

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

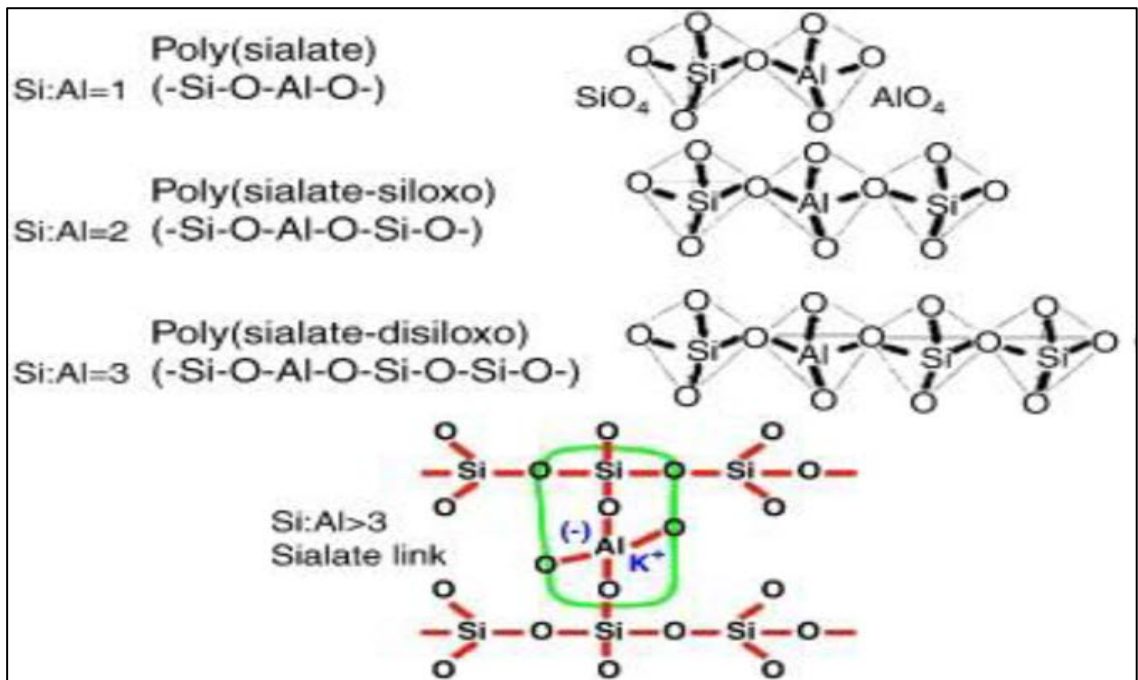
2.1 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) กับสารละลายซิลิเกต (Silicate) ภายใต้สภาวะความเป็นเบสสูง เรียกว่า ปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ได้สารประกอบ อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) เรียกว่า จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) (Davidovits, 2008) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารประกอบ จีโอพอลิเมอร์อนินทรีย์ มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) ไม่มีรูปร่างแน่นอน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) สภาวะต่างจากการ เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์หรือสารละลายซิลิเกต (Silicate) เร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัว และพัฒนาความสามารถรับกำลังอัดได้ ชื่อของ จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) รู้จักครั้งแรกในปี ค.ศ. 1970 ณ Saint-Quentin ประเทศฝรั่งเศส จากผลงานวิจัยของ Joseph Davidovits ถึงแม้ว่าก่อนหน้านี้ปี ค.ศ. 1950 ในสหภาพโซเวียต (Soviet Union) มีการพัฒนาวัสดุที่มีสมบัติคล้ายกับจีโอพอลิเมอร์ เกิดขึ้นโดย Glukhovskiy G.V. ภายใต้ชื่อ Soil cements แต่ชื่อนี้ไม่ได้รับความนิยมเพราะความใหม่ของ สมบัติหลายด้านของจีโอพอลิเมอร์ เช่น เป็นวัสดุที่ใช้เคลือบผิวสามารถห่อหุ้มของเสียและลดการ เคลื่อนย้ายสารอันตรายได้ เป็นตัวเชื่อมประสานซึ่งมีสมบัติเหนียวคล้ายกาว เป็นวัสดุทนไฟ เป็น ฉนวนกันความร้อน เป็นวัสดุตกแต่ง มีความแข็งแรงคล้ายซีเมนต์ และ ที่สำคัญเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อมและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ ทั้งนี้การเลือกวัสดุและกระบวนการสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ มีสมบัติเปลี่ยนแปลงมาก เช่น การรับ แรงอัด การหดตัว ระยะเวลาการก่อตัวเร็วหรือช้าความคงทนต่อสภาวะต่างๆ บุญฤทธิ์ แก้วคง, (2550)

ดังนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์จึงมีการวิจัย และพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมมาเป็นระยะเวลายาวนาน โดย ผลงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัสดุในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ จากผลิตภัณฑ์ใน กระบวนการเผาไหม้สารอินทรีย์ ได้แก่ ดินขาวเผาเถ้ากลบ เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอยจากการเผาไหม้ ถ่านหิน และตะกอนเหล็กจากเตาเผา (Blast Furnace Slag) เป็นต้น มาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ สารจีโอพอลิเมอร์ ด้วยจุดเด่นของต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้ ปูนซีเมนต์ ประมาณร้อยละ 10-30 และ สมบัติคล้ายซีเมนต์ Zhang et al. (2008)

2.1.1 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์

โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการจับกันระหว่างโมเลกุลของ Si^{+4} และ Al^{+3} เกิดพันธะโคออดิเนตแบบ 4 แขนกับออกซิเจน และทำปฏิกิริยากันไปจนเรื่อยจนเกิดเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ จีโอพอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ของ Silico-Aluminate จีโอพอลิเมอร์เป็นโซ่หรือเครือข่ายโมเลกุลที่เชื่อมโยงด้วยพันธะ Co-valent bond โครงสร้างหลักจะประกอบไปด้วยพีรามิดด้านเท่าสี่ด้าน หนึ่ง สอง และสามหน่วย ได้แก่ โพลีไซอะเลต (Polysialate) โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate Siloxo) โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate Disiloxo) Polysialate ย่อมาจาก Akali Silicon-Oxo-Aluminate ต่างเริ่มต้นจะใช้ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของโครงสร้างโมเลกุล Sialate รวมไปถึง 4 หน่วยย่อยที่แบ่งโดยใช้อัตราส่วนของอะตอม Si:Al



รูปที่ 2.1 รูปแบบพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์ Li et al. (2010)

2.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์

การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์เกิดได้โดย ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งเกี่ยวข้องกับการชะละลาย (Dissolution) การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) การก่อเจล (Gelation) การจัดเรียง (Reorganization) และการรวมตัวเป็นสารเกาะกลุ่ม (Polymerisation) ซึ่งการแข็งตัวของสารประกอบซิลิกา และอะลูมินา จะเกิดบริเวณผิวของอนุภาคปรากฏให้เห็นเป็นส่วนอนุภาคแข็งที่ไม่ละลายน้ำจากแหล่งอะลูมิโนซิลิเกตเจลาปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ ในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะมีกลไกการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

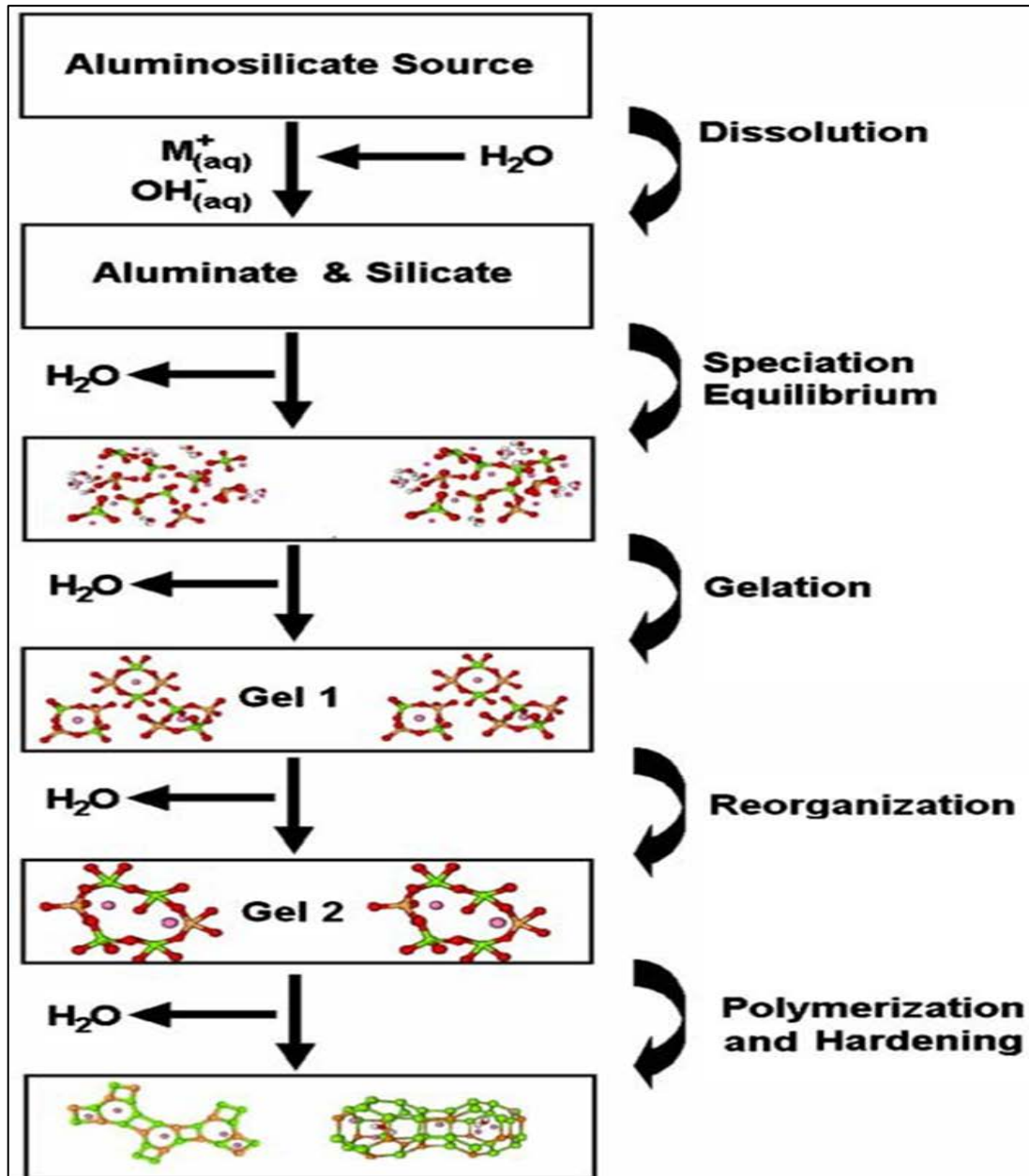
1) ขั้นตอนการละลาย (Dissolution) การเปลี่ยนวัสดุของแข็งที่ประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกต (Solid Aluminosilicate Source) ไปเป็นการสังเคราะห์อัลคาไลน์อะลูมิโนซิลิเกต (Synthetic Alkali Aluminosilicate) โดยการละลายของวัสดุของแข็งที่ประกอบไปด้วยอะลูมิโนซิลิเกต ด้วยสารละลายด่าง ที่มีไอออนไฮดรอกไซด์ จะได้สารละลายอะลูมินตและซิลิเกต

2) ขั้นตอนสถานะสมดุลจำเพาะ (Speciation Equilibrium) การละลายของอนุภาคของแข็งที่พื้นผิวเป็นผลให้อะลูมินตและซิลิเกตปลดปล่อยเป็นอิสระ จะอยู่ในรูปของโมโนเมอร์ เข้าไปในสารละลายส่วนผสมที่ซับซ้อนของซิลิเกต อะลูมินต และอะลูมิโนซิลิเกต จะเกิดขึ้นและอยู่ในสถานะที่มีสถานะสมดุลจำเพาะ กระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ นั้นในขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนสถานะสมดุลจำเพาะ (Speciation Equilibrium) น้ำจะถูกปลดปล่อยระหว่างปฏิกิริยาเคมี น้ำถูกขับออกจากเนื้อจีโอพอลิเมอร์ระหว่างการบ่มและช่วงที่อยู่ในสภาพแห้งต่อไปดังรูปที่ 2.2 น้ำที่เหลือจะอยู่ในโพรงขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Nano pore) ซึ่งมีผลดีต่อการทำงาน หรือการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ น้ำในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ ไม่ได้มีส่วนสำคัญในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เพียงแต่เป็นส่วนผสมในการทำปฏิกิริยาในระหว่างการผสม

3) ขั้นตอนการกลายเป็นเจล (Gelation) การชะของอสัณฐานอะลูมิโนซิลิเกตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าพีเอชสูง แล้วเกิดสารละลายอะลูมิโนซิลิเกตอิ่มตัวอย่างมาก (Supersaturated Aluminosilicate Solution) สารละลายเข้มข้นนี้จะอยู่ในรูปเจล (Gel) ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ในรูปแบบสถานะที่มีน้ำมีโครงข่ายใหญ่โดยการควบแน่น กระบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่สะสมระหว่างการละลาย น้ำมีส่วนในปฏิกิริยาขั้นกลางแต่ส่วนที่เหลือจะอยู่ในโพรงของเจล โครงสร้างเจลมีสองเฟส ประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกตและน้ำ

4) ขั้นตอนการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ (Reorganization) หลังจากเกิดเจล ระบบยังคงดำเนินต่อไป มีการจัดเรียงตัวและโครงสร้างใหม่

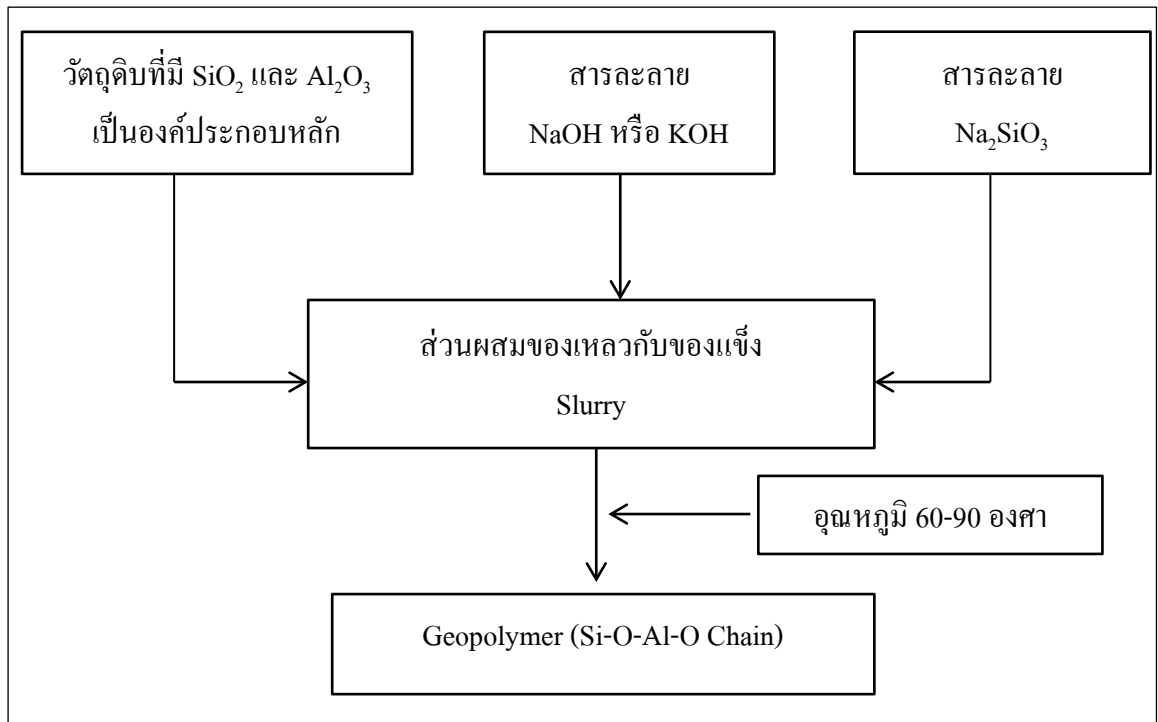
5) ขั้นตอนการเกิดการก่อตัวแบบลูกโซ่ (Polymerization and Hardening) มีการเชื่อมโยงโครงข่ายมากขึ้น ทำให้เกิดโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกต 3 มิติ



รูปที่ 2.2 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน Duxson et al. (2007)

2.1.3 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

จีโอพอลิเมอร์ มีโครงสร้างหลักเกิดจากองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และออกซิเจน ภายใต้สภาวะความเป็นด่างสูง ทำให้สารเหล่านี้เกิดการแตกตัวจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็น Polymer Chain มีความร้อนเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการสังเคราะห์โดยสังเขปอธิบายดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) ศักรินทร์ เหลืองกำจร (2556)

วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างลูกโซ่ที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si:Al ในสารตั้งต้น ดังนั้นโครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์แสดงได้ดังสมการของ สำเรียง รักซ้อน และ พิโรจน์ เงินพรหม, (2553)



โดย M คือ Cation ชาตออัลคาไลด์ (Sodium potassium หรือ Calcium)

n คือ จำนวนของโมเลกุลลูกโซ่ (Polycondensation)

Z คือ จำนวนโมเลกุล ของ SiO₂ เท่ากับ 1 2 หรือ 3

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

วัสดุที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา Geopolymerization ได้แก่ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ Al_2O_3 พบมากในวัสดุปอชโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash; RHA) และ ดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งสามารถสรุปองค์ประกอบได้ดังตารางที่ 2.1 นอกจากนี้หากเปรียบเทียบ โครงสร้างของ Portland Cement Mortar กับ Geopolymer Mortar พบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของ Geopolymer Mortar มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ซึ่งให้ความแข็งแรงมากกว่า Portland Cement Mortar ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างร่วนและไม่มีความแน่นในการอัดตัว

ตารางที่ 2.1 ค่าร้อยละขององค์ประกอบของวัสดุปอชโซลาน สำเร็จ รักษ้อน และ พิโรจน์ เงินพรหม (2553)

Chemical Composition	Portland Cement	Pulverized Fuel Ash	Rice Husk Ash	Met kaolin
SiO_2 (%)	21.70	42.5	76.1	52.86
Al_2O_3 (%)	5.04	24.7	0.8	42.79
Fe_2O_3 (%)	3.43	10.7	0.7	0.50
CaO (%)	64.6	12.4	1.8	0.03

การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เป็นการนำสารประกอบต่างๆ มาทำปฏิกิริยากันให้เกิดเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ในการเตรียมการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จะต้องประกอบด้วยสารประกอบต่างๆ ดังนี้

2.1.3.1 สารปอชโซลาน

สารปอชโซลาน เป็นวัสดุที่มี ซิลิกา และอะลูมินา เป็นส่วนประกอบ มีสมบัติในการยึดประสานเมื่อทำปฏิกิริยากับอัลคาไล เกิดเป็นสารประกอบ มีสมบัติคล้ายซีเมนต์ เรียกว่า Pozzolanic Concrete วัสดุปอชโซลาน ที่ใช้กันทั่วไป เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อย ซิลิกาฟุ่ม และตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก ปัจจุบันวัสดุปอชโซลานถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีต แทนบางส่วนของการใช้ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเป็นการลดต้นทุน และลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ออกสู่บรรยากาศเนื่องจากการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นในการรับกำลังอัด รวมทั้งวัสดุปอชโซลานเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตหลัก จึงมีต้นทุนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอชโซลานแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตจึงให้คุณภาพที่แตกต่างกันไป ในปัจจุบันมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้เป็น

วัสดุในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 9 ชนิด คือ Davidovit (2008)

- 1) โซเดียมซิลิเกต poly (Siloxonate); Solubel Silicate, Si:Al = 1.0
- 2) ดินขาว/Hydrosodalite; Poly (Sialate) Si:Al = 1.1
- 3) ดินขาวเผา MK-750; Poly (Sialate-Silxo) Si:Al = 2.1
- 4) แคลเซียม; (Ca,K,Na) Sialate, Si:Al = 1,2,3
- 5) หิน; Poly (Sialate-Multisiloxo) $1 < \text{Si:Al} < 5$
- 6) ซิลิกา Sialate link และ Siloxo Link in Poly(Siloxnate) Si:Al > 5
- 7) เถ้าลอย
- 8) ฟอสเฟต
- 9) สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

จากสารปอซโซลานทั้ง 9 ชนิดที่กล่าวมาสามารถใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ได้ ดังงานวิจัยของ วาสนา ประถมทอง และ วีรยา ฉิมอ้อย (2555) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ดินเหนียวกรุงเทพฯและดินขาวผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้การทดสอบ unconfined compression test เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จากผลการทดสอบพบว่าทั้งดินเหนียวกรุงเทพฯและดินขาวสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ โดยค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้น และตามปริมาณความชื้นเริ่มต้นของดินเหนียวที่ลดลง นอกจากนั้นแล้ว ยังมีงานวิจัยที่นำวัสดุปอซโซลาน 2 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว และ เถ้าลอย มาผสมกันเพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ทำการศึกษาโดย เกียรติศักดิ์ ศรีคู่ยสิง (2550) ศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบ โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และแกลบได้จากโรงสีข้าวในจังหวัดขอนแก่น โดยบดละเอียดให้มีความละเอียดเท่ากับ 18000 ตร.ซม.ต่อ กรัม 14000 ตร.ซม.ต่อ กรัม และ 12000 ตร.ซม.ต่อ กรัม และใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนักเท่ากับ 1.5 ระยะเวลาก่อนบ่ม 1 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สามารถนำไปใช้งานได้

2.1.3.2 สารประกอบซิลิเกต

เป็นตัวเชื่อมและทำให้เกิดโครงสร้างของ Geopolymer สารประกอบซิลิเกตที่นิยมใช้เพราะสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดี คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate: $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}$) และยังเป็น การเพิ่มซิลิกอนให้กับปฏิกิริยาคายคัง งานวิจัยของ ถนัดกิจ ชาริรัตน์ (2551) ศึกษาความสามารถทำงานได้ และกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่ทำจากเถ้าลอย พบว่า ความสามารถในการไหลด้วยโต๊ะการไหล

ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยมีค่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 10-65 เมกะปาสกาล การผลิตจีโอพอลิเมอร์ให้ค่ากำลังอัดสูงโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกต ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 0.6-1.00 ภายหลังจากการหล่อตัวอย่างจะต้องทิ้งระยะเวลาก่อนบ่ม 1 ชั่วโมง อุณหภูมิของการบ่มร้อนในตู้อบ 75 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 2 วัน

2.1.3.3 อัลคาไลไฮดรอกไซด์

อัลคาไลไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพราะเป็นสารที่มีค่าความเป็นด่างสูง สามารถเกิดปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานได้ดี โดยมีการเลือกใช้สารเคมีอย่างหลากหลาย โดยอัตราส่วนสารละลายต่างจะต้องมีปริมาณความเข้มข้นที่มากพอสำหรับการทำปฏิกิริยา เพื่อจะพัฒนาความสามารถในการพัฒนากำลังอัด ดังงานวิจัยของ ซาลินี อ่อนแสง, (2554) ศึกษาผลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ และชนิดของด่างต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนโรงกรองน้ำโดยใช้ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อัตราส่วน 1.78, 2.0, 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนัก และใช้ NaOH และ KOH เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 มีการพัฒนากำลังอัดสูงที่สุด โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 143 กก./ cm^2 . และเมื่ออัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เพิ่มขึ้นกำลังอัดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 มีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบสารกระตุ้นปฏิกิริยาพบว่า NaOH มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนโรงกรองน้ำมากกว่า KOH เนื่องจากค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการเติม NaOH มีค่ามากกว่าการเติม KOH ทุกอายุการบ่ม

Komnitsas et al. (2009) สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนเตาหลอมเหล็กกล้าผสมนิเกิลที่มีแคลเซียมต่ำเป็นวัตถุดิบ ใช้ตัวกระตุ้นด่างโซเดียมซิลิเกต NaOH และ KOH ร่วมกับการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ทดสอบกำลังอัดที่ 7 และ 28 วัน พบว่า NaOH 8.6 M ให้ค่ากำลังอัดที่สูงในช่วงต้น แต่การกระตุ้นด้วย KOH 4.3 M ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงปลาย โดยเฉพาะการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 50 MPa อธิบายได้ว่า KOH มี K^+ ขนาดใหญ่ ก่อตัวกับ silicate oligomer เกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมี $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ที่ชอบเข้าไปยึดเหนี่ยว ส่งผลให้การก่อตัวและให้ค่ากำลังอัดดีกว่า ดังนั้น alkali metal cation มีบทบาทสำคัญในการ

เร่งปฏิกิริยาและความคมชัดขั้นตอนการเกิดโพลีเมอร์อนินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแข็งตัว การเกิดผลึก ทำให้เกิดโครงสร้างที่เหมาะสม

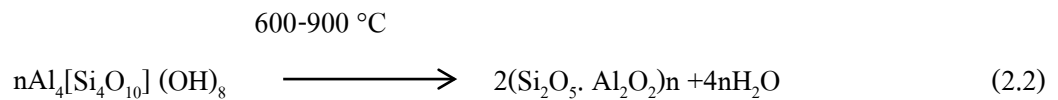
Rattanasak และ Chindaprasirt (2009) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายต่าง NaOH ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่าง 5 10 และ 15 M ด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนักร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าการชะละลายของ Si^{4+} ไอออน เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของ NaOH 10 M มากที่สุด มากกว่าความเข้มข้นที่ 5 M เนื่องจากค่าความเป็นด่างสูงกว่า ส่วนที่ 15 M ลดการละลายของ Si ลงเนื่องจากเกิด coagulation ของซิลิกา ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค SEM พบผิวขรุขระของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ถูกชะละลายด้วยสารละลาย NaOH เป็นผลจากการชะของไอออน ซึ่งที่ความเข้มข้น 5 M จะพบผิวที่ขรุขระน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 10 M และ 15 M ตามลำดับ ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ตัวกระตุ้น NaOH 10 M ให้กำลังอัดสูงถึง 60-70 MPa สูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์แบบผสมวัสดุตั้งต้นร่วมกันก่อนเติมสารละลายตัวกระตุ้นต่าง จะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าแบบแยกส่วนการผสม

Somna et al. (2011) สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยบดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 อนุภาคคงค้ำน้อยกว่าร้อยละ 2 ใช้ตัวกระตุ้นต่าง NaOH ที่ความเข้มข้น 4.5, 7.0, 9.5, 12.0, 14.0 และ 16.5 M บ่มก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและทดสอบการพัฒนากำลังอัดที่ 7 14 28 42 และ 60 วัน พบว่าการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิห้องคล้ายกับ Portland cement การเพิ่มความเข้มข้นสารละลายต่างจาก 4.5 เป็น 9.5 M เกิดปฏิกิริยาและพัฒนากำลังอัดได้ดี ส่วนความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ต่ำกว่า ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดน้อยกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ที่ความเข้มข้นสูงสุด 16.5 M กำลังอัดจะลดลงในช่วง 60 วัน การทำปฏิกิริยาต้องใช้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ (OH^-) มากเพียงพอ ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่างจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ หากความเข้มข้นมากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้ aluminosilicate gel ตกตะกอนในช่วงอายุต้นและทำให้กำลังอัดลดลง

2.1.3.4 น้ำ

น้ำเป็นตัวช่วยที่ทำให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี รวมทั้งทำให้สารจีโอพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้อย่างทั่วถึงซึ่งช่วงแรกที่มีการชะละลายซึ่งปฏิกิริยาต้องการน้ำอย่างเพียงพอเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวพาให้สารละลายต่างเกิดการกระจายภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ นอกจากนั้นน้ำที่อยู่ในวัตถุดิบหลักยังเป็นปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวงานวิจัยต่อไป

Zuhua et al. (2009) ทำการศึกษาบทบาทของน้ำสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้วัตถุดิบดินขาวจากสาธารณรัฐประชาชนจีน (kaolin มี Si/Al 1.19) เผาที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ใช้การกระตุ้นด้วย NaOH และ Na₂O เท่ากับร้อยละ 9.98 SiO₂ เท่ากับร้อยละ 27.10 (L/S เท่ากับ 0.8) ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส และอบไอน้ำ 80 องศาเซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 90 ± 5 จากนั้นทำการทดสอบค่ากำลังอัดและวิเคราะห์ XRD ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่า ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส บ่มที่อุณหภูมิห้องให้กำลังอัดสูงที่สุด ส่วนการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส กำลังอัดลดลงมากที่สุด ทั้งอายุการบ่มที่ 3 และ 7 วัน ซึ่งปฏิกิริยา dehydroxylation แสดงดังสมการที่ 2.2



ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ปรากฏรูปแบบของผลึก ไม่แตกต่างกันด้วยเทคนิควิเคราะห์ของ XRD ลักษณะโครงสร้างคล้ายกัน แต่ให้กำลังอัดที่ต่างกัน เนื่องจากน้ำส่วนที่เหลือในดินขาวเผามีปริมาณไม่เท่ากัน น้ำในปริมาณมากจะลดอัตราการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ที่ระยะการเกิด dissolution –hydrolysis ส่งผลต่อการเจือจางของสารละลายต่างและเกิดการชะละลายออกจากผิวหน้าของก้อนจีโอพอลิเมอร์ ผลที่ตามมาคือการพัฒนา กำลังอัดต่ำลง ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจำเป็นต้องมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะน้ำมีบทบาทในการทำลายโครงสร้างของอนุภาคของแข็งและการ hydrolysis ของการละลายไอออน Al³⁺ และ Si⁴⁺ ส่วนสภาวะ hydrothermal ที่อุณหภูมิสูงที่มีปริมาณน้ำมากเพียงพอจะพบผลึก zeolite ในรูปของ Nano crystalline

2.1.3.5 อัตราส่วนตั้งต้นของวัตถุดิบ

สารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะต้องมีปริมาณองค์ประกอบของสารซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากงานวิจัยโดยทั่วไป จะมีการกำหนดอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน เช่น SiO₂/Al₂O₃ หรือ Al₂O₃/SiO₂ ซึ่งอัตราส่วนของสารตั้งต้นเป็นปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยจะส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ได้ ซึ่งมีนักวิจัย Davidovits (2008) กล่าวถึงอัตราส่วน sodium oxide และ potassium oxide ร่วมกับ aluminum trioxide (Na₂O, K₂O)/Al₂O₃ ที่ต่ำกว่า 0.8 และอัตราส่วนของ silicon oxide ต่อ aluminum trioxide (SiO₂/ Al₂O₃) ต่ำกว่า 3.5 จะทำให้ aluminosilicate oxide คงเหลือมากเกินไป ผลที่ตามมาคือกระบวนการ polycondense จะไม่เกิดขึ้น ผลของปฏิกิริยาจะปรากฏให้เห็นเป็นสะเก็ดหรือผงสีขาวในผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้อัตราส่วน (Na₂O, K₂O)/Al₂O₃ ประมาณ 1.0 และ (SiO₂/ Al₂O₃)

ประมาณ 4.0 เป็นอัตราส่วนที่สูงเพียงพอสำหรับการเหนี่ยวนำให้เกิดสถานะต่างเป็นสาเหตุของการเคลื่อนย้ายซิลิกอนภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์และส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้มีการสรุปอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในช่วงต่างๆ ที่เหมาะสมดังแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์แนะนำ

อัตราส่วน	สัดส่วนที่แนะนำ (โดยโมล)
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0.20 - 0.48
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3.30 - 4.50
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	10 – 25
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0.80 - 1.20

Waijarean et al. (2014) ศึกษาการกำลักรับแรงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปา โดยนำตะกอนประปาเผา ที่ อุณหภูมิ 600 800 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.78 และ อัตราส่วนต่าง $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 พบว่า ตะกอนประปาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ระยะเวลาบ่ม 28 ให้ค่ากำลักรับแรงอัดที่สูงที่สุดและนอกจากนั้นมีการวิเคราะห์ XRD พบว่า ตะกอนประปาที่เผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมีผลึกของ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ (Al_2SiO_5) มัสโคไวต์ ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{11}$) เป็นต้น

Songpiriyakij et al. (2010) ศึกษาการรับกำลักรับแรงอัดและระดับการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เถ้าแกลบและเถ้าเปลือกไม้ นำมาจากโรงไฟฟ้าจากชีวมวล ที่ได้จากการเผาแกลบและเปลือกไม้ในอัตราส่วน 70:30 เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ใช้ในช่วงที่กว้างที่ 4.03 – 10.5 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 14 โมลาร์ และ 18 โมลาร์ ผลปรากฏว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้ค่ากำลักรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 15.9 เถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าแกลบและเปลือกไม้

เบียร์ศักดิ์ กลัปประสิทธิ์ (2549) ศึกษาการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ในช่วงระหว่าง 44.03-15.91 (หรือ Si/Al มีค่าเท่ากับ 2.09-8.28) จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีกำลักรับแรงอัดสูงสุดที่อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 8.28 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าเท่ากับ 15.91) เมื่อยังเพิ่มอัตราส่วน Si/Al ให้สูงขึ้นอีกในช่วง 8.27-18.27 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 15.91-35.11) กำลักรับ

มีค่าต่ำลงในช่วงก่อนอายุ 28 วัน และเมื่อมีอายุมากกว่า 28 วัน ขึ้นไปแล้ว ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เริ่มแสดงให้เห็นถึงรอยร้าวได้อย่างชัดเจนจนไม่สามารถทดสอบกำลังอัดได้ในส่วนผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เริ่มต้นเท่ากับ 15.91 และอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$) เท่ากับ 2.5 พบว่าอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อกำลังในช่วงอายุ 7 วันแรก และจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ มีค่ากำลังอัดสูงกว่าที่ 10 และ 14 โมลาร์ นอกจากนี้ อิทธิพลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ระหว่าง 0.108 – 0.266 พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนเพิ่มมากขึ้น

2.2 วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์มีมากมายหลากหลาย แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ดินตะกอนประปา ที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพมหานคร มาเป็นวัสดุหลักซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ซึ่งมี ซิลิกอนไดออกไซด์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ อยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม แต่องค์ประกอบของตะกอนดินประปาจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์รวมทั้งสารประกอบอื่นๆ ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับฤดูกาลและสารเคมีที่เติมลงไปในการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา ซึ่งกระบวนการผลิตน้ำประปามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

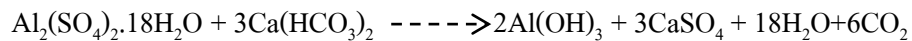
2.2.1 ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

ตะกอนดินประปาจากการผลิตน้ำประปาเป็นตะกอนที่เหลือจากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาเริ่มจากน้ำดิบเข้าสู่โรงผลิตน้ำประปา ผ่านการคัดกรองแรง (Screening) ตะกอนหนักจะตกลงสู่ถังตกตะกอน (Sedimentation tank) ส่วนตกตะกอนแขวนลอยจะตกตะกอนโดยการผสมสารเคมีในกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) และแปรสภาพตะกอนขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดและมีน้ำหนักรวมมากขึ้นในกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) ตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะตกลงในถังตกตะกอน จากนั้นน้ำใสจะไหลผ่านระบบกรอง (Filtration) ทำให้น้ำใสสะอาดมากขึ้นและผ่านระบบฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีนเรียกว่ากระบวนการ Disinfection ส่วนกลิ่นและรสที่น้ำรังเกียจไม่เหมาะสมสำหรับการอุปโภคและบริโภคถูกบำบัดด้วยระบบ Activated carbon ส่วนการเติมปูนขาว (Lime) เพื่อควบคุมความเป็นกรดของน้ำและลดการกัดกร่อนของระบบท่อประปา ระบบการเติมคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนในระบบ เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ (2549)

2.2.1.1 การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation)

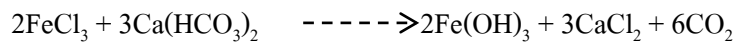
การสร้างตะกอนเกิดขึ้นโดยการเติมสารเคมีเรียกว่า (Coagulant) หรือเรียกว่า Flocculent ส่วนสารเคมีที่ช่วยให้เกิดการสร้างตะกอนที่มีประสิทธิภาพ เรียกว่า สารช่วยสร้างตะกอน Coagulant aid หรือ Flocculent aid เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2549) สารเคมีหลักมีอยู่หลายชนิดได้แก่ สารส้ม Aluminum Sulfate Alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), Ferric Chloride (FeCl_3), Ferric Sulfate ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), Ferric Chloride ($\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และออกซิเจน (O_2), Chlorinated Copperas ($\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Cl}_2$) และ Polyelectrolytes สารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ สารส้ม ซึ่งเป็นสารประกอบของอะลูมิเนียม สารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือ สารประกอบเหล็ก เช่น FeCl_3 ส่วน Coagulant Aid ที่นิยมใช้มากในปัจจุบันคือ Polyelectrolytes หรือเรียกสั้นๆว่า โพลีเมอร์ (Polymer) สารชนิดนี้แพงกว่าสารส้มมาก ส่วนสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีในระบบประปา มันสิน ตันกุลเวศ (2542) สรุปไว้ดังนี้

1) สารส้ม Aluminum sulfate สูตรเคมี $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

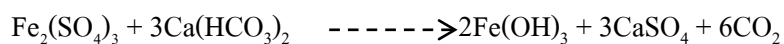


สารส้มนิยมใช้มากกว่าสารอื่นๆ และใช้กับแหล่งน้ำตามธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ จุดเด่นคือ ราคาถูกและหาซื้อง่าย

2) Ferric Chloride (FeCl_3)

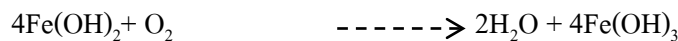
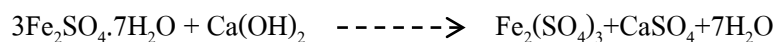


3) Ferric Sulfate ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)

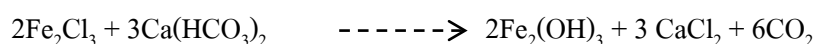
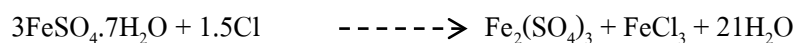


ใช้แทนสารส้มได้เป็นอย่างดีและให้ผลึก $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่มีเนื้อแน่น ตกตะกอนได้รวดเร็ว และเหมาะสมสำหรับใช้กับน้ำธรรมชาติเพราะในน้ำมีสารไบคาร์บอเนต พอเพียงทำให้ไม่ต้องเติมปูนขาว

4) Ferric Chloride, Lime และออกซิเจน ($\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Cl_2)

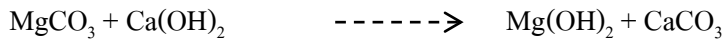


5) Chlorinated Copperas ($\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Cl}_2$)



6) MgCO_3

การใช้ MgCO_3 ร่วมกับปูนขาวเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่แต่ในสหรัฐอเมริกาได้มีการนำสารเคมี MgCO_3 มาใช้แทนสารส้ม มีข้อดีคือเป็นสารสร้างตะกอน ลดปัญหาการกำจัดตะกอนและความกระด้างของน้ำได้



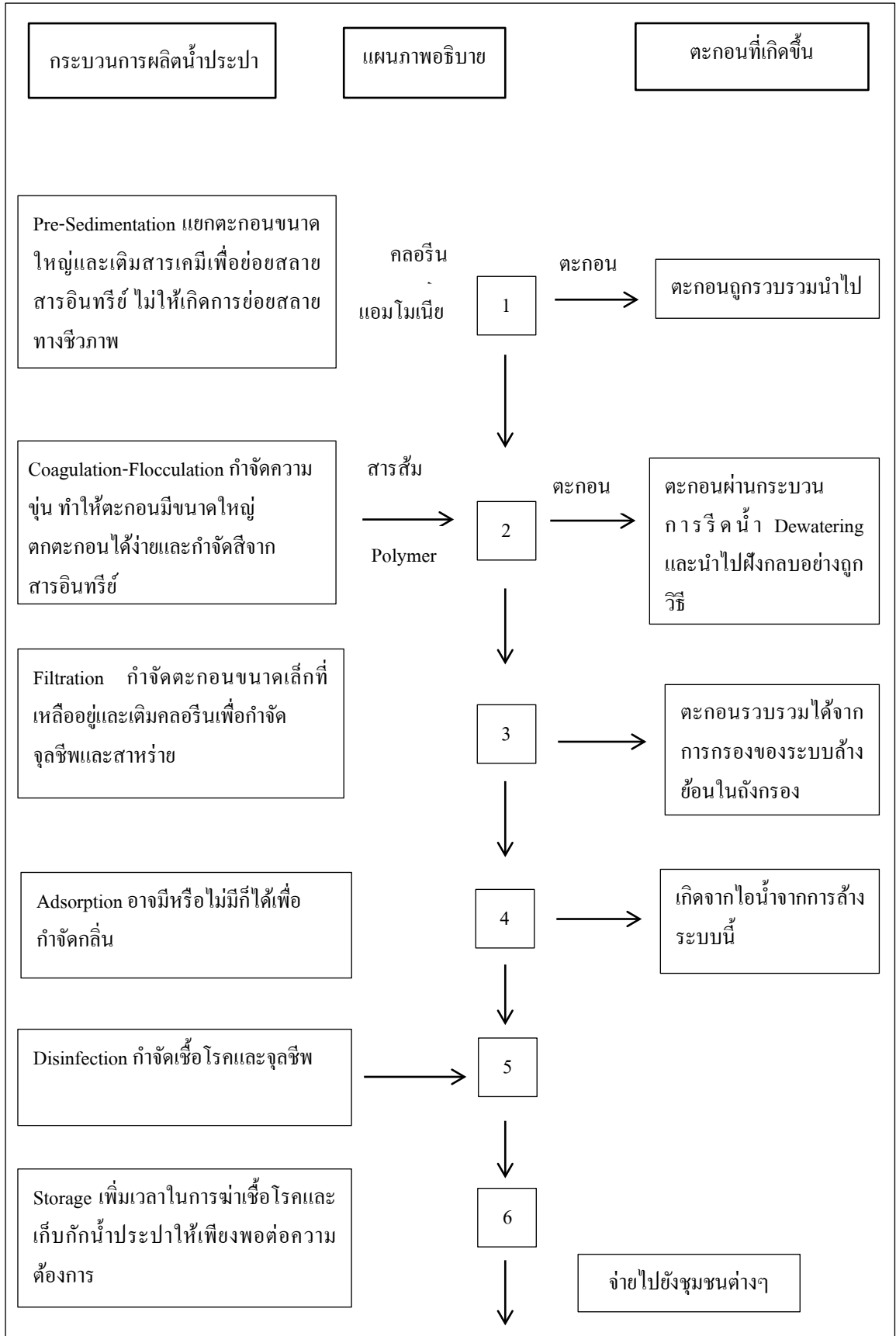
สารช่วยสร้างตะกอน Coagulant aids ได้แก่ Betonies Clay, Activated Silica, Polyelectrotes สำหรับ Activated Silica ช่วยทำให้เกิดการสร้างและรวมตะกอนดียิ่งขึ้น เกิด Floc ใหญ่กว่าถึง 100 เท่า และสามารถกำจัดสีและความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ฝายผลิตน้ำประปา, (2554) ตะกอน เหลวหรือสลัดจ์ (Sludge) มีลักษณะกึ่งเหลวมากกว่าของแข็ง เช่น อัตราส่วนของน้ำต่อของแข็งเท่ากับ 98:2 ดังนั้นการกำจัดสลัดจ์ที่มาจากกระบวนการผลิตน้ำประปาจึงหมายถึง การแยกน้ำออกจากสลัดจ์เปือก เพื่อให้สลัดจ์แห้งมากที่สุดก่อนนำส่วนที่เหลือไปกำจัด กระบวนการกำจัดสลัดจ์กระทำได้หลายวิธี เช่น การทำสลัดจ์ให้เข้มข้น (Thickening) บ่อดักแควด (Lagoons) ลานตากทราย (Sand-Drying Beds) การหมุนเหวี่ยง (Centrifuging) การกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum Filtration) การรีดด้วยสายพาน (Belt Filter Press) การอัดกรองด้วยแผ่น (Plate Pressure Filters) และการทิ้งกากสลัดจ์ (Ultimate Disposal) การพิจารณาเลือกระบบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น ประสิทธิภาพการลดปริมาณสลัดจ์ ค่าใช้จ่ายด้านการดำเนินการและลักษณะของสลัดจ์ สลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการกำจัดจะมีลักษณะแตกต่างกันสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 สลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกบางส่วน มีลักษณะคล้ายขมม้วนหรือคล้ายยาสีฟัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและความขุ่น การเติมสารเคมีในสลัดจ์ ปัจจุบันนิยมกำจัดด้วยวิธีการถมที่หรือทิ้งลงบนพื้นดินทั่วไป เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2549)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของสลัดจ์จากโรงผลิตประปา เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2549)

แหล่งที่เกิด	ประเภทของ ตะกอน	ปริมาณของแข็งใน ตะกอน (ร้อยละ)	COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สี
Coagulation	ตะกอนสารส้ม	0.5 - 2.0	30 - 5000	น้ำตาลเทา
Flocculation	ตะกอนเหล็ก	0.5 - 2.0	30 - 5000	น้ำตาล
Chemical Precipitation	Softening Sludge	2 - 15	ต่ำ	ขาว
ระบบล้างเครื่องกรอง	Back wash wastes	0.01 - 0.1	100	เทา - ดำ

ตารางที่ 2.4 สรุปลักษณะของสลัดจ์จากระบบต่างๆ

ระบบกำจัดสลัดจ์	ลักษณะของสลัดจ์
ระบบตกตะกอนขั้นต้นด้วยวิธีกายภาพ (Pre-Sedimentation)	ทราย เศษดิน กรวดเล็กๆ สารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้ว
ระบบแยกของแข็งสลัดจ์ด้วยวิธีเคมี-กายภาพ	- สลัดจ์ส่วนใหญ่เกิดจากปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และ Soda ash (Na_2CO_3) สลัดจ์อยู่ในรูปของ CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$
ระบบสร้างตะกอน-รวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)	- สลัดจ์มาจากสารส้มหรือเกลือของเหล็กเป็นส่วนมาก - สลัดจ์ในรูปสารอินทรีย์ร้อยละ 20-4 ส่วนที่เหลือร้อยละ 60-80 เป็นสารอนินทรีย์ - สลัดจ์จากสารส้มส่วนมากมี pH 5.5-7.5
ระบบล้างเครื่องกรอง	สลัดจ์ในรูปสารอินทรีย์



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำผิวดิน เกரியงศักดิ์ อุดมสิน โรจน (2549)

2.2.1.2 โรงผลิตน้ำบางเขน (Bangkhen Water Treatment Plant)

โรงผลิตน้ำบางเขนใช้แหล่งน้ำผิวดินจากแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นน้ำดิบประมาณ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อผลิตน้ำประปาในความรับผิดชอบของการประปานครหลวง กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีพื้นที่ดำเนินการประมาณ 1.1 ตารางกิโลเมตร นับเป็นโรงผลิตน้ำที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ฝ่ายการผลิตน้ำประปา (2554) น้ำดิบมาจากแหล่งน้ำผิวดินจึงมีความขุ่น สี และเนื่องจากการใช้น้ำสารอินทรีย์ปริมาณมาก ต้องทำการบำบัดและกำจัดเพื่อควบคุมน้ำประปาให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานก่อนนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภค ดังนั้นในขั้นตอนการผลิตน้ำของโรงผลิตน้ำบางเขนสรุป 7 ขั้นตอนดังนี้

1) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ (Raw Water Quality Improvement)

การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบของคลองประปาอาศัยหลักการทางธรรมชาติ การเติมอากาศ การสัมผัสแสงแดด และการตกตะกอนตามธรรมชาติ รวมทั้งการกำจัดของแข็งแขวนลอย เช่น ผลิตภัณฑ์พลาสติก เศษไม้และสาหร่าย ด้วยตะแกรงหยาบ (Coarse Screen) และตะแกรงละเอียด (Fine Screen) เพื่อลดการชำรุดของอุปกรณ์

2) การเติมสารเคมีและการตกตะกอน (Chemical Feeding and Clarification)

น้ำดิบจากคลองประปาถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอน มีการเติมปูนขาว เรียกว่า Per-lime เพื่อปรับสภาพน้ำให้มีความกระด้างในน้ำดิบและช่วยให้สารส้มทำปฏิกิริยาได้ดีกับคลอรีน เรียกว่า Pre-Chlorination เพื่อกำจัดสี กลิ่น ตะไคร่ และฆ่าเชื้อโรค สารส้มช่วยให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งสารเคมีจะถูกกวนให้สัมผัสและทำปฏิกิริยากับตะกอน จากนั้นมีการทำให้ตะกอนจับกันเป็นก้อนขนาดเล็กกรวมเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ขึ้น และตกลงสู่ถังตกตะกอน (Clarifier Tank) จากนั้นมีการสูบตะกอนไปยังบ่อทิ้งตะกอน (Sludge Lagoon) ใช้กระบวนการระเหยของน้ำตามธรรมชาติเพื่อให้ตะกอนมีความเข้มข้นร้อยละ 45-60 จากนั้นจะว่าจ้างบริษัทรับเหมานำไปกำจัดนอกพื้นที่ต่อไป ส่วนน้ำใสจะไหลลงบ่อกรอง ซึ่งความขุ่นที่วัดได้ออกจากถังตกตะกอนมีค่าอยู่ในช่วง 3-7 หน่วยความเข้มข้น NTU. การเติมสารช่วยเร่งตะกอนกลุ่ม Poly-electrolyte ใช้ในช่วงฤดูกาลที่มีความขุ่นของน้ำดิบสูงในช่วงเดือน พฤษภาคม ถึง ตุลาคม มีค่าความขุ่นเฉลี่ยสูงสุดกว่า 50 NTU

นอกจากนั้น Waijarean et al. (2014) นำตะกอนดินประปามาทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินประปา พบ สารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 30.43 และองค์ประกอบอื่นๆ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ธาตุในรูปออกไซด์ของตะกอนประปา Waijarean et al. (2014)

ธาตุในรูปออกไซด์	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ตะกอนประปาสด	ตะกอนประปาอบ (110 องศาเซลเซียส)*	ตะกอนประปาเผา (800 องศาเซลเซียส)**
SiO ₂	56.90	54.00	53.90
Al ₂ O ₃	26.70	29.30	30.40
Fe ₂ O ₃	8.89	9.84	9.18
K ₂ O	2.57	2.58	2.42
CaO	1.21	1.01	0.93
MgO	0.95	0.97	1.01
TiO ₂	0.91	0.91	0.85
SO ₃	0.71	0.43	0.39
P ₂ O ₅	0.32	0.35	0.34
MnO	0.26	0.19	0.18
Na ₂ O	0.24	0.22	0.24
%MC	13.59	2.71	-
%LOI	12.84	-	-
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ ratio	2.130	1.84	1.77

หมายเหตุ * ตะกอนประปาอบที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

** ตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง

3) การกรอง (Filtration)

น้ำที่ผ่านการตกตะกอนจะไหลเข้าสู่บ่อกรอง (Filter Tank) เพื่อกรองตะกอนละเอียดออกอีกครั้ง โดยใช้ผงถ่านแอนทราไซต์ (Anthracite Coal) และทรายกรองเป็นสารกรอง น้ำที่ผ่านระบบกรองจะใสมาก มีความขุ่นไม่เกิน 2 NTU. ระบบกรองมีระบบล้างกลับ (Back Wash) โดยการผันลมจากใต้บ่อกรองเพื่อให้ทรายขยายตัวและตะกอนบริเวณผิวหน้าทรายไหลน้ำออกไป

4) การฆ่าเชื้อ (Disinfection)

แบคทีเรียที่หลงเหลือในน้ำประปาจำเป็นต้องกำจัดทิ้ง เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก โดยวิธีการเติมคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรค (Post-Chlorination) และทำลายสารอินทรีย์กลิ่น สี และเหล็ก

5) การปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา (Tap Water Quality Improvement)

ภายหลังการฆ่าเชื้อโรค มีการเติมปูนขาว (Pot-lime) เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของเส้นท่อประปาที่จะส่งและลำเลียง

6) การสูบน้ำประปา (Transmission and Distribution)

น้ำประปาที่ผ่านกระบวนการผลิตจะถูกส่งเข้าสู่โมเมนต์ส่งน้ำและท่อส่งขนาดใหญ่ไปยังสถานีสูบน้ำตามย่านชุมชนต่างๆเพื่อบริการแก่ประชาชนต่อไป

7) การควบคุมคุณภาพน้ำ (Water Quality Control)

ระบบผลิตน้ำประปามีการดำเนินการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพน้ำทุกๆ 4 ชั่วโมง ด้วยวิธีการสุ่มตามจุดและการตรวจสอบแบบออนไลน์ ตั้งแต่ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบในคลองส่งน้ำดิบ การตกตะกอนและการกรอง การฆ่าเชื้อโรคและระบบจ่าย มีการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำอย่างสม่ำเสมอ ตามมาตรฐานค้ำกายภาพ และเคมีตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

กระบวนการผลิตน้ำประปาเกิดจากการตกตะกอนประปาและผลพลอยได้ (By Product) จากถังตกตะกอนและการล้างบ่อกรอง ตะกอนจะถูกรวบรวมเพื่อกำจัดตะกอนแบบวิธีธรรมชาติ (ระเหยและตกตะกอน) ดำเนินการโดยบริษัทผู้รับเหมาในพื้นที่ 25.5 ไร่ ซึ่งประกอบด้วย บ่อตกตะกอน (Sludge Lagoon) และบ่อตากตะกอน (Sludge Polder) ทำให้เกิดความเข้มข้นของตะกอนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 15 และ 30 ตามลำดับ จากนั้นตะกอนจะถูกขนถ่ายไปยังลานตากตะกอน (Drying Yard) ทำการพลิกกลับหน้าตะกอนเพื่อให้ระเหยตามวิธีธรรมชาติและทำให้ดินตะกอนมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 45 ถึง 60 ก่อนขนดินตะกอนเหมาออกไปถมที่บ่อโรงผลิตน้ำบางเขน ฝ่ายการผลิตน้ำประปา (2554) ลักษณะของดินตะกอนประเภทลึยดินเหนียว จับตัวเป็นก้อนแข็ง มีสีขาวอมน้ำตาลอ่อน เมื่อผสมน้ำจะมีความเหนียว สามารถปั้นขึ้นรูปได้และเมื่อระเหยเอาน้ำออก ตะกอนจะเริ่มแห้งและแตกร้าวปริมาณตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำบางเขนจากสถิติ 5 ปีย้อนหลัง ตั้งแต่ พ.ศ. 2548-2553 เฉลี่ยวันละ 200.43 ตัน (น้ำหนักแห้ง) ทำให้โรงผลิตน้ำประปาประสบปัญหา ด้านพื้นที่ไม่เพียงพอและเสียค่าใช้จ่ายสูงในการขนส่งตะกอนไม่เพียงพอและเสียค่าใช้จ่ายสูงในการขนส่งตะกอนแห้งไปกำจัด (1.8 สตางค์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อน้ำผลิต) มีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปาเพื่อดูความเหมาะสมทางเคมีของตะกอนเพื่อดูความเหมาะสมของตะกอนต่อการนำมาใช้เป็นส่วนผสมแทนสารซีเมนต์ คมิตฎุมิ ดุลยเกษม และคณะ (2552) และจากวิจัยที่ผ่านได้มีการศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของตะกอนดินประปาตั้งงานวิจัยของ ปริศนา เสือแซมเสริม (2545) จากการวิเคราะห์สมบัติแร่วิทยาของตะกอน พบว่า ตะกอนทั้งหมดจากบ่อตากตะกอน และลานตากตะกอน ในกลุ่มอนุภาคดินเหนียวมีองค์ประกอบของแร่ ประกอบด้วยแร่เคโอลิไนต์ แร่อิลไลต์ แร่สเมกไทต์ และแร่ควอร์ต ลักษณะของดินตะกอนมีโครงสร้างเป็นรอยแตก (Crack structure) ช่องว่างในดินมีปริมาณเล็กน้อยเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ที่ไม่สม่ำเสมอ

(Irregular vughs) ปริมาณอนุภาคหยาบสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคละเอียด ปริมาณอนุภาคหยาบมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคละเอียด คือ อยู่ในอัตราส่วน 2:98 ทำให้ตะกอนมีสัดส่วนช่องว่างสูง อนุภาคละเอียดที่พบจะเป็นอนุภาคดินเหนียว และทรายแป้ง เป็นส่วนประกอบ ซึ่งมีลักษณะสีน้ำตาล ปุย ไม่มีกลิ่น ลักษณะเนื้อละเอียด และจัดเป็นตะกอนดินชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) มีการกระจายอนุภาคส่วนใหญ่เป็นทรายแป้ง และดินเหนียว อีกทั้งมีปริมาณทรายต่ำ

นอกจากนั้นยังมีการนำตะกอนดินประปามาเป็นส่วนผสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถาซานอ้อยเป็นวัตถุดิบหลักและใช้ตะกอนดินประปาเป็นส่วนผสม ในการเพิ่มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้กับปฏิกิริยาในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ผลการศึกษาครั้งนี้ วีรยศ วิฑูริศานต์ (2556) ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังอัดของสารประกอบจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาซานอ้อยผสมเถาตะกอนน้ำประปา โดยสารตั้งต้นทั้งสองชนิดถูกนำมาอบแห้ง แล้วบดละเอียดจนมีอนุภาคคงค้างตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตะกอนน้ำประปาที่เผาด้วยอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง การแทนที่ในเถาซานอ้อยไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงกว่าแทนที่ร้อยละอื่นๆ และยังพบอีกว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถาซานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 1.00 และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ และอุณหภูมิการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส แต่การใช้ตะกอนประปาส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง และมอร์ตาร์มีการหดตัวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้เถาซานอ้อยเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว

นอกจากการนำดินตะกอนประปามาเป็นส่วนผสมรองในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ยังมีงานวิจัยที่นำเอาตะกอนดินประปาเพียงอย่างเดียวมาทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยการนำดินตะกอนมาเผาเพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาตะกอนดินประปา เพื่อที่จะได้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินตะกอนประปาสำหรับนำมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ผลการศึกษาครั้งนี้ เทวนันท์ ทองหยาด (2553) ศึกษาสมบัติของตะกอนประปาที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปาบางเขน โดยการนำตะกอนมาทำการบดให้มีร้อยละคงค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 17 ± 3 และนำตะกอนที่ได้มาเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตะกอนประปาทั้งเผาและไม่เผามาทำการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH และ KOH โดยควบคุมอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 0.25 0.30 และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 0.37 และ 0.45 พบว่า กำลังอัดที่อายุ 60 วัน ของตะกอนประปาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 105.4 กก./ cm^2 ในส่วนของผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตะกอนประปาที่ผ่านการเผาด้วย

อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค SEM พบว่าเกิดผลึกและฟิลาของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตเมื่อกระตุ้นตัวอย่างด้วย NaOH

2.2.1.3 ขั้นตอนการปฏิบัติงานกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

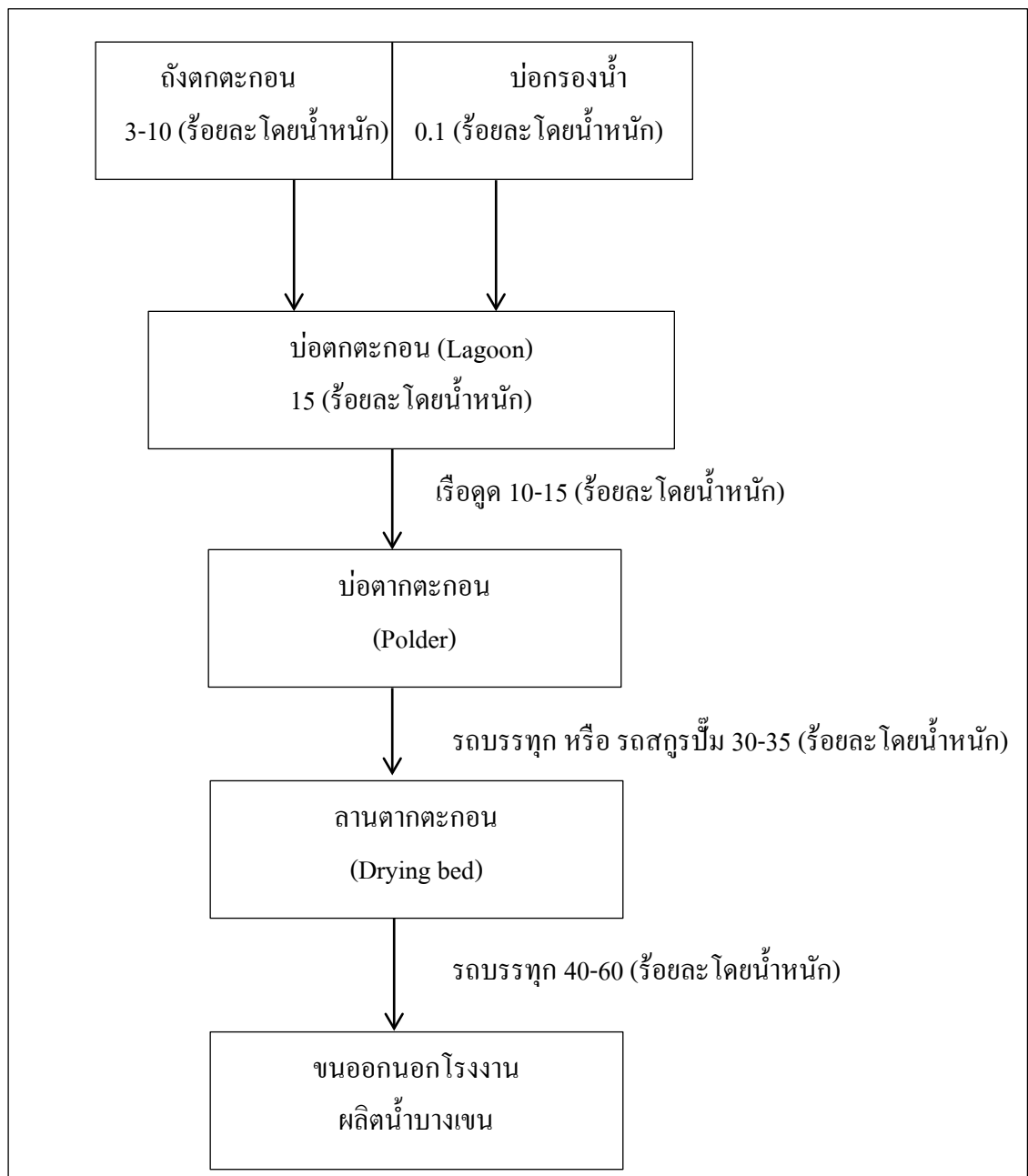
เนื่องจากตะกอนจากระบวนการผลิตน้ำประปาที่เกิดขึ้นเป็นของเหลวข้น ดังนั้นการกำจัดตะกอนส่วนมากจะทำให้แห้งก่อนการนำไปทิ้งโดยการถมที่ โดยขั้นตอนการปฏิบัติงานกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) รับน้ำตะกอนความเข้มข้นประมาณร้อยละ 3-10 โดยน้ำหนัก (w/w) จากถังตกตะกอนหมายเลข 1-16 เข้าสู่ท่อระบายตะกอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,000 มิลลิเมตร
- 2) นำตะกอนความเข้มข้น ประมาณร้อยละ 3-10 โดยน้ำหนัก (w/w) ส่งผ่านท่อระบายตะกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,000 มิลลิเมตร เข้าสู่บ่อกักตะกอนหมายเลข 1-4 ทาง Inlet Valve
- 3) นำตะกอนในบ่อกักตะกอนเกิดการตกตะกอน โดยธรรมชาติน้ำใสความขุ่นไม่เกิน 50 NTU จะลอยตัวอยู่ชั้นบนไหลออกทาง Outlet Valve ลงคลองระบายน้ำวนกลับ (Recycle) ส่วนตะกอนเหลวความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก (w/w) จะตกลงสู่ชั้นล่างสะสมจนถึงระดับเต็มบ่อความลึกประมาณ 3.5 เมตร ก็จะปิดบ่อเปลี่ยนไปใช้บ่ออื่น (บ่อเต็มใช้เวลาประมาณ 1-2 เดือน)
- 4) ใช้เรือสูบน้ำตะกอนเหลวที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก (w/w) ออกจากบ่อกักตะกอน 1-4 ไปยังบ่อดักตะกอน (Polder) A หรือ B โดยผ่านทางท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร
- 5) รวบรวมตะกอนเหลวจากบ่อกักตะกอน 1-4 มารวมกันในบ่อดักตะกอน A หรือ B
- 6) แยกน้ำออกจากตะกอนเหลวในบ่อดักตะกอน A หรือ B โดยระบายน้ำใสความขุ่น ไม่เกิน 50 NTU ออกจากบ่อดักตะกอนและปล่อยให้ตะกอนตกโดยธรรมชาติหรือ ใช้เครื่องจักรกลช่วยให้ตกตะกอนใช้เวลาประมาณ 1 ปี จะได้ตะกอนเหลวที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนัก (w/w)
- 7) ขนย้ายดินตะกอนเหลวความเข้มข้นร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนัก (w/w) จากบ่อดักตะกอน A หรือ B ไปยังลานตกตะกอน D หรือ E โดยใช้รถ Back Hoe ตักใส่รถบรรทุกหรือใช้สกรูบีบสูบน้ำผ่านท่อ
- 8) ตากและพลิกกลับตะกอนเหลวในลานตกตะกอน D หรือ E จนได้ความเข้มข้นตะกอนตั้งแต่ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก (w/w) ขึ้นไปโดยใช้ระยะเวลาในการตากประมาณ 1.5-2 เดือน (ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ)
- 9) ใช้รถ Back Hoe ตักดินตะกอนความเข้มข้น ตั้งแต่ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก (w/w) ขึ้นไปใส่รถบรรทุกขนย้ายออกจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนต่อไป

- 10) รับน้ำตะกอนล่างบ่อกรองจากบ่อกรองน้ำ (filter) 1-44 ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก(w/w) เข้าสู่ท่อระบายน้ำล่างบ่อกรอง (Filter Drain) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,500 เมตร
- 11) ส่งน้ำตะกอนล่างบ่อกรอง ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก (w/w) ทางท่อระบายน้ำล่างบ่อกรอง (Filter Drain) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,500 มิลลิเมตร เข้าสู่บ่อกักตะกอน 1-4 ทาง Inlet Valve
- 12) นำตะกอนในบ่อกักตะกอนเกิดการตกตะกอนโดยธรรมชาติ น้ำใสความขุ่น ไม่เกิน 50 NTU. จะลอยตัว อยู่ชั้นบนไหลออกจาก Outlet Valve ลงคลองระบายน้ำนำกลับ (Recycle) ส่วนตะกอนเหลวความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก (w/w) จะตกลงสู่ชั้นล่างสะสมจนถึงระดับ เต็มบ่อความลึกประมาณ 3.5 เมตร ก็จะปิดบ่อเปลี่ยนไปใช้บ่ออื่น (บ่อเต็มใช้เวลาประมาณ 6-8 เดือน)
- 13) ใช้เรือสูบน้ำตะกอนเหลวที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก (w/w) ออกจากบ่อกักตะกอนไปยังบ่อตากตะกอน (Polder) A หรือ B โดยผ่านทางท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร
- 14) น้ำใสที่ไหลออกจาก Outlet Valve ของบ่อกักตะกอน 1-5 ควบคุมความขุ่น ไม่เกิน 50 NTU. จะไหลมารวมกันที่คลองระบายน้ำนำกลับ (Recycle)
- 15) น้ำใสจากคลองระบายน้ำนำกลับ (Recycle) จะไหลโดย Gravity Flow เข้าสู่คลองน้ำดิบเพื่อนำ ไปผลิตเป็นน้ำประปาต่อไปในช่วงนี้ก่อนที่จะเข้าสู่คลองน้ำดิบจะมีตรวจวัด ความขุ่นของน้ำ โดยมีการกำหนดไว้ว่า จะต้องมีความขุ่นไม่เกิน 50 NTU.

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำตะกอนดินประปามาใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ แต่ในตะกอนดินประปาที่นำมาใช้ในการทดลองจะต้องนำมาเผาโดยกระบวนการ Dehydroxylation ที่อุณหภูมิ 600- 900 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนดิน และ ความร้อนจะส่งผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของอะลูมิเนียมของตะกอนดินประปาจาก Octahedral ให้อยู่ในรูป Tetrahedral ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น Davidovits (2008) กล่าวว่า วิธีการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงผ่านกระบวนการ dehydroxylation เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงหมู่ hydroxyl ให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ ซึ่งการเคลื่อนย้ายและสูญเสียหมู่ hydroxyl จะผลให้โครงสร้างของสารประกอบ alumino-silicate oxide เปลี่ยนรูปประจุของอะลูมิเนียมจาก six-fold coordination ให้อยู่ในรูปของ five และ four-fold coordination ตรงตำแหน่งของ tetrahedral เพิ่มขึ้น Waijarean et al. (2014) ศึกษาอุณหภูมิในการเผาตะกอนดินประปาที่ไม่ผ่านการเผา พบแร่เคลโอลิน ชนิดแร่ฮาลลอยไซต์ (Halloysite) ร่วมกับแรมส์โคไวต์ (Muscovite) ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับนำมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงนำดินตะกอนโรงประปามาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง พบว่า มีอัตราส่วนซิลิกาและอะลูมินาเท่ากับ 1.78 เกิดการจัดเรียงโครงสร้างอะลูมิเนียมแบบ four-fold

coordination เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุตั้งต้นสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ และสามารถพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง และให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดมากกว่า 80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้มีการยืนยันจากผลการวิเคราะห์จากเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่สามารถระบุรูปแบบของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ ผลึกของ sodium aluminum silicate hydrate (NASH) แทนตำแหน่งฟิสิกควอซต์ และตำแหน่งหมู่ฟังก์ชัน Si-O-T ที่เลขคลื่นประมาณ 1000 cm^{-1} และตำแหน่งสเปกตรัมที่ 60.6 ppm และ -88.3ppm



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการกำจัดตะกอนของโรงผลิตน้ำบางเขน ฝ่ายผลิตน้ำประปาบางเขน (2554)

2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารละลายต่างเข้มข้นเป็นส่วนที่สำคัญที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน เนื่องจากมีการชะละลายซิลิกาและอะลูมินา ให้หลุดออกจากวัตถุดิบเพื่อทำปฏิกิริยาเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงต่างเข้มข้นมีหลายประเภท ในงานวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากมีราคาถูก และมีความเข้มข้นสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันได้ดี

2.3.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์ มีสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขมันออก เช่น อุตสาหกรรมสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษ ตามบ้านเรือนมีการใช้ในงานล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างมีฤทธิ์กัดกร่อน ไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารแบ่งออกเป็น 2 ชนิด (มอก.150-2518) ราชกิจจานุเบกษา (2549) คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารละลาย หมายถึง สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะเป็นของเหลวขุ่น ไม่มีสี โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารละลาย 50 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดสารละลาย 32 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นก้อนเป็นเม็ด หรือ บดเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไปเป็นของแข็งสีขาวเกณฑ์การกำหนดของสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สามารถแบ่งชั้นคุณภาพ ชนิด ความเข้มข้นและลักษณะได้หลายประเภท แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ชนิด ความเข้มข้น ชั้นคุณภาพ และลักษณะทางเคมีของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด					
	โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดสารละลาย 50		โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดสารละลาย 50		โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดแข็ง	
	ชั้น คุณภาพ	ชั้น คุณภาพ	ชั้น คุณภาพ	ชั้น คุณภาพ	ชั้น คุณภาพ	ชั้น คุณภาพ
	1	2	1	2	1	2
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละโดยน้ำหนัก	50 ±0.5	50 ±0.5	32±0.5	32±0.5	ไม่น้อย กว่า 99.0	ไม่น้อย กว่า 98.0
โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃) ร้อยละโดยน้ำหนัก	1	1	0.7	0.7	0.5	2
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	0.1	0.5	0.07	0.35	0.1	0.15
ไอร์ออน (III) ออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่เกิน	0.005	0.01	0.004	0.007	0.005	0.005
สารที่ไม่ละลายน้ำ ร้อยละโดย น้ำหนัก ไม่เกิน	-	-	-	-	0.001	0.005
สารออกซิไดซ์(คำนวณเป็น NaClO ₃) มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน	100	100	70	70	100	200
ปรอท มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่เกิน	0.05	0.05	0.03	0.03	0.1	0.1

2.4 ปัจจัยการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ปัจจัยที่สำคัญหลายประการ เพื่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่สูง ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงได้แก่ องค์ประกอบของวัตถุดิบและอัตราส่วน ชนิดและความเข้มข้นของด่าง และ อุณหภูมิในการบ่ม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถอธิบายตามขั้นตอนได้ดังนี้

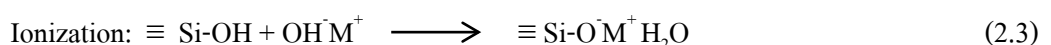
2.4.1 องค์ประกอบของวัตถุดิบและอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

องค์ประกอบสารตั้งต้นที่มีธาตุซิลิกอนและอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลักมีความสำคัญในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ส่วนอัตราส่วน Si และ Al มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ และส่วนใหญ่เป็นวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าแกลบดำ ตะกรันจากเตาถลุง เหล็ก ตะกอนจากโรงกรองน้ำ ซึ่ง อัตราส่วน Si/Al ในสารตั้งต้นเหมาะสม จะเป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลให้ต่อการเกิดปฏิกิริยาและการจับตัวของพันธะทางเคมีภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่ง องค์ประกอบของงานวิจัยนี้เลือกใช้ดินตะกอนประปา โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Waijarean et al. (2014) ใช้ตะกอนดินประปาในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นสารตั้งต้น โดยในตะกอนประปา มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 1.78 โดยน้ำหนัก

2.4.2 ชนิดและความเข้มข้นของด่าง

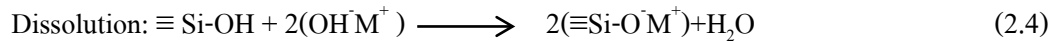
อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxides) นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เกิดกระบวนการกระจาย (Dispersant) ส่งผลต่อการเกิดพันธะของพอลิเมอร์อินทรีย์ เกิดกลไกการดูดประจุในตำแหน่งที่มีการแทนที่ซิลิกา (Si) ด้วยอะลูมิเนียม (Al) ให้เกิดการควบแน่นในโครงสร้างและก่อนวัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของซิลิกาในสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการหลักคือ

1) กระบวนการไอออนไนเซชัน (Ionization) เกิดขึ้นเมื่ออัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์แพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาคทำให้ซิลานอลกรุป (Silanol Group) เกิดการแตกตัวดังสมการ 2.3



อัตราการเกิดกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเป็นด่างของอัลคาไลน์ไอออนโดย $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนมีขนาดใหญ่มีความไวในการแตกตัวได้ดีกว่าและง่ายกว่าโซเดียมและลิเทียมไอออนในเวลาเท่ากัน

2) กระบวนการชะละลาย (Dissolution) คั่งสมการ อัตราการชะละลายของซิลิกาขึ้นอยู่กับ ดีกรีของแคตไอออนไฮเดรชัน (Degree of cation hydration) ซึ่ง $K^+ < Na^+ < Li^+$ มีผลอย่างมากเมื่อ อัตราส่วนของซิลิกาต่อโลหะออกไซด์มีค่าสูง (SiO_2/M_2O)



นอกจากนี้ขนาดของไอออนบวกก็มีอิทธิพลต่อโครงสร้างและส่วนประกอบของผลึกที่เกิดขึ้น คือ โซเดียมไอออน (Na^+) มีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) แสดงถึงการรวมตัวกับซิลิเกต โอลิโกเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า เช่น มอนอเมอร์ และแข็งแรงกว่า ส่วนโพแทสเซียมไอออน ชอบรวมตัวกับซิลิเกต โอลิโกเมอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในส่วนผสมจะมีการก่อตัวเร็วกว่าและให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นกว่าทำให้สามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ Davidovit (2008) นิยมใช้ NaOH เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยามากที่สุดในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เพราะราคาถูกและใช้ระดับความเข้มข้นได้ช่วงกว้าง สารละลายต่างที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต แต่งานวิจัยส่วนใหญ่มักใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังงานวิจัยของ Mingyu et al. (2009) ศึกษาการกระตุ้นจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยด้วยต่างร่วมกับการใช้ซีโอไลต์ หรือเบนโทไนท์เป็นสารเติมแต่ง พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดต่อกำลังอัดของวัสดุ ถึงแม้ว่าวัสดุเสริมไม่ได้มีบทบาทสำคัญต่อกำลังอัดของวัสดุ แต่โครงสร้างจุลภาคแตกต่างกันเมื่อจีโอพอลิเมอร์ที่มีวัสดุเสริมต่างกัน การวิเคราะห์ IR spectroscopy, SEM-EDX และ X-ray แสดงว่าจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยที่มีซีโอไลต์มีอะลูมิโนซิลิเกตอสัณฐาน (Amorphous aluminosilicates) มากที่สุด มีอัตรา Si/Al สูงที่สุด มีความแข็งแรงสูงสุดและมีความต้านทานต่อซัลเฟตที่ดี

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าอัตราส่วนต่างที่เหมาะสมกับสารตั้งต้นในวัตถุดิบหลัก ดังงานวิจัยของ De Vergas et al. (2011) ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Na_2O/SiO_2 อุณหภูมิในการบ่มที่ 24 ชั่วโมงแรก และอายุของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่าที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 สูงขึ้นความต้องการน้ำในการสังเคราะห์เพลสต์และมอร์ตาร์ดลดลง ซึ่งเป็นผลจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นของ NaOH ทำให้เถ้าลอยถูกชะละลายได้มากขึ้นจึงทำให้เกิดอะลูมิโนซิลิเกตเจลจำนวนมาก ซึ่งเจลนี้เป็นผลให้ความสามารถในการไหลเท (Workability) ของตัวอย่างสด (Fresh sample) ดีขึ้นมาก ความต้องการน้ำจึงลดลง โดยอัตราส่วนของ Na_2O/SiO_2 มีบทบาทสำคัญต่อกำลังอัดและลักษณะ โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ซึ่งการใช้ Na_2O/SiO_2 ที่อัตราส่วน 0.2 การเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดจาก 1-180 วัน มีค่าน้อยมาก เนื่องจากความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ จึงทำให้การชะละลายเถ้าลอยและเกิดปริมาณอะลูมิโน

ซิลิเกตเจลที่ไม่เพียงพอ แต่เมื่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เพิ่มขึ้น การชะละลายสารอะลูมิโนซิลิเกต เจลเกิดขึ้นได้มาก โดยที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.4 ทำให้โครงสร้างควบแน่นได้สูงจึงส่งผลต่อ ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ให้มีค่ากำลังอัดสูงสุด นอกจากนี้แล้วในงานวิจัยจาก ต่างประเทศยังมีการศึกษา สารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่าง 2 ตัวร่วมกัน คือ โซโครีเอมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับโซโครีเอมซิลิเกต โดยผลการศึกษาของ Songpiriyakij et al. (2010) ศึกษาการรับกำลังอัดและ ระดับการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เกลบและเปลือกไม้ที่ได้จากการเผาในโรงไฟฟ้าจาก ชีวมวลร่วมกับเถ้าลอย โดยมีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ใช้ในช่วงที่กว้างที่ 4.03 – 10.5 ใช้สารละลาย โซโครีเอมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 14 และ 18 โมลาร์ และสารละลายโซโครีเอมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยา ค่ากำลังอัดระดับ การเกิดปฏิกิริยา และโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับ ผลของ อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผลปรากฏว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้ค่ากำลังอัด สูงสุดเท่ากับ 15.9

2.4.3 อุณหภูมิในการบ่ม

การใช้อุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ส่งผลต่ออัตราการเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้น ช่วยเร่งให้เกิดผลิตภัณฑ์และส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น การบ่มจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ อุณหภูมิสูงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้อย่างรวดเร็ว และเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วงต้นได้ดี จีโอพอลิเมอร์สามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้ใน กระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์เป็นไปได้ช้า ต้องใช้ระยะเวลาเวลานานเพื่อที่จะพัฒนากำลังอัดได้ดี จึงมี การนำความร้อนมาช่วย เพื่อที่จะลดระยะเวลาบ่มให้น้อยลง และเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้น ซึ่งการบ่มแบ่ง ได้หลายแบบ เช่น บ่มแบบไอน้ำความดันสูง บ่มแบบอุณหภูมิห้อง บ่มแบบความร้อน และบ่มในอ่าง ควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น มีงานนักวิจัยหลายท่านศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ สังเคราะห์โดยใช้ความร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาในช่วงอายุต้น จากงานวิจัยของ Rovnanik., P. (2010) ศึกษาผลกระทบของการบ่มของการใช้ดินขาวเผาในงานจีโอพอลิเมอร์ พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อกำลังอัด จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดินขาวเผา โดยมีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบในทุกอุณหภูมิของการ บ่ม ที่อายุทดสอบ 7 และ 28 วัน พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการ บ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ที่อายุทดสอบที่ 28 วัน พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 1 วัน มีค่ากำลังอัดที่สูงเกิน 60 MPa. หากพิจารณาอายุทดสอบที่ 28 วัน พบว่าการบ่มที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

Nazari et al. (2011) ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมเถ้าเกลบและเปลือกยูคา ลิปตัส ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงให้กับ โรงไฟฟ้าชีวมวล ทำการทดสอบกำลังอัดที่

7 และ 28 วัน แบ่งชุดการทดสอบเป็น 2 ชุด คือ บ่มที่อุณหภูมิห้อง จนถึง 7 และ 28 วัน และ บ่มที่อุณหภูมิ 40-90 องศาเซลเซียส 36 ชั่วโมง จากนั้น บ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนถึง 7 และ 28 วัน โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 48 และ 12 โมลาร์ ร่วมกับ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.99 บ่มที่ 80 องศาเซลเซียส และมีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังอัดสูงสุดทั้ง 7 และ 28 วัน

จากนั้นการให้ความร้อนในการบ่มจีโอพอลิเมอร์จากเถาลอย จะมีการพัฒนากำลังอัดและระยะเวลาในการบ่มได้ เช่น งานวิจัยของ Chindaprasirt et al. (2013) ใช้รังสีไมโครเวฟที่ 90 วัตต์ ของ เป็นเวลา 5 นาที โดค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ด้วยรังสีไมโครเวฟเปรียบเทียบกับบ่มควบคุมที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ารังสีไมโครเวฟ ส่งผลให้การเรียงตัวหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเร่งการก่อตัวของเจล ในอนุภาคเถาลอย เนื่องจากการสลายตัวของชั้นคอนอสันฐานเฟส และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

2.5 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติของสารจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยเทคนิคดังนี้

2.5.1 เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry; XRF)

เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอยได้ เทคนิค XRF อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (Fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่างข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

2.5.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction ; XRD)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น(1)ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการ

เดี่ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเดี่ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก ของสารประกอบในสารตัวอย่าง

2.5.3 เทคนิคภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)

เทคนิค นี้อาศัยการโฟกัสลำอิเล็กตรอนกราดลงบนผิวชิ้นงานสัญญาณที่เกิดขึ้นจากอัตรา กิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับผิวชิ้นงานจะถูกถ่ายทอดผ่าน ระบบตรวจวัดและอิเล็กทรอนิกส์ปรากฏบนจอภาพคล้ายกับภาพที่เห็นทางจอโทรทัศน์ กล้องจุลทรรศน์ที่ทำงานในลักษณะนี้ เรียกว่า “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด” สัญญาณที่ใช้ในการสร้างภาพมีหลายชนิด เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ, อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ หรือรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น ทำให้เทคนิคนี้สามารถใช้ศึกษาพื้นฐานวิทยาของชิ้นงาน สภาพผิวของชิ้นงาน จุดบกพร่องบริเวณใกล้ผิวชิ้นงาน และหากมีตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ลักษณะเฉพาะ ก็สามารถวิเคราะห์ส่วนประกอบเคมีในระดับจุลภาพวิเคราะห์ได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบมาใช้ในการสังเคราะห์ Davidovit (2008) กล่าวว่า จีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ (Inorganic Portland Cement , IPC) เป็นที่รู้จักในชื่อของ จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นการสังเคราะห์จากสารที่มีส่วนประกอบของ Aluminosilicate เป็นส่วนประกอบหลักทำปฏิกิริยา Geopolymerization ภายใต้ตัวกระตุ้นต่างเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง ผลการสังเคราะห์ได้วัสดุที่มีสมบัติคล้ายซีเมนต์ ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ใช้วัตถุดิบที่เหลือใช้จากการเกษตรและของเสียจากภาคอุตสาหกรรม มาใช้ในการสังเคราะห์ เช่น เปลือกไม้ เถ้าแกลบ ดินขาว เถ้าลอย ตะกรันจากเตาหลอมเหล็ก ซึ่งวัตถุดิบเหล่านั้นมีองค์ประกอบหลักของสารประกอบ Aluminosilicate ดังนั้นความสำคัญของอัตราส่วนระหว่าง Si และ Al ในวัตถุดิบจึงส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์

ในงานวิจัยที่ผ่านมา นภารัตน์ ไวยเจริญ (2553) ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ กากตะกอนประปาของโรงผลิตน้ำบางเลน จังหวัดนครปฐม โดยทำการหาค่าประกอบทางกายภาพและเคมีพบว่า ออกไซด์ในรูปของ SiO_2 และ Al_2O_3 อยู่ในช่วง ร้อยละ 38.05-40.79 และ ร้อยละ 44.91-45.25 อัตราส่วน Si/Al น้อยกว่า 1.0 โดยใช้สารละลายด่าง NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิห้องและทดสอบกำลังอัดที่ 8 และ 28 วัน พบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงที่สุดได้ที่ระยะเวลาบ่ม 8 วัน เท่ากับ 1.19 กก./ cm^2 และระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน เท่ากับ 10.43 กก./ cm^2

ในงานวิจัยต่อมา Waijarean et al. (2014) ใช้กากเหลือทิ้งโรงประปาเป็นแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกตโดยมีแร่เคโอลินและแรมส์โคไวต์เป็นองค์ประกอบหลักเพื่อศึกษาการตรึงโลหะหนักในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากกากเหลือทิ้ง โรงประปาภายใต้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันโดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง การศึกษาครั้งใช้อุณหภูมิในการเผากากตะกอนเหลือทิ้งโรงประปาที่ 600 800 และ 900 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิการเผากากเหลือทิ้งโรงประปาที่ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ให้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.78 จัดเป็นวัสดุตั้งต้นอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งภายหลังการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันที่อายุการบ่ม 60 วัน ก้อน จีโอพอลิเมอร์สามารถพัฒนากำลังอัดมากที่สุดเท่ากับ 88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ในทำนองเดียวกันกับ เทวพันธ์ ทองหยาด (2553) ศึกษาสมบัติของตะกอนดินประปาที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยนำตะกอนมาทำการบดให้มีร้อยละคงค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 17 ± 3 และนำตะกอนที่ได้มา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างตะกอนประปาที่ผ่านและไม่ผ่านการเผาด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์เกินร้อยละ 70 และมีค่า LOI ของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผา เผาที่ 600 และเผาที่ 800 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 2.4 0.1 และ 0.1 ตามลำดับ จากนั้นนำตะกอนประปาที่ผ่านและไม่ผ่านการเผามากระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH และ KOH โดยควบคุมอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.3 และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 0.37 และ 0.45 พบว่า กำลังอัดที่อายุตัวอย่าง 60 วัน ของตะกอนดินประปาที่ผ่านการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส เมื่อทำปฏิกิริยากับ KOH และ NaOH ที่อัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.37 และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 89.4 และ 105.4 กก./ cm^2 ตามลำดับ

เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ซาลินี อ่อนแสง (2554) ศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) และชนิดของด่างต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอน

ประปาโดยใช้ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อัตราส่วน 1.78 ถึง 8 โดยน้ำหนักและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15 0.2 0.25 0.3 และ 0.35 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 มีการพัฒนากำลังอัดสูงสุด โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 143 กก./ cm^2 และก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลัง เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 มีค่ากำลังอัดสูงสุด ซึ่งที่อายุ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 18.2 กก./ cm^2 ส่วนของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยที่ระยะเวลา 60 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 170 กก./ cm^2 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของสารกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปามากกว่า เนื่องจากค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์มีค่ามากกว่าการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทุกอายุการบ่ม

นอกจากนั้นแล้ว อธิกา วงศ์วานกลม (2553) ได้ทำการศึกษการทำจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเป็นวัสดุตั้งต้น โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 และ 20 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.50–1.50 โดยน้ำหนัก พบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยเพียงชนิดเดียว และกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการบ่มความร้อนในช่วงอายุต้น นอกจากนี้ ยังพบว่า การขยายตัวและการหดตัวเมื่อแห้งของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์

นอกจากนั้นยังมีการนำดินขาวมาใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ได้ศึกษาผลของสารอัลคาไลน์และอัตราส่วน Si/Al ที่มีต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากดินขาวเผา โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอัลคาไลน์ (โซเดียม และ โพแทสเซียม) และอัตราส่วน Si/Al ที่มีผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยพบว่าตัวแปรทั้งสองมีผลต่อกำลังรับแรงอัดน้อยมาก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ Si/Al พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อชนิดเดียวพบว่าตัวอย่างมีกำลังลดลง การพัฒนาของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์ระหว่างอายุ 7 และ 28 วัน ขึ้นอยู่กับสารอัลคาไลน์ ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในตัวอย่างของ Na ที่อัตราส่วน Si/Al ต่ำ แต่จะลดลงเมื่ออัตราส่วน Si/Al เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ตัวอย่างของ K ได้ผลตรงกันข้ามกับ Na และอัตราส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงสารอัลคาไลน์ทั้ง 2 ชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยมาก ถือได้ว่าอัตราส่วน Si/Al ไม่มีนัยสำคัญต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอพอลิเมอร์ Duxson et al. (2006)

นอกจากนั้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์วัสดุที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย คือ การนำเถ้าลอยมาใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ดังงานวิจัยของ Rattanasak et al. (2009) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายต่าง NaOH ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่าง 5 10 และ 15 M ด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนักร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าการชะละลายของ Si^{4+} ไอออน เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของ NaOH 10 M มากที่สุด มากกว่าความเข้มข้นที่ 5 M เนื่องจากค่าความเป็นด่างสูงกว่า ส่วนที่ 15 M ลดการละลายของ Si ลงเนื่องจากเกิด coagulation ของซิลิกา ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค SEM พบผิวขรุขระของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ถูกชะละลายด้วยสารละลาย NaOH เป็นผลจากการชะของไอออน ซึ่งที่ความเข้มข้น 5 M จะพบผิวที่ขรุขระน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 10 M และ 15 M ตามลำดับ ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ตัวกระตุ้น NaOH 10 M ให้กำลังอัดสูงถึง 60-70 MPa สูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์แบบผสมวัสดุตั้งต้นร่วมกันก่อนเติมสารละลายตัวกระตุ้นต่าง จะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าแบบแยกส่วนการผสม

ในงานวิจัยต่อมา Somna et al. (2011) สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยบดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 อนุภาคคงค้ำน้อยกว่าร้อยละ 2 ใช้ตัวกระตุ้นต่าง NaOH ที่ความเข้มข้น 4.5, 7.0, 9.5, 12.0, 14.0 และ 16.5 M บ่มก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและทดสอบการพัฒนากำลังอัดที่ 7 14 28 42 และ 60 วัน พบว่าการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิห้องคล้ายกับ Portland cement การเพิ่มความเข้มข้นสารละลายต่างจาก 4.5 เป็น 9.5 M เกิดปฏิกิริยาและพัฒนากำลังอัดได้ดี ส่วนความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ต่ำกว่า ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดน้อยกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ที่ความเข้มข้นสูงสุด 16.5 M กำลังอัดจะลดลงในช่วง 60 วัน การทำปฏิกิริยาต้องใช้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ (OH^-) มากเพียงพอ ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่างจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ หากความเข้มข้นมากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้ Aluminosilicate gel ตกตะกอนในช่วงอายุต้นและทำให้กำลังอัดลดลง ส่วนการบดเถ้าลอยให้มีขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มพื้นที่ของอนุภาค มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มกำลังอัดโดยเฉพาะช่วง 7-14 วันแรก เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยที่ละเอียดมี Capillary pores ลดลงมากกว่าอนุภาคเถ้าลอยเนื้อหยาบ

ในขณะที่ อนุชาติ ถิ่นนันทศิริศักดิ์ (2549) ได้ทำการศึกษาวิธีการผลิตสารจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาว โดยศึกษาอุณหภูมิและช่วงเวลาในการเผาดินขาว อัตราส่วนของเถ้าผสมดินขาวเผาความสามารถทำงานได้ อุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม อัตราส่วนของ $Na_2O \cdot SiO_2$: NaOH โดยน้ำหนัก ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิและช่วงเวลาการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 600 องศาเซลเซียส และ

2 ชั่วโมงตามลำดับ การผสมดินขาวจะทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เด็กลอยลดลง จีโอพอลิเมอร์ที่มีดินขาวเผาไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะให้กำลังอัดที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 300-500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ถึง 125 ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 : \text{NaOH}$ โดยน้ำหนักที่เหมาะสมในการผลิตสารจีโอพอลิเมอร์จากเด็กลอยผสมดินขาว คือ 0.67-1.0 ควรให้ตัวอย่างก่อตัวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปเข้าสู่อบอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 75 องศาเซลเซียส

นอกจากนั้นยังมีการนำวัสดุชนิดอื่นมาศึกษา ดังงานวิจัยของ Songpiriyakij et al. (2010) ศึกษาการรับกำลังอัดและระดับการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เกลบและเปลือกไม้ที่ได้จากการเผาในโรงไฟฟ้าจากชีวมวลร่วมกับเด็กลอย โดยมีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ใช้ในช่วงที่กว้างที่ 4.03 – 10.35 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 14 และ 18 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัว กระตุ้น ปฏิกิริยา ค่ากำลังระดับการเกิดปฏิกิริยา และ โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับผลอัตรา $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ผลปรากฏว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 15.9 MPa.

นอกจากการศึกษาองค์ประกอบหลักในวัสดุดิบแล้ว โดยทั่วไปการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะใช้ระยะเวลาานาน ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาอุณหภูมิในการบ่ม เพื่อการพัฒนา กำลังอัด ดังงานวิจัยของ นอกจากนั้นแล้วงานวิจัยของ Nazari et al. (2011) ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเด็กลอยผสม เถ้าเกลบและเปลือกยูคาลิปตัสซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้าชีวมวล ทำการทดสอบกำลังอัดที่ 7 และ 28 วัน แบ่งชุดการทดสอบเป็น 2 ชุด คือ 1. บ่มที่อุณหภูมิห้อง จนถึง 7 และ 28 วัน 2. บ่มที่อุณหภูมิ 40-90 องศาเซลเซียส 36 ชั่วโมง จากนั้น บ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนถึง 7 และ 28 วัน โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4 และ 12 โมลาร์ ร่วมกับ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.99 บ่มที่ 80 องศาเซลเซียส และมีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังอัดสูงที่สุด ทั้ง 7 และ 28 วัน

นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยของ Lampris et al. (2009) ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ของ Silt จากแหล่งก่อสร้างและระบบการล้างของเสียร่วมกับ Pulverised Fuel ash (PFA) และ Metakaolin เป็นส่วนผสมของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ทำการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ แบ่งออกเป็น 3 ชุด การทดลองคือ บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน, 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน และบ่มต่อเนื่องด้วยการบ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 4 วัน รวมเป็น 7 วัน และบ่มที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากนั้นทดสอบกำลังอัดที่ 24 ชั่วโมงและ 7 วัน ใช้ตัวกระตุ้นต่าง NaOH และ Sodium Silicate ด้วยอัตราส่วน Na_2O ร้อยละ 7.5-8.5 , SiO_2 ร้อยละ 22.5-28.5 พบว่าการล้าง Silt ก่อนนำมาสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์เป็นการส่งเสริมกระบวนการ Geopolymerization และการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วันตามด้วยบ่มที่อุณหภูมิห้องส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดที่สูงในช่วงต้นมากกว่า การบ่มที่อุณหภูมิห้องเพียงอย่างเดียว

นอกจากนั้น L.Y.Kong และ G. Sanjayan (2008) ศึกษาพฤติกรรมที่ถูกทำลายของจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ใช้เกลือลอย เป็นวัตถุคิบ Class F ใช้ตัวกระตุ้นสารละลาย Sodium silicate ด้วยอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 2 ร่วมกับ KOH 7 M ซึ่ง เกลือลอย วิเคราะห์ออกไซด์ของ Si และ Al ด้วยเทคนิค XRF พบว่ามี SiO_2 48.8% Al_2O_3 27.0% อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 1.8 บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่าการเกิดปฏิกิริยาเคมีของจีโอพอลิเมอร์เกิดอย่างรวดเร็วภายใต้กระบวนการ Geopolymerization และให้กำลังอัดสูงประมาณ 70% ภายใน 3-4 ชั่วโมงแรกของการบ่ม และการบ่มด้วยความร้อนเป็นเวลานานไม่ได้ส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัด

Chindaprasirt et al. (2013) การบ่มจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เกลือลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน (1200 องศาเซลเซียส) กระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 10 โมลาร์ ต้องการความร้อนเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อการพัฒนา กำลังอัดที่เหมาะสม การให้ความร้อนในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่ประยุกต์ในจีโอพอลิเมอร์เกลือลอย การพัฒนาความแข็งแรงและระยะเวลาในการบ่ม โดยใช้ 90 วัตต์ ของรังสีไมโครเวฟ เป็นเวลา 5 นาที โดยผลการบ่มด้วยความร้อนของจีโอพอลิเมอร์เกลือลอย ผลแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ด้วยรังสีไมโครเวฟ โดยการบ่มเปรียบเทียบกับ การบ่มควบคุมที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ พบว่ารังสีไมโครเวฟส่งผลให้การเรียงตัวหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเร่งการก่อตัวของเจล ในอนุภาคเกลือลอย เนื่องจากการสลายตัวของชั้นคอนกรีตฐานเฟส และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

วีรช วิฑูริ์รสานต์ (2556) ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังอัดของสารประกอบจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าตะกอนน้ำประปา โดยสารตั้งต้นทั้งสองชนิดถูกนำมาอบแห้ง แล้วบดละเอียดจนมีอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตะกอนน้ำประปาที่เผาด้วยอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง การแทนที่ในเถ้าชานอ้อยไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงกว่าแทนที่ร้อยละอื่นๆ และยังพบอีกว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ

1.00 และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ และอุณหภูมิการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส แต่การใช้ตะกอนประปาส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง และมอร์ตาร์ทมีการหดตัวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ทที่ใช้เถ้าขานอ้อยเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ผู้ทำการศึกษาจึงมีแนวคิดที่นำตะกอนดินประปามาเป็นวัสดุในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ความเข้มข้นของสารกระตุ้น รวมทั้งอุณหภูมิระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เพื่อพัฒนากำลังอัดให้ดีขึ้น