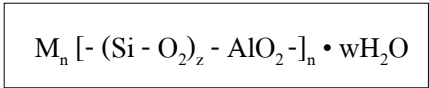


บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

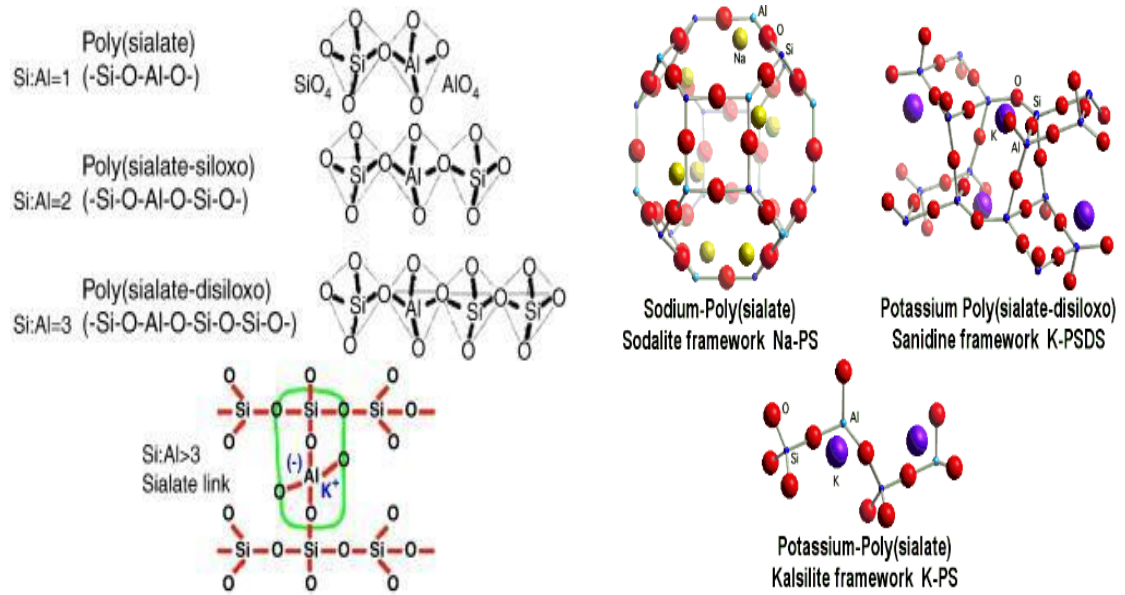
2.1 ความหมาย และโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymers) หรือเรียกอีกอย่างว่า พอลิไซอะเลต (Polysialate) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้จีโอพอลิเมอร์สามารถเกิดการก่อตัวแข็งแรงและให้กำลังอัดได้ โครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์แสดงได้ดังสมการ

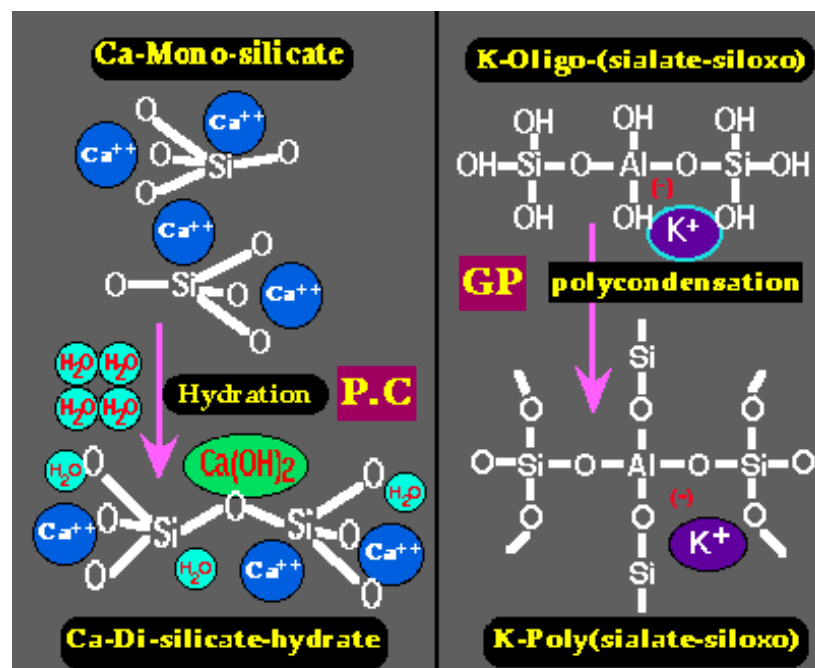


โดย	M	คือ	ธาตุอัลคาไลน์
	-	คือ	การยึดเกาะพันธะ (bond)
	z	คือ	จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
	n	คือ	จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ Degree of Polymerization
	w	คือ	จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสานในลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ของ $[\text{AlO}_4]^-$ และ $[\text{SiO}_4]^+$ โดยมีโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na^+) หรือโพแทสเซียม (K^+) ในการทำให้ประจุสมดุล ณ ตำแหน่งของ $[\text{AlO}_4]^-$ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้การใช้พลังงานลดลงไปมากและต้นทุนในการผลิตต่ำลง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือพอลิไซอะเลต
ที่มา : Jimenez, et al. (2004)



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับปฏิกิริยา
พอลิคอนเดนเซชันของจีโอพอลิเมอร์
ที่มา : Jimenez, et al. (2004)

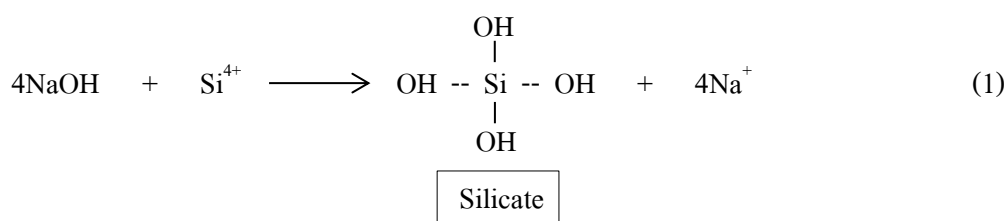
จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกันกล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะประกอบกันด้วยสารเชื่อมประสานของสารประกอบ ที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และ แคลเซียมออกไซด์ แต่การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) ซึ่งใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) โดยใช้ สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น โมเลกุล ลูโซในลักษณะของพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

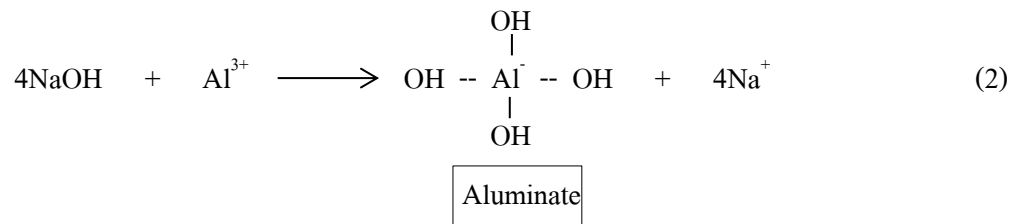
2.2 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

สารจีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีส่วนประกอบเป็นสาร ลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) และสารกึ่งผลึก (Semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์ จึงเป็นสารประกอบที่มีซิลิกาและอะลูมินาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์ สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาของ จีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน (Jimenez, et al., 2004) คือ

1) การชะละลาย (Dissolution)

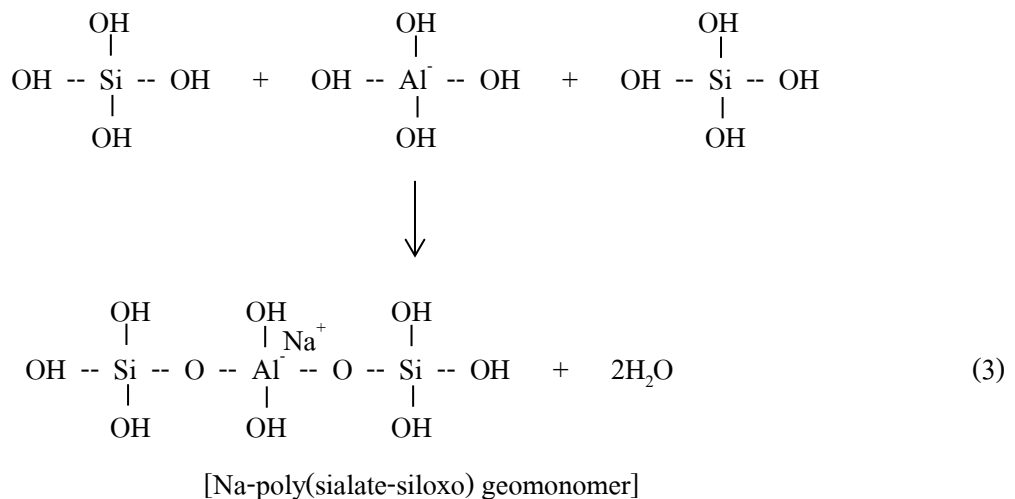
เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ ออกมา โดยอะลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะ ถูกชะละลายออกมามากเนื่องจากเป็นสารหลัก ได้เป็นหน่วยพริสมิตสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si และ Al ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการ จัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล (Jimenez, et al., 2004) สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ แสดงไว้ดังสมการที่ 1 และ 2 (Hench, 1998)



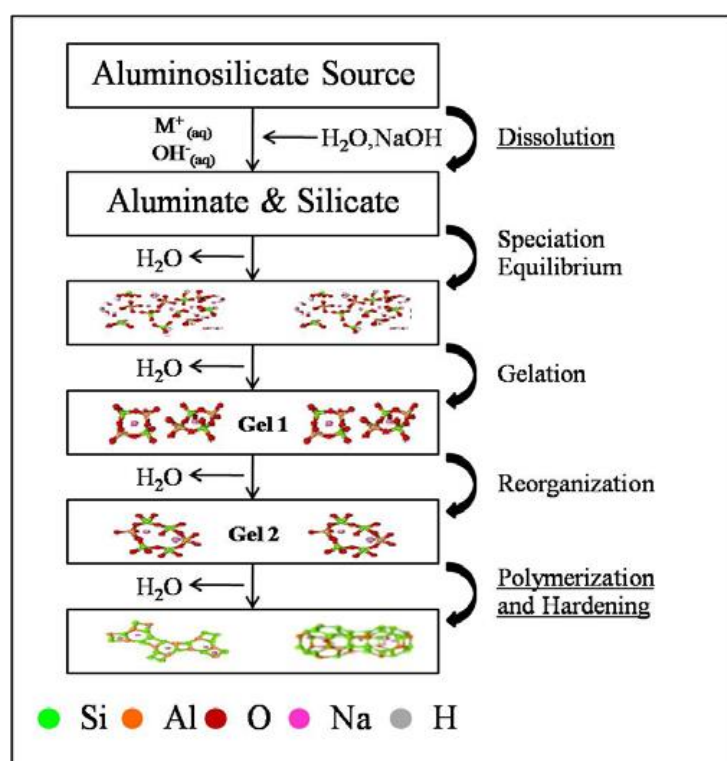
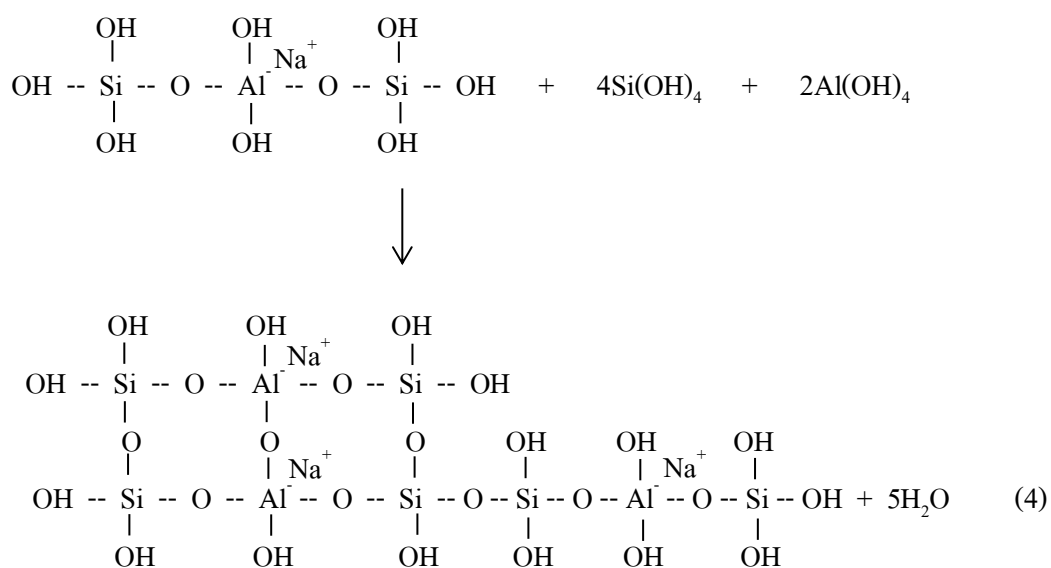


2) การทำปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ (Condensation-polymerization)

ในปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้น กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-stable) ที่มีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลัก จึงประกอบไปด้วยหน่วยพีรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สามและสี่หน่วย ได้แก่ พอลิไซอะเลต (Polysialate, PS) พอลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate siloxo, PSS) และพอลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ แสดงไว้ดังสมการที่ 3 (Hench, 1998)



จากนั้นจะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะของพอลิเมอร์ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้ สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้แสดงไว้ดังสมการที่ 4 (Hench, 1998)



รูปที่ 2.3 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

ที่มา : Jimenez, et al., (2004) และ Hench, (1998)

2.3 ปัจจัยในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เกี่ยวข้องกับ 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การผสม และการบ่ม ซึ่งทั้ง 3 ขั้นตอน ประกอบด้วยปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ตลอดจนความสามารถในการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ สามารถสรุปปัจจัยต่างๆ ได้ดังนี้

2.3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบมีความหลากหลายจากที่มาที่แตกต่างกัน หรือกระบวนการที่แตกต่างกันในแต่ละรอบที่นำมาทดสอบ ทำให้อาจมีสิ่งเจือปนที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเนื้อวัสดุ และการกำหนดอัตราส่วนระหว่างซิลิกา และอะลูมินาที่เหมาะสม ซึ่งอาจมีการการกระตุ้นวัสดุในกระบวนการเผา และการบดละเอียด ด้วยพลังงานสูง ทำให้วัสดุตั้งต้นมีความบริสุทธิ์ ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เช่น

1) สารปอซโซลานตั้งต้น

คือวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือมีทั้งซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถจะละลายได้ง่าย โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติในการยึดประสาน (Cementitious Materials) แต่เมื่อกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการแข็งตัว และสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ ตามมาตรฐาน ASTM C 618-9 จำแนกสารปอซโซลานออกเป็น 3 กลุ่ม (ประมาณ โสมละคร, 2550) คือ

- Class N ได้แก่ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural pozzolans) คือวัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพูน (Pumicite)
- Class F ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolans) คือวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล (Shale) หรือหินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก จีเถ้าหิน จีเถ้าแกลบ เป็นต้น
- Class C เป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบ เช่นเดียวกับ Class F แต่มีสมบัติบางประการที่ต่างกัน คือมีสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดการแข็งตัว ได้แก่ เถ้าลอยที่ได้จากการเผากำลังหินลิกไนต์ (Lignite) หรือได้จากเถ้าลอยจากกำลังหินซับบิทูมินัส (Subbituminous) (วารงคณา ใจมั่น, 2548)

2) อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของวัตถุดิบ

วัสดุตั้งต้นที่ประกอบด้วยซิลิกอน และอะลูมิเนียม เป็นองค์ประกอบหลัก มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลทำให้มีรูปแบบการเกิดผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน (Zheng, et al., 2011) เช่นเดียวกับสูตรพื้นฐานของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ($M_n [-(\text{Si} - \text{O}_2)_x - \text{AlO}_2 -]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$) และเกิดการควบแน่น โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ 3 รูปแบบ ซึ่งมีอัตราส่วนซิลิกอน และอะลูมิเนียม เท่ากับ 1, 2 และ 3 เป็นรูปแบบที่ใช้อ้างอิงการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 2008)

2.3.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา

การเกิดปฏิกิริยา โดยการเลือกใช้ชนิดของด่าง และอัตราส่วนของด่างที่เหมาะสม รวมถึงปริมาณน้ำที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์

1) อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์

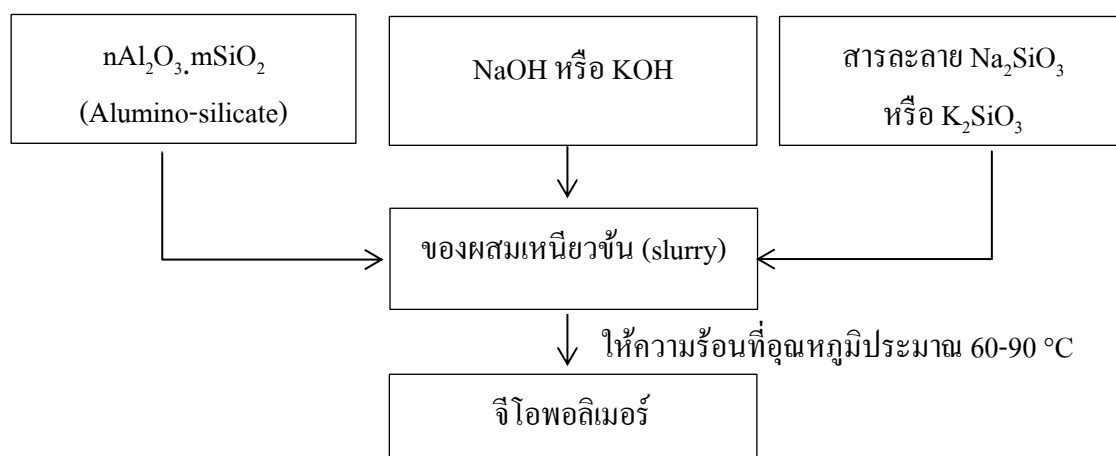
อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxides) เป็นสารกระตุ้นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยจะส่งผลต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของสารหลักในวัตถุดิบ เกิดพันธะของโพลิเมอร์ ซึ่งกระบวนการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกาในสารละลายแอลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ จะเริ่มต้นเมื่อแอลคาไลน์ไฮดรอกไซด์แพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ผิวอนุภาคของซิลิกา ทำให้เกิดการแตกตัว ซึ่งเรียกว่า กระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) ซึ่งอัตราอัตราการเกิดไอออไนเซชันขึ้นอยู่กับระดับความเป็นด่างของอัลคาไลน์ไอออน โดยที่ $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนมีขนาดใหญ่กว่า จึงมีความไวในการแตกตัวได้ดีกว่าโซเดียม และลิเทียมไอออน ในเวลาที่เท่ากัน และกระบวนการชะละลาย (Dissolution) ซึ่งอัตราการชะละลายจะขึ้นอยู่กับระดับของแคตไอออนไฮเดรชัน (Degree of cation hydration) โดยที่ $\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Li}^+$ ดังนั้น การใช้สารอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ จะเพิ่มระดับของการควบแน่นแบบลูกโซ่ (Davidovits, 2008)

อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยามากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพงหาซื้อได้ง่าย และสามารถเลือกใช้ที่ระดับความเข้มข้นช่วงกว้าง (Davidovits, 2008; Provis, et al., 2009) ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2518) คือ

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำลักษณะทั่วไป เป็นของเหลวข้น ไม่มีสี
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาด ชนิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 ซึ่งจะถูกนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการ

2) น้ำ

สารจีโอพอลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง กล่าวคือ การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์จะขึ้นจำเป็นต้องมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยน้ำมีบทบาทในการทำลายโครงสร้างของอนุภาคของแข็ง และไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของการละลายไอออนของ Al^{3+} และ Si^{4+} และในส่วนของสภาวะไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่อุณหภูมิสูง (Zuhau, et al., 2009) โดยน้ำที่ใช้ในการการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เป็นน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากแร่ธาตุ (Demineral Water หรือ Deionization Water) ซึ่งก็คือน้ำที่ผ่านการกำจัดประจุไฟฟ้าหรือไอออนออกไป (ประจุไฟฟ้า = แร่ธาตุที่ละลายอยู่ในน้ำ) ทำให้มีความบริสุทธิ์สูง โดยแผนผังการเกิดวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนผังการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

ที่มา : ปรินญา จินดาประเสริฐ (2549)

2.3.3 ขั้นตอนการบ่ม

การบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะเวลาในการบ่ม และวิธีการกระตุ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยการใช้ความร้อนในการบ่มจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัด จีโอพอลิเมอร์สามารถแข็งตัวได้เมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง แต่กระบวนการของการเกิดจีโอพอลิเมอร์จะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มที่นานขึ้นเพื่อที่จะพัฒนากำลังอัดให้ดีขึ้น จึงมีการใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์ เพื่อลดระยะเวลาในการบ่มให้น้อยลง และสามารถเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้น (นภารัตน์ ไวยเจริญ, 2557)

2.4 เถ้าลอยของถ่านหินบิทูมินัส

1) ความหมายของถ่านหิน

ความหมายของเถ้าลอย (Fly ash) คือผลพลอยได้ (By-product) หรือส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินเพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินจะถูกบดละเอียดก่อนนำไปเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน โดยเถ้าถ่านหินที่บดหรือเป็นผงจากเตาเผาแล้ว จะมีอยู่ 2 ส่วน คือ เถ้าถ่านหินส่วนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงไปยังก้นเตา จึงเรียกว่า เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน จึงเรียกเถ้าส่วนนี้ว่า เถ้าลอย โดยที่เถ้าลอยจะถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบๆ โรงไฟฟ้า โดยตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้แบ่งเถ้าลอยโดยอาศัยองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักในการแบ่ง โดยได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- Class F เถ้าลอย Class F จะมีองค์ประกอบของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ในปริมาณตั้งแต่ ร้อยละ 70 ขึ้นไป และค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของเถ้าลอยจะต้องไม่เกิน ร้อยละ 6 ซึ่งในส่วนของ Class F จะยอมให้มีค่า LOI ได้สูงถึงร้อยละ 12 ได้ ซึ่งต้องมีผลการทดสอบคุณภาพจากห้องทดลองในส่วนของคุณค่า SO_3 กำหนดไว้ให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 5 เถ้าลอย Class F ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) และมักมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ต่ำกว่า ร้อยละ 10

- Class C เถ้าลอย Class C จะมีองค์ประกอบของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ในปริมาณที่ต่ำกว่าร้อยละ 70 แต่ต้องไม่น้อยกว่า ร้อยละ 50 และค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของเถ้าลอยจะต้องไม่เกิน ร้อยละ 6 ซึ่งเถ้าลอยในส่วนของ Class C จะได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือ ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) โดยที่ส่วนใหญ่จะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูงกว่าร้อยละ 10

ประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินที่สำคัญอยู่หลายแห่ง ได้แก่ ที่แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ และแม่ตึบ อำเภอ งาว จังหวัดลำปาง ที่บ้านปูลูและบ้านป่าคา อำเภอถ้ำ จังหวัดลำพูน และที่เหมืองกระบี่ บ้านปูลู จังหวัด กระบี่ โดยเฉพาะที่แม่เมาะมีโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ และเป็นแหล่งเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดใน ประเทศไทย โดยผลิตได้ถึง 3 ล้านตันต่อปี (มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมรา ชูถัมภ์, 2545)

2) การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินนับเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้าที่มีใช้กันอยู่มี 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ (Rilem, 1991; Demir, et al., 2011)

- การเผาความร้อนสูง ในการเผาด้วยความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูง 1500 – 1700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอม ละลาย และรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน เถ้าถ่านหินที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้อนเตา และตกลงในอ่าง น้ำข้างล่าง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบนี้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อยเถ้าถ่านหินที่ได้ จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดใสๆ (Vitreous particle)

- การเผาความร้อนปานกลาง อุณหภูมิของการเผาถ่านหินในการเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วง ระหว่าง 1100 – 1400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอย ที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้อนเตา เถ้าลอยที่ได้ จากการเผาประมาณร้อยละ 70 – 90 มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน

- การเผาความร้อนต่ำ การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำ คือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เถ้าถ่านหินที่ได้ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่ได้ ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเพียงพอ อาจจะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้ (Roszczynialski,

2002; รัฐพล สมนา, 2546) แต่ไม่ดีเท่ากับถ่านล้อยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง การเผาวิธีนี้นิยมใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กของโรงงานต่างๆ

3) ถ่านล้อยของถ่านหินบิทูมินัสจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี

ถ่านหินบิทูมินัสให้ค่าความร้อนสูงแต่ปริมาณกำมะถันต่ำ นิยมนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าทั่วโลก โรงไฟฟ้าบีแอลซีพีใช้ถ่านหินคุณภาพดีประเภทบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิง จากประเทศออสเตรเลีย และอินโดนีเซีย มีค่าความร้อนสูง แต่ปริมาณกำมะถันต่ำ

3.1) ชนิดของถ่านหิน

- แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่สมบูรณ์ที่สุด มีเนื้อแข็ง สีดำ มีความแวววาวแบบกึ่งโลหะ ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด แต่ติดไฟยาก มีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก
- บิทูมินัส (Bituminous) ให้คุณภาพรองจากแอนทราไซต์ มีเนื้อแข็ง สีน้ำตาลถึงดำลักษณะมันวาว มีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ
- ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) เป็นถ่านหินที่มีสีดำคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนน้อยกว่าสองประเภทแรกแต่มีปริมาณความชื้นและออกซิเจนสูงกว่า
- ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหิน มีเนื้อแข็ง สีน้ำตาลเข้มหรือดำไม่ค่อยมีโครงสร้างพีชปรากฏให้เห็น ปริมาณออกซิเจนและความชื้นสูง

นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดแล้ว ยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำที่สุด ให้ค่าความร้อนต่ำที่สุด และมีความชื้นสูงที่สุด จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

3.2) ทำเรือขนถ่ายถ่านหิน

ทำเรือขนถ่ายถ่านหินอยู่ติดกับตัวโรงไฟฟ้า (ไม่ได้ยื่นออกไปในทะเล) และใช้สายพานลำเลียงที่มีแผ่นกำบังลมปิดกั้น และยังมีการติดตั้งอุปกรณ์สเปรย์น้ำที่ Unloader Hopper เพื่อป้องกันฝุ่นฟุ้งกระจาย น้ำจากการสเปรย์จะถูกรวบรวมลงถังพักและสูบกลับเพื่อนำมาบำบัด ไม่มีการปล่อยน้ำลงทะเล นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำทะเลรอบบริเวณท่าเรือขนถ่ายถ่านหินอย่างสม่ำเสมอ

3.3) ลานกองถ่านหิน

ลานกองถ่านหิน ใช้พลาสติกกันซึมคุณภาพดี HDPE (High Density Polyethylene) ปูด้านล่างเพื่อป้องกันน้ำซึมลงสู่ใต้ดิน โดยน้ำจากรอบลานกองถ่านหิน มีรางระบายน้ำเพื่อรวบรวมน้ำจากลานกองถ่านหินไปยังบ่อตกตะกอนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดฝุ่นละอองทุก 3 เดือน และมีกำแพงเปลี่ยนทิศทางลมกันลมปะทะกับลานกองถ่านหินโดยตรง



รูปที่ 2.5 ท่าเรือขนถ่ายถ่านหิน

ที่มา : www.blcp.co.th (2 มิถุนายน 2557)

4) ข้อมูลทั่วไปของโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี

โรงไฟฟ้าบีแอลซีพีมีกำลังการผลิต 1,434 เมกะวัตต์โดยใช้ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพดีประมาณ 3.6 ล้านตันต่อปี และติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิตย์ (ESP) เครื่องดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (FGD) เตาเผาชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Low NOx Burner) ระบบบำบัดน้ำเสีย และอุปกรณ์จัดการด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งมีมูลค่ากว่า 14,000 ล้านบาท หรือร้อยละ 25 ของเงินลงทุนทั้งหมด

กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี

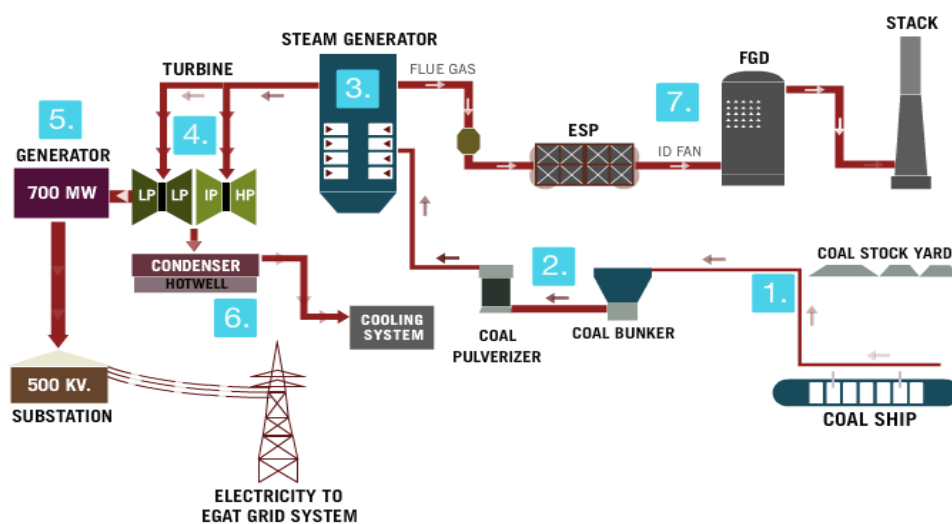
- โรงไฟฟ้าบีแอลซีพี รูปที่ 2.6 ใช้ถ่านหินคุณภาพดีชนิดบิทูมินัส รูปที่ 2.6 จากประเทศออสเตรเลีย และประเทศอินโดนีเซียเป็นเชื้อเพลิง ถ่านหินจะถูกขนส่งทางเรือและขนถ่ายที่ทำเรือของของโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จากนั้นจะถูกลำเลียงไปยังลานกองถ่านหินจำนวน 3 กอง โดยมีปริมาณรวมทั้งสิ้นประมาณ 700,000 เมตริกตัน ซึ่งถ่านหินจำนวนนี้สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 60 วัน ต่อเนื่อง

- จากลานกองถ่านหิน ถ่านหินจะถูกลำเลียงเข้าสู่โรงไฟฟ้าด้วยระบบสายพานลำเลียงไปยัง Coal Bunker และส่งต่อไปยัง Coal Pulverizer เพื่อบดถ่านจนเป็นผงละเอียดก่อนที่จะถูกส่งเข้าไปยังหม้อไอน้ำ (Boiler Furnace) โดยการใช้ลมพาผงถ่านเข้าไป เมื่อถ่านหินเกิดการเผาไหม้ก็จะคายพลังงานความร้อนออกมาและถ่ายเทให้น้ำที่อยู่ภายในท่อรอบๆ ผนังหม้อไอน้ำ น้ำที่ใช้จะต้องเป็นน้ำที่แร่ธาตุ (Demineralized water)
- เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ก็จะมีอุณหภูมิสูงจนเดือดและน้ำบางส่วน จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ อุปกรณ์ที่เรียกว่า Boiler Drum ซึ่งติดตั้งอยู่ส่วนบนของเตาเผาจะทำหน้าที่แยกไอน้ำและน้ำออกจากกัน ส่วนที่เป็นน้ำก็จะกลับไปสู่เตาเผาอีกครั้งหนึ่ง ส่วนที่เป็นไอน้ำจะผ่านไปเข้า Superheat Coil เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันให้เหมาะสมกับการที่จะนำไปใช้ในการขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ต่อไป
- ไอน้ำเมื่อผ่านกังหันจะคายพลังงานเพื่อทำให้ตัวกังหันหมุน แกนของกังหันจะต่อไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)
- เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน สนามแม่เหล็กจะหมุนไปตัดกับขดลวดที่อยู่ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าขึ้น กระแสไฟฟ้าส่วนนี้จะถูกยกระดับแรงดันขึ้นด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า (Generator Transformer) เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าเหมาะสมต่อการส่งกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ต่อไป
- ไอน้ำที่ไปหมุนกังหันแล้วจะมีอุณหภูมิและความดันลดลง จะถูกควบแน่นให้กลายเป็นน้ำภายในเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อส่งกลับไปต้มในหม้อไอน้ำต่อไป
- กระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินจะเกิดเถ้าขึ้นหลังจากการเผาไหม้ภายในหม้อไอน้ำ ส่วนที่มีน้ำหนัมากจะตกลงสู่ด้านล่างของเตาเผาซึ่งเรียกว่าเถ้าหนัก (Bottom Ash) เถ้าส่วนที่มีน้ำหนักน้อยจะลอยขึ้นไปกับอากาศที่ถูกเผาไหม้แล้ว (Flue gas) ส่วนบนของเตาเผาไหม้ ส่วนนี้จะถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator : ESP) และเนื่องจากในถ่านหินจะมีกำมะถันปนอยู่ด้วย เมื่อเกิดการเผาไหม้ กำมะถันนี้จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และจะถูกดักจับด้วย เครื่องดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulphurization : FGD) ก่อนที่จะปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศต่อไป การทำงานของโรงไฟฟ้าได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แผนผังโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี

ที่มา : www.blcp.co.th (2 มิถุนายน 2557)



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี

ที่มา : www.blcp.co.th (2 มิถุนายน 2557)

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชาลินี อ่อนแสง (2555) ศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) และชนิดของด่างต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปาโดยใช้ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อัตราส่วน 1.78 ถึง 8 โดยน้ำหนัก และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 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 มีการพัฒนากำลังอัดสูงที่สุด โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 143 กก./ชม.² และก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งที่อายุ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 18.2 กก./ชม.² ส่วนของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 โดยที่ระยะเวลา 60 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 170 กก./ชม.² เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของสารกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปามากกว่า เนื่องจากค่ากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์มีค่ามากกว่าการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทุกอายุการบ่ม

เบียร์ศักดิ์ กลับประสิทธิ์ (2549) ศึกษาการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ในช่วงระหว่าง 44.03-15.91 (หรือ Si/Al มีค่าเท่ากับ 2.09-8.28) จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดที่อัตราส่วน 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) ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำลงในช่วงก่อน 28 วัน และเมื่อมีอายุมากกว่า 28 วันขึ้นไปแล้วตัวอย่างที่ทำการทดสอบเริ่มแสดงให้เห็นถึงรอยร้าวได้อย่างชัดเจนจนไม่สามารถทดสอบค่ากำลังอัดได้ ในส่วนผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ 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 พบว่าอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อค่ากำลังในช่วง 7 วันแรก และสำหรับก้อนจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ มีค่ากำลังอัดสูงกว่าที่ 10 และ 14 โมลาร์ นอกจากนั้นอิทธิพลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ระหว่าง 0.108-0.266 พบว่าค่ากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มของค่ากำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนเพิ่มมากขึ้น

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ (2551) ศึกษาความสามารถในการทำงาน และค่ากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย พบว่ามีความสามารถในการทำงานของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ทำงานได้ดีจะอยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อ

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และให้ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 10-65 เมกะปาสกาล มีค่ากำลังอัดสูง โดยการใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ และค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 0.67-1.00 ภายหลังจากการหล่อตัวอย่างจะต้องทิ้งระยะเวลาก่อนบ่ม 1 ชั่วโมง อุณหภูมิของการบ่มร้อนในตู้อบ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 2 วัน

เกียรติศักดิ์ ศรีสุขเลิศ (2550) ทำการศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบ โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเถ้าแกลบ โดยบดละเอียดจนมีความละเอียดเท่ากับ 18,000, 14,000 และ 12,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 โมลาร์ โดยมีอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1.5 มีระยะเวลาในก่อนบ่ม 1 ชั่วโมง และทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สามารถนำไปใช้งานได้

ปริญญญา จินดาประเสริฐ (2556) ศึกษาอิทธิพลของพลังงานไมโครเวฟต่อกำลังอัดวัสดุจีโอพอลิเมอร์ พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์เมื่อนำมาใช้ร่วมกับการบ่มร้อน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟช่วยให้การชะละลายของซิลิกาและอะลูมินาบนผิวเถ้าลอยในสถานะเบสเกิดมากขึ้น เกิดเจลอะลูมิโนซิลิเกตที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์รับกำลังอัดได้ดี สำหรับสถานะที่เหมาะสมสำหรับบ่มจีโอพอลิเมอร์ขนาด คือ การให้พลังงานไมโครเวฟที่ 90 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนการบ่มร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่ 42.5 เมกะปาสกาล สูงกว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ควบคุมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2551) ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินจากการชะของซิลิกา และอะลูมินา จากเถ้าถ่านหินลิกไนต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างกัน และนำสารละลายที่ระยะเวลาการชะต่างกันไปวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาและอะลูมินา นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ผลแสดงให้เห็นว่าการชะละลายของเถ้าถ่านหินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นปานกลางคือ 10 โมลาร์ และเวลาในการชะละลาย 10 นาที ให้กำลังอัดที่สูง ทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังอัดสูง 65 เมกะปาสกาล ซึ่งเทียบได้กับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตกำลังสูงที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพสต์ได้จากการผสมเถ้าถ่านหิน กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดย

น้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ คือ 10 และ 15 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองได้แสดงว่าปริมาณของสารประกอบซิลิกา และค่ากำลังอัดขึ้นกับอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ และวิธีการผสม

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ (2552) ศึกษาผลของความเข้มข้นต่างของสารละลายต่าง NaOH ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่าง 5, 10 และ 15 โมลาร์ ด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าสารละลาย Si^{4+} ไอออน เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของ NaOH 10 โมลาร์ มากที่สุด และมากกว่าความเข้มข้นที่ 5 โมลาร์ เนื่องจากความเป็นด่างสูงกว่า ส่วนที่ 15 โมลาร์ ลดการละลายของซิลิกา เนื่องจากเกิดการรวมตัวเป็นก้อนแข็งของซิลิกา ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค SEM พบว่าผิวขรุขระของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่ถูกชะละลายไอออนด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ มีผิวขรุขระน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์ ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดถึง 60-70 เมกะปาสคาล สูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำกว่า

สมภพ แต่บัววันสวด และคณะ (2555) ศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้น ด้วยคลื่นไมโครเวฟ จากผลของพลังงานไมโครเวฟต่อสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับกำบ่มจีโอพอลิเมอร์ด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว วัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างสารปอซโซลานกับสารละลายเบส และสารละลายโซเดียมซิลิเกต แล้วบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส โดยใช้พลังงานไมโครเวฟให้ความร้อนเบื้องต้นก่อนการบ่มร้อน พลังงานไมโครเวฟช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดการชะของซิลิกา และอะลูมินาที่ผิวเถ้าลอยได้ผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อการพัฒนาด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยระบบที่ใช้พลังงานไมโครเวฟ 90 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนการบ่มร้อนต่อเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัด 34 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่ามากกว่าระบบที่บ่มร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (31 เมกะปาสคาล) ดังนั้นพลังงานไมโครเวฟสามารถลดระยะเวลา และพลังงานที่ใช้การบ่มร้อนและทำให้ได้จีโอพอลิเมอร์รับแรงอัดสูงขึ้น

วัชรปัญญา พรหมแสน และคณะ (2555) ศึกษาผลของความละเอียดของเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 โมลาร์ เป็น 12 โมลาร์ และ 16 โมลาร์ ทำให้กำลังของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตลดลง เนื่องจากปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีมากเกินไปจะทำให้เกิดการตกตะกอนของอลูมินาซิลิเกต และที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสภาพของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีความหนืดสูงขึ้น ทำให้การเทเข้าแบบ และการทำให้แน่นทำได้ไม่ดี ทำให้กำลังลดลง และเปรียบเทียบกำลังอัดของการบ่ม

ร้อนกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ตัวอย่างที่บ่มร้อนให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เพราะความร้อนจะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ โดยในงานวิจัยนี้ตัวอย่างที่บ่มร้อนให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องประมาณร้อยละ 40

Ridtirud, et al. (2008) ศึกษาผลของวิธีการบ่มที่มีต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา และเถ้าลอย 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวิธีการบ่มประกอบด้วย 1) บ่มด้วยแสงแดด (solar curing) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ในช่วง 28 ถึง 48 องศาเซลเซียส 2) บ่มด้วยเตาอบความดันไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความดัน 1 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 3) บ่มที่อุณหภูมิ 23, 45 และ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบตั้งต้น และวิธีการบ่มชิ้นงาน โดยการสังเคราะห์ก้อนจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูง (680 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งสภาวะการบ่มที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่การใช้อุณหภูมิสูงเกินไปโดยใช้วิธีออโตเคลฟจะมีผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงต่ำ อันเกิดจากการระเหยของน้ำในโครงสร้างจนทำให้ชิ้นงานแตกร้าวเสียหาย ส่วนจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำก็เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ และการบ่มด้วยแสงอาทิตย์ทำให้กำลังอัดสูงถึง 810 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถยืนยันได้ว่าการเกิดจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน ส่งผลให้การสังเคราะห์ก้อนจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยต้องใช้ความร้อนสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่เป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน

Somna, et al. (2011) ศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าลอยบดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 อนุภาคคงค้ำน้อยกว่าร้อยละ 2 ใช้สารละลายต่าง NaOH เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 4.5, 7, 9.5, 12, 14 และ 16.5 โมลาร์ บ่มที่อุณหภูมิห้อง และทดสอบการพัฒนา กำลังอัดที่ 7, 14, 28, 42 และ 60 วัน พบว่าการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่างจาก 4.5 เป็น 9.5 โมลาร์ เกิดปฏิกิริยาได้ดี และพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นสูงสุด 16.5 โมลาร์ กำลังอัดจะลดลงในช่วง 60 วัน ซึ่งในการทำปฏิกิริยาต้องใช้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพียงพอ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่างจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ หากมีความเข้มข้นมากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ตกตะกอนในช่วงอายุต้น ทำให้กำลังอัดลดลง ส่วนการบดเถ้าลอยให้มีขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มพื้นที่ของอนุภาค มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มกำลังอัดของเพสต์โดยเฉพาะช่วง 7-14 วันแรก

Swanepoel, et al. (2002) การศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่มของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผา โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้น ที่ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 6, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของชิ้นงาน จากการศึกษพบว่า สภาพการบ่มที่เหมาะสมคือใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่น (density) ของชิ้นงานลดลง เนื่องมาจากการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างในระหว่างการบ่มร้อน

Rovnanik, et al. (2010) ศึกษาผลกระทบของการบ่มโดยใช้ดินขาวเผาในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พบว่าอุณหภูมิมิผลต่อกำลังอัด และมีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบในทุกอุณหภูมิของการบ่ม ที่อายุทดสอบ 7 และ 28 วัน และพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิอื่นๆ ทั้งที่อายุทดสอบ 7 และ 28 วัน และที่อายุทดสอบที่ 28 วัน พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 1 วัน มีค่ากำลังอัดที่สูงเกิน 60 เมกะปาสกาล

Alonso, et al. (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์พสต์จากเถ้าลอยขณะที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่าง พบว่า ส่วนมากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม (spherical) ขนาดต่างๆ กัน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง อนุภาคของเถ้าลอยได้ถูกกัดกร่อนที่บริเวณผิวของทรงกลมก่อนที่จะขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยาทั้งภายใน และภายนอกอนุภาคทรงกลม จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงถึงส่วนของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสที่เกิดขึ้นใหม่บนอนุภาคของเถ้าลอย นอกจากนั้นก็ยังสังเกตเห็นอนุภาคบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ เถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ระยะเวลาการบ่มและการผสม จากการทดลอง พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมก่อนจีโอพอลิเมอร์ และนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นผืนผืนกิดกันคล้ายกับเนื้อของแก้ว

Nazari, et al. (2011) ได้ทำการศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าแกลบเปลือกไม้ โดยทำการทดสอบ 2 ชุด ชุดที่ 1 ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบแรงอัดที่ 7 และ 28 วัน และชุดที่ 2 บ่มที่อุณหภูมิ 40-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง พบว่าวันที่ 7 และ 28 วัน อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{A}_2\text{IO}_3$ เท่ากับ 2.99 มีค่าแรงอัดสูงที่สุด เท่ากับ 58.9 เมกะปาสกาล ที่อุณหภูมิบ่ม เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และใช้สารละลายด่างเข้มข้นมากที่สุด เท่ากับ 12 โมลาร์

Fletcher, et al. (2005) ศึกษาอัตราส่วนสารอะลูมิเนียมซิลิเกตในวัสดุตั้งต้นแร่เคโอลินต์ ทำปฏิกิริยากับ NaOH ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 และ $\text{H}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 11 ตลอดจนทดสอบ และทดสอบที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 0.5 ถึง 300 พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ไรเซชันกับกำลังรับแรงอัด สามารถแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง สัดส่วนของสาร อะลูมิเนียมซิลิเกตเริ่มต้นมากกว่าหรือเท่ากับ 2.0 จะปรากฏโครงสร้างอสัณฐานและเกิดเป็นหน่วย tetrahedral ของ Al และ Si ซึ่งหากเพิ่มหรือลดอัตราส่วนจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด ดังนั้นสาร อะลูมิเนียมซิลิเกตในวัสดุตั้งต้นจึงอยู่ในช่วง $2.0 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 300$ ทั้งนี้อัตราส่วนซิลิกาและอะลูมิเนียม จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ ซึ่ง $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นปัจจัยที่สำคัญประการแรก ที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและการจับตัวของพันธะเคมีภายในโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์

Davidovits (2005) ศึกษาอัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์ ร่วมกับ อะลูมิเนียมไตรออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่ต่ำกว่า 0.8 และอัตราส่วนของซิลิกอนออกไซด์ต่อ อะลูมิเนียมไตรออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ต่ำกว่า 3.5 จะทำให้อะลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ คงเหลือมาก เกินไป ทำให้กระบวนการควบแน่นจะไม่เกิดขึ้น ผลของปฏิกิริยาจะปรากฏให้เห็นเป็นสะเก็ดหรือผง สีขาวในผลิตภัณฑ์ โดยที่อัตราส่วน ($\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ประมาณ 1 และ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ประมาณ 4 เป็น อัตราส่วนที่สูงเพียงพอสำหรับการเหนียวทำให้เกิดสถานะต่าง ที่ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายซิลิเกต ภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์ และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

Djwantoro, et al. (2014) ได้ทำการศึกษาดัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ ใช้ถั่วลันเตาเป็นสารตั้งต้น โดยกำหนดให้อัตราส่วนสารละลายต่อถั่วลันเตา 0.35 ใช้มวลรวมหยาบและ มวลรวมละเอียดคิดเป็นร้อยละ 77 โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ผลการ ทดสอบ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการบ่มอยู่ในช่วงระหว่าง 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจะ เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเริ่มต้นของการบ่ม จนกระทั่งหลังจากเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง กำลังอัดจะยังคง เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในอัตราค่อนข้างคงที่

Hajimohammadi, et al. (2009) ศึกษาผลของซิลิกาต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน พบว่า อัตราส่วนของซิลิกาจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เจล และกลไกการเกิดปฏิกิริยา ซึ่ง การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความละเอียดของอนุภาคของซิลิกา เช่น ซิลิกาฟุ้ง หรือ geothermal silica และ solid sodium aluminate โดยการเริ่มต้นที่ปริมาณซิลิกาสูงจะนำไปสู่การ เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต และก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่มีผลต่อ

โครงสร้างจุลภาคและกำลังอัด โดยใช้ slow silica ที่มีปริมาณ SiO_2 ร้อยละ 96 และผสมกับ โซเดียมอะลูมิเนต มีปริมาณ Al_2O_3 ร้อยละ 55 พบว่าการใช้สารละลายซิลิเกตเป็นแหล่งซิลิกา สามารถละลายนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที อนุภาคมีการกระจายตัว และเกิดเฟสในรูปแบบใหม่ และการเติม อะลูมิเนียมในรูปของ solid sodium aluminate ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว แต่เกิดเจลใน ลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนผลของ XRD พบผลึกควอร์ตของ SiO_2 ซึ่งเป็นผลึกใน geothermal silica พบเฟสของโซเดียมซิลิเกต หลังการเกิดปฏิกิริยา 4 วัน พบเฟสซีโอไลต์ เนื่องจากถูกกระตุ้น ปฏิกิริยด้วยการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

Wang, et al. (2000) ศึกษาสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา โดยใช้สารละลายโซเดียม ซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 4 - 12 โมลาร์) เป็นตัวกระตุ้น บ่มที่ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมงขึ้นงานหลังจากการบ่มร้อน พบว่า เมื่อความเข้มข้น ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงต่อการคด, ความแข็งแรงต่อ การกดอัด และความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD, IR บ่งชี้ว่าวัสดุ จีโอพอลิเมอร์จะอยู่ในรูปอสัณฐาน กึ่งผลึก และมีบางส่วนของดินขาวเผาที่ไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฟส ออสัณฐานของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลมา จากการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการชะละลายอนุภาคของดินขาวเผา และกระตุ้นให้เกิดการ ควบแน่นแบบเร่ง (accelerated condensation) ของโมโนเมอร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

Alexandre, et al. (2011) ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ อุณหภูมิ และอายุการบ่ม ของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่า ผลจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นของ NaOH ทำให้เถ้าลอยถูก ชะละลายได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดอะลูมิโนซิลิเกตเจลจำนวนมาก ความต้องการน้ำจึงลดลง โดย อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดจาก 1-180 วัน มีค่าน้อยมาก เนื่องจากความเข้มข้นของ NaOH ต่ำ จึงทำให้การชะละลายเถ้าลอย และเกิดปริมาณอะลูมิโนซิลิเกต เจลที่ไม่เพียงพอ แต่เมื่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เพิ่มขึ้น การชะละลายสารอะลูมิโนซิลิเกตเจล เกิดขึ้นได้มาก โดยที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.4 ทำให้โครงสร้างควบแน่นได้สูงจึงส่งผลต่อค่า กำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ให้มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด

Bakharev (2005) ศึกษาการใช้ตัวกระตุ้นที่ต่างกัน 3 กลุ่มคือ 1) สารละลายโซเดียมซิลิเกตและ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2) สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ 3) สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าถ่านหินชนิดเอฟ (Class F) โดยการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็น เวลา 5 เดือน จากผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้น และกำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ซึ่งเป็นเพราะการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้เกิดโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (cross-linked alumino silicate polymer) ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแน่นตัวจึงไม่ละลายในเกลือต่างๆ ดังนั้นความคงทนของจีโอพอลิเมอร์ต่อสภาพที่เป็นเกลือขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการแข็งตัว นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันมีค่าน้อยกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

Mustafa, et al. (2011) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของอนุหภูมิในการบ่มของจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เกลือในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ และใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน เพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงขึ้น ซึ่งตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จะถูกเตรียมโดยใช้อนุหภูมิบ่มที่แตกต่างกัน คือที่อนุหภูมิห้อง 50, 60, 70, 80 องศาเซลเซียส และใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาทดสอบวันที่ 7 พบว่า ที่อนุหภูมิบ่ม 60 องศาเซลเซียส มีแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 67.04 เมกะปาสคาล กำลังอัดต่ำสุดที่อนุหภูมิห้อง เท่ากับ 22.9 เมกะปาสคาล และอนุหภูมิบ่มที่มากกว่า 60 องศาเซลเซียส จะมีแรงอัดลดลง และการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร โดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วง Infrared (IR) จากเครื่อง FTIR พบว่า สเปกตรัมของ FTIR ของ Si สูง ของการบ่มที่อนุหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีส่วนช่วยให้กำลังอัดสูงขึ้น

Syuan, et al. (2013) ทำการศึกษาองค์ประกอบ และปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อลักษณะเชิงกลของการเกิดจีโอพอลิเมอร์โดยใช้วิธีการทางสถิติ โดยผลการทดลอง พบว่า เกิดพีค ของ Si-O-Si (Al), Si-OH และ AlO_2 เท่ากับ 980, 862, และ 680 ต่อเซนติเมตร (cm^{-1}) ตามลำดับ โดยโครงสร้างของซิลิกาไอออนถูกพบในรูปของ $Q^4(3Al)$ และ $Al(4)$ ดังนั้น การสร้างพันธะระหว่าง Silica Tetrahedron กับ Alumina tetrahedron จะขึ้นอยู่กับ OH^- และ SiO_2

Huajun, et al. (2013) ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อมีการผสมกับดินขาวเผา และสารละลายโซเดียมซิลิกาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เวลา 28 วัน จากผลการทดลอง พบว่า ที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังอัด 1.3 เมกะปาสคาล และเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ที่เวลา 28 วัน ภายใต้อนุหภูมิเดียวกันคือ 20 องศาเซลเซียส โดยหากเพิ่มอนุหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง 31% และ 37% ตามลำดับ ซึ่งหลังจากนำไปวิเคราะห์ XRD, FTIR และ SEM พบว่าค่ากำลังอัดที่ลดลง

เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของรูปพรุนในโครงสร้าง หลังจากการสูญเสีย น้ำ และการสร้างพันธะของ จีโอพอลิเมอร์มีมากจนเกินไป

Sagoe, et al. (2002) ศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ในระบบที่มีซิลิกาสูง ใช้เกลือผสมกับ สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อัลคาไลน์ซิลิเกตและน้ำ และเพิ่มซิลิกาฟูลลงในส่วนผสมเพื่อให้ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงที่ต้องการคือ 15 - 56 และมีอัตราส่วนระหว่าง โซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ในช่วง 1.5 - 6.5 พบว่า อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีอิทธิพลอย่างมาก ต่อโครงสร้างและสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยที่อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าต่ำ ระบบจะมี หน่วยของ $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$ มากกว่า $\text{Si}(\text{OH})_4$ ปริมาณโซลันอลจึงไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้ กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำด้วย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และกำลังรับแรงอัด พบว่า กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่อ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณอัลคาไลน์ทำให้ความเป็นด่าง (alkalinity) ของระบบสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการควบแน่นระหว่างหน่วยของอะลูมินेट และซิลิเกตของ มอนอเมอร์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่ากำลังอัดเช่นเดียวกัน

Bing, et al. (2014) ศึกษาอุณหภูมิบ่มและปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาว เเผ พบว่า ผลกระทบของอุณหภูมิบ่มแตกต่างกัน (ในช่วง 20 ถึง 100 องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิบ่ม สูงขึ้นเร่งการสลายตัวของอนุภาคดินขาวเเผ และเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันในช่วง เริ่มต้น อุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 97.95 เมกกะปาสกาล ในขณะที่การบ่มที่อุณหภูมิสูงเกินไป 80 และ 100 องศาเซลเซียส ส่งผลกระทบต่อ สมบัติทางกายภาพที่ก่อตัวอย่างรวดเร็วเกินไปของ slurries จีโอพอลิเมอร์ และยับยั้งการเปลี่ยนแปลง ในโครงสร้างของก้อนจีโอพอลิเมอร์

Zuhau, et al. (2009) ศึกษาบทบาทของน้ำในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเเผ พบว่าความ เข้มข้นของ NaOH และน้ำ ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ โดยน้ำมีความสำคัญในการพา สารละลายต่างเข้าไปชะละลาย Al^{3+} และ Si^{4+} ที่มีอยู่ในวัสดุ ให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้อย่าง สมบูรณ์ และจากผลกระทบของการบ่มที่แตกต่างกัน คือการบ่มด้วยความร้อนในไอน้ำ และบ่มใน ตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งความร้อนสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี ในช่วงต้น (24 ชั่วโมง) ในขณะที่การบ่มแบบธรรมดา ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงอัด สามารถพัฒนาได้ดีหลังระยะเวลา 7 วัน ซึ่งใช้เวลานานกว่า และมีความชื้นมากกว่าการบ่มด้วยความร้อน ซึ่งทำให้มีปริมาณน้ำที่เพิ่ม ส่งผลต่อปฏิกิริยา Polycondensation จะถูกขัดขวาง ทำให้การ พัฒนากำลังอัดน้อยกว่าการบ่มความร้อน

Gorhan, et al. (2013) ศึกษาการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย Class F จากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนในตุรกี การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการ geopolymerization ใช้ความเข้มข้นของ NaOH (3, 6 และ 9 โมลาร์) อุณหภูมิ (65 และ 85 องศาเซลเซียส) และเวลาการบ่มที่แตกต่างกัน และใช้สารละลายต่างร่วมกับโซเดียมซิลิเกต ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิ และเวลาบ่มมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของก้อนจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งกำลังอัดขึ้นอยู่กับระยะเวลาบ่ม และการเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH โดยการบ่มด้วยร้อน และความเข้มข้นที่ได้ผลดีที่สุดคือ การบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และ ความเข้มข้นของ NaOH 6 M ตามลำดับ

Zhu, et al. (2013) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสของจีโอพอลิเมอร์ เมื่อมีการผสมกับดินขาวเผาและสารละลายโซเดียมซิลิกาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ มีอายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดลองพบว่ามีความกำลังอัดที่เวลา 7 วัน เท่ากับ 1.3 เมกกะปาสกาล และเพิ่มกำลังอัดขึ้นเป็น 1.5 เมกกะปาสกาล ที่เวลา 28 วัน ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันคือ 20 องศาเซลเซียส โดยหากเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงร้อยละ 31 และ 37 ตามลำดับ ซึ่งหลังจากนำไปวิเคราะห์ XRD, FTIR และ SEM พบว่าค่ากำลังอัดที่ลดลงเนื่องมาจาก การเพิ่มขึ้นของรูพรุนหลังจากการสูญเสีย น้ำและการสร้างพันธะของจีโอพอลิเมอร์มีมากจนเกินไป

Hardjito, et al. (2008) ศึกษาความแข็งแรง และเวลาก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต มีขนาดก้อนจีโอพอลิเมอร์ 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร บ่มที่อุณหภูมิ 65, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของด่างทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิมีบทบาทที่สำคัญต่อกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน บ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ที่อายุ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 16.1 เมกกะปาสกาล และพบว่า การบ่มที่อุณหภูมิสูงทำให้ระยะเวลาก่อตัวมีค่าลดลง