บทที่ 4 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มและความเข้มข้นด่างต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาจากโรงผลิตน้ำบางเขนโดยนำมาทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สารกระตุ้นปฏิกิริยา และทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบไฟฟ้า เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน และลดระยะเวลาในการบ่ม ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างความเป็นผลึกของตะกอนดินประปา

ในงานวิจัยนี้ตะกอนดินประปาของโรงผลิตน้ำบางเขนมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง สีน้ำตาลอ่อน หรือสีเทาอ่อนอมน้ำตาลมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เนื่องด้วยตะกอนดินมีลักษณะคล้ายดินเหนียว ความละเอียดสูง และมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมโดยมีปริมาณซิลิกามากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณธาตุทั้งหมด และอะลูมิเนียมในรูป Al_2O_3ปริมาณร้อยละ 25.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งมาจากกระบวนการเติมสารส้ม ($Al_2(SO_4)_2.18H_2O$) เพื่อช่วยสร้างตะกอนในกระบวนการตกตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาโดยมีอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Al_2O_3 อยู่ระหว่าง 2-5 โดยน้ำหนักซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล จากงานวิจัยของ บุญฤทธิ์ คงแก้ว (2550) ทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา พบว่าตะกอนดินประปามีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 60 และอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีองค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยต้องนำตะกอนดินประปามาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากงานวิจัยของ Waijarean et al. (2014) พบว่าการเผาตะกอนดินประปาจะทำให้เกิดกระบวนการ dehydroxylation ซึ่งจะทำลายโครงสร้างผลึกกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ของตะกอนดินประปาและก่อนการนำมาใช้จะต้องทำการบดลดขนาดอนุภาคให้มีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสในการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของธาตุและสารละลายอัลคาไลน์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เทวนันท์ ทองหยาด (2553) ที่ทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา พบว่าตะกอนดินประปาเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดสูงกว่าดินตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผา สาเหตุที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่ไม่ผ่านการเผาจะให้ค่าการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำกว่าดินตะกอนประปาที่ผ่านการเผา ตะกอนดินประปาที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำจะใช้น้ำดิบจากลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งมีลักษณะทั่วไปของตะกอนดินจะมี

องค์ประกอบของซิลิกาเป็นหลัก และมีสารอินทรีย์เป็นส่วนผสมอยู่ในตะกอนดินประปา ซึ่งอาจจะรบกวนปฏิกิริยาในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าตะกอนดินประปาที่ผ่านการเผา ดังนั้นการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้สารอินทรีย์สลายไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำตะกอนดินประปามาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาทำการบดเพื่อให้อนุภาคตะกอนดินประปามีร้อยละคงค้างบนตะแกรง เบอร์ 325 ไม่เกิน 34 โดยหลังจากทำการบด 13 ชั่วโมงจะมีร้อยละน้ำหนักคงค้างบนตะแกรงเท่ากับ 18 โดยน้ำหนัก และทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence โดยใช้เทคนิค X-ray Diffract meter เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของตะกอนดินประปา ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.1

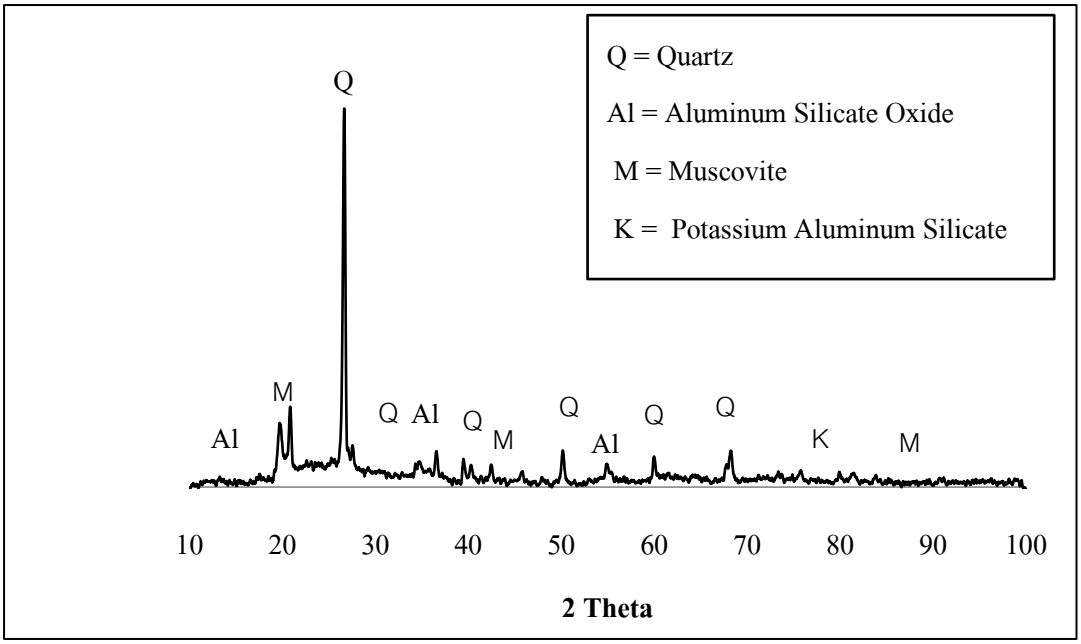
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินประปาเผาที่อุณหภูมิ 800±10 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
	ตะกอนประปา
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	60.6
อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3)	25.7
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	7.00
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	2.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.12
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.919
ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO)	0.903
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	0.342
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.345
อัตราส่วน Si/Al	2.35

จากตารางที่ 4.1 พบว่าตะกอนดินประปาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 60.6 โดยน้ำหนักเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 25.7 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2.35 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนโดยโมลที่แนะนำในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ประเภทพอลิไซอะเลตไซลอกโซ โดยที่

(Davidovit 2008) กล่าวว่าจีโอพอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondersation) ของ Silico-Aluminate จีโอพอลิเมอร์เป็นโซ่ หรือ เครือข่ายโมเลกุลที่เชื่อมโยงด้วยพันธะ Covalant bond โครงสร้างหลักจะประกอบไปด้วยปิรามิดด้านเท่าสี่ด้าน หนึ่ง สอง และสามหน่วย ได้แก่ พอลิไซอะเลต (Polysialate) พอลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate Siloxo) พอลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate Disloxo) Polysialate ที่อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 2 จะเป็นอัตราส่วนที่มีความเสถียรที่สุด

นอกจากนั้นมีการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.1 พบว่าตะกอนดินประปามีองค์ประกอบของที่เหมือนกันคือ ควอตซ์ (Quartz; SiO_2) ซึ่งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 28 องศา มีมุมเด่นชัดที่สูงที่สุด และนอกจากนั้นยังพบ อะลูมินัมซิลิเกตออกไซด์ (Aluminum Silicate Oxide) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างโมเลกุล Al_2SiO_5 และพบ มัสโคไวท์ (Muscovite) มีสูตรโมเลกุลคือ $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ และโพแทสเซียมอะลูมินัมซิลิเกต (Potassium Aluminum Silicate) มีสูตรโมเลกุลคือ $KAl_3Si_3O_{11}$ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Waijarean et al., (2014)



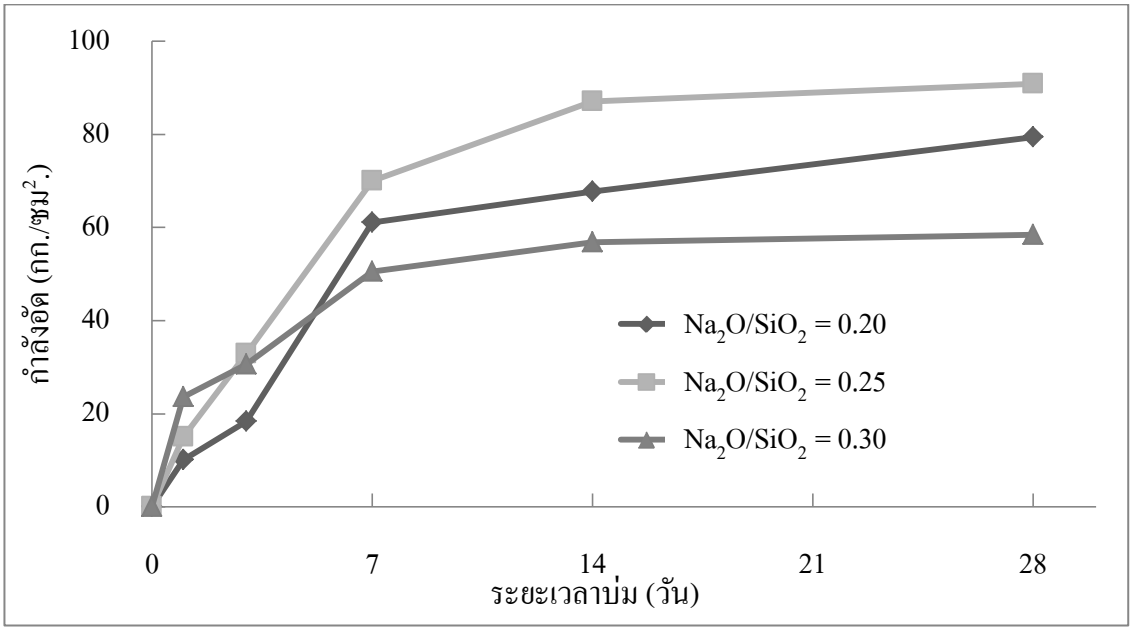
รูปที่ 4.1 โครงสร้างความเป็นผลึกของตะกอนดินประปาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง

4.2 ผลของความเข้มข้นด่างต่อการพัฒนากำลังอัดกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา

ในงานวิจัยนี้ได้นำตะกอนดินประปาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ อัลไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxides) เช่น NaOH และ KOH เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยซึ่งปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดกระบวนการชะละลายของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตจากผิวของตะกอนดินประปาออกมาทำปฏิกิริยา และควบแน่นเกิดเป็นพันธะของโพลิเมอร์ โดยปฏิกิริยานี้ส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์โดยตรง โดยงานวิจัยของ (Davidovits, 2008) กล่าวว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้มากที่สุดในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากราคาถูก และสามารถเลือกใช้ที่ระดับความเข้มข้นช่วงกว้าง การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ด่างในการกระตุ้นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในขั้นตอนการชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียม จำเป็นต้องใช้สารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูงเพื่อเพิ่มความสามารถในการชะละลายสารประกอบหลักที่อยู่ในโครงสร้างของตะกอนดินประปา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชาลินี อ่อนแสง (2554) ที่ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาที่สังเคราะห์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาในอัตราส่วน Na_2O/SiO_2 และ K_2O/SiO_2 และทุกอายุบ่ม พบว่าการให้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างกระตุ้นจะพัฒนาค่ากำลังอัดสูงกว่าการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากอัตราการชะละลายของซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับดีกรีของแคตไอออนไฮเดรชั่นซึ่ง $Na^+ > K^+$ โดยไอออนบวกของโซเดียมไอออน (Na^+) ที่มีขนาดเล็กกว่าจะเกิดการไฮเดรชั่นได้ดีกว่าไอออนบวกของโพแทสเซียมไอออน (K^+) ที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นอัตราการชะละลายสารอะลูมิโนซิลิเกตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงสูงกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

นอกจากนั้นงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีวิจัยของ Pimraksa et al. (2011) ยังทำศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอม มีค่าเท่ากับ 10 โมลาร์ (ที่อายุบ่ม 7 วัน) ซึ่งมีความเข้มข้นของโซเดียมไอออน (Na^+) เหมาะสมกับการการดุลประจุ ณ ตำแหน่ง $[AlO_4]^{5-}$ จากนั้นการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 130.9 กก./ซม.^{2} และลดลงเท่ากับ 119.7 กก./ซม.^{2} ที่อายุบ่ม 60 วัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกสารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.30 โดยโมล ผลการทดสอบแสดงดัง รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นค่าการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่เผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พบว่าค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปา โดยที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 จะมีการพัฒนากำลังอัดได้น้อยที่สุด โดยที่อายุบ่ม 1 และ 3 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 10 และ18 กก./ซม.^{2} และเมื่อเพิ่มอายุบ่มเป็น 7 วัน ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 61 กก./ซม.^{2} หลังจากนั้นการพัฒนากำลังอัดกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงมี โดยการบ่มที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน จะมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 68 และ 79 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การพัฒนากำลังอัดในช่วงระยะเวลาช่วงต้น 1 และ 3 วัน จะเป็นไปได้ช้า เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 เท่ากับ 0.20 มีค่าความเข้มข้นของสารกระตุ้นปฏิกิริยาต่ำสุด โดยมีค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 9.12 โมลาร์ เป็นผลทำให้การชะละลายไอออนของ Si^{4+} และ Al^{3+} ออกมาจากผิวอนุภาคดินตะกอนประปาได้น้อย ทำให้ปริมาณ $Al(OH)^-_4$ และ $Si(OH)^-_5$ ซึ่งเป็นตัวตั้งต้น

ที่จะนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าการพัฒนากำลังอัดช้า

จากนั้นเมื่อเพิ่มความที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2จาก 0.20 เป็น 0.25 ค่าการพัฒนากำลังอัดที่อายุบ่ม 1 และ 3 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 15 และ 33 กก./ซม.^{2} และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มที่อายุบ่ม 7 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 70 กก./ซม.^{2} และหลังจาก 7 วันการพัฒนากำลังอัดเกิดขึ้นอย่างช้า โดยที่อายุบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังอัด 87 กก./ซม.^{2} และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 28 วัน มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 91 กก./ซม.^{2} ค่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 มีค่าสูงกว่าที่อัตราส่วน 0.20 ทุกอายุบ่ม เนื่องจากที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 (มีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 11.75 โมลาร์) มีค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าอัตราส่วน Na_2O/SiO_2 0.20 เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นด่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขั้นตอนการชะละลาย (Dissolution) สารประกอบไอออนของ Si^{4+} และ Al^{3+} ออกมาจากผิวอนุภาคตะกอนดินประปาเกิดการรวมตัวกับไอออนของออกซิเจน เกิดเป็นปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดเป็นคอร์ออดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน เชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si และ Al ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] จากนั้นจะทำการควบแน่น และเกิดการรวมตัวของโมโนเมอร์ได้โครงข่ายของอะลูมิโนซิลิเกต ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น ความเข้มข้นของด่างเพิ่มจะเกิดความร้อนขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา ส่งผลต่อขั้นตอนการกลายเป็นเจล (Gelation) โดยที่การชะของอสัณฐานอะลูมิโนซิลิเกตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าพีเอชสูง แล้วเกิดสารละลายอะลูมิโนซิลิเกตอิ่มตัวอย่างมาก (Supersaturated Aluminosilicate Solution) สารละลายเข้มข้นนี้จะอยู่ในรูปเจล ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ ในรูปแบบสภาวะที่มีน้ำมีโครงข่ายใหญ่โดยการควบแน่น กระบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่สะสมระหว่างการชะละลาย และเกิดโครงสร้างใหม่ ส่งผลโครงแน่นและทำให้จีโอพอลิเมอร์สามรถรับกำลังอัดได้ดี

จากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 จาก 0.20 เป็น 0.30 มีแนวโน้มเหมือนกับจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_3 เท่ากับ 0.20 และ 0.25 และมีค่ากำลังอัดสูงกว่าในช่วงอายุบ่ม 1 และ 3 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 24 และ 33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่ากำลังอัดมากกว่าที่ อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 และ 0.25 ที่อายุบ่ม 1 วัน เท่ากับร้อยละ 57 และ 45 ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_3 เท่ากับ 0.3 เป็นอัตราส่วนที่ ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ความร้อนและค่าพีเอชเพิ่มภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์และ 44.06 และที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 ที่อายุบ่ม 1 วัน เท่ากับร้อยละ 36.33 เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.30 เป็นอัตราส่วนที่มีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง จะทำให้ความร้อน

เพิ่มและค่าพีเอชสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้อัตราการชะละลายสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตออกจากผิวตะกอนประปาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสามารถพัฒนาได้ดีช่วงอายุต้น จากนั้นเมื่อเพิ่มอายุบ่มเป็น 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น โดยที่ค่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 51 กก./ซม.^{2} และมีค่าเพิ่มขึ้นที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน ทั้งนี้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่ถูกชะละลายออกมาในปริมาณมากทำให้เกิดสารประกอบหลักการตกตะกอน เกิดการควบแน่นได้น้อยเนื่องจากโครงสร้างเกิดการก่อตัวเร็ว ซึ่งสารประกอบหลักที่ถูกชะออกมาบางส่วนยังไม่เกิดปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อย

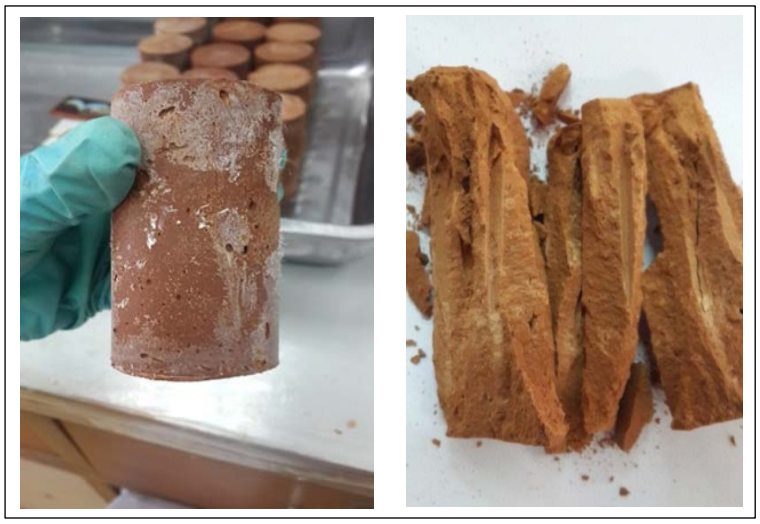
ค่ากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.30 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 และ 0.25 เนื่องจาก ปริมาณความเข้มข้นที่สูง จะส่งผลดีต่อการชะละลายของสารตั้งต้นได้ดีในช่วงต้น และหลังจากนั้นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่ถูกชะออกมาจะเกิดการตกตะกอน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่ากำลังอัดต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนอื่น ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zuhua et al. (2009) พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง (เช่น 12 โมลาร์) จะเร่งการชะละลายและการไฮโดรไลซิส แต่จะขัดขวางการควบแน่นของสายโพลิเมอร์ และยังสอดคล้องกับงาน Pimraksa et al. (2011) รายงานว่า เมื่อความเข้มของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 12 โมลาร์ ค่ากำลังอัดจะมีค่าลดลง เพราะความรุนแรงของสารละลายทำให้ส่วนผสมมีความหนืดขึ้นส่งผลให้ในขั้นตอนการผสมตัวอย่างสดมีความหนืดสูงขึ้นส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายไอออนออกจากผิววัตถุดิบตั้งต้นลดลง

นอกจากนั้นงานวิจัยของ Rattanasak U. and Chindaprasirt P. (2009) ทำการศึกษาการชะละลาย Si^{4+} และ Al^{3+} ในเถ้าลอย ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ ผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5, 10, 15 โมลาร์ ทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ Si^{4+} ที่ถูกชะออกมาจากเถ้าลอยอยู่ในช่วง 200, 600 และ 260 ppm ตามลำดับ ซึ่งที่ความเข้มข้นของโซเดียม ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ มีความสามารถในการชะละลาย Si^{4+} ออกจากเถ้าลอยได้สูงที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 15 โมลาร์ พบว่าค่าการชะละลาย Si^{4+} ในเถ้าลอยลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง จะส่งผลให้ Si^{4+} เกิดการตกตะกอนเช่นเดียวกับการชะละลาย Al^{3+} ซึ่งทำการชะละลายเช่นเดียวกับ Si^{4+} โดยอัตราการชะละลายสารประกอบทั้งสองชนิด มีค่าไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าการชะละลาย Al^{3+}จะน้อยกว่า Si^{4+} เนื่องเถ้าลอยมีองค์ประกอบของ SiO_2ที่สูงกว่า

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำกำลังอัดสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนมาเปรียบเทียบกันพบว่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทุกอัตราส่วน สามารถพัฒนากำลังอัดได้เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น โดยสามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 7 วันแรก และเมื่อเพิ่มอายุบ่มที่ 14 และ 28 วัน ค่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 มีค่าการพัฒนากำลังอัดได้สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Waijarean et al. (2014) และ ชาลีนี อ่อนแสง (2554) ที่ทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณความเข้มของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด การผสมตะกอนดินประปาและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดความร้อนสูงซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัว เป็นผลให้เกิดรูพรุนจำนวนมากภายในก้อนตัวอย่าง ค่าความเข้มข้นด่างที่สูงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (W/S) จะลดลงเมื่ออัตราส่วนของ Na_2O/SiO_3 เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ De Vergas et al. (2011) อัตราส่วนโดยโมลของ Na_2O/SiO_2 มีค่าเหมาะสมอยู่ในช่วง 0.2-0.48 โดยโมล Davidovits (2008) และยังเสนอว่า ซึ่งการเพิ่มสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมทำให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนโพรงที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง Chindaprasirt et al. (2007) รายงานว่า และสารละลายด่างกระตุ้นที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์มีความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้มีสารละลายส่วนเกินที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด เมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน จะทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) ทำให้เกิดผลึกโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เกาะบริเวณผิวด้านนอกของก้อนจีโอพอลิเมอร์ คล้ายกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2014) พบว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มระยะเวลานานที่อุณหภูมิห้องพบผลึกสีขาว (Efflorescence) ดังรูปที่ 4.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศในสภาวะมีความชื้น ส่งผลทำให้เกิดการก่อตัว ของโซเดียมคาร์บอเนตที่มีสมบัติไม่สามารถละลายได้ ซึ่งแสดงดังสมการดังนี้

$$CO_2\,(g) + 2OH^-\,(aq) \longrightarrow CO_3^{2-}\,(aq) + H_2O$$

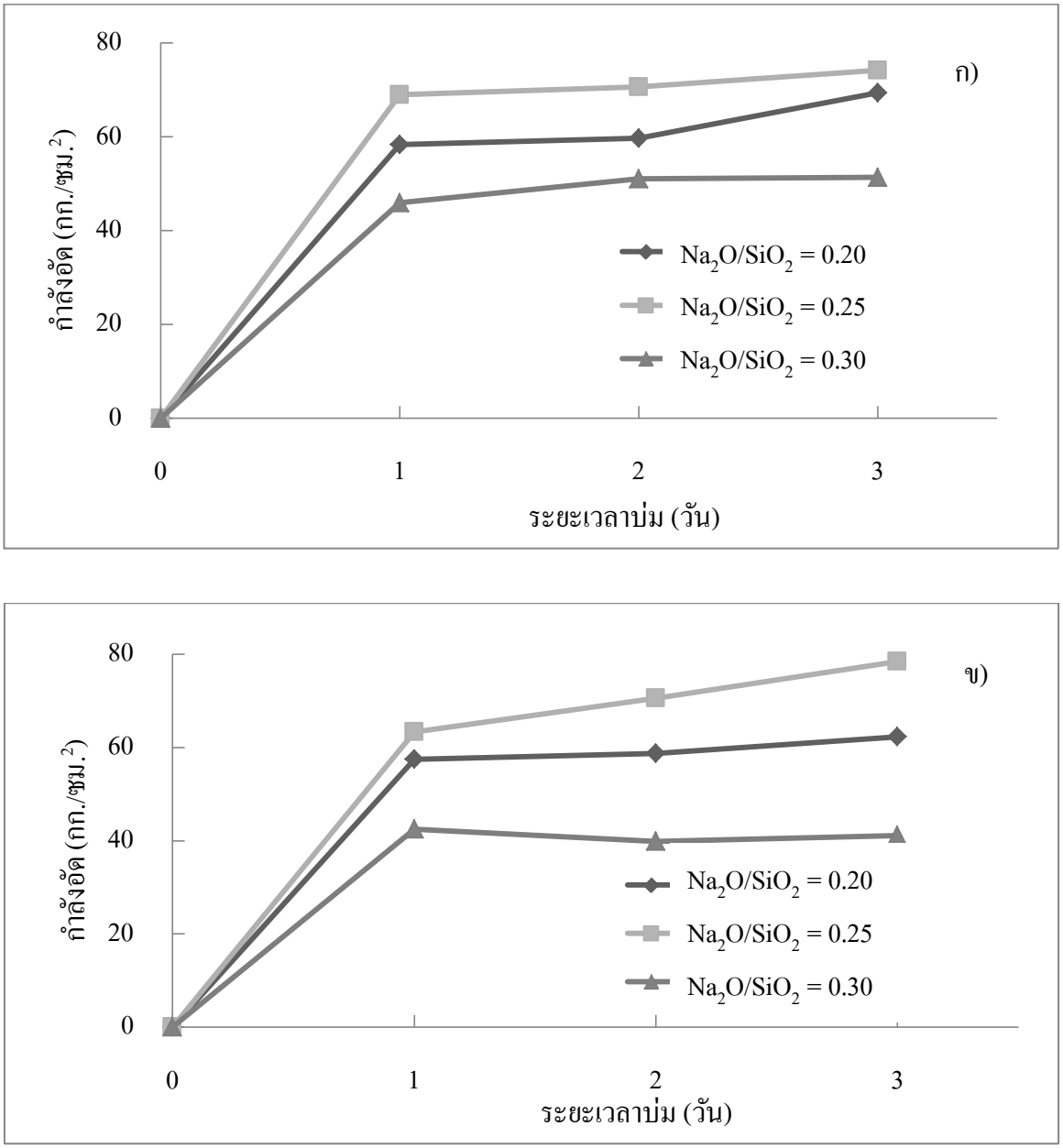
$$2Na^+\,(aq) + CO_3^{2-}\,(aq) + 7H_2O \longrightarrow Na_2CO_3\,.7H_2O\,(s)$$



รูปที่ 4.3 ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีผลึกโซเดียมคาร์บอเนตเกาะบริเวณผิวก้อนตัวอย่าง

4.3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อการกำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์

ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์นอกจากจะใช้สารละลายด่างในการกระตุ้นปฏิกิริยา งานวิจัยนี้ยังมีการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาต่อการพัฒนากำลังอัดโดยทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง 50 และ 70 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาบ่มต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ ก) 50 องศาเซลเซียส ข) 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มด้วยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 2 และ 3 วัน เมื่อครบอายุทดสอบจะนำไปทดสอบกำลังอัด พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายด่าง ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.2 ระยะเวลาบ่ม 1 วันบ่ม 50 องศาเซลเซียส มีค่าการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็ว โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 69 กก./ซม.^{2} และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 2 วัน มีค่ากำลังเท่ากับ 60 กก./ซม.^{2} จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็นเวลา 3 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 70 กก./ซม.^{2} ซึ่งจากผลทดสอบกำลังอัดพบแสดงให้เห็นว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสสามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนจากการบ่มจะเร่งอัตราการชะละลายสารประกอบหลักออกจากสารตั้งต้น ปฏิกิริยาเกิดได้เร็ว ส่งผลให้ก้อนจีโอพอลิเมอร์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วันแต่ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 82 เมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน แต่เพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 2 วัน และ 3 วัน การพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 83 และ 85 เนื่องจากความร้อนจะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงแรกแต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มขึ้นเป็นการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาของตะกอนดินประปาในส่วนที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนั้นความร้อนจะส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำในก้อนจีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำภายในก้อนตัวอย่าง อาจจะทำให้ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง การสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากในขั้นตอนการชะละลายสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตเพื่อมาทำปฏิกิริยา การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะต้องการน้ำเป็นตัวพาให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กระจายเข้าสู่ภายในก้อนตัวอย่าง และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 ที่บ่มอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 69 กก./ซม.^{2} และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มที่อายุบ่ม 2 วัน เพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 71 กก./ซม.^{2} และที่อายุบ่ม 3 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 74 กก./ซม^2 แนวโน้มการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 แต่จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่า และยังเป็นอัตราส่วนที่สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงสุด เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นด่างที่เหมาะสมและอุณหภูมิที่สูงส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายส่งผลให้ซิลิกินและอะลูมิเนียมชะละลายออกจากผิวตะกอนดินประปาออกมาอย่างรวดเร็วและทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างภายใต้ปฏิกิริยาความร้อน เกิดการก่อตัวเป็นเจลขึ้นที่อนุภาคอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะรวมตัวกับไอออนของออกซิเจนเกิดเป็นคอร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน เกิดการรวมตัวของ monomer และoligomers ได้โครงข่ายของอะลูมิโนซิลิเกต และเมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นเกิดการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์แบบสลับ (cross link) หนาแน่นและมากขึ้นทำให้โครงสร้างแน่นมีรูพรุนลดลง ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดได้

จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ

0.20 และ 0.25 โดยค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 1 2 และ 3 วัน เท่ากับ 38 40 และ 42 กก./ซม.^{2} จากผลการทดสอบค่ากำลังอัดพบว่าที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 เป็นอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดต่ำที่สุดสำหรับการทดลองนี้ เนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายด่างที่สูงเกินไป ประกอบกับความร้อนจากการบ่มทำให้เร่งการชะละลายของ ซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดช่องว่างจำนวนมาก เป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

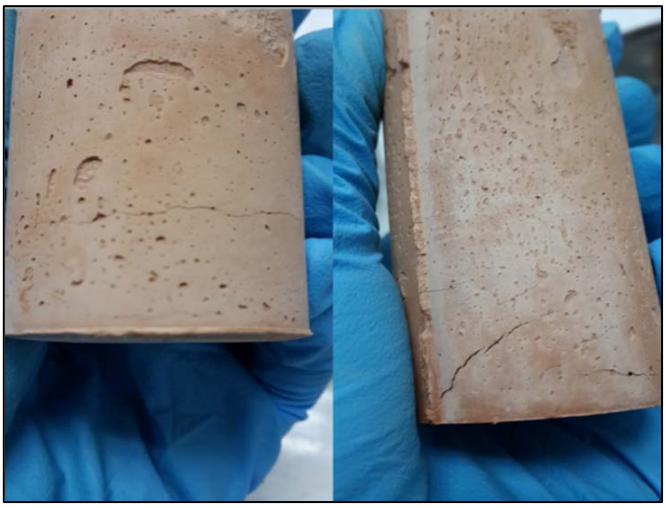
จากรูปที่ 4.4 พบว่าทุกอัตราส่วนความ Na_2O/SiO_2 ของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ค่ากำลังอัดสามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ทำให้ก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สมภพ แต้บ้านฮวด (2555) ที่รายงานว่าค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีสภาวะการบ่มที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 31 เมกกะปาสคาล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ดังนั้นการบ่มความร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ทำให้ก้อนตัวอย่างรับแรงอัดได้สูงในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเข้าสู่ระบบ โดยปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ได้ และเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 2 และ 3 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่ให้ในช่วง 2 และ 3 วัน เป็นเพียงแต่การเพิ่มการชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกจากตะกอนดินประปา ที่ยังไม่ถูกชะละลายในช่วง 1 วันแรกเท่านั้น ซึ่งทำให้จะมีปริมาณไม่สูงมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Chindaprasirt et al. (2007) ที่รายงานว่าการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยโดยใช้ความร้อนบ่มที่ระยะเวลานานเกินไปจาก 24 ชั่วโมง เป็น 48 ชั่วโมง มีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยความร้อนจากการบ่มที่นานในช่วงที่เกิน 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว อาจจะทำให้ปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เกิดปฏิกิริยาไม่สมบรูณ์ ทำให้เกิดการเรียงตัวของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์เกิดรอยร้าว จึงเป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อบ่มที่ระยะเวลานานขึ้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบ่ม เป็น 70 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.4 ข) พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 สามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วที่อายุบ่ม 1 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 57 กก./ซม^2. จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 2 และ 3 วัน พบว่าค่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 59 และ 62 กก./ซม^2. การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แต่การบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสจะมีค่า

กำลังอัดต่ำกว่า เนื่องจากการบ่มที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิจะเร่งปฏิกิริยาการชะละลายสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตออกจากตะกอนดินประปาอย่างรวดเร็ว และเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำที่อยู่ก้อนตัวอย่าง ส่งผลให้ก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วและเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้มีรูพรุนมากนอกจากนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นยังเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาทำให้โครงสร้างที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเกิดการพัฒนาและขยายตัวทำให้เกิดแรงดันภายในโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดรอยร้าวเล็กๆ ภายในก้อน ทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

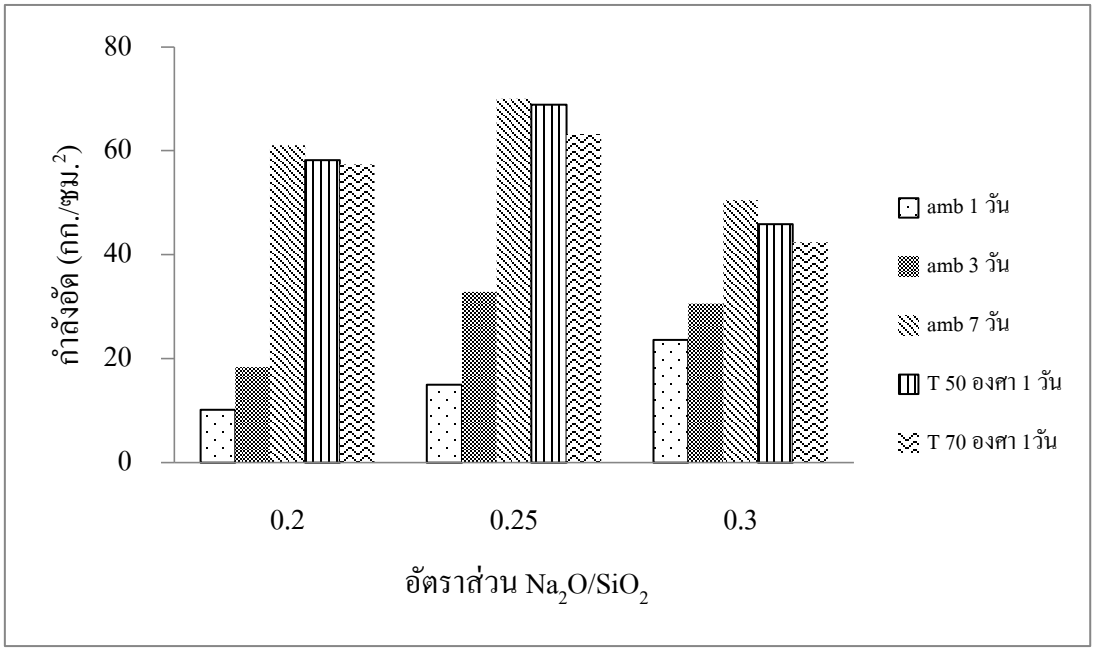
จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 พบว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์มีการพัฒนากำลัดสูงกว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นด่างที่ 0.25 เป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกระตุ้นที่ โดยตัวอย่างที่บ่มอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาบ่ม 1 2 และ3 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 64 71 และ 78 กก./ซม^2.ตามลำดับ ค่าการพัฒนากำลังอัดสามารถพัฒนาได้อย่างรวดเร็วที่อายุบ่ม 1 วัน และเมื่อค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ระยะเวลาบ่มเพิ่มเป็น 2 และ 3 วัน ส่วนที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.30 เป็นอัตราส่วนที่มีความเข้มข้นด่างสูงเกินไป (14 โมลาร์) ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดมีค่าต่ำกว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 และ 0.25

จากการศึกษาอุณหภูมิการบ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย เจริญชัย ฤทธิรุทธ (2550) ที่ศึกษาจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากดินขาวระนองเผา พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับบ่มจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากดินขาวเผานั้นจะอยู่ประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิในการบ่มสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งอาจจะเกิดจากสองกรณีด้วยกัน กรณีแรกโครงสร้างภายในแห้งไม่มีความความชื้นอยู่จากการสูญเสียความชื้น กรณีที่สองคือการเร่งอุณหภูมิสูงอย่างทันทีทำให้การเกิดการเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างภายในเกิดการยึดเหนียวกันอย่างไม่แข็งแรง



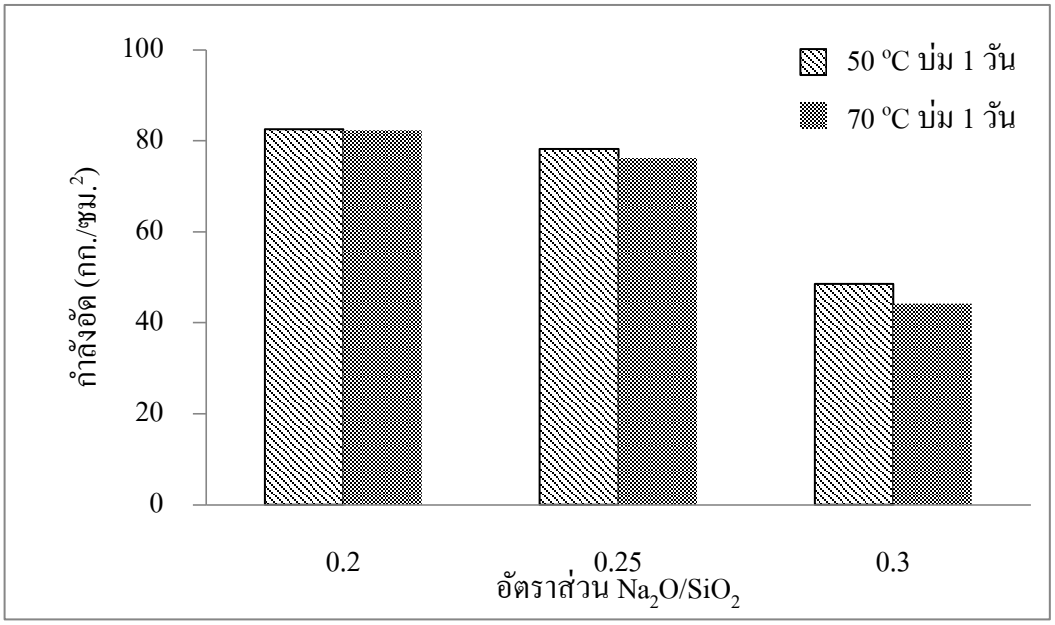
รูปที่ 4.5 รอยร้าวของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้องและและบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศา เป็นเวลา 1 วัน พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาทุกอัตราส่วนผสมที่บ่มในอุณหภูมิห้องมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ซึ่งการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องในช่วงแรก (1-3 วัน) ปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์จะเกิดได้ค่อนข้างช้า และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเพิ่มเป็น 7 วัน พบว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่หลังเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่บ่มอุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ที่มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาที่บ่มอุณหภูมิห้อง ที่มีการพัฒนากำลังอัดอายุบ่ม 1 และ 3 วัน โดยก้อนจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 58 กก.ซม.^{2} ซึ่งมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มอุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาบ่ม 1 และ 3 วัน ถึงร้อยละ 82 และ 68 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 พบว่าค่ากำลังอัดมีค่าสูงกว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มอุณหภูมิห้อง 1 และ 3 วัน ถึงร้อยละ 82 และ 67 ตามลำดับ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิบ่มที่ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้นมีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 และ 0.30 ทั้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิบ่ม 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดสูงกว่าก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่บ่มอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 และ 3 วัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์บ่มที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส

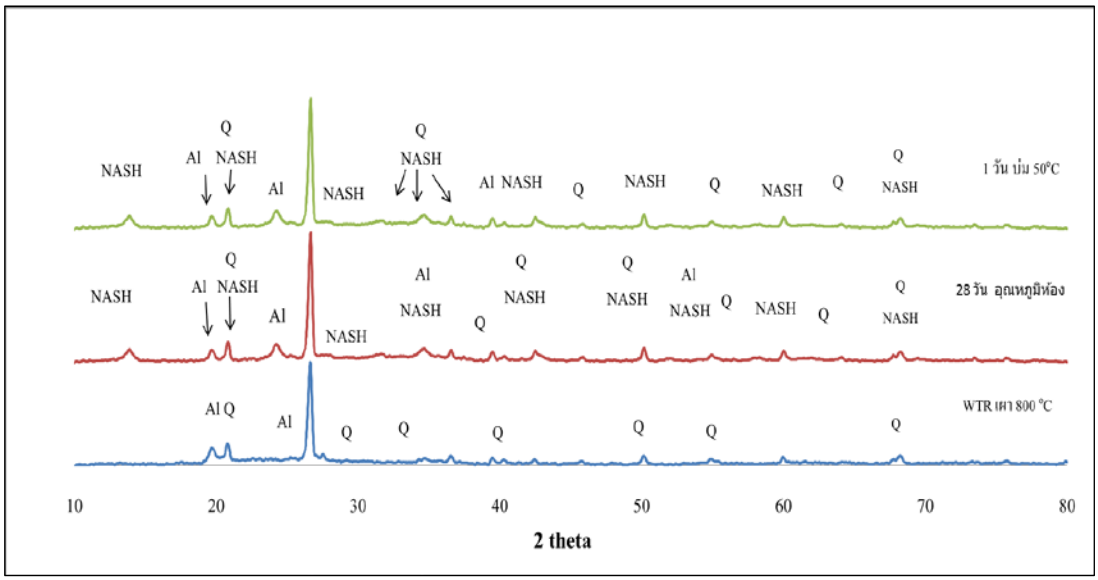
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าร้อยละ การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา ที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เทียบกับก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นสภาวะในการบ่มที่เหมาะสมกับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา คือบ่มที่อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีค่ากำลังอัดไม่แตกต่างจากการบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพียงเล็กน้อยและอีกทั้งยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานอีกด้วย



รูปที่ 4.7 ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา

การศึกษาโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา โดยนำมาทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1ชั่วโมง ผสมกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.20 0.25 0.30 และบ่มที่อายุ 1 3 7 14 และ 28 วันที่อุณหภูมิห้อง และบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 และ 3 วัน จากผลการทดสอบค่ากำลังอัด พบว่าอัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่า 0.25 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงที่สุด ทั้งนี้บ่มที่อุณหภูมิห้อง และการบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ทุกอายุบ่มและเมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา ที่อุณหภูมิบ่ม 50 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากำลังอัดที่อัตราส่วนผสมและระยะเวลาในการบ่มเท่ากันและมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่า 0.25 ที่ อายุบ่มเป็นเวลา 28 วัน และ ก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่อายุบ่ม 1 วัน ที่อุณหภูมิบ่ม 50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงสุดมาทำการศึกษาโครงสร้างผลึก



รูปที่ 4.8 รูปแบบโครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา Q = Quart (SiO_2), NASH = Sodium Aluminum Silicate Hydrate ($Na_6(AlSiO_4)_6.4H_2O$), Al = Aluminum Oxide (Al_2O_3)

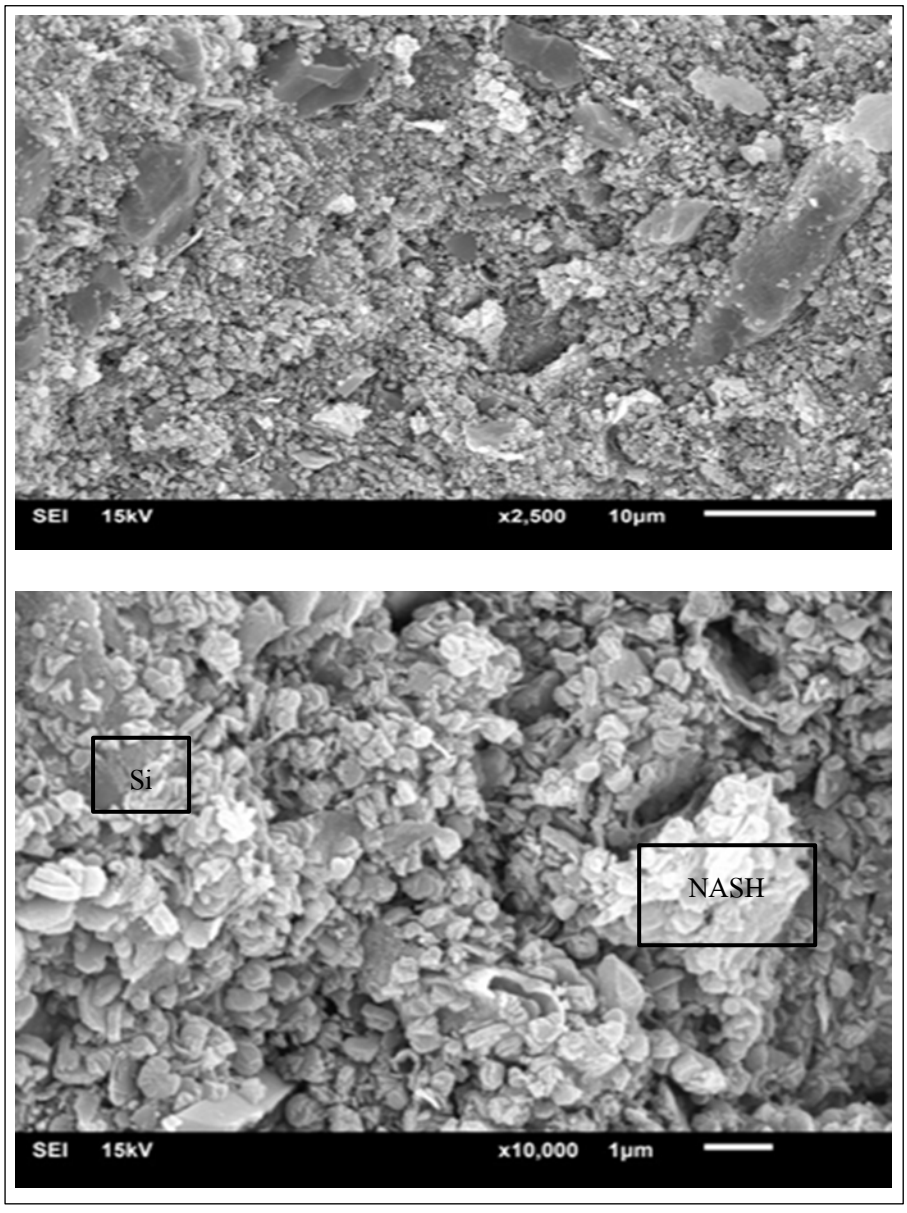
ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินตะกอนประปา เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลานาน 1 ชั่วโมง พบว่าองค์ประกอบหลักของดินตะกอนประปา ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz; SiO_2) ซึ่งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 theta เท่ากับ 28 องศา และนอกจากนั้นยังพบ อะลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์และมัสโคไวท์ เป็นต้น และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 ที่อายุบ่ม 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง จะพบพีคของผลึก Quartz และ Aluminum Oxide เป็นพีคหลัก และบางตำแหน่งถูกเปลี่ยนไปเป็น Sodium Aluminum Silicate Hydrate และพบพีคของ Sodium Aluminum Silicate Hydrate มีสูตรโครงสร้าง ($Na_6(AlSiO_4)_6.4H_2O$ จากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างตะกอนดินประปาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดการชะละลาย ซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมารวมกับอะตอมของออกซิเจนอยู่ในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้าเป็นพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าของ Si^{4+} และ Al^{3+} เกิดการรวมตัวกันเป็นโมนอเมอร์ ได้โครงข่ายของอะลูมิโนซิลิเกต ทำให้โครงสร้างมีความแน่นเพิ่มขึ้นและสามารถพัฒนากำลังอัดได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Waijarean et al. (2014) ศึกษาจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากกากเหลือทิ้งโรงประปาเผาที่อุณหภูมิ 800 นาน 1 ชั่วโมง จะปรากฏโครงสร้างผลึกของ Sodium Aluminum Silicate Hydrate (NASH) มีสูตรโครงสร้าง $Na_{96}Al_{96}Si_{96}O384.216H_2O$ และยังพบผลึกควอซต์ และอลูมิเนียมออกไซด์จะถูกแทนที่ด้วยพีค NASH เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

นอกจากนั้นการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบพีคของผลึก Quartz และ Aluminum Oxide เป็นพีคหลัก และบางตำแหน่งถูกเปลี่ยนไปเป็น Sodium Aluminum Silicate Hydrate เช่นเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน มีการพัฒนากำลังอัดเหมือนกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด โดยค่ากำลังอัดของการบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจะมีค่าน้อยกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องที่อัตราส่วนความเข้มข้นด่างเท่ากัน เนื่องจากการบ่มที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและเกิดรอยร้าวบริเวณก้อนตัวอย่าง

4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา

ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา จะใช้ก้อนตัวอย่างที่มีค่าการพัฒนากำลังอัดสูงที่สุด เพื่อดูโครงสร้างระดับจุลภาคหลังจากเกิดปฏิกิริยา จากรูปที่ 4.8 ภาพถ่ายระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 28 วัน พบผลึกหลายรูปทรง และจับตัวเป็นแผ่นซ้อนทับกัน นอกจากนั้นยังมีบางส่วนมีลักษณะคล้ายเจลก่อตัวอย่างหนาแน่น ซึ่งบริเวณที่เกิดเจล น่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการรวมตัวของ ซิลิกอน และ อะลูมิเนียม ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดการจัดเรียงโครงสร้างเป็นสารประกอบ Sodium Aluminum Silicate Hydrate ปรากฏเป็นเจลโดยรอบบริเวณ ลักษณะการเกิดเจลเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการบ่มที่อุณหภูมิห้องปฏิกิริยาจะค่อยๆ ดำเนินไปส่งผลให้อัตราการเกิดช้า สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่ถูกชะละลายออกจากตะกอนดินประปาจะทำปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงภายในก้อนตัวอย่าง แต่การบ่มก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปค่อนข้างช้า ส่งผลให้ก้อนตัวอย่างเกิดการเชื่อมโยงโครงข่ายพอลิเมอร์อย่างหนาแน่น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบรูณ์

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Waijarean et al. (2014) ที่พบรายงานภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากกากเหลือทิ้งโรงประปาเมื่อสิ้นสุดการบ่มที่ 28 วัน พบว่า ภายหลังถูกชะละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารอะลูมิโนซิลิเกตจะถูกกัดกร่อนปรากฏให้เห็นพื้นผิวขรุขระ และปรากฏผลึกรูปทรงเหลี่ยมซ้อนกันเป็นกลุ่มกระจายทั่วพื้นผิวและก่อตัวเป็นเจลขึ้นที่ผิวอนุภาค ลักษณะดังกล่าวเป็นผลจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ชะละลายสารอะลูมิโนซิลิเกตและถูกสะลายพันธะ เกิดการแลกเปลี่ยนประจุทำให้อิออนของอะลูมิเนียมเกิดการรวมตัวกับอิออนของออกซิเจนเกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2552)

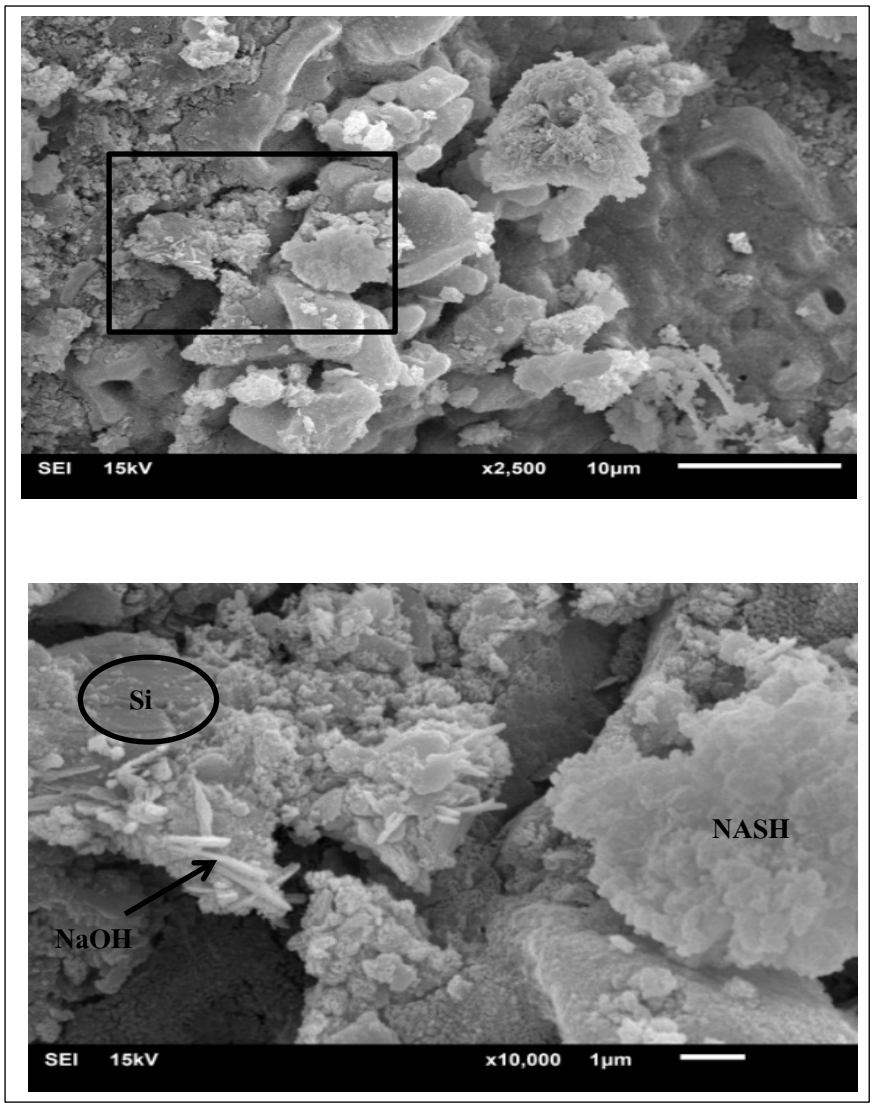


รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะพื้นผิวของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาบ่มที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาบ่มนาน 28 วัน

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 วัน พบช่องว่างภายขนาดใหญ่และพบลักษณะเจลเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนบริเวณพื้นผิวกระจายอยู่รอบๆ ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากเจลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาการควบแน่นเกิดการก่อตัวมีลักษณะเป็นเจลของ Sodium Aluminum Silicate Hydrate ซึ่งเกิดการเกาะก่อตัวภายใต้การกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อน โดยที่ความร้อนจะเร่งปฏิกิริยาการควบแน่น

ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์แข็งตัวอย่างรวดเร็ว สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่ถูกชะออกมาในกระบวนการชะละลายเกิดการควบแน่นไม่ทัน เนื่องจากความร้อนจะเร่งให้เกิดการก่อของก้อนตัวอย่างที่รวดเร็ว และน้ำที่อยู่ภายในก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เกิดการระเหยออกไปอยากรวดเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์อาจจะเกิดเพียงบางส่วน ทำให้เกิดรูพรุนในก้อนตัวอย่างมาก อีกทั้งอาจทำให้รอยร้าวภายในก้อนตัวอย่างอีกด้วย

นอกจากนั้นความร้อนจากการบ่มยังทำให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียม ที่แทรกอยู่ในโครงสร้างยังสามารถพัฒนาเป็น Sodium Aluminum Silicate Hydrate ได้ต่อ เป็นผลทำให้โครงสร้างมีการขยายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดแรงดันภายในเป็นผลทำให้เกิดรอยร้าวภายในก้อนตัวอย่าง ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิวของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปาที่อายุบ่ม 1 วัน อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส