

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การออกแบบการวิจัย

เริ่มจากการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพและเคมี และโครงสร้างระดับอนุภาคของสารตั้งต้นคือถั่วลันเตาจากกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สารตั้งต้นที่ใช้จะถูกนำไปทดสอบความเป็นผลึกด้วยวิธี x-ray Diffraction (XRD) ทดสอบหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี x-ray fluorescence (XRF) จากนั้นทำการผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเปลี่ยนสารประกอบซิลเฟตในถั่วลันเตา FBC เป็นเอททริงไกต์ และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมให้เป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่เป็นสารที่ทำให้กำลังตัวของจีโอโพลิเมอร์

จากหลักการที่กล่าวข้างต้น ถั่วลันเตา FBC จะผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ได้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ ทดสอบหาเอททริงไกต์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากนั้นนำถั่วลันเตา FBC มาผสมกับ $Al(OH)_3$ และควบคุมการเกิดเอททริงไกต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยจะผสมถั่วลันเตา FBC กับ $Al(OH)_3$ ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์

ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลันเตา FBC ผสม $Al(OH)_3$ ถั่วจะถูกผสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนที่จะเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดชันหรือจีโอโพลิเมอไรเซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.0 จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่หุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกสำหรับห่อหุ้มอาหาร ที่อุณหภูมิ $65^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาจะเกิดคล้ายกับการผลิตสารซีโอไลต์ แต่จะใช้ถั่วลันเตาในปริมาณที่มากกว่า คืออัตราส่วนถั่วลันเตาต่อสารละลายเบสและซิลิเกตมีค่ามากกว่าที่ใช้ผลิตซีโอไลต์ และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาดำกว่า ที่ความดันบรรยากาศ ทำให้ได้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง มีลักษณะคล้ายมอร์ตาร์/คอนกรีต และเป็นการใช้ถั่วลันเตาซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มที่

จีโอโพลิเมอร์ที่ได้จะถูกทดสอบกำลังอัด คุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา ดัชนีการเกิดปฏิกิริยา และความคงทนต่อสารละลายกรดและสารละลายเกลือ

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องมือ

1. เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)
2. เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal testing machine)
3. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น METTLEP AE 200
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก (3 กก. $\pm$ 0.5 กรัม) รุ่น EKO 3
5. เครื่องผสมมือ (Hand mixer) Philips รุ่น Mixer HR 1456
6. เครื่องผสมอัตโนมัติ 5 ลิตร รุ่น LNK 530
7. ตู้อบรุ่น BINDER
8. อ่างควบคุมอุณหภูมิ

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ขนาด 500 และ 100 มิลลิลิตร
2. บีกเกอร์พลาสติก ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ขวดพลาสติกขนาด 1000 มิลลิลิตร
4. แห้งแก้ว
5. ซ้อนดักสาร
6. โกร่งบดสาร
7. แบบหล่อมอร์ต้าร์พลาสติกขนาด 5×5×5 ซม.
8. ฟิล์มหุ้มอาหาร (Cling-film)
9. แบบหล่อเพสต์พลาสติก

สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 98% ; MW = 40 ; บริษัท Sigma Thasco Chemical ; Commercial grade)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 98% ; MW = 40 ; บริษัท Sigma Ajax Finechem ; AR grade)
3. โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โดย $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} = 3.2$ โดยน้ำหนัก
4. แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4 ; MW = 120.415; Commercial grade)
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl ; MW = 36.46 ; บริษัท QRēC New Zealand ; AR grade)
6. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4 ; MW = 98; Commercial grade)

7. อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$; MW = 78 ; s.d.fine-chem limited ; AR grade)
8. อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$; MW = 78 ; Sigma Thasco Chemical ; Commercial grade)
9. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3 ; Mw = 106 g/mol; บริษัท Sigma Thasco Chemical; AR grade)
10. ตัวอย่างเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบตจากโรงงานกระดาษ (เถ้าลอย FBC)
11. ทรายคัดขนาด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (รูเปิด 2.36 mm)

3.3 การเตรียมสารละลาย

เนื่องจากสารละลายที่เตรียมเป็นสารละลายหุติยภูมิ ไม่เสถียร สามารถดูความเข้มข้นได้จึงทำการเตรียมสารละลายอย่างประมาณ ดังนี้

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ความเข้มข้น 15 โมลาร์ 1,000 มิลลิลิตร

ชั่ง NaOH (AR grade) 600.0 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตรในบีกเกอร์

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ความเข้มข้น 15 โมลาร์ 1,000 มิลลิลิตร

ชั่ง NaOH (Commercial grade) 600.0 กรัม ละลายด้วยน้ำประปาแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตรในบีกเกอร์

3. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 5% w/v สำหรับวิเคราะห์ดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (DOR)

ละลายโซเดียมคาร์บอเนต 50.0 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 5% w/v

4. กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ 500 มิลลิลิตร สำหรับวิเคราะห์ DOR

ตวงกรดไฮโดรคลอริกด้วยกระบอกตวง ปริมาตร 86.2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 500 มิลลิลิตรในบีกเกอร์

5. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) 5% w/v วิเคราะห์การทนทานต่อการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟต

ซึ่งแมกนีเซียมซัลเฟต 50.0 กรัม ละลายด้วยน้ำประปา แล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตรในบีกเกอร์

3.4 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบด

3.4.1 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในความเข้มข้นต่างๆ

การผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบด โดยแบ่งการผลิตออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นที่ 1 : จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบดที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในความเข้มข้นต่างๆ

ขั้นที่ 2 : จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบดผสมผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ

เตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อศึกษาด้านการเกิดปฏิกิริยา, โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ และสัณฐานวิทยาโดย X-ray diffraction (XRD) โดยผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC จะใช้เถ้าลอย FBC ผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10, 12, 15 และ 18 โมลาร์ ($S/T = 0.4$)

ระบบที่ 1 ผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เถ้าลอย 40 กรัม

ระบบที่ 2 ผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้เถ้าลอย FBC 38 กรัม ผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 2 กรัม ($5\% \text{Al}(\text{OH})_3$) โดยแสดงอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 ซึ่งทำการเตรียมดังนี้

1. ผสมส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องมือ โดยผสมของแข็งให้เข้ากันก่อน จากนั้นจึงเติมสารละลาย

2. ใส่ลงในแบบหล่อเพสต์พลาสติก แล้วหุ้มด้วยพลาสติกใส นำไปอบที่อุณหภูมิ 65°C นาน 24 ชั่วโมง

3. จากนั้นแกะออกจากแบบหล่อ ใส่ในถุงซิปลำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ $25\pm 3^\circ\text{C}$ นาน 7 วัน

4. นำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ

5. ส่วนจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับทดสอบค่ากำลังอัด จะผสมทรายในปริมาณ 2 เท่าของ น้ำหนักเถ้าลอย (หรือน้ำหนักเถ้าลอยผสมกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์) ในขั้นตอนผสม ก่อนเทส่วนผสม ลงในแบบพลาสติกขนาด 5x5x5 ซม. และทำการบ่มเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์

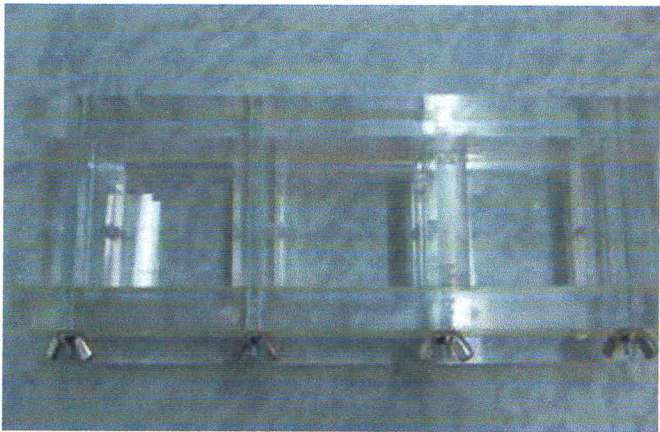
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10, 12, 15 และ 18 โมลาร์

ตัวอย่าง	FBC (g)	Al(OH) ₃ (g)	WG* (g)	NaOH (g)
100-FBC (100 % FBC)	40	-	40	20
95 FBC (95 FBC : 5 Al)	38	2	40	20

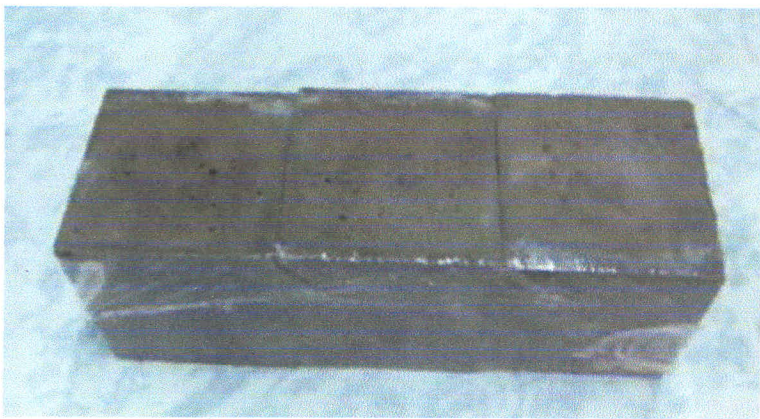
*WG คือสารละลายโซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพสต์



รูปที่ 3.2 แบบหล่อมอร์ตาร์พลาสติกขนาด 5x5x5 ซม.



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์

3.4.2. เตรียมอีโพลีเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ

เตรียมอีโพลีเมอร์เพสต์เพื่อศึกษาด้านการเกิดปฏิกิริยา, โครงสร้างจุลภาคของอีโพลีเมอร์ และสัณฐานวิทยาโดย X-ray diffraction (XRD) โดยใช้เถ้าลอย ผงอะลูมิเนียม สารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ (ของแข็ง/สารทั้งหมด = 0.4) ดังแสดงอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2 ทำการเตรียมดังนี้

- 1. ผสมส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องผสมมือ โดยผสมของแข็งให้เข้ากันก่อน จากนั้นจึงเติมสารละลาย
- 2. ใส่ลงในแบบหล่อเพสต์พลาสติก แล้วหุ้มด้วยพลาสติกใส นำไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C นาน 24 ชั่วโมง
- 3. จากนั้นแกะออกจากแบบหล่อ ใส่ในถุงซิปปนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 °C นาน 7 วัน
- 4. นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมอีโพลีเมอร์จากเถ้าลอย FBC ผสมผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ

ตัวอย่าง	FBC (g)	Al(OH) ₃ (g)	WG (g)	NaOH (g)
100 FBC	40	-	40	20
97.5 FBC	39	1	40	20
95 FBC	38	2	40	20

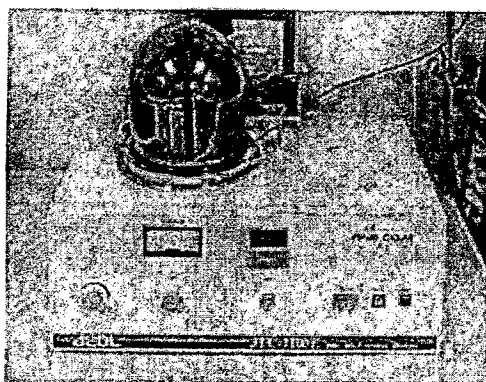
*WG คือสารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.5 การศึกษาโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์โดยใช้เทคนิค Fourier Infrared Spectrometer (FT-IR)

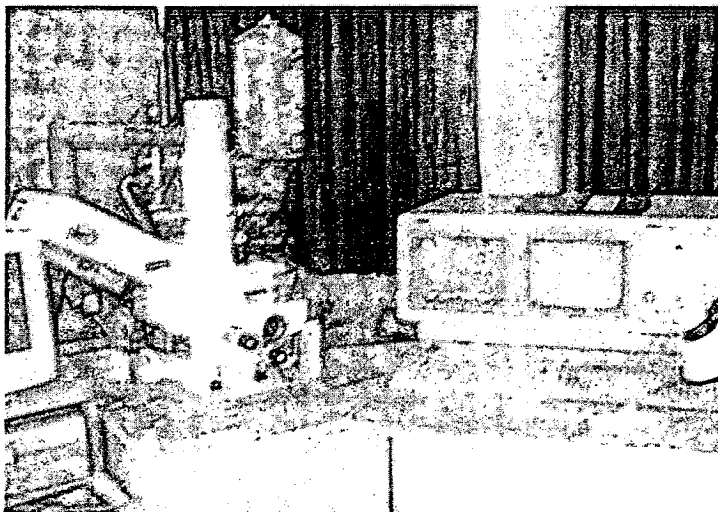
1. นำจีโอโพลิเมอร์เพสต์มาบดในโกร่งบดสาร (Mortar agate)
2. ชั่งจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ตัวอย่างละ 0.001 กรัมใส่ลงในขวดไวโอล
3. นำโพแทสเซียมโบรไมด์ไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้ว เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์
4. นำจีโอโพลิเมอร์เพสต์และโพแทสเซียมโบรไมด์ บดรวมกันในโกร่งบดสาร
5. นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบซิลิกาด้วยเครื่อง Fourier Infrared Spectrometer (FT-IR) ที่ใช้เลขคลื่น (Wave number) ในช่วง 4000-400 cm^{-1} ค่าการแยก (Resolution) เท่ากับ 4 จำนวนครั้งที่สแกน (Number of scan) เท่ากับ 4

3.6 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากแก้วลอยโดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ถูกทำให้แตกจนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร นำไปติดบนแท่งติดตัวอย่าง หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการเคลือบตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Sputter Coater และถ่ายภาพจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากแก้วลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.4 เครื่อง Iron sputtering device



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7 การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง X-ray diffraction เพื่อตรวจหาผลึกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยอาศัยสมบัติการกระเจิงแสงของอนุภาค เมื่อได้รับรังสีเอ็กซ์ที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงสูง แทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึกซึ่งประกอบด้วยอนุภาคเรียงตัวกัน อนุภาคจะกระเจิงลำแสงและหักเหลำแสงไปเป็นมุม 2θ โดยนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เป็นบดเป็นผงมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

3.8 การศึกษาร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on ignition, LOI)

ชั่งถ้วยคูลชิเบลด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง นำถ้ำลอย (หรือจีโอโพลิเมอร์เพสต์บด) ใส่ถ้วยคูลชิเบล 5 กรัม นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 ± 50 °C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากเผาทิ้งไว้อีก 30 นาที แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำไปหาน้ำหนักของสารที่เหลือ แล้วนำไปคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D7348-08

$$\% \text{ LOI} = \left[\frac{\text{น้ำหนักสารก่อนเผา} - \text{น้ำหนักสารหลังเผา}}{\text{น้ำหนักสารก่อนเผา}} \right] \times 100$$

3.9 การศึกษาดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (Degree of reaction, DOR) ของจีโอโพลิเมอร์เฟส

ทำการศึกษาเพื่อศึกษาปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นว่าละลายได้ทำปฏิกิริยาไปมากน้อยเพียงใด หลักการที่เกิดค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยา คือ 2 M HCl ใช้ในการละลายสารประกอบของแคลเซียมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันเหลือตะกอนที่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 และเถ้าที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (Unreacted ash) ส่วนสารละลาย 5% w/v Na_2CO_3 เติมลงไปเพื่อละลาย SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 เหลือเป็นตะกอนของเถ้าที่เกิดปฏิกิริยา โดยมีวิธีการศึกษาดังต่อไปนี้

1. นำจีโอโพลิเมอร์เฟสไปบดให้ละเอียด ชั่งให้น้ำหนักแน่นอนถึง 0.1 มิลลิกรัม ประมาณ 5 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
2. เติมสารละลาย 2 M HCl ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. นำไปตั้งที่เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C ให้ความร้อนเป็นเวลา 20 นาที คนตลอดเวลา
4. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง และอะซิโตน 1 ครั้ง
5. นำตะกอนไปอบต่อที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. หลังจากทำการอบแล้วนำตะกอนที่ได้ไปใส่บีกเกอร์ เติม 5% w/v Na_2CO_3 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
7. นำไปตั้งที่เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 20 นาที
8. กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง และอะซิโตน 1 ครั้ง
9. นำตะกอนไปอบต่อที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำตะกอนที่เหลือไปชั่งแล้วไปคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Degree of reaction} = \left[\frac{M_{\text{sample}} - (M_{\text{residue}} \cdot (1 + \text{LOI}))}{M_{\text{sample}}} \right] \times 100$$

M_{sample} คือ มวลของจีโอโพลิเมอร์เริ่มต้น (กรัม)

M_{residue} คือ มวลของจีโอโพลิเมอร์ที่เหลือ (กรัม)

LOI คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ผ่านการบด

3.10 การทดสอบความคงทนของจีโอโพลิเมอร์ในสภาวะเกลือและสภาวะกรด

การทดสอบความคงทนของจีโอโพลิเมอร์ในสภาวะเกลือและสภาวะกรด ทำได้โดยการเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ แคล่งในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 5 โดยปริมาตร เป็นเวลา 6 และ 9 เดือน เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจีโอโพลิเมอร์ในดินเค็ม และสภาวะน้ำทิ้งที่เป็นกรดหรือฝนกรด จากนั้นทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.11 การทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ในการทดสอบกำลังอัด จะใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งเตรียมแบบเดียวกันกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่มีการเติมทรายในขั้นตอนสุดท้ายของการผสม และแบบหล่อที่ใช้จะเป็นแบบหล่อพลาสติก ลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม ตามมาตรฐาน ASTM C-109 เครื่องทดสอบกำลังอัดโดยผลการทดสอบค่ากำลังอัดจะเป็นค่าเฉลี่ยของมอร์ตาร์ทั้ง 3 ก้อน