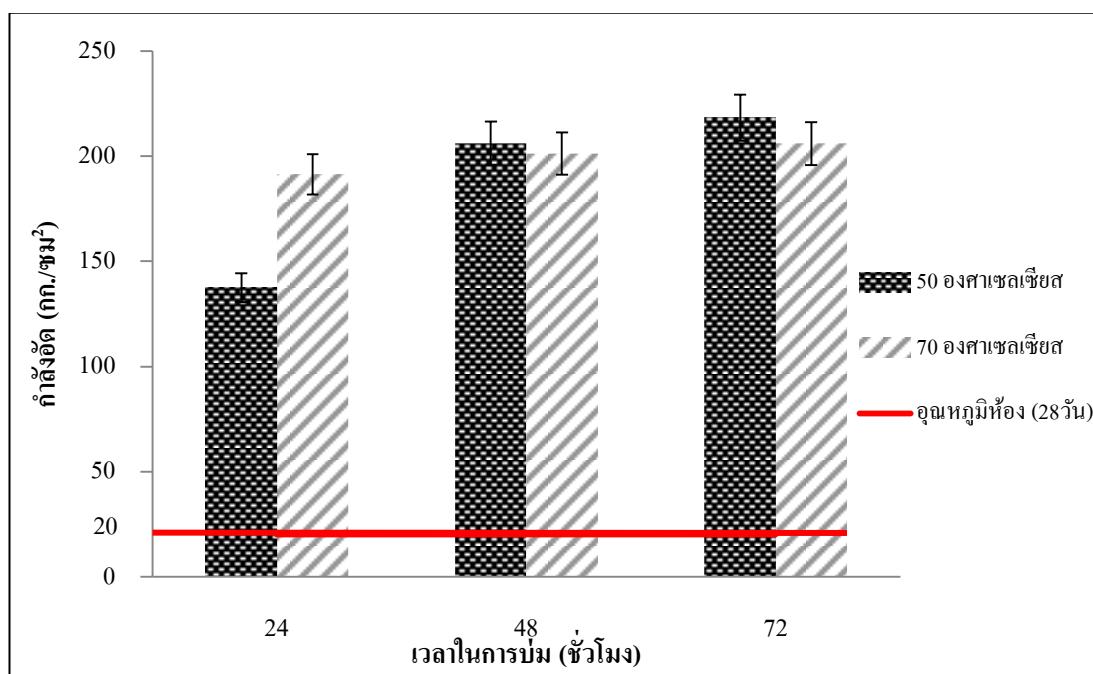
จากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นต่าง เป็นอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่า การพัฒนาค่าลึงอัดมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกับก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล ที่บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าลึงอัดที่ระยะเวลายบ่ม 24 ชั่วโมง เท่ากับ 167 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้ค่าลึงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 180 และ 182 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ค่าลึงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง

การพัฒนาค่าลึงอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส บ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 และ 0.25 โดยโมล มีการพัฒนาค่าลึงอัดในช่วงต้นของการบ่มด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยการบ่มด้วยความร้อนจะเป็นการเพิ่มพลังงานให้แก่กระบวนการชะละลาย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic process) (Ayuso, et al., 2008) จึงทำให้เร่งการชะละลายสารประกอบซิลิกอน และอะลูมิเนียม ออกมาจากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่มีโครงสร้างทรงสี่หน้า และเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โมเลกุลของน้ำ

จะถูกดึงออกมาเพื่อให้ซิลิกา และอะลูมินาเกิดการเชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน และควบแน่นกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และกระจายตัวอยู่ในลักษณะที่เชื่อมขวางกัน ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ น้ำระเหยออกจากภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วระหว่างกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์แข็งอย่างรวดเร็ว และสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูง ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของปริญญา จินดาประเสริฐ (2556) ที่ศึกษาความสามารถในการใช้งาน และความแข็งแรงของก้อนจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่า โดยทั่วไปการบ่มร้อนวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มร้อนให้สูงขึ้น เช่น จาก 24 เป็น 48 ชั่วโมง จะมีผลต่อกำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เพียงเล็กน้อย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ridtirud, et al. (2008) ที่ศึกษาผลของวิธีการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินขาวเผา และเถ้าลอย พบว่า การสังเคราะห์ก้อนจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา มีผลทำให้ได้กำลังอัดที่สูง โดยมีสภาวะการบ่มที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถยืนยันได้ว่าการเกิดจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน ส่งผลให้การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยต้องใช้ความร้อนสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่เป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน



รูปที่ 4.5 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัสบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน และบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียสของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล

เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาวะการบ่มในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส คือ การบ่มแบบปกติ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน และการบ่มในตู้อบโดยใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล เพราะเป็นอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า การใช้ความร้อนในการบ่มทำให้การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วง 24 ชั่วโมงแรก สามารถให้ค่ากำลังอัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สูงกว่าบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน ถึงร้อยละ 85 แต่มีค่าต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ร้อยละ 30 เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ และเร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำระหว่างกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ เป็นผลให้เกิดการแข็งอย่างรวดเร็วของก้อนจีโอพอลิเมอร์ และสามารถพัฒนากำลังอัดใน 24 ชั่วโมงแรก ได้สูงสุด ดังนั้นการใช้ความร้อนมาใช้ในการบ่มจึงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างรวดเร็ว และมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูง ทำให้มีประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และอาจจะช่วยลดระยะเวลาในการบ่มได้มากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง แต่อาจมีการสิ้นเปลืองพลังงาน และสูญเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง จึงพิจารณาการพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสม และประหยัดค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ก้อนจีโอพอลิเมอร์ได้มากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบ่ม สำหรับสภาวะการบ่มด้วยความร้อนของทั้งสองอุณหภูมิ คือ ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่มีการพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด เทียบกับค่ากำลังอัด (ตารางที่ 4.2)

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าการใช้ไฟฟ้าของอุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม จะทำให้การใช้พลังงานในการบ่มเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการใช้ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจาก 24 ชั่วโมง เป็น 48 ชั่วโมง มีการพัฒนากำลังอัด ร้อยละ 30 และมีค่าการใช้ไฟฟ้า ร้อยละ 50 จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจาก 48 ชั่วโมง เป็น 72 ชั่วโมง ทำให้การพัฒนากำลังอัดมีค่าลดลง ร้อยละ 6 และมีค่าการใช้ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 33 และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจาก 24 ชั่วโมง เป็น 48 ชั่วโมง มีการพัฒนากำลังอัด ร้อยละ 5 และมีค่าการใช้ไฟฟ้า ร้อยละ 50 เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจาก 48 ชั่วโมง เป็น 72 ชั่วโมง ทำให้การพัฒนากำลังอัดมีค่าลดลง ร้อยละ 3 และมีค่าการใช้ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 33 ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าการใช้ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แต่การพัฒนากำลังอัดมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนค่าไฟฟ้าในการบ่ม และค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย
ของถ่านหินบิทูมินัส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล

อุณหภูมิ และระยะเวลา ในการบ่ม	50 องศาเซลเซียส			70 องศาเซลเซียส		
	24 (ชั่วโมง)	48 (ชั่วโมง)	72 (ชั่วโมง)	24 (ชั่วโมง)	48 (ชั่วโมง)	72 (ชั่วโมง)
ค่ากำลังอัด (กก/ชม ²)	138	207	219	192	202	207
ค่าพลังงานการใช้ไฟฟ้า (บาท)	114	227	341	159	318	477
ค่าไฟฟ้าต่อกำลังอัด (บาท/กก/ชม ²)	0.83	1.10	1.56	0.83	1.57	2.30

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราของการใช้ไฟฟ้าต่อค่ากำลังอัด ที่ระยะเวลาในการบ่ม 24 ชั่วโมงแรก ทำให้อัตราส่วนของค่าไฟฟ้าต่อค่ากำลังอัดของอุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.83 บาทต่อกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่า การบ่มด้วยความร้อนที่ระยะเวลาเท่ากันของ อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราการใช้ไฟฟ้าต่อค่ากำลังอัดเท่ากัน แต่ให้ค่ากำลังอัดที่ ต่างกัน โดยการบ่มด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ร้อยละ 30 จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะทำให้อัตราส่วนของค่าไฟฟ้า ต่อค่ากำลังอัดของอุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส การ เพิ่มระยะเวลาในการบ่ม 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้อัตราส่วนของค่าไฟฟ้าต่อค่ากำลังอัด เพิ่มขึ้นร้อยละ 25 และ ร้อยละ 30 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้อัตราส่วนของค่าไฟฟ้าต่อค่ากำลังอัด เพิ่มขึ้นร้อยละ 47 และ ร้อยละ 32 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิ และระยะเวลาที่เหมาะสม สำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยของ ถ่านหินบิทูมินัส ของการวิจัยในครั้งนี้

ดังนั้น ปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ของเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่ส่งผลต่อการ พัฒนากำลังอัด ประกอบไปด้วย 1) ความเข้มข้นของสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 2) อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงความสำคัญของทั้ง 2 ปัจจัย พบว่า ความ

เข้มข้นของสารละลายต่างที่เหมาะสมมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ (Vargas, et al., 2011; Hu M, et al., 2009; Gokhan, et al., 2014) เนื่องจากค่านี้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ในขั้นตอนการชะละลายซิลิกอน และอะลูมิเนียม (Buchwald, et al., 2009) ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นธาตุหมู่ 1A เป็นธาตุโลหะที่มีความแข็งแรง และสารประกอบไฮดรอกไซด์จากธาตุหมู่ 1A จะแตกตัวได้ทั้งหมด ทำให้มีความเป็นด่างสูง และอะตอมของโซเดียมใช้เป็นตัวสมดุลประจุ (Charge balance) ให้กับโครงสร้าง Tetrahedral และเชื่อมต่อกับโครงสร้างของซิลิกา และอะลูมินา โดยการให้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเฟสของแข็งจากสารประกอบในแก้วลอยของถ่านหินปิโตรมันส์ที่ประกอบด้วยซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก กับเฟสของเหลวจากสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะความเป็นด่างสูงเรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต หรือสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อนินทรีย์ เป็นผลิตภัณฑ์ (Davidovits, 2008; Duxson, et al., 2007) ซึ่งวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตมีโครงสร้าง 3 มิติ ที่สามารถก่อตัวได้เป็นโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกต เป็นผลให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และในส่วนของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม จะมีความสำคัญรองจากความเข้มข้นของสารละลายต่างที่เหมาะสม ซึ่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างแก้วลอยของถ่านหินปิโตรมันส์ และสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้การบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเป็นไปตามกฎของ Arrhenius ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และการเกิดปฏิกิริยา โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันสูงกว่าอัตราที่ควรเพิ่มตามปกติ ซึ่งสอดคล้องกับ Palomo, et al. (1999) ที่รายงานว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังอัดคือ อุณหภูมิในการบ่ม และชนิดของสารกระตุ้น โดยวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกขนาดใหญ่ภายหลังจากการแข็งตัว ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ และตัวกระตุ้นต่าง (ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายต่าง) เป็นหลัก ประกอบกับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการบ่ม ดังกลไกของการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันที่เกี่ยวข้องกับการชะละลาย (Dissolution) การเคลื่อนย้าย (Migration) การก่อเจล (Gelation) การจัดเรียง (Reorganization) และการรวมกันเป็นสารเกาะกลุ่ม (Polymerization) (Galiano, et al., 2011) และนอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่สำคัญต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดย Xu and Deventer (2003) พบว่า อัตราส่วนโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al molar ratio) ในเฟสเจล (Gel phase) และความเข้มข้นของวัสดุตั้งต้นเป็นปัจจัยหลักที่กระทบต่อกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และ Xu, et al. (2003) ที่รายงานว่า ในระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน น้ำทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวทำปฏิกิริยา (Reagent) ชนิดหนึ่ง และเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน โดยในสภาวะการชะละลายจะใช้น้ำ แต่ในส่วนของการบ่มพอลิเมอร์ไรเซชันจะคายน้ำออกมา

4.4 การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ด้วยเทคนิค XRD

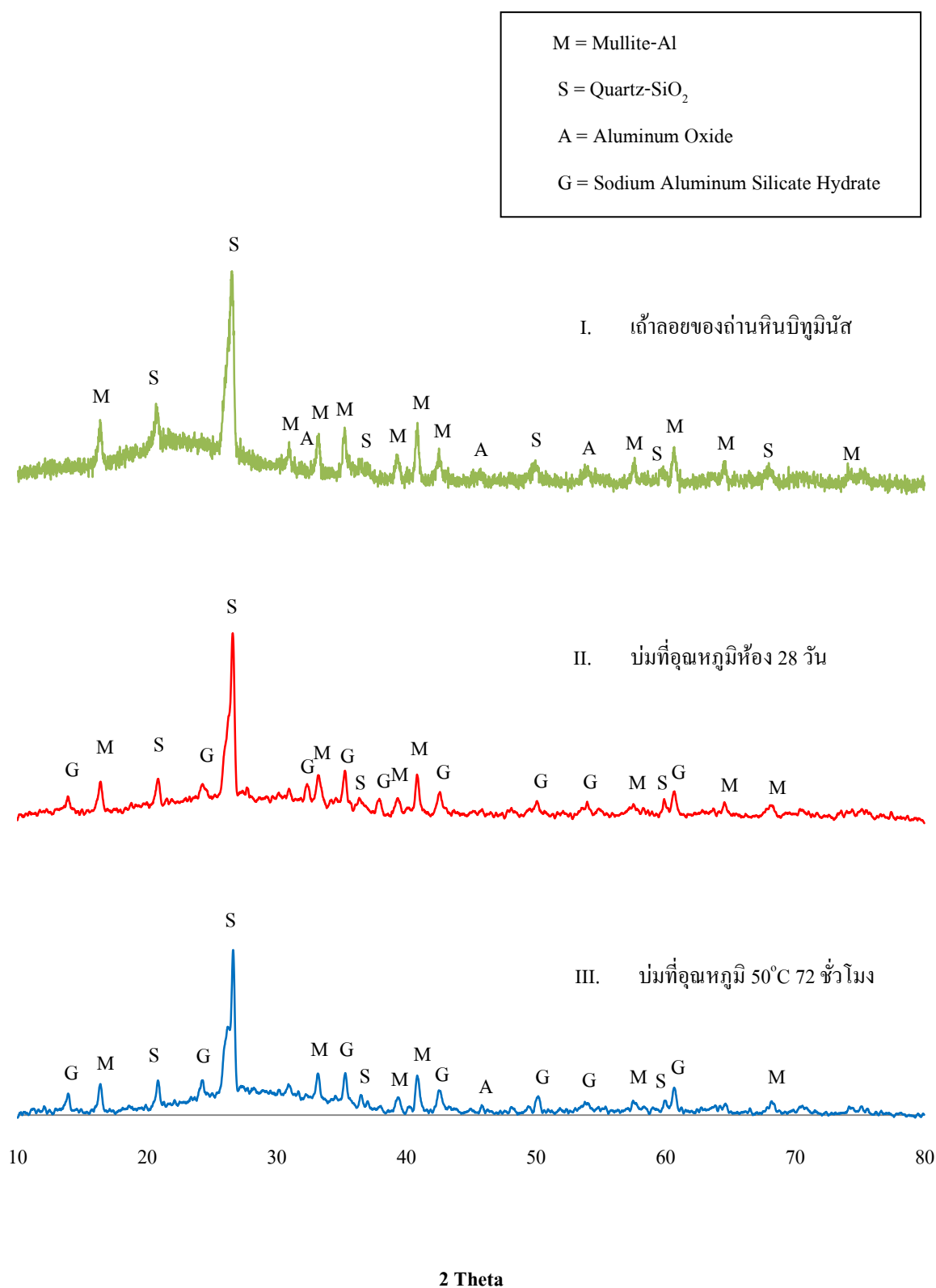
การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 และ 0.25 โดยโมล ที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน และบ่มในตู้อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จากผลการทดสอบกำลังอัด พบว่า ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด ทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และการบ่มด้วยความร้อนทั้งสองอุณหภูมิ ทุกอายุการบ่ม และเมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดที่บ่มด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า การบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส บ่มเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ดังนั้น การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส จึงเลือกตัวอย่างของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน และบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง มาทำการศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึก

จากรูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส (วัตถุดิบ) พบควอตซ์ (Quartz-SiO_2) มุลไลต์ (Mullite-Al) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide) เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อนำเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัสมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน พบควอตซ์ (Quartz-SiO_2) และมุลไลต์ (Mullite-Al) ที่เป็พึกหลักของเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส แสดงให้เห็นว่ามี SiO_2 และ Al_2O_3 ในเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัสยังไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Palomo, et al. (1999) ที่ศึกษาการกระตุ้นเถ้าลอยด้วยด่าง รายงานว่าไม่พบเฟสผลึก (Crystalline phase) เกิดขึ้นใหม่ นอกจากเฟสผลึกของเถ้าลอยที่มีอยู่แล้วก่อนการทำปฏิกิริยา และงานวิจัยของ Fernandez-Jimenez and Palomo (2003) ที่รายงานว่าเถ้าลอยที่ถูกกระตุ้นด้วยด่าง พบเฟสผลึกเดิมในเถ้าลอยไม่ได้ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงหลังการถูกกระตุ้นด้วยด่าง

นอกจากนั้นยังพบโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (Sodium Aluminum Silicate Hydrate; NASH) โดยเป็นตำแหน่งที่เกิดขึ้นใหม่ และเป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงจากควอตซ์ มุลไลต์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ไปเป็นโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เชชันขึ้น เมื่อมีการผสมเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเริ่มจากการชะละลายซิลิกอน และอะลูมิเนียม ออกมาจากผิวของเถ้าลอยของ

ถ่านหินบิทูมินัส ที่มีลักษณะโครงสร้าง Tetrahedral หรือทรงสี่หน้า เมื่อปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โมเลกุลของน้ำจะถูกดึงออกมาเพื่อให้ซิลิกา และอะลูมินาเกิดการเชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน และควบแน่นกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และกระจายตัวอยู่ในลักษณะที่เชื่อมขวางกันเป็นโครงข่ายของอะลูมิโนซิลิเกต เป็นผลให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถพัฒนากำลึงอัดได้เพิ่มขึ้น และยังสามารถคล้องกับงานวิจัยของนภารัตน์ ไวยเจริญ และคณะ (2557) ที่ทำการศึกษการตรึงโลหะหนักในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา พบว่า โครงสร้างความเป็นผลึกภายหลังการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบผลึกโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรต (NASH) จำนวนมากกระจายตลอดมุมการเลี้ยวเบน และผลึกควอตซ์เปลี่ยนไปเป็นผลึกโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรตในบางตำแหน่ง

เมื่อศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล ที่บ่มในตู้อบด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบควอตซ์ มุลไลต์ และยังพบผลึกของโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรต (NASH) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน นอกจากนั้น โครงสร้างความเป็นผลึกของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่บ่มด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าความสูงของควอตซ์ ตำแหน่งมุมหักเห (2θ) เท่ากับ 28 องศา ของการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซิลิกอน และอะลูมิเนียมที่เป็นองค์ประกอบหลักถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และการใช้ความร้อนในการบ่มจะช่วยเร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วในช่วงต้น และสามารถพัฒนากำลึงอัดสูงในช่วงต้น โดยใช้ระยะเวลาอันสั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลึงอัดที่แสดงให้เห็นว่า การบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง มีการพัฒนากำลึงอัดได้ดีกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน

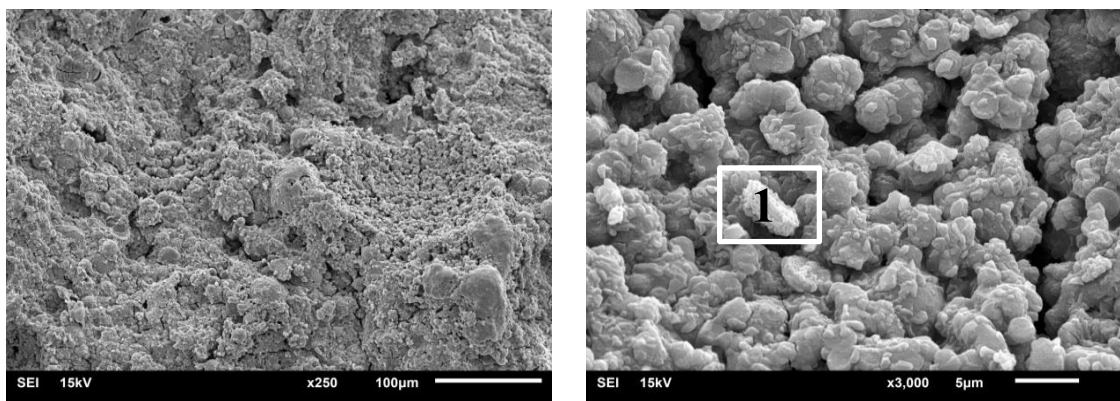


รูปที่ 4.6 โครงสร้างความเป็นผลึกของแก้วลอยของถ่านหินบิทูมินัส และจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากแก้วลอยของถ่านหินบิทูมินัส ของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

4.5 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 และ 0.25 โดยโมล ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน และบ่มในตู้อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จากผลการทดสอบกำลังอัด พบว่า ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด ทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และการบ่มด้วยความร้อนทั้งสองอุณหภูมิ ทุกอายุการบ่ม และเมื่อพิจารณากำลังอัดของบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดสูงสุด จึงนำมาศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

ตัวอย่างของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน ของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล แสดงภาพถ่ายทางโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ ดังรูปที่ 4.7 (a) และ (b) พบว่า สภาพพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ มีการรวมตัวของเจลเป็นกลุ่มก้อนกระจายบนพื้นผิวอนุภาคโดยรอบ ซึ่งคาดว่าเป็นเจลที่เกิดจากการรวมตัวของซิลิกอน และอะลูมิเนียม หลังจากถูกชะละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเกิดเป็นผลึกโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรต (NASH) ที่บริเวณที่ผิว แสดงดังรูปที่ 4.7 (b) ตำแหน่งที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fernandez, et al. (2004) สรุปขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าลอยได้ว่า ลักษณะปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดขึ้นจากบริเวณผิวของอนุภาคเถ้าถ่านหิน จากนั้นจะแพร่กระจายเข้าไปภายในโครงของอนุภาคแบบ Cenosphere หรือ Plerosphere จนเต็มโครง หรือจนกว่าเถ้าถ่านหินจะถูกทำปฏิกิริยาจนหมด และ Criado, et al. (2005) รายงานว่า การกระตุ้นเถ้าลอยด้วยด่างเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างมาก แต่คล้ายคลึงกับการเกิดซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ที่มีอะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นผลิตภัณฑ์หลัก และเป็นสารประกอบโคออดิเนชันทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral coordination) ของซิลิกา และอะลูมิเนียม แบบห่วงโซ่โพลิเมอร์ (Polymeric chain) ที่มี Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} โดยที่ประจุไฟฟ้าลบถูกแทนที่ด้วยไอออนบวกที่เป็นด่าง (Alkali cation) ระหว่างที่วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกา และอะลูมินาถูกสารละลายด่างชะ โดยสภาวะเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียสผลึกจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันกับการชะละลาย เมื่อนิวเคลียสมีขนาดใหญ่พอมันจะเริ่มกลายเป็นผลึก (Crystalline) แต่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต้องใช้เวลาานกว่าจะเสร็จสมบูรณ์



(a)

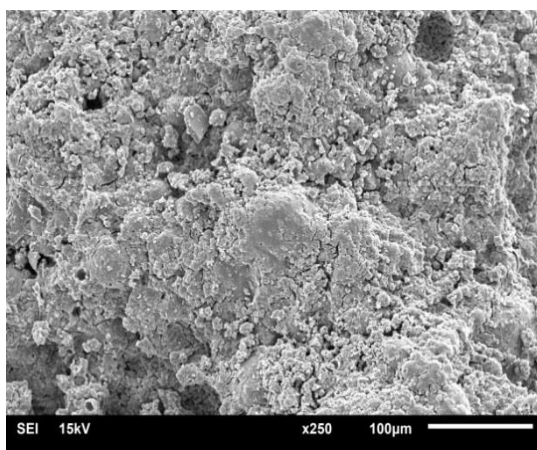
(b)

รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล บ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน

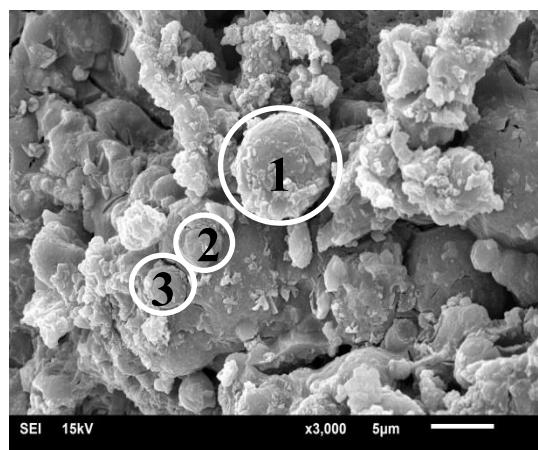
เมื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ สำหรับการบ่มด้วยความร้อน โดยนำ ก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล บ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.8 (a) และ (b) สำหรับการบ่ม ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และรูปที่ 4.8 (c) และ (d) สำหรับการบ่มที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง โดยการบ่มที่ ระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบลักษณะโครงสร้างของเถ้าลอยที่มีลักษณะเป็นทรงกลม และเจลในลักษณะที่ กระจายอยู่รอบๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 (b) ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 และยังพบรูที่มีขนาดใหญ่ในบริเวณ พื้นผิว เนื่องจากว่าอนุภาคของเถ้าลอยที่มีลักษณะกลม ขนาดต่างๆกัน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ อนุภาคของเถ้าลอยจะถูกกัดกร่อนที่บริเวณผิวของทรงกลมก่อนที่จะขยาย ออกเป็นรูที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 (c) และ (d) พบเจลที่ห่อหุ้มอนุภาคของเถ้าลอยที่มีความหนาแน่นมากขึ้น และ พบผลึกโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรตเรต (NASH) แสดงดังรูปที่ 4.8 (d) ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลังจากการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์กระจายอยู่บริเวณพื้นผิว และมีปริมาณ มากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์เซชัน และการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนทำให้เร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำ ระหว่างกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ทำให้น้ำระเหยออกจากผิว และภายในของก้อนจีโอพอลิเมอร์ สังเคราะห์ และแข็งตัวเป็นก้อนจีโอพอลิเมอร์ได้รวดเร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถ พัฒนากำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด โดยที่การบ่มด้วยความร้อน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง สอดคล้องกับ Palomo, et al., (2001) ที่ศึกษาโครงสร้าง

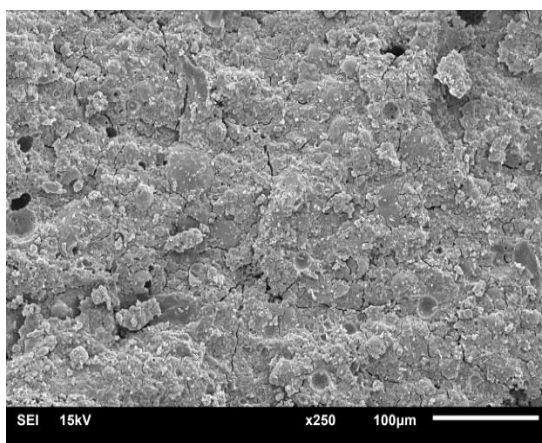
ทางจุลภาคของก้อน จีโอพอลิเมอร์พอสต์จากถ้ำลอย ขณะทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงส่วนของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นใหม่บนอนุภาคของถ้ำลอย และมีอนุภาคบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ โดยให้เหตุผลว่าถ้ำลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของต่าง ขนาดอนุภาคของถ้ำลอย และระยะเวลาในการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าการนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นผืนผืนกิดติดกันคล้ายเนื้อแก้ว



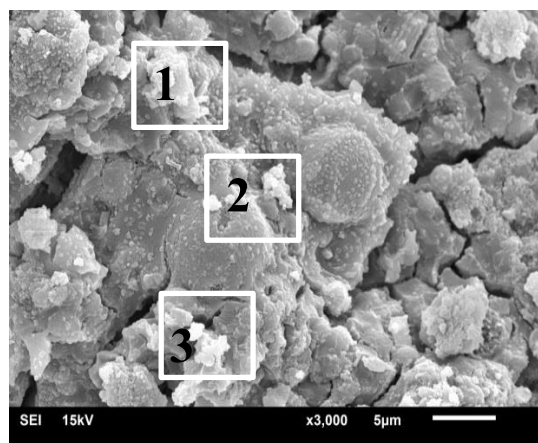
(a) กำลังขยาย 250 เท่า



(b) กำลังขยาย 3000 เท่า



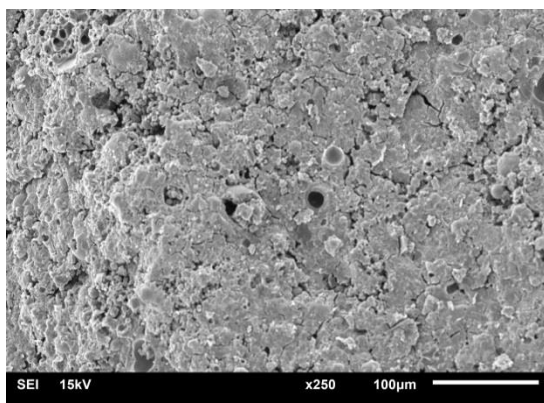
(c) กำลังขยาย 250 เท่า



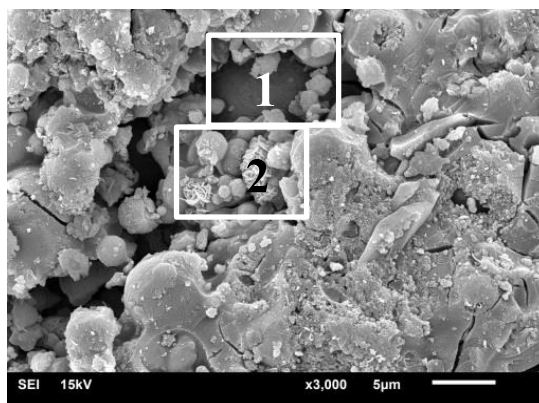
(d) กำลังขยาย 3000 เท่า

รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยของถ่านหินบิทูมินัส บ่มด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 (a และ b) และ 72 ชั่วโมง (c และ d)

จากนั้นทำการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส โดยบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สำหรับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยโมล แสดงดังรูปที่ 4.9 (a) และ (b) พบช่องว่างขนาดใหญ่ภายในอนุภาค แสดงดังรูปที่ 4.9 (b) ตำแหน่งที่ 1 และจุดที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นของโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (NASH) กระจายทั่วพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบผลึกของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ยังหลงเหลืออยู่ บริเวณตำแหน่งที่ 2 รูปที่ 4.9 (b)



(a) กำลังขยาย 250 เท่า



(b) กำลังขยาย 3000 เท่า

รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส บ่มด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ดังนั้น จากการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของทั้งสองสภาวะในการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส สำหรับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน และการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า การบ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ลักษณะของเจลจะเริ่มเกิดการรวมตัวขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และกระจายรอบๆ พื้นผิวของอนุภาค เนื่องจากการใช้ความร้อนในการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และเร่งการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูง แต่การแข็งตัวอย่างรวดเร็วอาจส่งผลให้โครงสร้างภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่การบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะดำเนินไปอย่างช้าๆ ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างเป็นระเบียบ แต่อาจต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์แข็งตัว ดังนั้น การใช้ความร้อนมาช่วยในการบ่มเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้สามารถลดระยะเวลาในการบ่มให้สั้นลง แสดงให้เห็นว่าการบ่มที่

อุณหภูมิห้อง ที่อายุการบ่ม 28 วัน เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ช้ากว่าการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของทั้งสองสถานะ

นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มด้วยความร้อนของอุณหภูมิทั้งสองที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน คือการบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้การบ่มที่อุณหภูมิการ 70 องศาเซลเซียส มีลักษณะของรูพรุนที่เกิดจากการหลุดของอนุภาคของเถ้าลอย และรอยแตกที่บริเวณพื้นผิวมากกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็วขึ้น โดยการชะละลายสารประกอบซิลิกอนและอะลูมิเนียม ออกมาจากเถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส ได้เป็นโครงสร้างลักษณะทรงสี่หน้า และเมื่อปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็วขึ้นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โมเลกุลของน้ำจะถูกดึงออกมาเพื่อให้ซิลิกาและอะลูมินาเกิดการเชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนอะตอมร่วมกัน และควบแน่นกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และกระจายตัวอยู่ในลักษณะที่เชื่อมขวางกัน ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้น้ำระเหยออกจากภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วระหว่างกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์แข็งอย่างรวดเร็ว และสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นสูง ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกร้าวของก้อนจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลเสียต่อโครงสร้างและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ (Van. et al., 2002) ส่งผลให้โครงสร้างภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์ของบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียความชื้น และแห้งอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นลักษณะรอยแตกร้าวภายในโครงสร้างมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่อายุการบ่มเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bakharev (2005) ที่ทำการศึกษาสภาพเนื้อของจีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์จากเถ้าถ่านหิน ที่ใช้สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา และบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 75 และ 95 องศาเซลเซียส พบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของก้อนจีโอพอลิเมอร์แตกต่างกันตามสถานะของการบ่ม โดยพบรอยแตกในเนื้อวัสดุ และพบอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากระจายอยู่ทั่วไป