

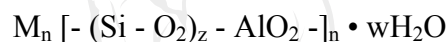
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์

2.1.1 ความหมายและโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์

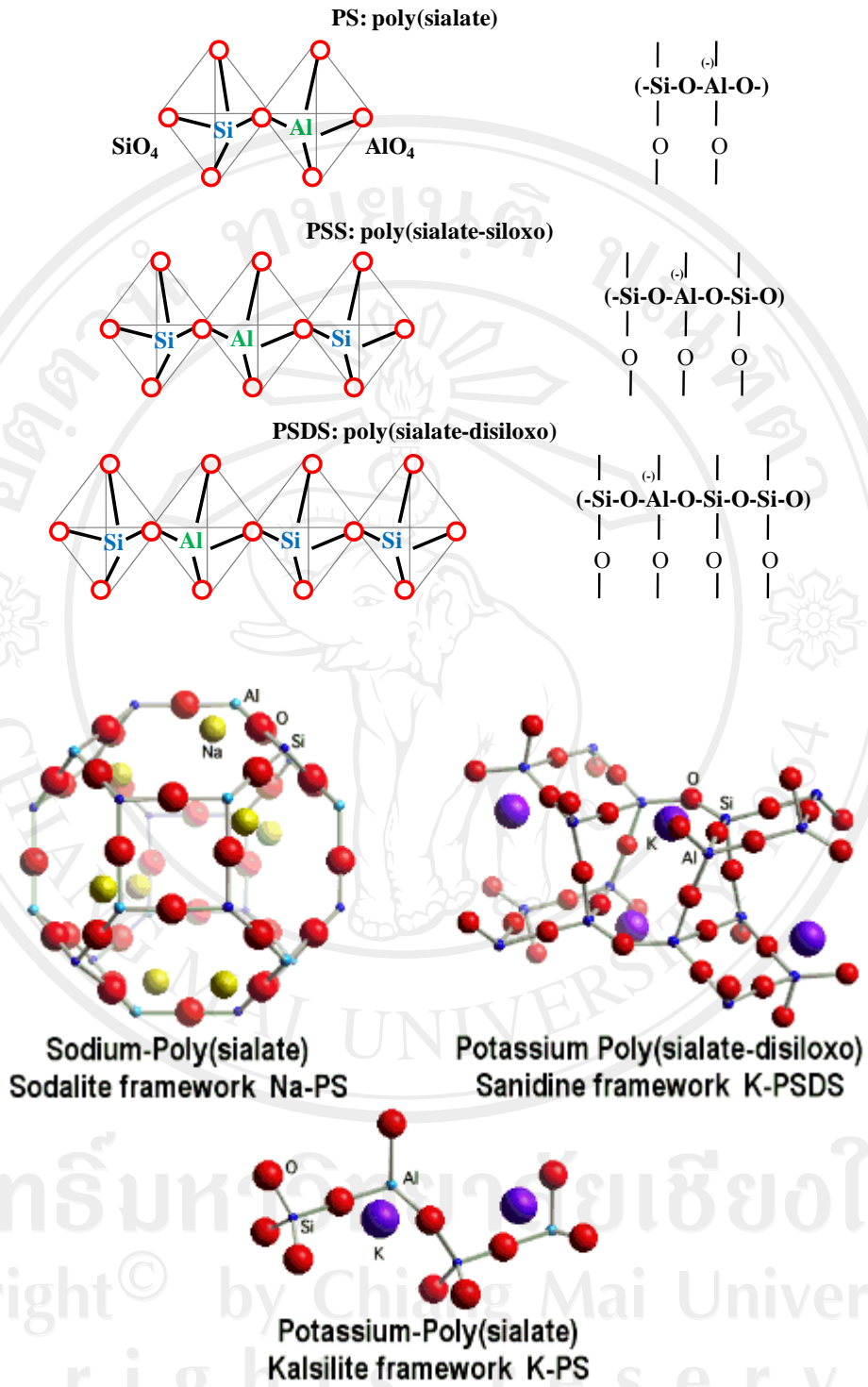
จีโอพอลิเมอร์ (geopolymers) หรือเรียกอีกอย่างว่า พอลิไซอะเลต (polysialate) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้จีโอพอลิเมอร์สามารถเกิดการก่อตัวแข็งแรงและให้กำลังอัดได้ โครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์แสดงได้ดังสมการ



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

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสานในลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ของ [AlO₄]⁵⁻ และ [SiO₄]⁴⁻ โดยมีโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na⁺) หรือโพแทสเซียม (K⁺) ในการทำให้ประจุสมมูล ณ ตำแหน่งของ [AlO₄]⁵⁻ ดังแสดงในรูปที่

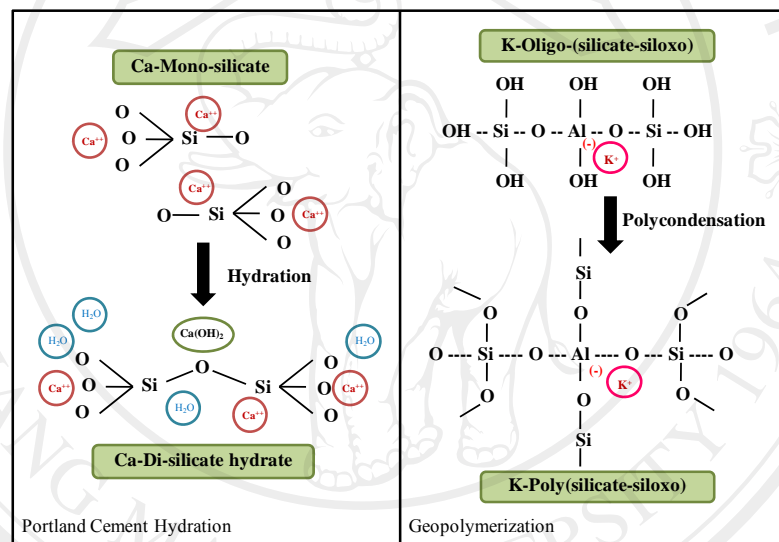
2.1 การสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้การใช้พลังงานลดลงไปมากและต้นทุนในการผลิตต่ำลง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือพอลิไซโอเซด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานของสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และแคลเซียมออกไซด์ แต่การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) ซึ่งใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น โมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [6]



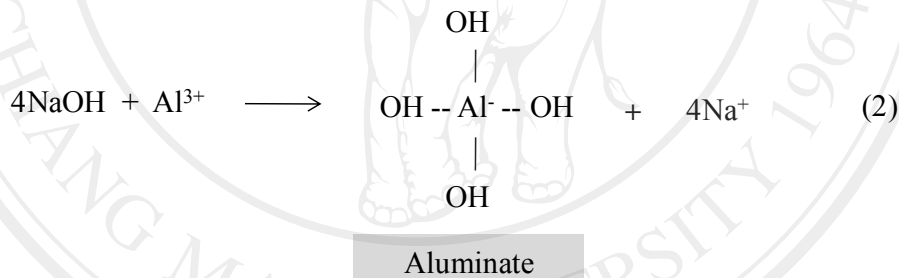
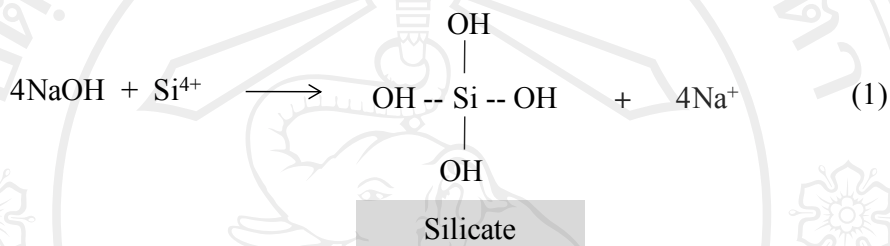
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันของจีโอพอลิเมอร์

2.1.2 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

สารจีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีส่วนประกอบเป็นสารลักษณะอสัณฐาน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอะลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน [7] คือ

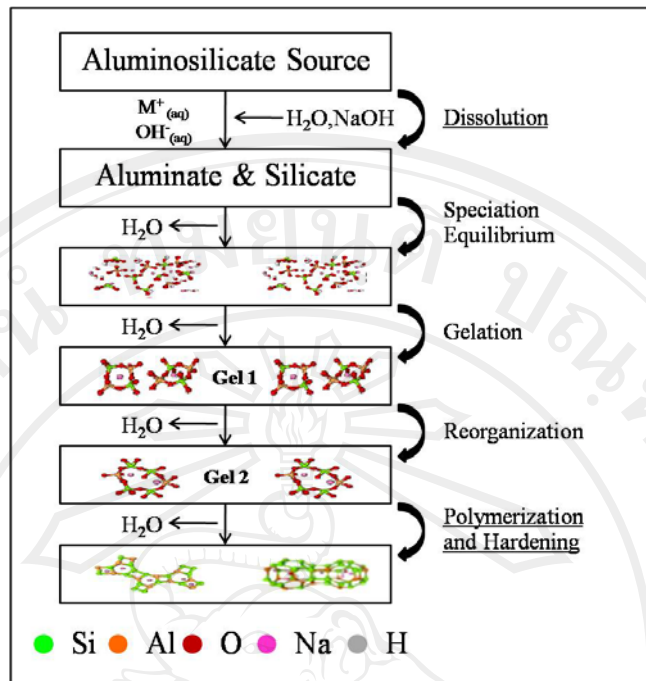
1. การชะละลาย (dissolution)

เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆออกมา โดยอะลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมาเนื่องจากเป็นสารหลัก ได้เป็นหน่วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si และ Al ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่เหลี่ยมกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล [7] สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้แสดงไว้ดังสมการที่ 1 และ 2 [8]



2. การทำปฏิกิริยาควบแน่นและลู่โซ่ (condensation-polymerization)

ในปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้น กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ที่มีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สามและสี่หน่วย ได้แก่ พอลิไซอะเลต (polysialate, PS) พอลิไซอะเลตไซลอกโซ (polysialate siloxo, PSS) และพอลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้แสดงไว้ดังสมการที่ 3 [8]



รูปที่ 2.3 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

2.1.3 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วย

1. สารพอสโซลานตั้งต้น

คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถละลายได้ง่าย วัสดุพอสโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่งได้แก่ พอสโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) และพอสโซลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) พอสโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิตได้แก่เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันได้มีการนำเอาพอสโซลานชนิดนี้ไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนพอสโซลานที่มาจากธรรมชาติได้แก่ ดินไดอะตอมมัลปาง (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อน เช่น การเผา การทำให้แห้ง เป็นต้น [10]

2. อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์

อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้กันได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็น

ค้างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากราคาไม่แพง หาได้ง่าย และให้อิโพลิเมอร์คุณภาพดี โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด [11] คือ

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวข้น ไม่มีสี

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาดชนิดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 ซึ่งจะถูกนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการ

3. สารประกอบซิลิเกต

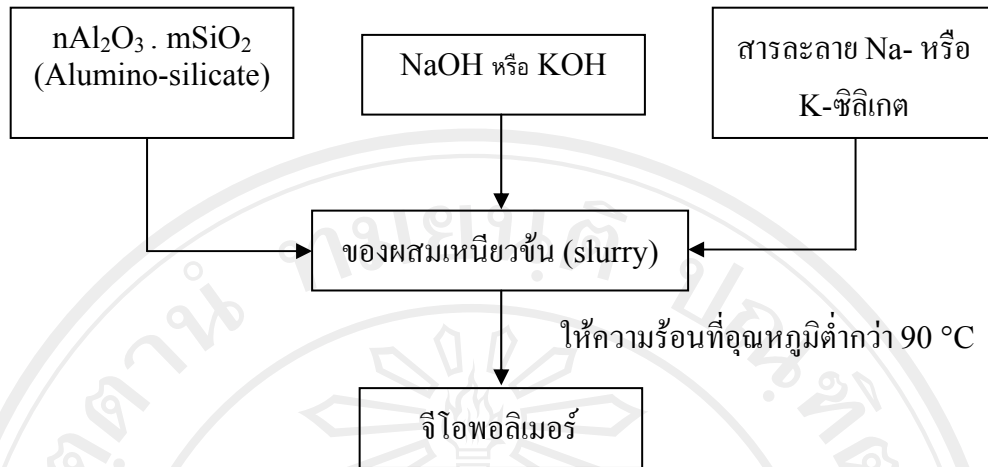
สารประกอบซิลิเกตที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งเป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นค่า ลักษณะทั่วไปไม่มีสี หรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม แบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามากออกเป็น 3 ชนิด ดังตารางที่ 2.1 [12] โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1:2.41

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:1.97 ถึง 1: 2.17	1:2.34 ถึง 1: 2.58	1:3.18 ถึง 1: 3.59
เหล็ก ร้อยละไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

4. น้ำ

สารอิโพลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อทำให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำกลั่น โดยแผนผังการผลิตอิโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

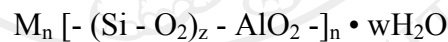


รูปที่ 2.4 แผนภูมิการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ [13]

2.1.4 คุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1. ด้านการศึกษา

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี วัสดุชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลีไซอะเลต (polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] จากสูตร



ถ้า z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไซโลโซ (PSS)

ถ้า z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซโลโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ ตัวอย่างการใช้งานของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

อัตราส่วนของ Si : Al = 2 : 1 เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วนของ Si : Al = 3 : 1 เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาส

และวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียมที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200-1,000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของ Si : Al = 20 : 1 ถึง 35 : 1 ได้สารที่มีโครงสร้างของพอลิเมอร์เชื่อมขวางกันมากขึ้นทำให้สามารถนำไปใช้เป็นไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (high performance fiber composites)

2. ด้านอุตสาหกรรม

วัสดุอีโพอลิมเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิการบ่มที่ต่ำ โดยการผสมวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักกับสารละลายอัลคาไลน์ จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ จะได้วัสดุอีโพอลิมเมอร์ที่มีความแข็งแรงเทียบเท่ากับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ วัสดุอีโพอลิมเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่ง และงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้คุณสมบัติที่ดี เช่น ประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง สามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส มีความต้านทานเป็นเลิศ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุอีโพอลิมเมอร์สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้นเซรามิกและซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

3. ด้านเศรษฐศาสตร์และสังคม

การใช้วัสดุอีโพอลิมเมอร์ในงานก่อสร้างต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อมและทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกสูงมาก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน แต่สำหรับวัสดุอีโพอลิมเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์จัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ต้องใช้ความร้อนสูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ

2.2 ดินไดอะตอมล้าปาง

ดินไดอะตอมเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่ง มีลักษณะเด่นคือมีน้ำหนักรวมเบาและเปราะกว่าหินทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด หินชนิดนี้เกิดจากการทับถมกันของเปลือกสาหร่ายเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก (50-100 ไมครอน) ที่เรียกว่า “ไดอะตอม (diatom)” จำนวนมหาศาล โดยมีตะกอนพัดพาขนาดละเอียดซึ่งมักเป็นแร่ควอตซ์หรือแร่ดินบางชนิด ตกตะกอนปะปนด้วยในปริมาณเล็กน้อย เปลือกของไดอะตอมมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาเนื้อโอปอ (opaline silica) มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปมากมาย และมีลักษณะที่สำคัญคือมีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมดินไดอะตอมจึงมีความ

หนาแน่นของมวลรวมน้อยจนบางครั้งสามารถลอยน้ำได้ สีของหินมักเป็นสีโทนอ่อนๆ เช่น สีครีม ขาวอมเหลือง หรือขาวอมชมพู เป็นต้น

ไดอะทอมมีสายพันธุ์หลากหลาย มีทั้งที่อาศัยในน้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำจืด ในทะเลสาบ บนพื้นทวีป สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและแพร่พันธุ์ของไดอะทอมคือบริเวณที่มีอากาศอบอุ่น น้ำใส นิ่ง หรือน้ำที่ไหลเข้ามาในแอ่งสะสมตัวมีตะกอนพัดพาจำนวนน้อย และที่สำคัญที่สุดคือจะต้องมีการเติมซิลิกา (SiO_2) เข้ามาอย่างต่อเนื่อง ในปริมาณมากพอต่อการนำไปสังเคราะห์เป็นเปลือก ดังนั้นจึงมักพบแหล่งดินไดอะทอมในพื้นที่ภูเขาไฟซึ่งเป็นแหล่งที่ให้ซิลิกาทั้งในรูปของตะกอนที่เกิดจากการผุพังของหินและขี้เถ้าภูเขาไฟ เมื่อซิลิกาในแอ่งถูกใช้หมดไป การแพร่พันธุ์ของไดอะทอมก็จะหยุดชะงักจนกว่าจะมีการเพิ่มซิลิกาเข้ามาใหม่ในธรรมชาติ จึงมักพบชั้นดินไดอะทอมเป็นช่วงชั้นบางๆ สลับกับหินดินดาน หินโคลน ที่เกิดร่วมในแอ่งสะสมตัว

คำว่า “ดินไดอะทอม” อาจทำให้เกิดความสับสนอยู่บ้างระหว่างการเป็น “หิน” “ดิน” หรือ “แร่” ในประการแรกดินไดอะทอมมิใช่เป็นสารอนินทรีย์ แต่เป็นเสมือนสุสานของซากสาหร่ายเซลล์เดียว ไม่มีรูปผลึกที่แน่นอน และไม่สามารถเขียนองค์ประกอบเป็นสูตรเคมีได้ ดังนั้นจึงไม่จัดเป็นแร่ตามความหมายทางธรณีวิทยา อีกทั้งยังไม่จัดเป็นดินเพราะมีแร่ดินเป็นส่วนประกอบในปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเปลือกไดอะทอม เมื่อพิจารณากระบวนการเกิดดังได้กล่าวมาเห็นได้ชัดว่าดินไดอะทอมเป็น “หินตะกอน” ที่เกิดโดยกระบวนการคล้ายคลึงกับหินตะกอนชนิดอื่นๆ ที่เกิดร่วม อย่างไรก็ตามมุมมองของการใช้ประโยชน์ ดินไดอะทอมถือเป็นแร่อุตสาหกรรมชนิดหนึ่งได้ เนื่องจากความหมายของ “แร่อุตสาหกรรม” ที่ว่า “แร่หรือหินที่เกิดตามธรรมชาติและมีมูลค่าในเชิงพาณิชย์” [14]

2.2.1 แหล่งของดินไดอะทอม

แหล่งแร่ที่สำคัญมีทั้งชนิดที่เกิดขึ้นในน้ำทะเลและน้ำจืด ซึ่งที่พบในจังหวัดลำปาง จัดเป็นไดอะทอมชนิดที่อาศัยอยู่ในน้ำจืดมีทั้งหมด 5 แหล่ง คือ

1. บ้านม่อนหินแก้ว ตำบลวังพร้าว อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง
2. วัดม่อนศรีวัน ตำบลพิชัย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง
3. บ้านห้วยน้ำเค็ม ตำบลข้างแสง อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง
4. บ้านหนองถ้อย ตำบลนาคร้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง
5. ตำบลกล้วยแพะ อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

สมบัติทางกายภาพของดินไคอะตอมอาจจะแตกต่างกันบ้างตามแหล่งที่พบ นอกจากนี้ในแหล่งเดียวกันก็ยังสามารถแตกต่างกันไปตามความลึกของแหล่งที่พบ ดังนั้นการจำแนกดินไคอะตอมอาจพิจารณาจาก

1. ชนิดและปริมาณของสิ่งที่เป็น
2. รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของไคอะตอมที่มาทับถมกัน

2.2.2 การประยุกต์ใช้ดินไคอะตอม

การที่เปลือกสสารไคอะตอมมีรูปร่างแตกต่างกัน เมื่อเกิดการตกตะกอนทับถมจะมีการจัดเรียงตัวภายในเนื้อหินที่ไม่เป็นระเบียบ ดินไคอะตอมจึงมีความพรุนตัวและมีพื้นที่ผิวสูงมาก อีกทั้งยังมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นซิลิกาถึงฟลิก คุณสมบัติพิเศษเหล่านี้ทำให้สามารถนำเอาดินไคอะตอมไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้หลายประเภท เช่น

1. ใช้เป็นตัวช่วยกรอง (Filter Aid) อนุภาคขนาดเล็กๆ ที่แขวนลอยในของเหลวหลายชนิด เช่น น้ำมันพืช น้ำผลไม้ เบียร์ และไวน์
2. ใช้เป็นตัวเติม (Filter) หรือตัวเพิ่มเนื้อ (Extender) ในสียางและพลาสติกได้เป็นอย่างดี
3. ใช้ผสมในการทำสี เนื่องจากคุณสมบัติที่เกิดจากความขรุขระของเปลือกไคอะตอมซึ่งทำให้สามารถกระจายแสงที่ตกกระทบได้ดีทุกทิศทาง ช่วยเพิ่มความสว่างของสี
4. ใช้ทำฉนวนความร้อนและอุปกรณ์ป้องกันเสียง เช่น ทำแผ่นฝ้าเพดานห้องบันทึกเสียงหรือห้องประชุม ทั้งนี้เนื่องจากรูพรุนของเปลือกไคอะตอมมีอากาศที่ไม่เคลื่อนไหว ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนและไม่เป็นตัวนำเสียงที่ดีแทรกอยู่จำนวนมาก อีกลักษณะหนึ่งคือการใช้เป็นส่วนผสมทำอิฐโมเลอร์ (Moler) ที่ช่วยป้องกันความร้อนเช่นที่ใช้ในประเทศเดนมาร์ก

การพิจารณาคุณภาพของดินไคอะตอมมักอาศัยองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งได้แก่ ปริมาณซิลิกา อะลูมินา (ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณแร่ดินที่ปะปนอยู่) และเหล็กออกไซด์ ประกอบกับข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติม เช่น ความหนาแน่นของมวลรวม (Bulk Density) สี หรือความชื้น สำหรับข้อกำหนดในการใช้ประโยชน์ที่สูงสุดมักจะเป็นดินไคอะตอมที่จะนำไปใช้เป็นตัวช่วยกรองซึ่งเป็นชนิดที่มีราคาสูง

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 บทบาทของวัตถุดิบ

การเลือกวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ประสิทธิภาพของวัตถุดิบ, ราคา และลักษณะการใช้งานของผู้บริโภค เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1972, Davitdovits ได้เป็นผู้ริเริ่มการใช้ดินขาวและดินขาวเผา (calcined kaolinite; metakaolin) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ต่อมามีนักวิจัยจำนวนมากได้มุ่งความสนใจไปที่การผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น โดยทำการศึกษาแร่ธาตุในกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกต ทั้งจากธรรมชาติและจากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์

Xu และ Van Deventer [15] ได้ทำการศึกษาสมบัติของแร่ดิน 15 ชนิดที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ แร่อะลูมิเนียมซิลิเกตทั้ง 15 ชนิด จะถูกวิเคราะห์ความสามารถในการละลายได้ในสารละลายอัลคาไลน์ พบว่าแร่ส่วนใหญ่มีปริมาณการละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวกลาง ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายได้ของแร่พบว่า แร่ที่มีโครงสร้างเป็นโครงข่ายสามมิติ (framework silicate) จะสามารถละลายในสารละลายอัลคาไลน์ได้มากกว่าแร่ที่มีโครงสร้างแบบลูกโซ่ (chain structure), โครงสร้างแบบแผ่น (sheet structure) และโครงสร้างแบบวงแหวน (ring structure) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า แร่ที่มีปริมาณการชะละลายสูงเมื่อเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ในชั้นจะให้กำลังรับแรงอัดสูงด้วย และเมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์พบว่า แร่สติลไบท์ (stilbite) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโครงข่ายสามมิติ ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด (18 เมกะปาสกาล)

Palomo และคณะ [16] ได้เสนอว่าวัสดุที่ถูกเผา (calcined) มาก่อนเช่น แก้วลอย, ผงตะกอนและดินขาวเผาส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่ผ่านการเผา (non-calcined materials) ซึ่งอาจเป็นเพราะการกระตุ้นวัสดุด้วยความร้อนหรือเผา จะทำให้โครงสร้างของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพที่เป็นผลึก (crystalline) เป็นสภาพอสัณฐานซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า

Van Jaarsveld และคณะ [17] ทำการวิจัยผลขององค์ประกอบและอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอยผสมดินขาวเผา จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาการเผาดินขาวมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยได้เสนออุณหภูมิที่เหมาะสมใน

การเผาหินขาวที่ควรอยู่ในช่วง 500 - 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้เถ้าลอยผสมหินขาวเผาในอัตราส่วน 86:14 จะให้จีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ridtirud และ Chindaprasirt [18] ที่กล่าวว่า การเผาหินขาวที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น ทำให้หินขาวเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการเผาหินขาวที่เหมาะสมคือ 3 ชั่วโมง หากใช้เวลานานการเผามากขึ้นจะไม่เกิดประโยชน์ด้านการพัฒนา กำลังมากนัก แต่หากเวลาการเผาต่ำกว่า 3 ชั่วโมง พบว่า เวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินาอยู่ในรูปอสัณฐานทำให้เกิดปฏิกิริยากับต่างได้น้อย ซึ่งส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง

Kong และคณะ [19] ได้ทำวิจัยในหัวข้อ “การเปรียบเทียบจีโอพอลิเมอร์จากหินขาวเผาและเถ้าลอยหลังจากกระตุ้นด้วยความร้อนสูง” โดยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้หินขาวเผาและเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน จีโอพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด (หินขาวเผา, เถ้าลอย) จะถูกสังเคราะห์โดยใช้โซเดียมซิลิเกต และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หลังจากกระตุ้นด้วยความร้อนสูง จีโอพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน, โครงสร้างทางจุลภาค และการกระจายขนาดรูพรุน ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA), Scanning electron microscopy (SEM) และ Mercury intrusion porosimetry (MIP) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นหลังจากให้ความร้อนสูงขึ้น (800 องศาเซลเซียส) ซึ่งค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นบางส่วนอาจเกิดจากการซินเทอริง (sintering) ของอนุภาคเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากหินขาวเผาจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากรอยแตกที่สร้างขึ้นกับชิ้นงานหลังจากการให้ความร้อน และจากการวิเคราะห์การกระจายขนาดรูพรุนพบว่า จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กอยู่มากซึ่งช่วยให้ความชื้นระเหยออกได้ง่ายเมื่อให้ความร้อน ดังนั้นความเสียหายที่เกิดกับชิ้นงานมีน้อยมากเมื่อเทียบกับจีโอพอลิเมอร์จากหินขาวเผา

เถ้าลอย (fly ash) และกากโลหะ (slag) จัดเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดย Van Jaarsveld และคณะ [20] ได้รายงานว่ ปริมาณแคลเซียมของเถ้าลอยเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ โดยปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอยจะมีนัยสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดช่วงปลายของจีโอพอลิเมอร์ กล่าวคือ เถ้าลอยที่มีแคลเซียมมากกว่าจะให้จีโอพอลิเมอร์ที่มีการพัฒนากำลังได้เร็วและสูงกว่า อย่างไรก็ตาม Fernandez-Jimenez [21] เสนอว่า วัสดุจะมีสมบัติในการเชื่อม

ประสานที่ดีได้เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นมีปริมาณแคลเซียมต่ำ, ปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ต่ำกว่า 10%, มีปริมาณซิลิกาที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (reactive silica) 40-50% และมีขนาดอนุภาคที่ต่ำกว่า 45 ไมโครเมตรอยู่ 80 - 90% ดังนั้นจึงมีการใช้เถ้าลอยที่มีแคลเซียมต่ำ (low calcium, ASTM Class F) เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์มากกว่าการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง (high calcium, ASTM Class C)

Alonso และ Palomo [22] ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ของจีโอพอลิเมอร์พสต์จากเถ้าลอยขณะที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่าง พบว่า ส่วนมากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม (spherical) ขนาดต่างๆ กัน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง อนุภาคของเถ้าลอยได้ถูกกัดกร่อนที่บริเวณผิวของทรงกลมก่อนที่จะขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยาทั้งภายในและภายนอกอนุภาคทรงกลม จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงถึงส่วนของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสที่เกิดขึ้นใหม่บนอนุภาคของเถ้าลอย นอกจากนั้นก็ยังสามารถเห็นอนุภาคบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ เถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของค่า, ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย, ระยะเวลาการบ่มและการผสม จากการทดลอง พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอพอลิเมอร์ และนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นผืนผืนกติดกันคล้ายกับเนื้อของแก้ว

Chindaprasirt และคณะ [23] ศึกษาศึกษาภาพการนำเถ้าลอยแม่เมาะมาใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จากการทดลองพบว่า ความละเอียดของเถ้าลอยมีนัยสำคัญอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกันของ ภูวิศและคณะ [24] พบว่าการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (rice husk-busk ash) ที่มีความละเอียดสูงจะให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อีกทั้งยังทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคของเถ้าสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ดี สารประกอบซิลิกอนและอะลูมิเนียมถูกชะละลายออกมาเพื่อทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น จีโอพอลิเมอร์ที่ได้จึงมีความแข็งแรง นอกจากนี้ Chareerat และคณะ [25] ได้เสนอว่า ความละเอียดของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความสามารถในการทำงานได้ (workability) ของจีโอพอลิเมอร์พสต์สูงขึ้น เนื่องจากการใช้เครื่องคัดแยกขนาดด้วยลม (air classifier method) ทำให้ได้เถ้าลอยขนาดละเอียดที่มีพื้นผิวเรียบและเป็นทรงกลมสม่ำเสมอส่งผลให้สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้ดีกว่าเถ้าลอยขนาดหยาบ ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์พสต์จึงมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้น

Cheng and Chiu [26] ได้ใช้ผงตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast furnace slag) เป็นแอกทีฟฟิลเลอร์ (active filler) ในการสังเคราะห์วัสดุอิโพลีเมอร์ที่มีสมบัติทนความร้อน (fire resistance) จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวของอิโพลีเมอร์มีความสัมพันธ์อย่างมากกับอุณหภูมิ โดยระยะเวลาการก่อตัวของอิโพลีเมอร์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาการชะละลายและการควบแน่นเกิดได้เร็วขึ้น

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางกลพบว่า ความหนาแน่นของอิโพลีเมอร์อยู่ในช่วง 1.67 - 1.83 g/cm³ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณดินขาวเผาและโซเดียมซิลิเกตจะทำให้ความหนาแน่นของอิโพลีเมอร์ลดลง พร้อมกับปริมาณรูพรุนและการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น อิโพลีเมอร์จากตะกรันเตาถลุงเหล็กจะให้กำลังรับแรงอัดสูงถึง 60 เมกะปาสคาล เมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นตัวกระตุ้น

การทดสอบคุณสมบัติด้านการทนต่อความร้อนทำได้โดยการให้เปลวไฟที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส แก่อิโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นหนา 10 มิลลิเมตร และทำการวัดอุณหภูมิด้านตรงข้าม ซึ่งพบว่าอิโพลีเมอร์จากตะกรันเตาถลุงเหล็กสามารถทนต่อความร้อนได้ดี เนื่องจากอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าประมาณ 240 - 283 องศาเซลเซียส ดังนั้นอิโพลีเมอร์จากตะกรันเตาถลุงเหล็กจึงมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมทนต่อความร้อน

Chareerat และคณะ [27] ได้ทดลองใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอยในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในการผลิตวัสดุอิโพลีเมอร์ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาเถ้าแกลบที่มีต่อองค์ประกอบทางแร่และกำลังรับแรงอัดของวัสดุอิโพลีเมอร์ ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าแกลบที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน (450, 600, 700 °C) พบว่า ที่อุณหภูมิของการเผาเถ้า (450 °C) เถ้าแกลบมีองค์ประกอบเป็นเฟสอสัณฐานของซิลิกาพร้อมด้วยคริสโตบาไลต์ปริมาณเล็กน้อย ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 600 และ 700 °C โครงสร้างของซิลิกาแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างแบบไม่มีรูปผลึกแน่นอนหรืออสัณฐานมากขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการแตกตัวและสลายตัวของสารอินทรีย์ที่สมบูรณ์มากกว่าเนื่องจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ออกไปมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมของการนำพาสารอินทรีย์ออกไปจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบสำหรับการสังเคราะห์อิโพลีเมอร์ ซึ่งอิโพลีเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ให้กำลังรับแรงอัด 41.0 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าการใช้เถ้าแกลบที่อุณหภูมิอื่น

Damer [28] ได้เสนอว่า การเผาถ่านโค้กที่อุณหภูมิ 600-650 องศาเซลเซียส จะได้ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous) ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา แต่หากเผาที่อุณหภูมิสูงกว่านี้และใช้เวลากการเผานานทำให้ซิลิกากลายเป็นผลึก (crystalline) และเนื่องต่อการทำปฏิกิริยา การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ความชื้นภายในเคลือบจะระเหยออกมา และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เคลือบถูกเผาไหม้บางส่วนและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 300 องศาเซลเซียส เคลือบจะถูกเผาไหม้เปลี่ยนเป็นสีดำและมีน้ำหนักลดลงร้อยละ 60 จากเคลือบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส เคลือบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนและขาวในที่สุดและมีน้ำหนักคงที่เมื่อสารอินทรีย์ระเหยออกไปหมด

ฟองจันทร์ และ Lohaus [29] เสนอว่า คุณสมบัติทางกายภาพและอนุภาคสัณฐานของวัสดุเคลือบที่ใช้ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลและค่าการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญจากการทดลองได้ทำการแทนที่ถ่านโค้กด้วยวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาสูง 3 ชนิด คือ ถ่านโค้กบดละเอียด, ควอตซ์บดละเอียด และซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่แทนที่ถ่านโค้กด้วยควอตซ์บดละเอียด, ถ่านโค้กบดละเอียดและซิลิกาฟูมให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 84.8, 73.5 และ 49.6 เมกะปาสกาล และเมื่อพิจารณา ค่าการไหลแผ่ของแต่ละชุดตัวอย่างพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ่านโค้กที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูม, ควอตซ์บดละเอียดและถ่านโค้กบดละเอียดมีค่าการไหลแผ่ลดลง ตามลำดับ เนื่องจากซิลิกาฟูมมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและมีความละเอียดสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคสัณฐานของควอตซ์บดละเอียดที่มีอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมตัน และถ่านโค้กบดละเอียดที่มีความพรุนตัวสูงและมีรูปร่างไม่แน่นอน จึงทำให้มีค่าการไหลแผ่ต่ำกว่าซิลิกาฟูม

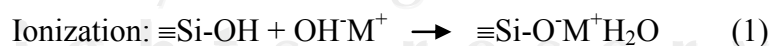
ประมวล และคณะ [30] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้แร่ดินเบาแทนที่ถ่านโค้ก โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิการเผาแร่ดินเบา, ปริมาณการแทนที่ถ่านโค้กด้วยแร่ดินเบา จากการศึกษาพบว่า การเผาแร่ดินเบาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผลิตจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเกิดการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างของแร่มอนท์โมริลโลไนต์ (montmorillonite) ดังนั้นจึงทำให้แร่มอนท์โมริลโลไนต์มีพื้นผิวที่มีประจุลบเพิ่มขึ้นจากการที่พันธะถูกทำลาย ส่งผลให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 700 องศาเซลเซียส จะเกิดการทำลายโครงสร้างของแร่เคโอลินไนต์ (kaolinite) และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่จากแร่เฮมาไทต์ (hematite; Fe_2O_3) เป็นแร่แมกนีไทต์ (magnetite; Fe_3O_4) ซึ่งเป็นเฟสที่มีความว่องไวในการ

เกิดปฏิกิริยาต่ำ ปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยแร่ดินเบาไม่เกินร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังอัดของซีโอฟอลิเมอร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อปริมาณการแทนที่ดินเบาเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของซีโอฟอลิเมอร์ลดลง งานวิจัยของ Yilmaz และ Ediz [31] พบว่า การเผาดินไคอะตอมทำให้คุณสมบัติพอสโซลานิก (pozzolanic properties) ของดินไคอะตอมเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมทั้งแบบเผา (calcined diatomite) และไม่เผา (raw diatomite) พบว่า ดินไคอะตอมที่ถูกเผามีปริมาณซิลิกา (SiO₂), อะลูมินา (Al₂O₃), เหล็ก (Fe₂O₃) และซิลิกาที่ทำปฏิกิริยา (reactive SiO₂) มากกว่าดินที่ไม่เผา นอกจากนี้การเผายังทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของดินไคอะตอมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการรวมตัวกันของอนุภาค (agglomeration) ในระหว่างการให้ความร้อน

2.3.2 บทบาทของโลหะอัลคาไลน์

ในทางทฤษฎี สารอัลคาไลน์จะถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นในปฏิกิริยาซีโอฟอลิเมอร์-เซชัน โดยได้มีการศึกษาอิทธิพลของสารอัลคาไลน์ชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุซีโอฟอลิเมอร์ โดยเฉพาะ โซเดียม (Na⁺) และโพแทสเซียมไอออน (K⁺) การเลือกชนิดไอออนบวกของสารอัลคาไลน์เพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์ซีโอฟอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายข้อ ซึ่งที่มีความสำคัญที่สุดคือ ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้นและการประยุกต์ใช้งาน [32] Barbosa และคณะ [33] กล่าวว่า พอลิเมอร์จะมีคุณสมบัติที่ดีเมื่อความเข้มข้นของโซเดียม (Na) มีเพียงพอสำหรับกลไกการควบประจุในตำแหน่งที่มีการแทนที่ซิลิกอน (Si) ด้วยอะลูมิเนียม (Al) แต่ไม่ควรมากเกินไปจนเกิดเป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ที่เกิดจากการคาร์บอเนชัน (carbonation) ในบรรยากาศ

Phair และ Van Deventer [34] ได้เสนอกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของซิลิกาในสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ว่าขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการ คือ 1) กระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) จะเกิดขึ้นเมื่ออัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์แพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาคทำให้ซิลานอลกรุป (silanol group) เกิดการแตกตัว ดังสมการที่ 1



อัตราการเกิดกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นด่าง (basicity) ของอัลคาไลน์ไอออน โดย $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะสามารถแตกตัวออกมาได้ไวและง่ายกว่าโซเดียมและลิเทียมไอออนในเวลาเท่ากัน ดังนั้นในระบบที่มีการใช้ K^+ จึงมีไอออนบวกปริมาณมากกว่าเพื่อทำปฏิกิริยาต่อได้ 2) กระบวนการชะละลาย

(dissolution) ดังสมการที่ 2 อัตราการชะละลายของซิลิกาขึ้นอยู่กับคิกริชของแคตไอออนไฮดรเจน (degree of cation hydration) ซึ่ง $K^+ < Na^+ < Li^+$ และจะมีผลอย่างมากเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่อโลหะออกไซด์มีค่าสูง (SiO_2/M_2O)



นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของโลหะอัลคาไลน์ซิลิเกตที่มีต่อปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำการเติมสารละลายโพแทสเซียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายโพแทสเซียมและโซเดียมซิลิเกต จากผลการวิเคราะห์ด้วย ^{29}Si NMR พบว่าการเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในส่วนผสมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มระดับของการควบแน่นแบบลูกโซ่ (degree of polycondensation) ในสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต เนื่องจากมีสัดส่วนของ Q^2 และ Q^3 มากกว่าสารละลายชนิดอื่น (Q คือ จำนวนของพันธะไฮดรอกซิลที่เชื่อมต่อกัน; Si-O-Si โดย Q^0 หมายถึง ซิลิกอนอะตอมที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับอะตอมอื่น, Q^2 หมายถึง ซิลิกอนอะตอมที่เชื่อมต่อกับซิลิกอนอีก 2 อะตอม) ในขณะที่การเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มปริมาณของซิลิเกตมอนอเมอร์ (monomeric silicate: Q^0, Q^1) เท่านั้น และยังพบว่า ขนาดของไอออนบวกมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น กล่าวคือ โซเดียมไอออน (Na^+) จะมีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) ซึ่งแสดงถึงการรวมตัวเป็นคู่ที่แข็งแรง (strong pair formation) กับซิลิเกตโอลิโกเมอร์ (silicate oligomers) ที่มีขนาดเล็กกว่า เช่น มอนอเมอร์ ในขณะที่โพแทสเซียมไอออนชอบที่จะรวมตัวกับซิลิเกตโอลิโกเมอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าพร้อมกับหน่วยของอะลูมิเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_4^-$) ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมจะมีการก่อตัวที่เร็วกว่าและทำให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นกว่าทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

การประเมินความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายและราคาการทดสอบไม่สูงมากนักคือ การวัดกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ซึ่งเป็นค่าเบื้องต้นของการพิจารณาความสามารถของวัสดุเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างด้านต่างๆ

Wang และคณะ [35] ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น

4 - 12 โมลาร์) เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ใช้งานหลังจากการบ่มร้อนจะถูกวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงต่อการดัด (flexural strength), ความแข็งแรงต่อการกดอัด (compressive strength), ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density), องค์ประกอบทางแร่โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD), โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope: SEM) และติดตามการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (Infrared spectrometry: IR) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงต่อการดัด, ความแข็งแรงต่อการกดอัด และความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD, IR บ่งชี้ว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) กึ่งผลึก (semi-crystalline) และมีบางส่วนของดินขาวเผาที่ไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฟสอสัณฐานของจีโอพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการชะละลายอนุภาคของดินขาวเผาและกระตุ้นให้เกิดการควบแน่นแบบเร่ง (accelerated condensation) ของมอนอเมอร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

Bakharev [36] ได้ศึกษาการใช้ตัวกระตุ้นที่ต่างกัน 3 กลุ่มคือ 1) สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2) สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ 3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อความทนทานต่อเกลือและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้านหินชนิดเอฟ (Class F) โดยการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 5 เดือน จากผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้นและกำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ซึ่งเป็นเพราะการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้เกิดโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (cross-linked alumino silicate polymer) ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแน่นตัวจึงไม่ละลายในเกลือต่างๆ ดังนั้นความคงทนของจีโอพอลิเมอร์ต่อสภาพที่เป็นเกลือขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการแข็งตัว นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันมีค่าน้อยกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

Sagoe-Crentsil [37] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ในระบบที่มีซิลิกาสูง ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์เตรียมได้จากการใช้เถ้าลอยผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อัลคาไลน์ซิลิเกตและน้ำ จากนั้นทำการเพิ่มซิลิกาฟูลงในส่วนผสมดังกล่าวเพื่อให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงที่ต้องการคือ 15 - 56 นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ในช่วง 1.5 - 6.5 ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีอิทธิพลอย่างมากต่อโครงสร้างและสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยจีโอพอลิเมอร์จะมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเมื่อ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 32$ ในกรณีที่อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าต่ำ ระบบจะมีหน่วยของ $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$ มากกว่า $\text{Si}(\text{OH})_4$ ปริมาณซิลานอลจึงไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำด้วย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และกำลังรับแรงอัด พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่อ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณอัลคาไลน์ทำให้ความเป็นด่าง (alkalinity) ของระบบสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการควบแน่นระหว่างหน่วยของอะลูมินตและซิลิเกตมอนอเมอร์เพิ่มสูงขึ้น Swaddle และคณะ [38] ได้กล่าวว่าในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูงค่าความเป็นด่างของระบบ (pH) มีค่าประมาณ 13.9 ซึ่งทำให้ซิลิเกตและอะลูมิโนซิลิเกตมีความเสถียรต่ำกว่าที่ $\text{pH} = 12$ ส่งผลให้สามารถชะละลายสารประกอบซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากวัสดุคิบได้ง่ายขึ้น

Swanepoel และ Strydom [39] ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผา โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้น และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่มที่ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 6, 24, 48 และ 72 ชั่วโมงที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่า สภาวะการบ่มที่เหมาะสมคือใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่น (density) ของชิ้นงานลดลงสืบเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างในระหว่างการบ่มร้อน Ayuso และคณะ [40] เห็นว่า การบ่มเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ กล่าวคือ อุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มพลังงานให้แก่กระบวนการชะละลายซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic process) ทำให้ระบบมีความสามารถในการชะละลายสารประกอบของซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ออกมาจากวัสดุคิบ เพื่อทำปฏิกิริยามากขึ้น จนกระทั่งเกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างมอนอเมอร์ เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่ซับซ้อน จีโอพอลิเมอร์จึงสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น

Chindaprasirt และคณะ [41] ได้ศึกษาสภาวะการบ่มที่เหมาะสมสำหรับจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลอขนชนิดแคลเซียมสูง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซัลไฟด์ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ระยะเวลาที่ทิ้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนการบ่มร้อน (delayed time), อุณหภูมิการบ่มร้อน (temperature of curing) และระยะเวลาการบ่มร้อน (duration of curing) ผลการศึกษาพบว่า การเก็บชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนการบ่มด้วยความร้อนจะเป็นผลดีต่อการพัฒนาความแข็งแรงของชิ้นงาน อุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมคือ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 - 3 วัน จะให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า การบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส (ในการทดลองคือ 90 °C) จะทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เริ่มลดลง เนื่องจากโครงสร้างภายในเกิดการสูญเสียความชื้นส่งผลต่อการแตกร้าวภายในโครงสร้างของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ดังนั้น การทำให้แห้งอย่างรวดเร็วในระหว่างการบ่มเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Van Jaarsveld และคณะ [42] ที่พิสูจน์ว่าการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะทำให้โครงสร้างของวัสดุจีโอพอลิเมอร์อ่อนแอลง ดังนั้นการหลงเหลือน้ำไว้ในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อย จึงจำเป็นต่อการป้องกันการแตกร้าวของชิ้นงาน การเพิ่มระยะเวลาการบ่มที่อุณหภูมิสูงออกไป จะส่งผลให้การพัฒนาโครงสร้างเจลของจีโอพอลิเมอร์หยุดลง และเกิดการสูญเสียน้ำในปฏิกิริยา (dehydration) ในทางตรงข้ามการเพิ่มระยะเวลาการบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา กำลังอัดมากกว่า งานวิจัยของ Teixeira-Pinto และคณะ [43] กล่าวว่า การทิ้งช่วงเวลาไว้ให้จีโอพอลิเมอร์เกิดการก่อตัวมีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานในภาคปฏิบัติ เนื่องจากเป็นเวลาที่ใช้ในการขนส่ง การเท และการทำให้แน่น ดังนั้น การจะทำให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรม ควรจะมีกรรมวิธีการบ่มที่เหมาะสมเหมือนกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

Ridtirud และคณะ [44] ได้ศึกษาผลของวิธีการบ่ม 5 วิธี ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาและถั่วลอขน 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 จากผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุดิบตั้งต้นและวิธีการบ่มชิ้นงาน โดยการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากถั่วลอขนต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูง (680 ksc) ซึ่งสภาวะการบ่มที่

เหมาะสมคือ ใช้อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่การใช้อุณหภูมิสูงเกินไปโดยวิธีออตเคลฟจะมีผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงต่ำ อันเกิดจากการระเหยของน้ำในโครงสร้างจนทำให้ชิ้นงานแตกร้าวเสียหาย ส่วนจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำก็เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ โดยการบ่มด้วยแสงอาทิตย์จะให้กำลังอัดสูงถึง 810 ksc จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถยืนยันได้ว่าการเกิดจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดความร้อน ส่งผลให้การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยต้องใช้ความร้อนสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่เป็นปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน

2.3.4 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

เทคนิคและเครื่องมือขั้นสูงต่างๆ ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เพื่อชี้ให้เห็นถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติของสารจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วย

1. เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

(Atomic absorption spectrometry; AAS)

เป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุคิบที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ว่าเมื่อทำปฏิกิริยากับต่างแล้วจะสามารถชะ (leaching) เอาไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุคิบออกมาได้มากน้อยแค่ไหน โดยค่าความเข้มข้นของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาของวัสดุคิบ หากค่ามากย่อมเป็นผลดีเนื่องจากทำให้ได้มอนอเมอร์ปริมาณมากในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและเกิดโครงสร้างที่แข็งแรง งานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [45] ได้ศึกษาสภาวะการชะละลายไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดสอบพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และเวลาในการชะ 10 นาที จะทำให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมถูกชะละลายออกมามากที่สุด ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวสามารถผลิตจีโอพอลิเมอร์ที่ให้กำลังอัดสูงถึง 65 เมกะปาสคาล

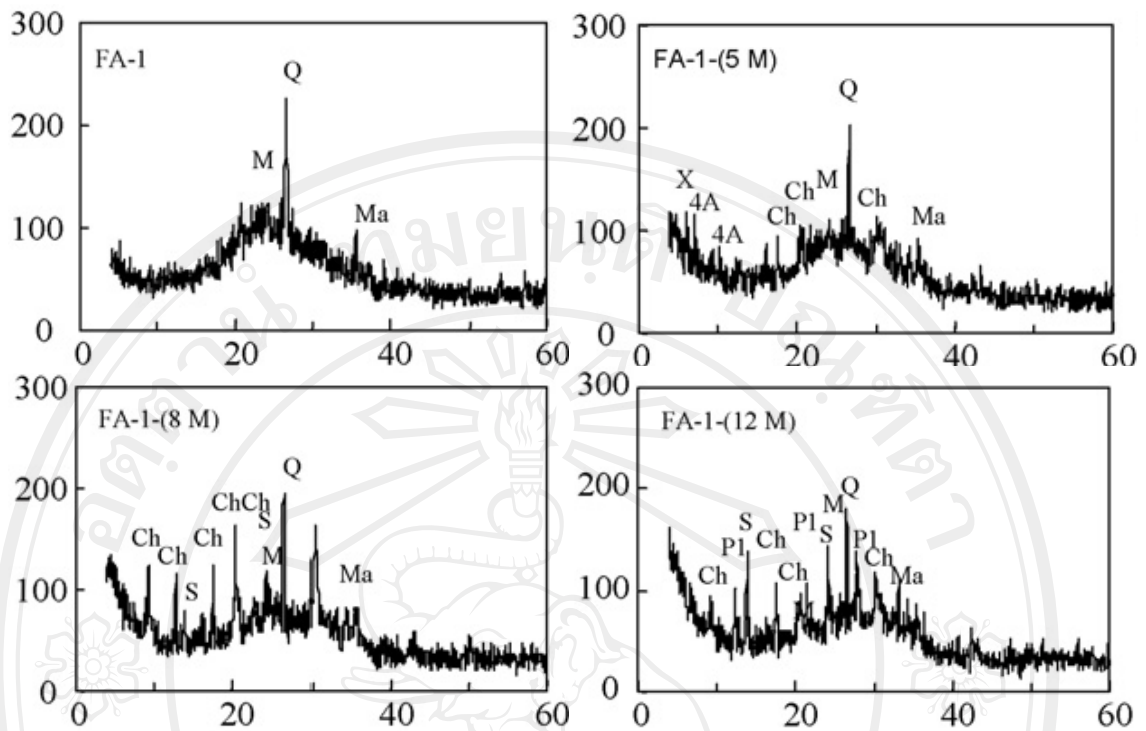
2. เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุ โดยการทำงานของเครื่องจะเริ่มจากการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วแอโนดทำให้ไส้หลอดร้อนขึ้น อิเล็กตรอนจะหลุดออกและวิ่งชนขั้วแอโนด (ขั้วทองแดง) ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโลหะใน K-shell แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L-shell จะเข้ามาแทนที่ เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปความร้อน 99 เปอร์เซ็นต์ และรังสีเอกซ์ 1 เปอร์เซ็นต์ รังสีเอกซ์ที่ได้จะถูกบีบให้เป็นลำแคบลงโดยไดเวอร์เจนท์

สลิต (divergent-slit) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมรังสีให้ผ่านไปยังตัวอย่าง เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบ ตัวอย่างจะเกิดการเลี้ยวเบนที่ระนาบผลึก รังสีที่สะท้อนกลับจากตัวอย่าง จะผ่านเข้าสู่หัววัดรังสี เพื่อนับปริมาณรังสี ดังนั้นข้อมูลที่ได้รับคือ ความเข้มของรังสี (Intensity ; I) และ มุมการเลี้ยวเบน (2θ) โดยมุมการเลี้ยวเบนจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น (λ) และระยะห่างระหว่างระนาบ (d) ตามสมการของ Bragg's law ดังสมการที่ 4

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (4)$$

ส่วนการนำมาใช้วิเคราะห์วัสดุซิลิโพลิเมอร์อาจมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากธรรมชาติของซิลิโพลิเมอร์จะมีความเป็นอสัณฐานอยู่มากกว่าความเป็นผลึก แต่ก็สามารถบ่งบอกสภาพความเป็นผลึกของวัสดุได้ตั้งแต่ต้นและสภาพหลังจากการทำปฏิกิริยาได้ รูปที่ 2.5 แสดงแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุซิลิโพลิเมอร์จากถ้ำลอย ซึ่งจะแสดงถึงส่วนที่เป็นผลึกคือ ควอตซ์ (quartz), มัลไลต์ (mullite) และแมกนีไทต์ (magnetite) และส่วนที่เป็นอสัณฐานคือฟิสิก ในช่วง $2\theta = 20 - 32$ องศา โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณการเกิดส่วนที่เป็นอสัณฐานหลังจากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมีมากขึ้น อันเกิดจากการชะละลายสารตั้งต้นเป็นหน่วยของมอนอเมอร์ก่อนที่จะเกิดการควบแน่นเป็นเจลต่อไป ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (5 M NaOH) จะเกิดสารประกอบซีโอไลต์ชนิด X และ 4A (zeolite X และ zeolite 4A) เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะเกิดซีโอไลต์ชนิด Na-P1 (zeolite Na-P1) ส่วนซาบาไซต์ (chabazite) และโซดาไลต์ (sodalite) จะเกิดขึ้นทุกช่วงความเข้มข้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีการหลงเหลือของมัลไลต์ (mullite) อีกด้วย

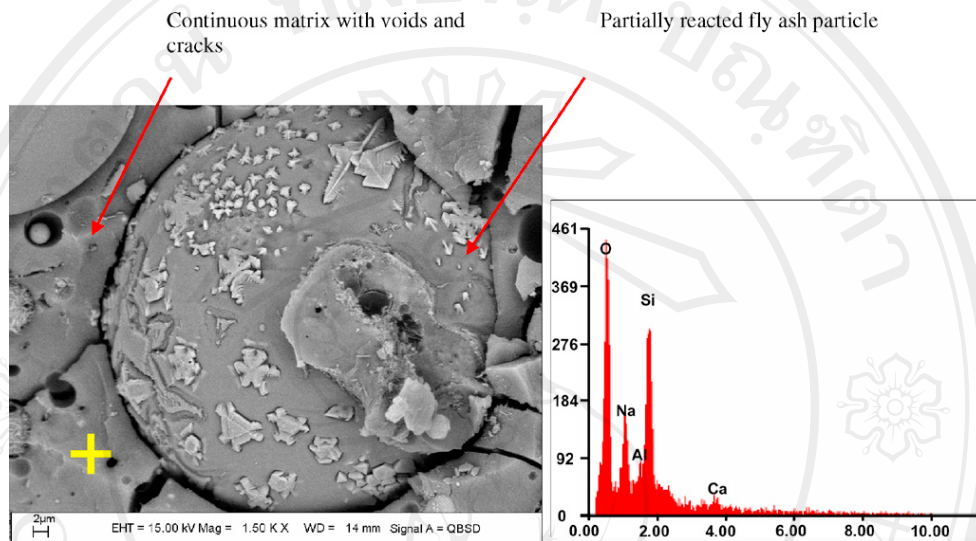


รูปที่ 2.5 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย (FA-1) และจีโอพอลิเมอร์หลังจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน Q: quartz, M: mullite, Ma: magnetite H: hematite, Ch: chabazite, S: sodalite, X: zeolite x, 4A: zeolite 4A, P: zeolite Na-P1 [40]

3. เทคนิคภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)

เป็นเครื่องมือที่สามารถถ่ายภาพได้ตั้งแต่ระดับมิลลิเมตรจนถึงระดับไมครอนซึ่งสามารถอธิบายถึงสภาพทางกายภาพของวัสดุทั้งในส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน โดยกล้องจะใช้อิเล็กตรอนแทนแสง ด้านบนของกล้องจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (primary electron) อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจนมีพลังงานประมาณ 2 - 40 keV โดยมีเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่โฟกัสให้อิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานจะทำให้เกิดสัญญาณแบบต่างๆ เช่น อิเล็กตรอนหลุดออกจากชิ้นงาน (secondary electron) อิเล็กตรอนกระดอนกลับ (backscattered electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดโดยตัววัดสัญญาณและแปลผลเป็นสัญญาณไฟฟ้า ภาพและกราฟในที่สุด โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแสดงให้เห็นความขรุขระและเม็ดเจลที่เกิดขึ้นโดยรอบอนุภาค เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารจีโอพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวบางส่วนของเถ้าลอยและพบผิวบางส่วนที่เรียบ เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์

ดังรูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (Energy dispersive x-ray spectrometer; EDX) พบว่าส่วนของเจลในจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน (Si), อะลูมิเนียม (Al) และ โซเดียม (Na) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของสารจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบแคลเซียม (Ca) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัตถุคิบตั้งต้นด้วยในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย ที่กำลังขยาย 1500 เท่า [46]

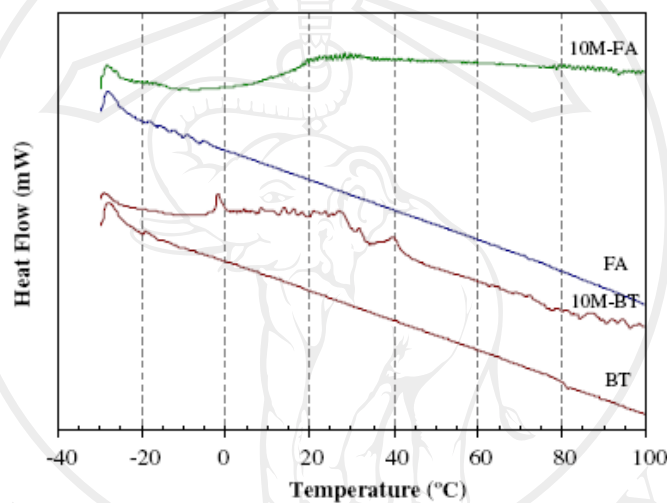
4. เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลเลอร์ิเมตรี

(Differential scanning calorimetry; DSC)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยการวัดพลังงานที่ทำให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงเท่ากัน หากมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น เครื่องจะจ่ายพลังงานไปชดเชยด้านที่ขาด เพื่อให้ทั้ง 2 ด้านมีอุณหภูมิเท่ากัน ขนาดพลังงานที่เครื่องจ่ายให้จะเท่ากับขนาดของการดูดหรือคายความร้อนของสารตัวอย่าง

การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ทำได้โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของพีคที่มีการดูดและคายความร้อนโดยศึกษาอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง 100 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของแก้ว (glass transition temperature; T_g) รูปที่ 2.7 แสดงเทอร์โมแกรม (thermogram) ของเถ้าลอย, เถ้าหนักและจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จะเห็นว่า เถ้าลอยและเถ้าหนักจะให้เส้นกราฟที่มีความชันคงที่ แสดงถึงการไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอนุภาค พีคที่พบช่วงอุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส คือ พีคที่เกิดจากการหลอมเหลว (melting point) ของน้ำ ซึ่งจะพบในวัสดุจีโอ-

พอลิเมอร์ แต่จะไม่พบในแก้วลอยและแก้วหนัก เนื่องจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีน้ำเป็นส่วนประกอบ และพบพีคการคายความร้อนของจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอยที่อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของแก้ว ส่วนจีโอพอลิเมอร์จากแก้วหนักจะพบพีคที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 10 - 40 องศาเซลเซียส เป็นพีคของการคายความร้อน โดยคาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของจีโอพอลิเมอร์เป็นผลึก (crystallization temperature; T_c) ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวของแข็งออสซิลฐานจะมีความหนืดลดลงและมีอิสระเพียงพอที่จะเกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวใหม่กลายเป็นผลึก



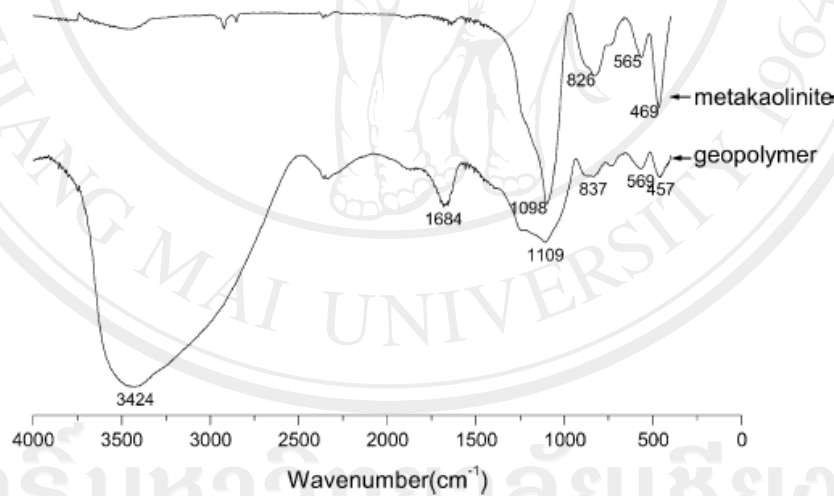
รูปที่ 2.7 DSC Thermogram ของแก้วลอย, แก้วหนักและจีโอพอลิเมอร์เพสต์ [46]

5. เทคนิคฟูริเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

(Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

เป็นเทคนิคที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ทั้งในแง่ของคุณภาพและปริมาณซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิเคราะห์วัสดุที่ทำจากสารอินทรีย์ (organic) แต่ในบางกรณีก็ใช้ได้กับวัสดุที่ทำจากสารอนินทรีย์ (inorganic) เทคนิค FTIR ทำได้โดยการยิงคลื่นรังสีอินฟราเรดที่มีช่วงความยาวคลื่น (wave number) $200 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ (50 - 2.5 ไมโครเมตร) ซึ่งจัดเป็นย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (middle IR) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือหมุนพันธะของโมเลกุลทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพัทธ์ของความถี่ (wavenumber) กับค่าการส่งผ่านของแสง (% transmittance)

อินฟราเรดสเปกตรัม (IR spectrum) เป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ซึ่งทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสารนั้นๆ ว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง เมื่อพิจารณารายละเอียดที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปกตรัมพีคในช่วง $1350 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในหมู่ฟังก์ชัน (group functional region) และในช่วงประมาณ $910 - 1350 \text{ cm}^{-1}$ จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวเรียกว่า ย่านพิมพ์รอยนิ้วมือ (finger print region) FTIR spectrum ของดินขาวเผาและจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ผสมกับโซเดียมซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าพีคของดินขาวเผาจะดูดกลืนคลื่นแสงที่ความถี่ 1098 และ 826 cm^{-1} ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของพันธะ Si-O และ Si-O-Al ตามลำดับ หลังจากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแล้ว จะพบพีคที่เป็นเอกลักษณ์ในการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ที่ความถี่ 1600 และ 3450 cm^{-1} นั่นคือ H-O-H และ O-H ซึ่งเป็นพันธะที่จะเกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแบบลูกโซ่



รูปที่ 2.8 FTIR spectrum ของดินขาวเผาและจีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากดินขาวเผา [35]

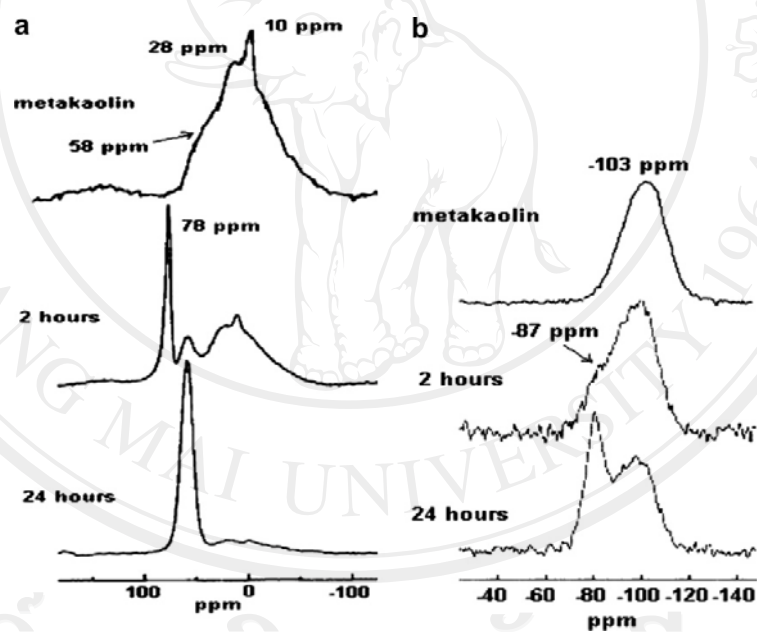
6. เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

(Nuclear magnetic resonance spectroscopy; NMR)

เป็นเทคนิคที่สามารถระบุคุณสมบัติของโมเลกุลที่ประกอบด้วยนิวเคลียสแม่เหล็ก (magnetic nuclei) ได้โดยการวิเคราะห์คลื่นความถี่ที่ทำให้นิวเคลียสมีค่าความถี่ที่เรโซแนนซ์ (resonance) กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าว

แสดงให้เห็นถึงช่วงกว้างของเรโซแนนซ์ที่ -99.6 ppm ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างแบบไร้ระเบียบของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ [47]

ตัวอย่างการวิเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงแรก หลังจากการผสม ดังรูป 2.9 (b) สเปกตรัมที่ปรากฏอยู่ในช่วง -87 ppm แสดงถึงดินขาวเผาส่วนที่ยังไม่ถูกชะละลาย (undissolved metakaolin) และหน่วยของอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate species) เพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่กับหน่วยของอะลูมินेट ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) อิสระ แต่จะไม่พบหน่วยของมอนอเมอร์ซิลิเกต (monomeric silicate) ให้เห็นในระบบ ซึ่งอาจเกิดจากการควบแน่นอย่างรวดเร็วของมอนอเมอร์ซิลิเกตร่วมกับหน่วยของอะลูมินेट เพื่อเกิดเป็นสายโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกต [48]



รูปที่ 2.9 NMR spectra ของดินขาวเผาที่ใช้เป็นสารตั้งต้นและดินขาวเผาภายหลังการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ ที่เวลาต่างกัน (a) ^{27}Al NMR และ (b) ^{29}Si NMR [49]

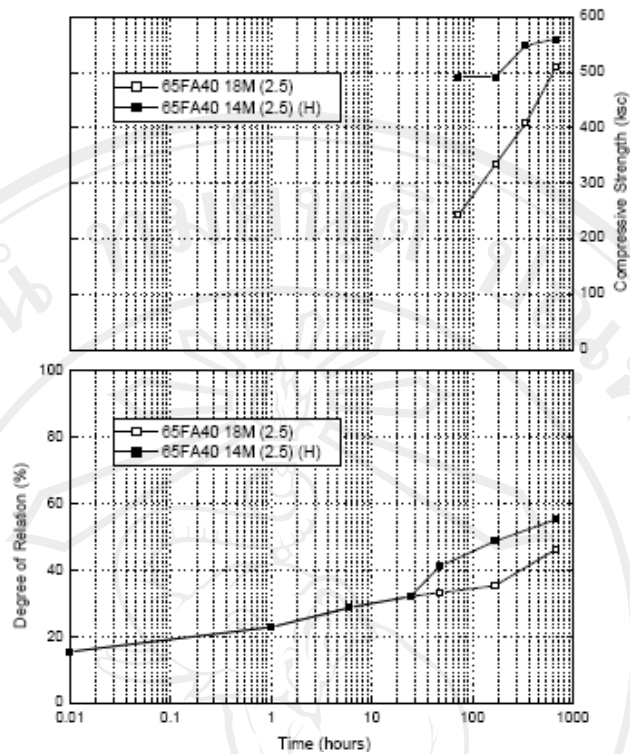
7. การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Determination of reaction rate)

การวิเคราะห์อัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ จะใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดพิคลิก (picric acid) และกรดไฮโดรคลอริก

(hydrochloric acid) โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอนุภาคของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าอนุภาคที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา

การทดสอบเริ่มจากการนำกรดฟอสฟอริกปริมาณ 5 กรัม ละลายในสารละลายเมทานอล (methanol) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์มาบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 100 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในสารละลายข้างต้น และกวนด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาณ 20 มิลลิลิตร แล้วกวนสารละลายต่อไปอีก 30 นาที สารละลายจะถูกกรองผ่านกระดาษกรองชนิดไร้เด้า ทำการล้างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ค้างอยู่ด้วยสารละลายเมทานอลจนกระทั่งสีของกรดฟอสฟอริกเจือจางลง จึงทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่คำนวณได้คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน [51]

Klprasit และคณะ [51] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่มและอายุของตัวอย่างที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอยผสมถ้ำแคลสเป็ลือกไม้ ในอัตราส่วน 40:60 จากผลการศึกษาพบว่า การบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเท่ากับร้อยละ 41.25, 48.73 และ 55.25 ที่อายุ 2, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเพสต์ที่ไม่ได้ผ่านการบ่มร้อน ดังรูปที่ 2.10 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบ่มร้อนจะกระตุ้นให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้เร็วขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เกิดการก่อตัวได้เร็วขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังรับแรงอัด โดยชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มร้อนให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 24.3, 33.5, 40.9 และ 51.0 เมกะปาสคาล แต่เมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดในทุกอายุการทดสอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 49.2, 49.2, 54.9 และ 56.0 เมกะปาสคาล



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ที่อายุต่างกัน [51]

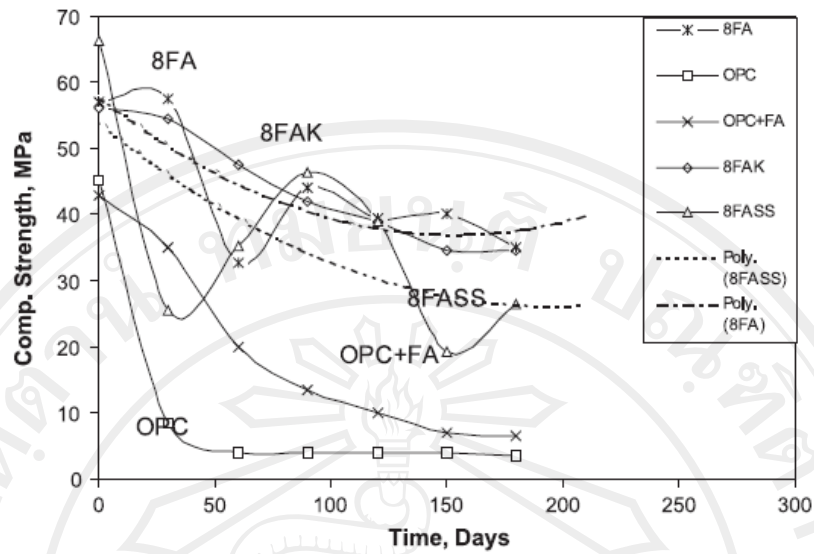
2.3.5 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งาน

Davidovits [52] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์พบว่า จีโอพอลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) หรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอลิติก (zeolitic) จีโอพอลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 70-100 เมกะปาสคาล และจากคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็ง หดตัวน้อย ทนความร้อนและต้านทานการสึกกร่อน จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ ที่สามารถประยุกต์ใช้กับงานด้านโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนต่อการสึกกร่อน นอกจากนี้การผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่ต้องเผาที่อุณหภูมิสูง ทำให้ไม่ก่อเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยสามารถพบเห็นการใช้งานวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในโครงสร้างยานยนต์และอากาศยาน

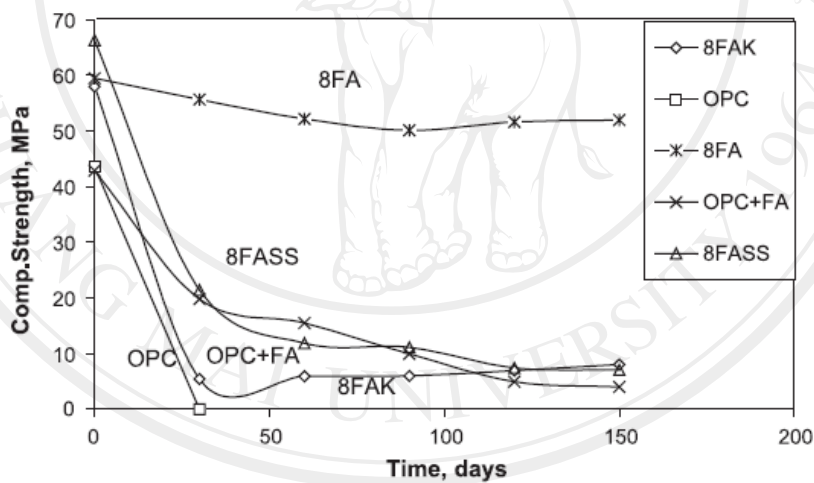
คุณสมบัติด้านความคงทนต่อสารละลายกรดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ถูกศึกษาโดย Bakharev [53] โดยใช้เก้าอี้ชนิดเอฟ (Class F) และสารอัลคาไลน์ที่แตกต่างกันเป็นตัวกระตุ้น

ชิ้นงานจะถูกแช่ไว้ในสารละลายกรดอะซิติก (acetic acid) และกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) ความเข้มข้น 5% โดยทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก กำลังรับแรงอัด ผลึกที่เกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคชิ้นงานที่ถูกทำให้เสื่อมสภาพ จากการศึกษาพบว่าวัสดุอีโพอลิเมอร์มีสมรรถนะที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) หลังจากการแช่ในสารละลายกรดเป็นเวลา 2 เดือน ซึ่งเพศที่ทำจากปูนซีเมนต์ (OPC) และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย (OPC+FA) จะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากที่สุดในครดทั้ง 2 ชนิด โดยอีโพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นอย่างเดียว (8FA) ให้ผลทนต่อกรดได้ดีที่สุด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยที่สุด รองลงมาคืออีโพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (8FASS) ในกรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (8FAK) จะให้ผลที่ทนต่อสารละลายกรดอะซิติก และให้ผลตรงข้ามในสารละลายกรดซัลฟูริก รูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงถึงค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของเพศเมื่อแช่ในสารละลายกรดอะซิติก และซัลฟูริกที่เวลาต่างกันพบว่า ตัวอย่าง 8FASS และ 8FAK จะมีกำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายกรดเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการชะละลายของอัลคาไลน์ออกมาจากโครงสร้างของอีโพอลิเมอร์เมื่อถูกกรดทำลายทำให้โครงสร้างของอีโพอลิเมอร์อ่อนแอลง แต่ตัวอย่าง 8FA จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วงเดือนแรก และเพิ่มขึ้น 4% ในเดือนต่อมา

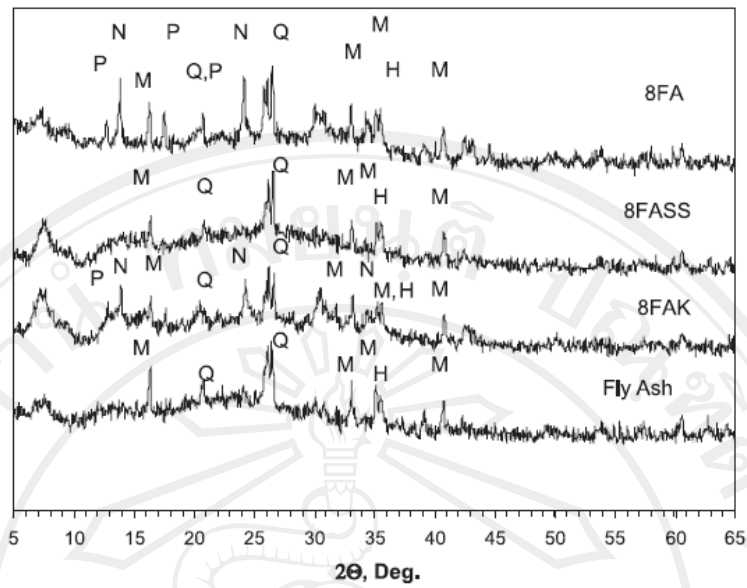
การวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอยตั้งต้นและอีโพอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยเถ้าลอยจะแสดงถึงส่วนที่เป็นผลึก คือ ควอตซ์ (quartz) มัลไลต์ (mulite) และเฮมาไทต์ (hematite) และพีคช่วงกว้างในช่วง $2\theta = 6 - 10$ องศา คือเจลของอะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งชิ้นงาน 8FA และ 8FAK จะปรากฏพีคของไฮโดรโซดาไลต์ (hydrosodalite) และซีโอไลต์ชนิด Na-P1 หลังจากการแช่ตัวอย่างในสารละลายกรดอะซิติก 2 เดือน ดังรูปที่ 2.14 พบว่าพีคของไฮโดรโซดาไลต์และซีโอไลต์ในตัวอย่าง 8FA หายไป นอกจากนี้ยังพบว่าพีคของควอตซ์และส่วนที่เป็นผลึกของตัวอย่าง 8FAK หายไปด้วย เมื่อทำการแช่ตัวอย่างในสารละลายกรดซัลฟูริก ดังรูปที่ 2.15 พบว่าพีคส่วนที่เป็นผลึกของ 8FA หายไปเกือบทั้งหมด



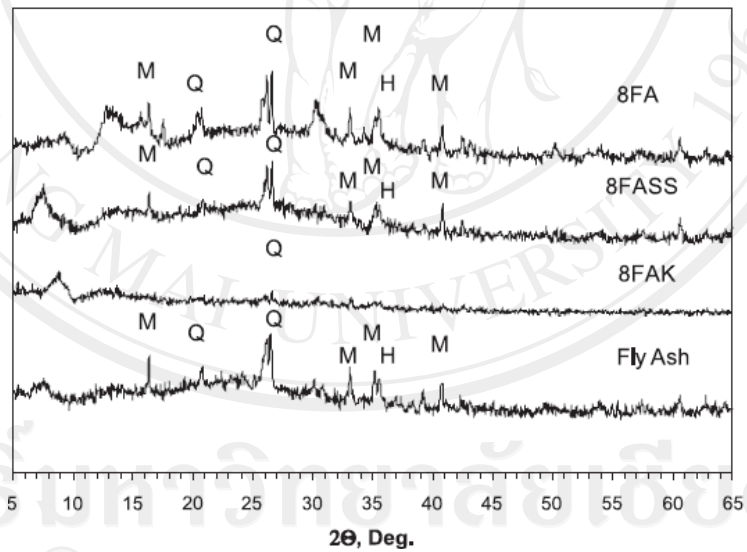
รูปที่ 2.11 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลายกรดอะเซติกความเข้มข้น 5% [53]



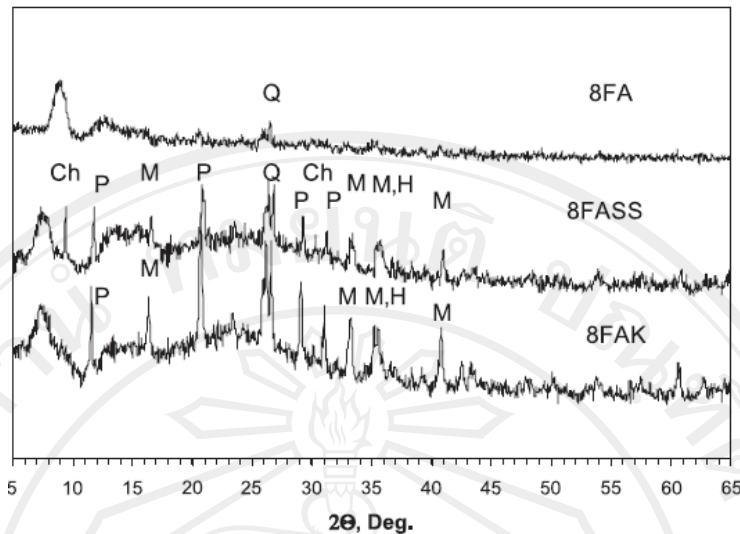
รูปที่ 2.12 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 5% [53]



รูปที่ 2.13 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ก่อนการทดสอบ P = Na-P1 (gishmondine), N = hydroxyl-sodalite, Q = quartz, M = mullite, H = hematite [53]



รูปที่ 2.14 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลายกรดอะซิติก Q = quartz, M = mullite, H = hematite [53]

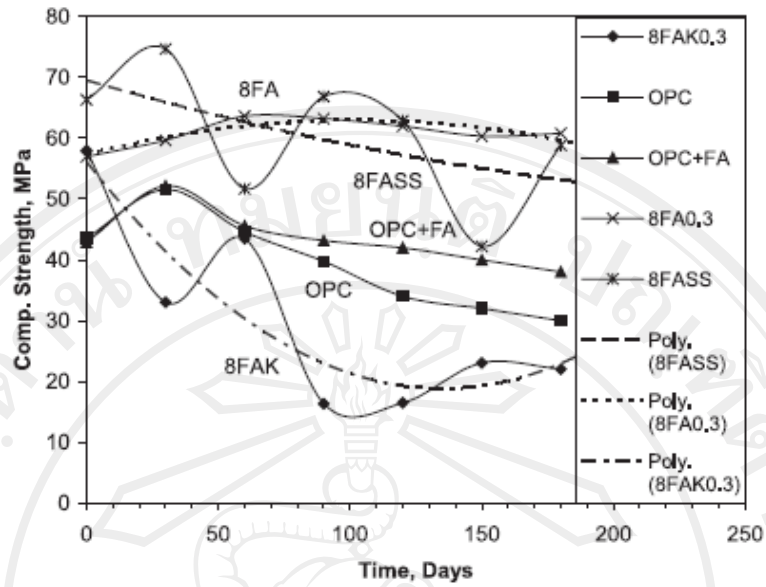


รูปที่ 2.15 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก

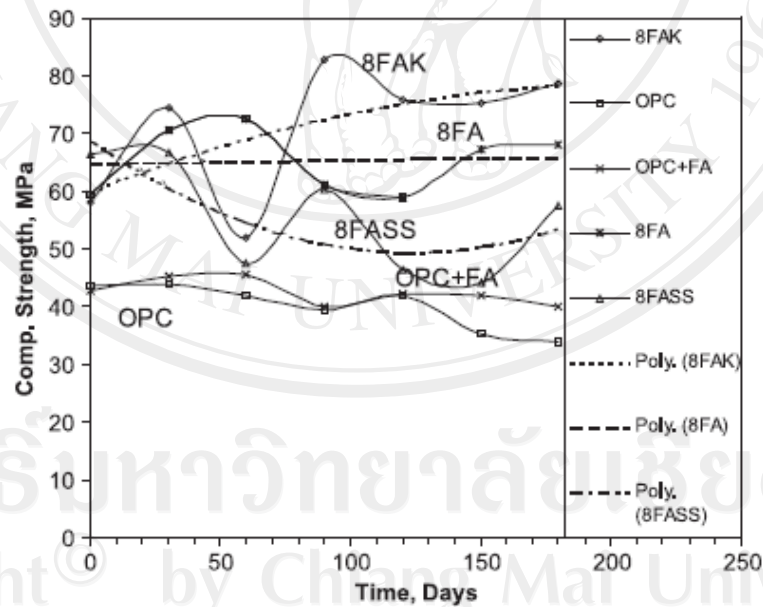
Ch = chabazite, P = Na-PI (gismondine), Q = quartz, M = mullite, H = hematite [53]

ในเวลาต่อมา Bakharev [36] ได้ทำการศึกษาความทนทานของจีโอพอลิเมอร์ต่อการทำลายของสารละลายซัลเฟตโดยใช้เกลืออลูมิเนียม (Class F) และสารอัลคาไลน์เป็นวัตถุคืบ การทดสอบทำโดยการแช่วัสดุจีโอพอลิเมอร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการทดลองพบว่าการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะทำให้กำลังรับแรงอัดของชิ้นงานที่เตรียมจากสารละลายโซเดียมซิลิเกต (8FASS) ลดลง 18 เปอร์เซ็นต์ และลดลง 65 เปอร์เซ็นต์ ในตัวอย่างที่เตรียมด้วยสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (8FAK) ขณะที่ตัวอย่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 4 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.16 ในกรณีที่แช่ตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าตัวอย่าง 8FA และ 8FAK จะให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 12 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ในตัวอย่าง 8FASS จะให้กำลังอัดลดลง 24 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.17

จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถถูกทำลายได้เมื่อแช่ในสารละลายซัลเฟต แต่การถูกทำลายจะต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยจีโอพอลิเมอร์ถูกทำลายจากการที่มีการสูญเสียไอออนของอัลคาไลน์ในสารละลายซัลเฟต ซึ่งไอออนของอัลคาไลน์เป็นตัวทำให้เกิดความสมดุลด้านประจุไฟฟ้าในขั้นตอนของการทำปฏิกิริยาถูกโซ่ การสูญเสียไอออนดังกล่าวจึงทำให้เกิดความเค้นและรอยแตกซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์



รูปที่ 2.16 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5% [36]



รูปที่ 2.17 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5% [36]

Hardjito และคณะ [54] ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านการหดตัวและการคืนตัวของวัสดุ จีโอพอลิเมอร์ โดยพบว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะมีการคืนและการหดตัวค่อนข้างน้อย เนื่องจาก โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ที่มีลักษณะต่างจากโครงสร้างของปูนซีเมนต์ ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็น แผ่นประกอปกันเป็นเจล แต่จีโอพอลิเมอร์เป็น โครงสร้างลักษณะอสัณฐานและกิ่งผลึก

นอกจากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น วัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังมีความสามารถในการปรับ สภาพของเสียที่มีพิษได้ ด้วยการผสมของเสียดังกล่าวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ความสามารถในการ ตรึง (immobilisation) ของเสียที่มีพิษไว้ในตัวเองได้นี้เกิดจากการที่มีโครงสร้างคล้ายกับซีโอไลต์ (zeolite) หรือเฟลสปาทรอยด์ (feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับไอออนของสารพิษ ได้ดี โดยการทำให้ของเสียให้เป็นของแข็งแบบเชื่อมแน่น (adhesive solid) ของเสียทางเคมีประเภท นี้ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของสารนิวเคลียร์ ซึ่งโครงสร้างที่แข็งแรงของวัสดุจีโอพอลิ เมอร์จะสามารถจับยึดของเสียที่มีพิษไว้อย่างหนาแน่นภายในโครงข่าย 3 มิติ (three dimensional framework) ไม่ให้ถูกชะละลายออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยของ Comrie และคณะ [55] ได้ ทดลองใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อผลในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก จากตารางที่ 2.2 พบว่า ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาจากกากแร่ (mine tailings) และกาก ตะกอนสี (paint sludge) มีค่าน้อยลง เมื่อนำกากของเสียดังกล่าวมาสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิ เมอร์ ซึ่งเชื่อว่าอนุภาคหรือไอออนของโลหะหนักนั้นจะถูกกักเก็บ (encapsulated) อยู่ในรูปของไฮ-ดรอกไซด์ (hydroxide) มอนอเมอร์ (monomer) หรือสายโซ่ซิติเกตขนาดเล็ก (small chain silicate species) ภายในเฟสอสัณฐานของจีโอพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ถูกชะละลายออกมาจากกากแร่ (Kam-Kotia mine tailings) และกากตะกอนสี (paint sludge), ppm [55]

	As	Fe	Zn	Cu	Ni	Ti
Untreated tailings	42	9726	1858	510	5	20
Geopolymerised tailings	2	123	1115	4	3	7

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

	Mg	Cr	Zn	Mn	Co	Ti	V
Untreated sludge	1024	55	384	64	84	6	9
Geopolymerised sludge	512	7	7	6	9	3	1