

ผลของ Na_2O SiO_2 และ H_2O ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ฐานแก้วลอย

นางสาวภัทรกมล ไชยภูมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF Na₂O SiO₂ AND H₂O ON PROPERTIES OF FLY ASH BASED
GEOPOLYMER

Miss Phattarakamon Chaiyapoom

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของ Na_2O SiO_2 และ H_2O ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ฐานเถ้าลอย
โดย	นางสาวภัทรมล ไชยภูมิ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	Professor Shigetaka Wada, D.Eng ดร.ปาจรรย์ ถาวรนิติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(Professor Shigetaka Wada, D.Eng)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.ปาจรรย์ ถาวรนิติ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จนา พรประเสริฐสุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)

ภัทรกมล ไชยภูมิ : ผลของ Na_2O SiO_2 และ H_2O ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ฐานเถ้า
 ลอย. (EFFECTS OF Na_2O SiO_2 AND H_2O ON PROPERTIES OF FLY ASH BASED
 GEOPOLYMER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ศิริพันธ์ แจ่มศิริเลิศ, อ.ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : Prof. Shigetaka Wada, D.Eng, ดร.ปาจารย์ ถาวรนิติ, 82
 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้สารตั้งต้นคือ
 เถ้าลอย เถ้าแกลบ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นหลัก
 โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณโซเดียมออกไซด์ เถ้าแกลบ (ซิลิกา) และน้ำ เพื่อดูความแตกต่าง
 ทางสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ กระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เริ่มจาก
 ละลายโซเดียมซิลิเกตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในน้ำกลั่น กวนผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมผง
 วัสดุคือเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบลงในสารละลายที่เตรียมไว้ กวนผสมจนเข้ากันดี จากนั้นเท
 ของผสมที่ได้ลงในแม่แบบ ปิดฝาแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องหรือ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48
 ชั่วโมง หลังจาก 7 วันแล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่อไป ผลการทดลองพบว่า ในระบบที่ใช้สาร
 ตั้งต้นเป็นเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมซิลิเกต เมื่อผสมผงวัสดุเข้ากับสารละลายและ
 กวนผสมแล้ว ของผสมมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ไม่สามารถเทออกมาใส่แม่แบบได้ ดังนั้น
 ผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการทดลองวัดค่าความแข็งแรงและสมบัติอื่นๆ ต่อ เมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นเถ้า
 ลอย-สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีการไหลตัวที่ดี เมื่อนำ
 จีโอพอลิเมอร์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติพบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโซเดียมออกไซด์จาก
 0.5 ไปเป็น 1.0 โมล ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ
 โซเดียมออกไซด์ จาก 1.0 เป็น 1.5 โมล จะทำให้ความแข็งแรงลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้า
 แกลบ (ซิลิกา) ส่งผลให้ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อสัดส่วนของน้ำเพิ่มขึ้น
 ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์จะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างจากอุณหภูมิห้อง
 ไปเป็น 60 องศาเซลเซียส พบว่าทำให้สามารถสังเกตเห็นผลของโซเดียมออกไซด์ ซิลิกา และ
 น้ำที่มีต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ได้ชัดเจนขึ้น

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิติ.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเซรามิก.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5272469123 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : GEOPOLYMER / FLY ASH / RICE HUSK ASH

PHATTARAKAMON CHAIYAPOOM : EFFECTS OF Na_2O SiO_2 AND H_2O ON PROPERTIES OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER. ADVISOR : ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., CO-ADVISOR : PROF. SHIGETAKA WADA, D.Eng, PARJAREE THAVORNITI, Ph.D., 82 pp.

In this work, fly ash, rice husk ash, sodium hydroxide and sodium silicate were used as raw material for making geopolymer. The samples were prepared by mixing fly ash and activator: sodium hydroxide (NaOH) or sodium silicate (Na_2SiO_3) at the various proportions of Na_2O , SiO_2 and H_2O content. After mixing, the mixtures were casted in a mold and left to harden for 48 hr at room temperature or 60°C and further cured for 7 days. When geopolymer from fly ash and sodium silicate was prepared, the paste of geopolymer was harden suddenly after mixing and could not pour into mold. Therefore, others properties of geopolymer in this system were not be measured. In fly ash – sodium hydroxide system, results showed that the amount of Na_2O , SiO_2 and H_2O content had an effect on the properties of geopolymer. An increasing of Na_2O mole from 0.5 to 1.0 resulted in strength development. However, when Na_2O ratio was higher than 1.0, the strength of specimens decreased. The strength of geopolymer was increased as the amount of SiO_2 increased. The strength decreased with an increase in H_2O mole ratio. Curing temperature also affects the properties of geopolymer. When geopolymer was cured at room temperature, the effects of adding Na_2O , SiO_2 and H_2O on properties of geopolymer do not represent clearly. However, after cured at 60°C , the effect of adding these oxides could show obviously.

Department : Materials Science..... Student's Signature

Field of Study : Ceramic Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011..... Co-advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ Professor Shigetaka Wada, D.Eng และดร.ปาจารย์ ถาวรนิติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับ คำแนะนำ คำชี้แนะ ช่วยแก้ไขปัญหา ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ แนวทางการดำเนินงานวิจัย และแนวคิดที่ดีต่อการทำงานวิจัยและการดำเนินชีวิต ตลอดจนมอบโอกาสและประสบการณ์ที่ดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่า มาให้ความรู้ คำชี้แนะรวมทั้งการตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ และ ผศ.ดร. นิศานาถ ไตรผล ภาควิชา วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ ความรู้ และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ของ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals and Advanced Materials) ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ ดร.อภิรัฐ ธีรภาพวิเศษพงษ์ คุณวิระพงษ์ ครอบนอม คุณธนากร เทพามาตย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือและแนะนำการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือในการทำทดลอง แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้าย กราบขอบพระคุณครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 จีโอพอลิเมอร์.....	3
2.2 แก้วลอยหรือแก้วถ่านหิน.....	6
2.3 แก้วแกลบ.....	7
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	10
3.1 สารเคมีและวัสดุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	10
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	10
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบ.....	11
3.3.1 การเตรียมแก้วแกลบจากแกลบสด.....	11
3.4 แผนผังการทดลอง.....	12
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์วัสดุดิบ.....	14
3.5.1 แก้วลอย.....	14
3.5.2 แก้วแกลบ.....	14
3.6 การออกแบบการทดลอง.....	15
3.7 วิธีการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์.....	18

3.8 การวิเคราะห์สมบัติของจีโอพอลิเมอร์.....	18
3.8.1 ตรวจสอบเฟสของจีโอพอลิเมอร์.....	18
3.8.2 ทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Bending strength)	19
3.8.3 ทดสอบความต้านทานแรงกดแตก (Compressive strength)	19
3.8.4 ตรวจสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ	19
3.8.5 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	21
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ.....	21
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแก้วลอย	21
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแก้วกลบ.....	26
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของจีโอพอลิเมอร์	28
4.2.1 ผลการตรวจสอบเฟสของจีโอพอลิเมอร์.....	28
4.2.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง	36
4.2.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดแตก.....	42
4.2.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ.....	48
4.2.5 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	82

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของส่วนประกอบออกไซด์โดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและ สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้น	15
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้โดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและสารละลาย โซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้น.....	15
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของส่วนประกอบออกไซด์โดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ และ Na ₂ O	16
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้โดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและ Na ₂ O	17
ตารางที่ 3.5 สัดส่วนของส่วนประกอบออกไซด์โดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ แก้วกลม.....	17
ตารางที่ 3.6 สัดส่วนของส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้โดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ที่มี แก้วลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยน ปริมาณแก้วกลม	18
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย.....	22
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคแก้วลอย.....	25
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วกลม	27

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์.....	5
ภาพที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์เทียบกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	5
ภาพที่ 3.1 แผนผังการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์.....	13
ภาพที่ 4.1 XRD ของแก้วลอย.....	21
ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของแก้วลอย.....	23
ภาพที่ 4.3 SEM แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแก้วลอยที่กำลังขยายต่างๆ.....	24
ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบ DTA/TG ของแก้วลอย.....	26
ภาพที่ 4.5 XRD ของแก้วเคลบ.....	26
ภาพที่ 4.6 การกระจายขนาดอนุภาคของแก้วเคลบ.....	27
ภาพที่ 4.7 XRD ของตัวอย่างที่ใช้สารตั้งต้นเป็นแก้วลอยและสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	29
ภาพที่ 4.8 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	30
ภาพที่ 4.9 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่ 60 °C.....	31
ภาพที่ 4.10 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na ₂ O บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	32
ภาพที่ 4.11 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na ₂ O บ่มที่ 60 °C.....	33
ภาพที่ 4.12 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	34
ภาพที่ 4.13 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลบ บ่มที่ 60 °C.....	35
ภาพที่ 4.14 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	37
ภาพที่ 4.15 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่ 60 °C.....	38
ภาพที่ 4.16 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na ₂ O บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	39
ภาพที่ 4.17 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na ₂ O บ่มที่ 60 °C.....	39
ภาพที่ 4.18 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	41

ภาพที่ 4.39 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำบ่มที่ 60 °C.....	58
ภาพที่ 4.40 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na ₂ O บ่มที่อุณหภูมิห้อง	59
ภาพที่ 4.41 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na ₂ O บ่มที่ 60 °C.....	59
ภาพที่ 4.42 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้ากลบบ่มที่อุณหภูมิห้อง....	60
ภาพที่ 4.43 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้ากลบบ่มที่ 60 °C.....	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ทั่วโลกได้มีการตระหนักถึงการลดการใช้พลังงานเนื่องจากปัญหาทางสิ่งแวดล้อมจากภาวะเรือนกระจก กระบวนการอุตสาหกรรมในหลายๆ สาขาได้พยายามลดการใช้พลังงานโดยการเปลี่ยนสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ ปรับเปลี่ยนวิธีการผลิต หรือนำของเสียหรือของเหลือทิ้งกลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นใหม่ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ก็เช่นกัน ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ คิดค้นหาวัสดุทดแทนที่สามารถนำมาแทนที่ หรือช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์มีการใช้พลังงานที่สูงมาก หนึ่งในวัสดุที่มีการคิดค้นพัฒนาเพื่อการนี้ก็คือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ แบบอสัณฐาน โดยมี $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ จับกันไปมาเป็นโมเลกุลลูกโซ่คล้ายพอลิเมอร์ เมื่อผงอะลูมิโนซิลิเกตถูกผสมกับสารละลายแอลคาไลน์และกระตุ้นด้วยความร้อน จะเกิดเป็นของเหลวและเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีเวลาไม่เพียงพอให้โครงสร้างผลึกเกิดการเติบโตอย่างสมบูรณ์ได้หลังจากก่อตัวและแข็งตัวแล้ว จะให้สมบัติเชิงกลที่ดี สามารถรับแรงอัดได้

จีโอพอลิเมอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การนำไปใช้ในงานก่อสร้างงานคอนกรีต นำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากการเผาซิลิกา อะลูมินาและแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1400-1600 °C มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก นอกจากนี้ยังมีกระบวนการบดย่อย การลำเลียงวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานทั้งสิ้น แต่ในกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์อาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นโดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 °C ก็สามารถก่อตัวและแข็งตัวรับกำลังอัดได้ภายในเวลาอันรวดเร็ว นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ยังมีการนำไปใช้งานด้านเซรามิกขั้นสูงเป็นอิฐทนไฟ ตลอดจนอุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น

สารตั้งต้นที่นิยมนำมาผลิตจีโอพอลิเมอร์ต้องเป็นสารที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก ซึ่งได้แก่ ดินเคโอลินเผา (metakaolin) เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินที่เป็นผลพลอยได้จาก

กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานความร้อน แก้วแกลบที่ได้จากการเผาแกลบสดซึ่งเป็นของเหลือทิ้งของอุตสาหกรรมการเกษตร เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้สารตั้งต้นเป็นแก้วลอย และแก้วแกลบเป็นหลัก เพื่อให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีค่าความแข็งแรงสูง สามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไปและเป็นการลดปริมาณของเสียจากภาคอุตสาหกรรมอีกทางหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งและกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม
- เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์และสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาสมบัติต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแตกต่างของปริมาณออกไซด์ตั้งต้น ได้แก่ ปริมาณโมลของ Na_2O ปริมาณโมลของ SiO_2 และปริมาณโมลของ H_2O ที่เติมลงไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากแก้วลอยและแก้วแกลบที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอพอลิเมอร์

ในปัจจุบันในวงการก่อสร้างมักนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กันอย่างแพร่หลาย⁽¹⁻²⁾ เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัตถุดิบหลักของคอนกรีตและมอร์ตาร์ กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เริ่มจากการเผาซิลิกา อะลูมินาและแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1400-1600 °C แล้วนำมาบดให้ละเอียด ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตต้องใช้พลังงานสูงมาก มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลกระทบดังกล่าว จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุพอลิซิลิเกตที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้เป็นวัสดุทดแทน หรือนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งทำให้คอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่ได้มีคุณสมบัติเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งหนึ่งในวัสดุทดแทนนี้ก็คือ จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสังเคราะห์อะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างอสัณฐาน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารประกอบจีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Victor Glukhovsky และ Pavel Krivenko⁽³⁻⁴⁾ จากยูเครน ในปีค.ศ.1950 จากนั้นในปี 1972 Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้ให้คำนิยามของจีโอพอลิเมอร์เป็นครั้งแรก กล่าวคือ จีโอพอลิเมอร์เป็นสารอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างสามมิติ ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำภายในระยะเวลาอันสั้นด้วยสารอะลูมิโน-ซิลิเกตในธรรมชาติ

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย Sialate(silicon-oxo-aluminate) network ซึ่งประกอบด้วย SiO_4 และ AlO_4 จับกันไปมาเป็นโมเลกุลลูกโซ่คล้ายพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยมีการใช้อะตอมของออกซิเจนร่วมกัน ไอออนบวก เช่น Na^+ , K^+ และ Ca^+ จะเข้าไปอยู่ในช่องว่างของโครงสร้างเพื่อทำให้เกิดความสมดุลกับประจุลบของ Al^{3+} Poly(sialates) จะจับกันเป็นลูกโซ่และวงแหวนพอลิเมอร์ด้วย Si^{4+} และ Al^{3+} ใน 4 ทิศทางกับอะตอมของออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีคือ $M_n(-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2)_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ ซึ่ง z คือจำนวนโมเลกุลของซิลิกา 1, 2 หรือ 3 M คือ ธาตุแอลคาไลน์ เช่น K^+ หรือ Na^+ n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่ และ w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

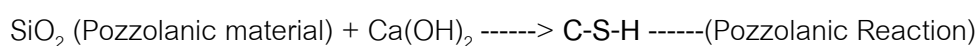
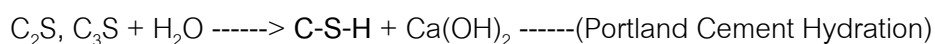
ลักษณะของโมเลกุลลูกโซ่หรือโครงข่ายของจีโอพอลิเมอร์มักประกอบด้วยหน่วยโมเลกุลดังต่อไปนี้⁽⁴⁾

- -Si-O-Si-O- siloxo, poly(siloxo)
- -Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate)
- -Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)
- -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo)
- -P-O-P-O- phosphate, poly(phosphate)
- -P-O-Si-O-P-O- phospho-siloxo, poly(phospho-siloxo)
- -P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly(phospho-sialate)
- -(R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone

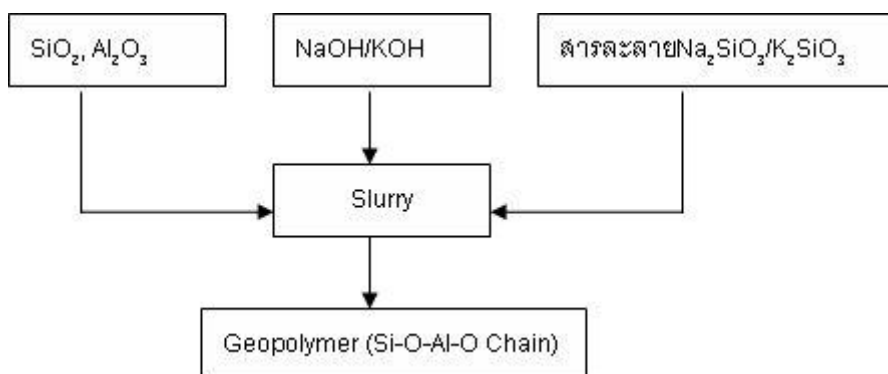
จีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 9 กลุ่มใหญ่ๆ ตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์ดังนี้

- 1) Water glass-based geopolymer, poly(siloxonate), soluble silicate, Si:Al=1:0
- 2) Kaolinite / Hydrosodalite-based geopolymer, poly(sialate) Si:Al=1:1
- 3) Metakaolin MK-750-based geopolymer, poly(sialate-siloxo) Si:Al=2:1
- 4) Calcium-based geopolymer, (Ca, K, Na)-sialate, Si:Al=1, 2, 3
- 5) Rock-based geopolymer, poly(sialate-multisiloxo) $1 < \text{Si:Al} < 5$
- 6) Silica-based geopolymer, sialate link and siloxo link in poly(siloxonate) Si:Al>5
- 7) Fly ash-based geopolymer
- 8) Phosphate-based geopolymer
- 9) Organic-mineral geopolymer

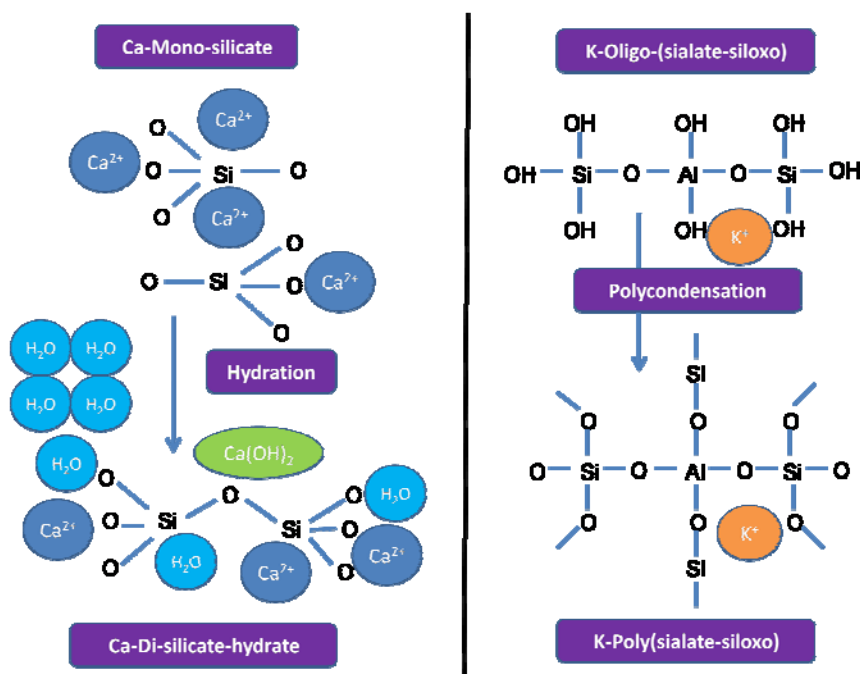
การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์แตกต่างจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเห็นได้ชัด โดยการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเกิดผลผลิตเป็นสารเชื่อมประสานหลัก คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัด และเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองร่วมด้วย ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างของปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นและความแข็งแรงมากขึ้น



ส่วนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์จะเริ่มจากวัตถุดิบจากธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของซิลิกาเกต อะลูมินา และออกซิเจนถูกละลายโดยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงดังภาพที่ 2.1⁽²⁾ เพื่อให้เกิดการแตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นดังภาพที่ 2.2⁽²⁾ โดยปกติแล้วมักใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาควบคู่ไปด้วย



ภาพที่ 2.1 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์



ภาพที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์เทียบกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ปฏิกิริยา geopolymerisation ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน⁽⁵⁻⁷⁾ คือ

- 1) การละลายของ Si และ Al ออกจากสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ในสารละลายเข้มข้นของอัลคาไลน์
- 2) การเกิด oligomer ซึ่งประกอบด้วยพันธะของ Si-O-Si หรือ Si-O-Al
- 3) การเกิด polycondensation ของ oligomer เพื่อเกิดเป็นโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตแบบ 3 มิติ
- 4) การจับพันธะกันของอนุภาคของแข็งที่ไม่เกิดการละลาย ไปเป็นโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์และเกิดการแข็งตัวของระบบไปสู่โครงสร้างสุดท้ายของพอลิเมอร์ของแข็ง

ผลผลิตจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถนำไปใช้ได้ในงานที่หลากหลาย เช่น ใช้ในงานก่อสร้าง งานคอนกรีตและมอร์ตาร์ ด้านเซรามิกชั้นสูงเป็นอิฐทนไฟ อุตสาหกรรมไฟฟ้า และงานตกแต่ง เป็นต้น

สารตั้งต้นที่นิยมนำมาผลิตจีโอพอลิเมอร์ต้องเป็นสารที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก⁽⁸⁾ ซึ่งได้แก่ ดินเคโอลินเผา (metakaolin) เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานความร้อน^(6,9) เถ้ากลบที่ได้จากการเผาถ่านหินซึ่งเป็นเรื่องของเหลือทิ้งของอุตสาหกรรมถ่านหิน เป็นต้น

2.2 เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน

ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน⁽¹⁰⁻¹¹⁾ มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์และน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ถ่านหินลิกไนต์เมื่อมีการเผาไหม้สันดาปกับแก๊สออกซิเจนแล้วจะเกิดเป็นแก๊สของเสีย คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้คือ ขี้เถ้า แบ่งเป็น ยิปซัมสังเคราะห์ เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยและเถ้าหนัก ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้จะเกิดวันละเอียดของขี้เถ้าลอยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งจะถูกรดักจับไว้ด้วยตัวดักจับ ซึ่งเป็นไฟฟ้าสถิต แล้วรวบรวมบ่มไว้ที่ไซโล ในการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ประมาณวันละกว่า 40,000 ตัน⁽¹²⁾ จะได้เถ้าถ่านออกมาประมาณ 10,000 ตัน โดยเป็นเถ้าลอยประมาณ 8,000 ตัน แต่เดิมเถ้าลอยนับเป็นของเสียจากกระบวนการผลิต ทางโรงไฟฟ้าต้องมีการลำเลียงไปทิ้งเป็นจำนวนมาก แต่ปัจจุบันได้มีการคิดค้นวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มมูลค่าในเชิงอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ให้แก่เถ้าลอย การนำเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบันมีทั้งเป็นส่วนผสมของซีเมนต์ในงานคอนกรีต สร้างเขื่อน

นำไปผสมซีเมนต์เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคา ท่อสำเร็จรูป พื้นสำเร็จรูป ท่อ บำบัดน้ำเสีย อีฐตัวหนอน ใช้เป็นฐานในการทำถนน เป็นต้น

เถ้าลอยลิกไนต์มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน คือวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินา เป็น องค์ประกอบหลัก⁽¹³⁾ โดยทั่วไปมีสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม หรือ เทา-น้ำตาล ถึง น้ำตาลแดง หรือน้ำตาลเหลือง⁽¹⁴⁾ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน วิธีการเผาและอุณหภูมิขณะเผาถ่านหิน มีลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลม ขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 200 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยอัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดและสีของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน วิธีการเผาและอุณหภูมิขณะเผาถ่านหิน

ตามมาตรฐาน ASTM C-618⁽¹⁵⁾ ได้มีการแบ่งประเภทของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอย class F และเถ้าลอย class C โดยความแตกต่างของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณ องค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์เป็นหลัก เถ้าลอย class F จะมีปริมาณซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปแล้ว เถ้าลอย class F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ ส่วนเถ้าลอย class C จะมีปริมาณออกไซด์ทั้งสามชนิดนี้ที่ประมาณ 50-70% โดยน้ำหนัก มีปริมาณ CaO สูง จึงมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เรียกอีกอย่างว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง

การพบว่าเถ้าลอยจากแหล่งเดียวกันมีทั้งแบบที่เป็น class C และ class F นั้นถือว่าเป็นเรื่องปกติ เนื่องจากถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้นั้นเป็นวัสดุจากธรรมชาติ จึงมีความ หลากหลายทางด้านองค์ประกอบของวัตถุดิบ

2.3 เถ้าแกลบ

ในปัจจุบัน แม้ว่าข้าวจะไม่ใช้สินค้าหลักที่ส่งออกนํารายได้เข้าประเทศดังเช่นในอดีต⁽¹⁶⁾ แต่ประเทศไทยก็ยังคงเป็นหนึ่งในผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก เมื่อนํ้าข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวได้มา ผ่านกระบวนการสี แยกเมล็ดข้าวออกจากเปลือกข้าว วัสดุเหลือทิ้งที่เราได้ก็คือ เปลือกข้าวหรือ แกลบ ซึ่งแกลบนี้จะมีน้ำหนักประมาณ 22.5-25.2% ของข้าวเปลือก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณ แกลบเหลือทิ้งนี้มีมากมายเพียงใดเมื่อเทียบกับผลผลิตข้าวที่ได้ เนื่องจากแกลบมีราคาถูก หาง่าย จึงมักถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3,880 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม เมื่อนํ้าไปเทียบกับค่าความร้อนเฉลี่ยของไม้ฟืนที่ 4,475 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันไม่มากนัก แต่ปริมาณซีเถ้าที่ได้จากการเผาแกลบจะมีปริมาณมากกว่าซีเถ้าของไม้ฟืนถึง 7 เท่า

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้วแกลบ พบว่าประกอบด้วยซิลิกาสูงถึง 70-90% โดยน้ำหนัก ซิลิกาในแก้วแกลบมีทั้งแบบที่เป็น ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่ไม่มีรูปร่างผลึก ซิลิกาผลึกยังสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามลักษณะรูปร่างของผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว

เนื่องจากแก้วแกลบมีความพรุนตัวสูง มีน้ำหนักเบา และมีพื้นที่ผิวมาก จึงมีสมบัติในการดูดซับสูง นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นฉนวนอีกด้วย แก้วแกลบจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในอุตสาหกรรมโลหะใช้โรยลงบนผิวหน้าแอ่งรองรับน้ำโลหะเพื่อป้องกันการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเหล็ก ในอุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีตใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต ใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา ใช้ผลิตอิฐทนไฟ เป็นต้น และเนื่องจากแก้วแกลบมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งให้ซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุซีโอพอลิเมอร์ได้อีกด้วย

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ P. D. Silva และ K. S. Crenstil⁽¹⁷⁾ ได้ศึกษาถึงสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ที่ส่งผลต่อระบบของซีโอพอลิเมอร์ โดยทำการทดลองที่สัดส่วน Na_2O เป็น 0.7 1.0 และ 1.4 สัดส่วนของ Al_2O_3 เป็น 0.6, 1.0 และ 1.2 สัดส่วนของ SiO_2 เป็น 2.5, 3.0 และ 3.8 และสัดส่วนของ H_2O เป็น 13.6 ใช้สารตั้งต้นเป็นดินเกาลินเผาที่ได้จากการเผาดินขาวเกาลินไฮเดียมไฮดรอกไซด์และไฮเดียมซิลิเกต เตรียมโดยการละลายเกล็ดไฮเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายไฮเดียมซิลิเกต เติมน้ำลงไปตามสัดส่วนที่กำหนด ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องก่อนจะเติมเมตะเกาลินลงไปผสม จากนั้นหล่อขึ้นรูปในภาชนะทรงกระบอกขนาด 30 มม. x 50 มม. แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัด compressive strength โดยใช้ตัวอย่างที่บ่มเป็นเวลา 3, 53 และ 210 วัน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มจาก 3 วันเป็น 53 วัน ความแข็งแรงของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นสูงสุดและลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเวลาบ่มเป็น 210 วัน เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ Na_2O หรือลดสัดส่วน SiO_2 หรือ Al_2O_3 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นซีโอไลต์ (zeolite) ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างลดลง

S. Songpiriyakij⁽¹⁸⁾ และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เตรียมที่สัดส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ 100:0, 80:20, 60:40,

20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนัก เริ่มจากการผสมไซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายไซเดียมซิลิเกตเข้าด้วยกันก่อนแล้วทิ้งไว้หนึ่งคืนจนเย็นลงถึงอุณหภูมิห้องจึงเติมเถ้าลอย เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ลงไปผสม หล่อขึ้นรูปในแม่แบบทรงกระบอกขนาด 30 มม. x 60 มม. จากนั้นแบ่งบ่มที่อุณหภูมิห้อง 27 °C และอบในเตาอบที่ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดความต้านทานแรงกดแตกที่เวลา 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ผลการทดลองพบว่าที่สัดส่วนของ Na₂O ต่อ SiO₂ ระหว่าง 0.14 ถึง 0.23 และสัดส่วนของ Na₂O ต่อ Al₂O₃ ระหว่าง 2.21 ถึง 3.37 เมื่อลดสัดส่วนของ Na₂O ต่อ SiO₂ หรือลดสัดส่วนของ Na₂O ต่อ Al₂O₃ จะทำให้ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

S. Detphan และ P. Chindapasirt⁽¹⁹⁾ ทดลองเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเถ้าแกลบ โดยทำการผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นเวลา 2 นาทีจนได้สีที่สม่ำเสมอ จากนั้นจึงเติมไซเดียมไฮดรอกไซด์ ไซเดียมซิลิเกตและน้ำลงไปผสมต่ออีก 5 นาที หล่อขึ้นรูปในแม่แบบ 50 มม. x 50 มม. x 50 มม. บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6, 12, 18, 24, 48, 60 และ 72 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงได้จากการบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงและสัดส่วนของไซเดียมซิลิเกตต่อไซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 4.0 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสม เนื่องจากทำให้สัดส่วนของ SiO₂ ต่อ Al₂O₃ เพิ่มขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการผลิตจีโอพอลิเมอร์โดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นเป็นเถ้าลอยและเถ้าแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณภาพดีและเป็นการช่วยลดการกำจัดของเสียเหลือทิ้งอีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้งคือ แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง และแก้วเคลือบที่เตรียมจากเคลือบสลดเหลือทิ้งจากจังหวัดปทุมธานี เป็นการลดของเสียเหลือทิ้งสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นวัสดุใหม่ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้เน้นการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเป็นส่วนประกอบหลักในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยวัตถุดิบที่นำมาใช้มีดังนี้

- 1) แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 2) แก้วเคลือบจากจังหวัดปทุมธานี
- 3) เกล็ด Sodium Hydroxide (NaOH) 97% ของบริษัท Ajax finechem
- 4) Sodium Silicate Solution (Na_2SiO_3) ของบริษัท Chem min ประกอบด้วย SiO_2 25.5 wt% Na_2O 11.0 wt% และ H_2O 63.5 wt%

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

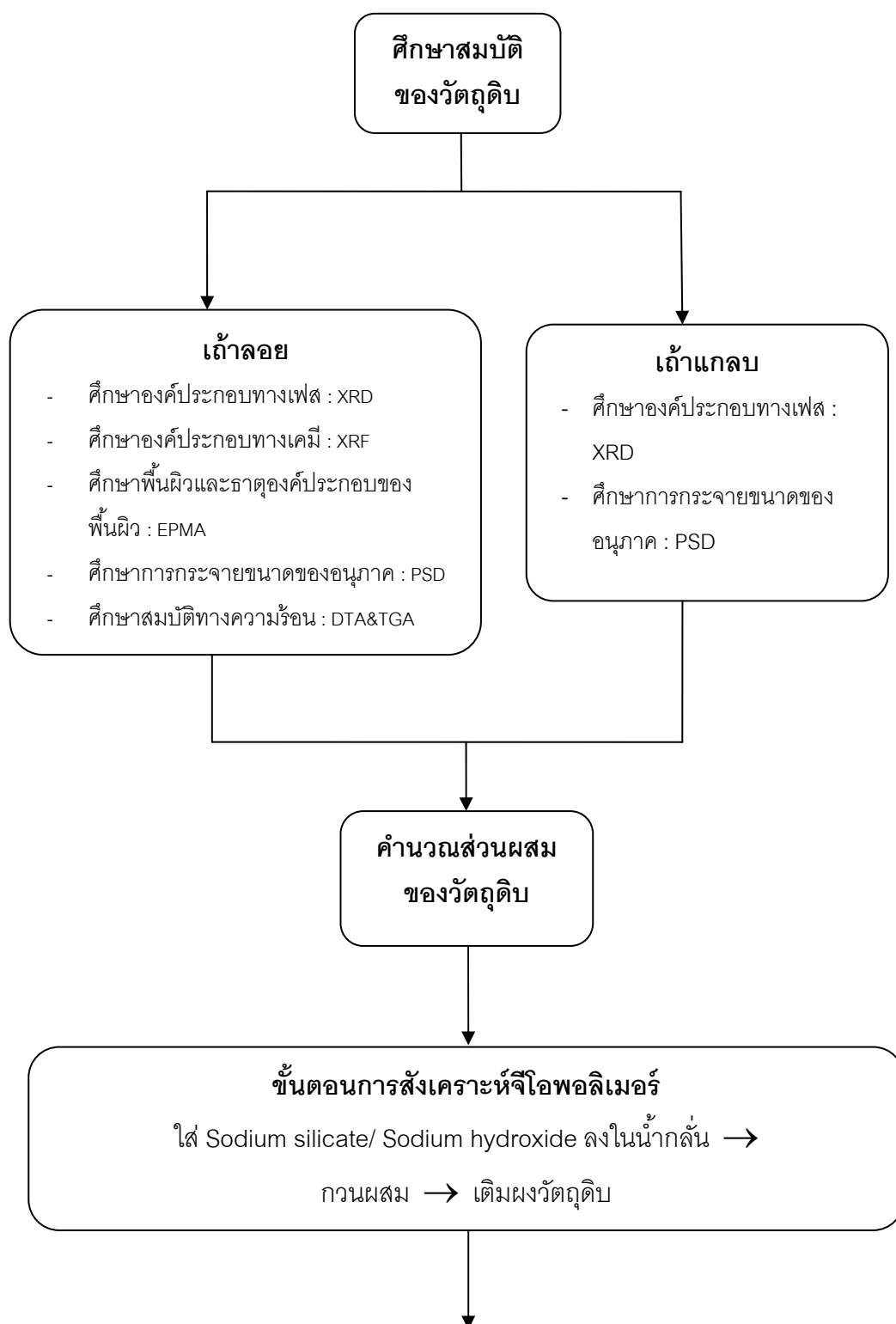
- 1) ปีกเกอร์พลาสติก
- 2) ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 100 120 และ 325 เมช
- 3) ใบบายสำหรับคนสาร
- 4) ถุงพลาสติก
- 5) ช้อนตักสาร
- 6) แม่แบบกล่องพลาสติก
- 7) แม่แบบโลหะขนาด 50 มม. X 50 มม. X 50 มม.
- 8) ถุงมือยาง
- 9) เครื่องชั่ง
- 10) ตู้อบ

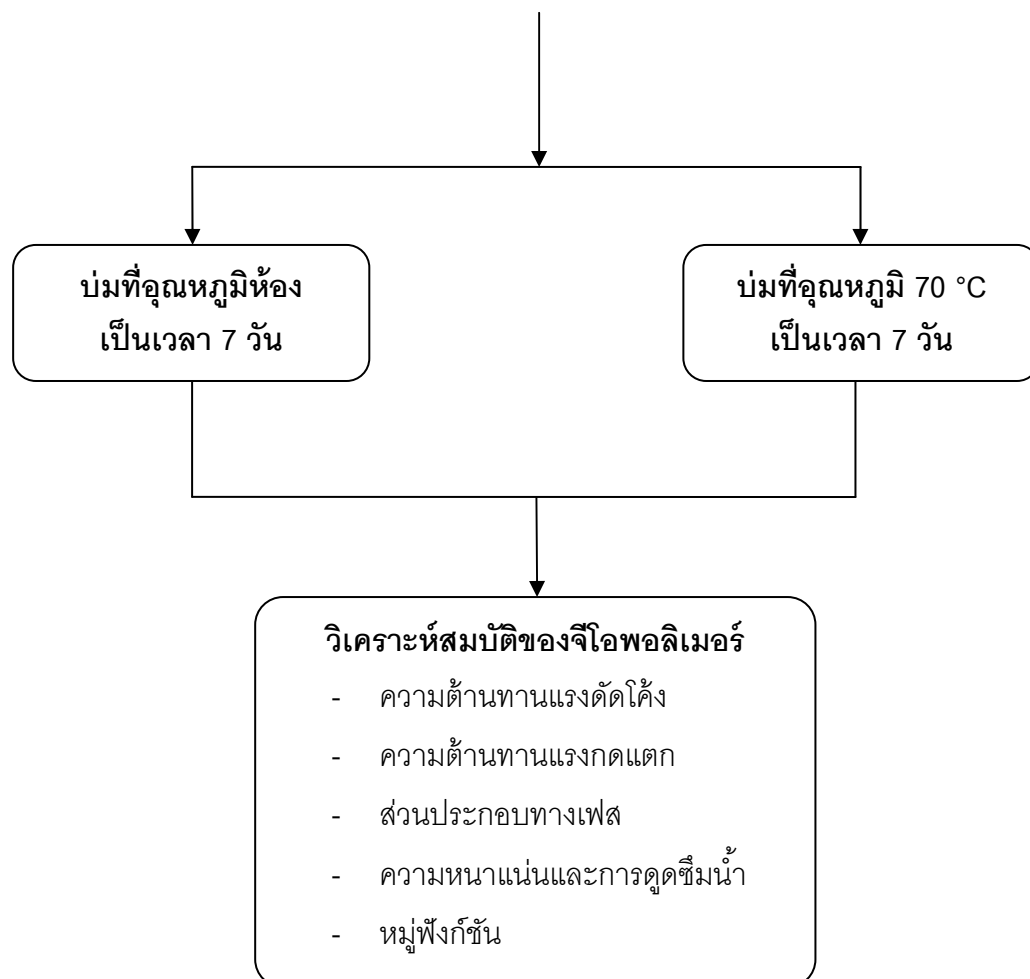
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบ

3.3.1 การเตรียมเถ้าแกลบจากแกลบสด

นำแกลบสดจากจังหวัดปทุมธานีไปทำการเผาครั้งแรกในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เถ้าแกลบสีดำ จากนั้นนำเถ้าแกลบที่ได้ไปเผาครั้งที่สองในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เถ้าแกลบสีขาวเทา จากนั้นนำไปบดในเครื่องบด Planetary mill เป็นเวลา 1-2 นาทีจึงได้ผงเถ้าแกลบที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.4 แผนผังการทดลอง





ภาพที่ 3.1 แผนผังการสังเคราะห์อีพอกซีโพลีเมอร์

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์วัสดุดิบ

3.5.1 ถ้ำลอย

- 1) ตรวจสอบเฟสของผงถ้ำลอย โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) (Bruker, D8 Advance)
- 2) ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยและปริมาณของแร่ที่มี ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) (Bruker AXS, S8 Tiger)
- 3) ตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคถ้ำลอย ถ้ำกลมและกากอะลูมิเนียมในน้ำและ เอทานอล โดยใช้เทคนิค Laser Light Scattering ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (Malvern Instrument 2000)
- 4) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงถ้ำลอย โดยใช้เทคนิคการส่องกราดของอิเล็กตรอนด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL, JSM-6480LV)
- 5) ตรวจสอบพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบของพื้นผิวอนุภาคถ้ำลอย โดยใช้เทคนิค Wavelength dispersive ด้วยเครื่อง Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) (JEOL, JXA 8100)
- 6) ตรวจสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของถ้ำลอยด้วยเครื่อง Differential Thermal Analyzer (DTA) และเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) (NETZSCH, STA 409 C/CD)

3.5.2 ถ้ำกลม

- 1) ตรวจสอบเฟสของผงถ้ำกลม โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) (Bruker, D8 Advance)
- 2) ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกลมและปริมาณของแร่ที่มี ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) (Bruker AXS, S8 Tiger)
- 3) ตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคถ้ำกลมในน้ำและเอทานอล โดยใช้เทคนิค Laser Light Scattering ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (Malvern Instrument 2000)

3.6 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะใช้วัตถุดิบคือ เถ้าลอยและเถ้าแกลบ โดยจะแยกการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ใช้สารตั้งต้นเป็นผงเถ้าลอยผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ส่วนที่ 2 ใช้สารตั้งต้นเป็นเถ้าลอยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

คำนวณสูตรของสัดส่วนออกไซด์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากวัตถุดิบตั้งต้นเป็นเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมซิลิเกต (ส่วนที่ 1) ได้ดังตารางที่ 3.1 และสัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของส่วนประกอบออกไซด์โดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้น

สูตร	ส่วนประกอบออกไซด์ (สัดส่วนโดยโมล)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	H ₂ O
SS1	4.30	0.81	1.0	17.63
SS2	5.04	0.57	2.0	13.86
SS3	6.03	0.87	1.0	20.02
SS4	6.81	1.12	1.0	23.95

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้โดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้น

สูตร	น้ำหนักวัตถุดิบ (กรัม)		
	เถ้าลอย	สารละลายโซเดียมซิลิเกต	น้ำกลั่น
SS1	100	25.6	55.6
SS2	62	51.2	30.0
SS3	100	51.2	60.0
SS4	100	38.4	60.0

หมายเหตุ 1. SS หมายถึงตัวอย่างที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้น

2. การกำหนดสัดส่วนของออกไซด์และวัตถุดิบในตารางที่ 3.1 และ 3.2 เริ่มจากกำหนดสัดส่วนของออกไซด์ที่ Na₂O = 1.0 โมล และ H₂O = 17.63 โมล (สัดส่วน H₂O แรกเริ่มกำหนดไว้ที่ 13.0 โมล แต่ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตก็มี H₂O อยู่ด้วย สุดท้ายจึงรวมได้

สัดส่วน H_2O ที่ 17.63 โมล) คือสูตร SS1 แล้วจึงคำนวณเป็นน้ำหนักของวัตถุดิบได้น้ำหนักของวัตถุดิบ SS1 ดังตารางที่ 3.2 จากนั้นกำหนดสูตร SS2 โดยกำหนดปริมาณเถ้าลอยที่ 100 กรัม (แต่เนื่องจากหลังเติมผงเถ้าลอยลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกตพบว่า มีความหนืดมาก สามารถเติมผงเถ้าลอยสูงสุดที่ 62 กรัม และไม่สามารถเติมผงวัตถุดิบลงไปได้อีก) กำหนดปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็น 2 เท่า และปริมาณน้ำกลั่นเป็น $\frac{1}{2}$ เท่าของสูตร SS1 สูตร SS3 ปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำเป็น 2 เท่าของสูตร SS2 และสูตร SS4 ปรับเปลี่ยนปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตให้อยู่ระหว่าง 25.6 และ 38.4 กรัม จากนั้นจึงคำนวณสัดส่วนโดยโมลของออกไซด์ของสูตรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3.1

คำนวณสัดส่วนตั้งต้นของออกไซด์ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากวัตถุดิบตั้งต้นเป็นเถ้าลอยและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ส่วนที่ 2) ได้ดังตารางที่ 3.3 และ 3.5 โดยตารางที่ 3.3 เป็นสูตรที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและ Na_2O ส่วนตารางที่ 3.5 เป็นสูตรที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้ากลบ สามารถคำนวณเป็นน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ได้ดังตารางที่ 3.4 และ 3.6 โดยตารางที่ 3.4 เป็นสูตรที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและ Na_2O ส่วนตารางที่ 3.6 เป็นสูตรที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้ากลบ

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของส่วนประกอบออกไซด์โดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและ Na_2O

สูตร	ส่วนประกอบออกไซด์ (สัดส่วนโดยโมล)			
	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	H_2O
9.0H-1.0N	3.29	0.89	1.0	9.0
11.0H-0.5N	3.29	0.89	0.5	11.0
11.0H-1.0N	3.29	0.89	1.0	11.0
11.0H-1.5N	3.29	0.89	1.5	11.0
13.0H-1.0N	3.29	0.89	1.0	13.0
15.0H-1.0N	3.29	0.89	1.0	15.0
17.0H-1.0N	3.29	0.89	1.0	17.0
19.0H-1.0N	3.29	0.89	1.0	19.0
23.0H-1.0N	3.29	0.89	1.0	23.0

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้โดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและ Na_2O

สูตร	น้ำหนักวัตถุดิบ (กรัม)		
	แก้วลอย	Sodium hydroxide	น้ำกลั่น
9.0H-1.0N	100	13.03	27.42
11.0H-0.5N	100	5.55	36.10
11.0H-1.0N	100	13.03	36.10
11.0H-1.5N	100	20.52	36.10
13.0H-1.0N	100	13.03	42.93
15.0H-1.0N	100	13.03	47.65
17.0H-1.0N	100	13.03	54.39
19.0H-1.0N	100	13.03	61.14
23.0H-1.0N	100	13.03	76.10

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนของส่วนประกอบออกไซด์โดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลือบ

สูตร	ส่วนประกอบออกไซด์ (สัดส่วนโดยโมล)			
	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	H_2O
100FA-0RH	3.29	0.89	1.0	11.0
95FA-5RH	3.34	0.79	1.0	11.0
90FA-10RH	3.61	0.75	1.0	11.0
85FA-15RH	3.87	0.71	1.0	11.0

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนของส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้โดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอย และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นและมีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าเคลบ

สูตร	น้ำหนักวัตถุดิบ (กรัม)			
	เถ้าลอย	เถ้าเคลบ	Sodium hydroxide	น้ำกลั่น
100FA-0RH	100	0	13.03	36.10
95FA-5RH	95	5	13.03	36.10
90FA-10RH	90	10	13.03	36.10
85FA-15RH	85	15	13.03	36.10

3.7 วิธีการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

ซึ่งวัตถุดิบตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ในตารางที่ 3.2, 3.4 และ 3.6 เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตโซเดียมซิลิเกตหรือเกร็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในน้ำกลั่น กวนผสมจนละลายเข้ากัน ทิ้งไว้ให้สารละลายเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมผงวัตถุดิบคือเถ้าลอยหรือเถ้าเคลบลงในสารละลายที่เตรียมไว้ กวนผสมจนเข้ากันดี จะได้ของเหลวข้นสีน้ำตาล จากนั้นเทของผสมที่ได้ลงในแบบพิมพ์พลาสติกสำหรับนำไปทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง หรือแบบพิมพ์โลหะสำหรับนำไปทดสอบความต้านทานแรงกดแตก จากนั้นปิดฝาให้สนิทด้วยเทปกาว นำไปห่อในถุงพลาสติก แล้วแบ่งบ่มที่อุณหภูมิห้องและ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอีก 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.8 การวิเคราะห์สมบัติของจีโอพอลิเมอร์

3.8.1 ตรวจสอบเฟสของจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเตรียมได้การนำชิ้นงานที่หักภายหลังจากการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งมาบดด้วยโกร่ง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรง 120 เมช แล้วจึงนำผงตัวอย่างที่ได้ไปตรวจสอบเฟสของชิ้นงาน โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (Bruker, D8 Advance) โดยใช้ Cu K α radiation ที่ scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 10-80 องศา

3.8.2 ทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Bending strength)

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเตรียมได้จากการเทส่วนผสมซีโอพอลิเมอร์ลงในแม่แบบพลาสติกที่มีขนาด 18x12x90 มิลลิเมตร หลังจากบ่มที่อุณหภูมิที่กำหนดเป็นเวลา 7 วันแล้ว จึงนำไปทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งด้วยเครื่อง Tensile/Compression Strength รุ่น HT-8116 โดยใช้อัตราเร็ว 5 มิลลิเมตร/นาที คำนวณค่าความต้านทานแรงดัดโค้งได้จากสมการ 3.1

$$\text{ความต้านทานแรงดัดโค้ง} = \frac{3LD}{2bd^2} \quad (\text{สมการ 3.1})$$

เมื่อ

L	=	น้ำหนักแรงกด (N)
D	=	ระยะห่างระหว่างหัวกด (m)
b	=	ความกว้างของชิ้นงาน (m)
d	=	ความหนาของชิ้นงาน (m)

3.8.3 ทดสอบความต้านทานแรงกดแตก (Compressive strength)

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเตรียมได้จากการเทส่วนผสมซีโอพอลิเมอร์ลงในแม่แบบโลหะที่มีขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร หลังจากบ่มที่อุณหภูมิที่กำหนดเป็นเวลา 7 วัน จึงนำไปทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งด้วยเครื่อง Instron Testing Machine รุ่น 5882 โดยใช้อัตราเร็ว 5 มิลลิเมตร/นาที

3.8.4 ตรวจสอบความความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเตรียมได้การนำชิ้นงานบางส่วนที่หักภายหลังจากการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง ใช้วิธีวัดตามมาตรฐาน ASTM C 830-00⁽²⁰⁾ โดยการนำตัวอย่างไป vacuum เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเทน้ำกลั่นลงไปให้ท่วมชิ้นงาน vacuum ทิ้งไว้อีก 10 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักอิมเมอร์ชัน นำชิ้นงานขึ้นจากน้ำมาชั่งน้ำหนักออกแล้วจึงชั่งน้ำหนักในอากาศ จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้งอีกครั้งแล้วจึงเอาน้ำหนักที่ชั่งไว้ทั้งหมดไปเข้าสู่หาคำนวณความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ ดังสมการ 3.2 และ 3.3

$$\text{Bulk density} = \frac{W_d}{W_{\text{sat}} - W_{\text{sus}}} \quad (\text{สมการ 3.2})$$

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{W_{\text{sat}} - W_d}{W_d} \times 100 \quad (\text{สมการ 3.3})$$

เมื่อ

W_d = น้ำหนักของชิ้นงานแห้งในอากาศ (กรัม)

W_{sat} = น้ำหนักของชิ้นงานอมน้ำ (กรัม)

W_{sus} = น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งแทนที่น้ำ (กรัม)

3.8.5 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

โดยการนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ไปบดผสมกับ Potassium Bromide (KBr) ในอัตราส่วนผงจีโอพอลิเมอร์ 1 ส่วนต่อผง KBr 100 ส่วนโดยประมาณ นำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางใส จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy ((PerkinElmer (Spectrum one) Spectrometer))

บทที่ 4

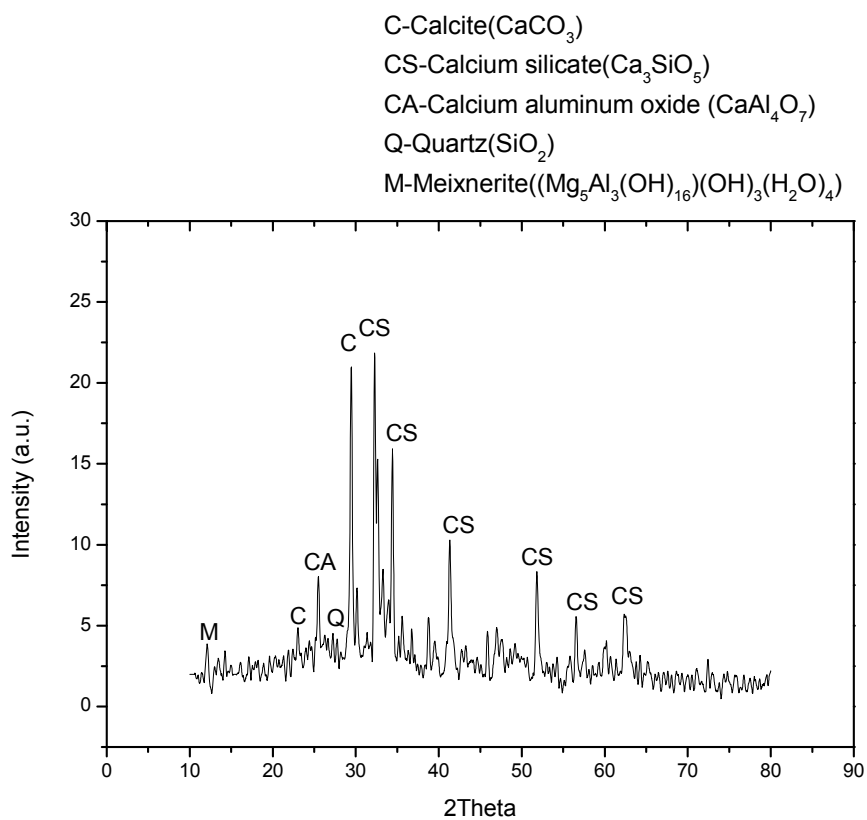
ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเถ้าลอย

1) ผลการวิเคราะห์เฟสของเถ้าลอย

จากการวิเคราะห์ XRD พบว่าเฟสของเถ้าลอยประกอบด้วย Calcite (CaCO_3 , JCPDS 01-072-1652), Calcium silicate (Ca_3SiO_5 , JCPDS 00-042-0551) Calcium aluminum silicate (CaAl_4O_7 , JCPDS 01-074-1467) Quartz (SiO_2 , JCPDS 00-046-1045) และ Meixnerite ($(\text{Mg}_5\text{Al}_3(\text{OH})_{16})(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_4$, JCPDS 00-050-1684) ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 XRD ของเถ้าลอย

2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

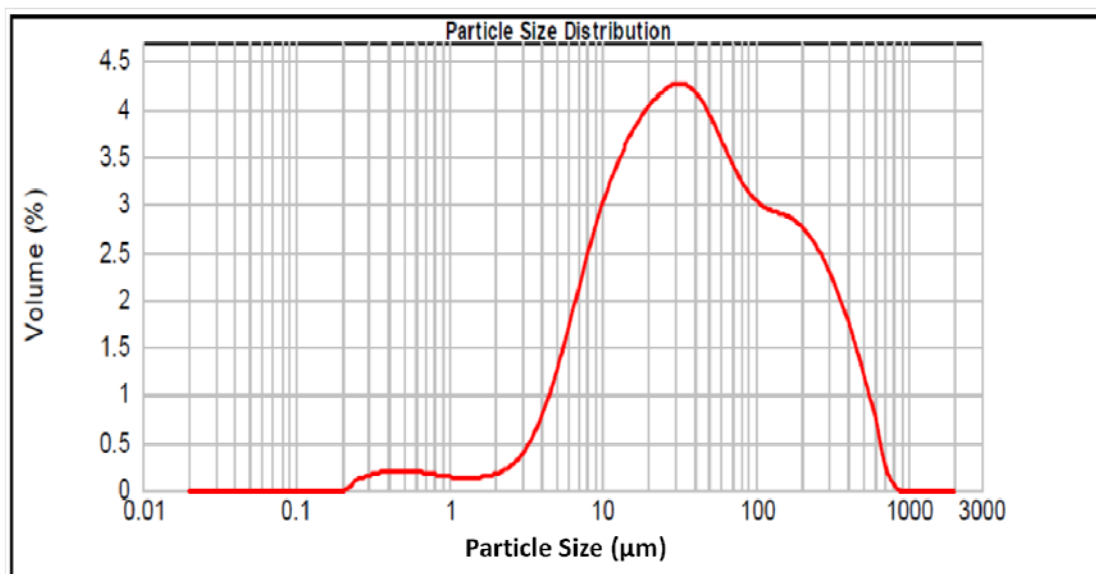
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF ของเถ้าลอยพบว่า เถ้าลอยนี้มีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 28.13% Al_2O_3 12.21% และ CaO 37.74% ดังตารางที่ 4.1 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในลดการผลิตนี้จึงเป็นเถ้าลอย class C เนื่องจากมี $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 49.06\%$ โดยน้ำหนัก ซึ่ง ASTM C618⁽¹⁵⁾ ได้กำหนดไว้ว่า เถ้าลอย class C จะมีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 50-70\%$ โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)	ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)
SiO_2	28.13	TiO_2	0.27
Al_2O_3	12.21	MnO	0.07
Na_2O	1.09	Fe_2O_3	8.72
CaO	37.74	CuO	0.02
MgO	2.19	SrO	0.08
P_2O_5	0.14	BaO	0.07
SO_3	2.81		
K_2O	1.31	LOI	5.17

3) ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอย

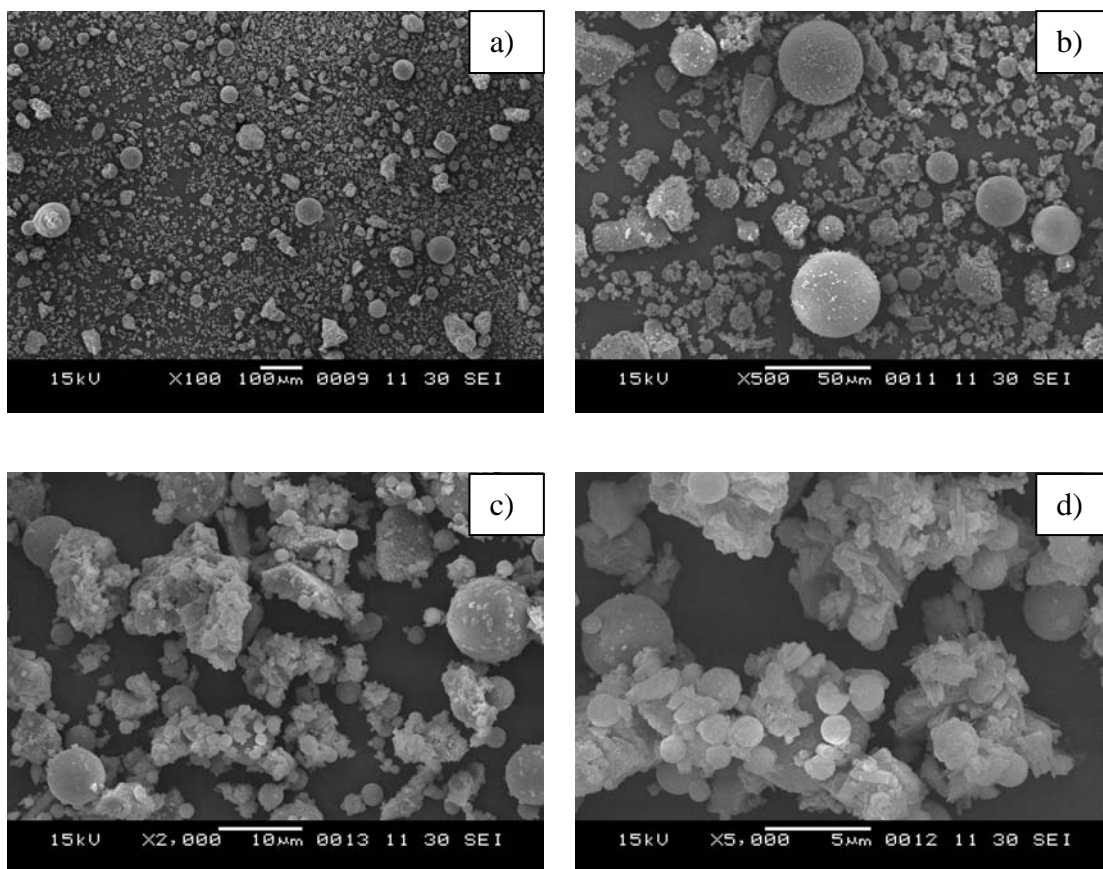
จากการวิเคราะห์ด้วย PSD พบว่าอนุภาคเถ้าลอยมีการกระจายขนาดตั้งแต่ 1-1000 μm และอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 20-80 μm ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอย

4) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอย

จากภาพ SEM แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย พบว่าผงเถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและรูปร่างเป็นเกล็ดเล็กๆ มีอนุภาคหลายขนาดกระจายปนๆกันไป ส่วนใหญ่ไม่เป็นอนุภาคเดี่ยว มักประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ จับตัวรวมกันดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 SEM แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยายต่างๆ

a) กำลังขยาย 100 เท่า b) กำลังขยาย 500 เท่า

c) กำลังขยาย 2000 เท่า d) กำลังขยาย 5000 เท่า

5) ผลการวิเคราะห์พื้นผิวและธาตุองค์ประกอบของพื้นผิวอนุภาคเถ้าลอย

จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA พบว่า อนุภาคของเถ้าลอยที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ประกอบด้วย SiO_2 40-55% Al_2O_3 15-40% และ CaO 2-25% โดยน้ำหนัก ส่วนอนุภาคของเถ้าลอยที่มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงเหลี่ยม ประกอบด้วย SiO_2 35-60% Al_2O_3 4-20% และ CaO 20-50% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าอนุภาคทรงกลมของเถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ Al_2O_3 ส่วนอนุภาคที่มีลักษณะเป็นเกล็ดเล็กของเถ้าลอย มีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 และ CaO ดังตารางที่ 4.2 การนำเถ้าลอยมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ ใช้ทั้งเถ้าลอยที่มีอนุภาคเป็นทรงกลมและอนุภาคเป็นเกร็ดร่วมกันโดยไม่มีกรร่อนผ่านตะแกรกร่อน

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคเถ้าลอย

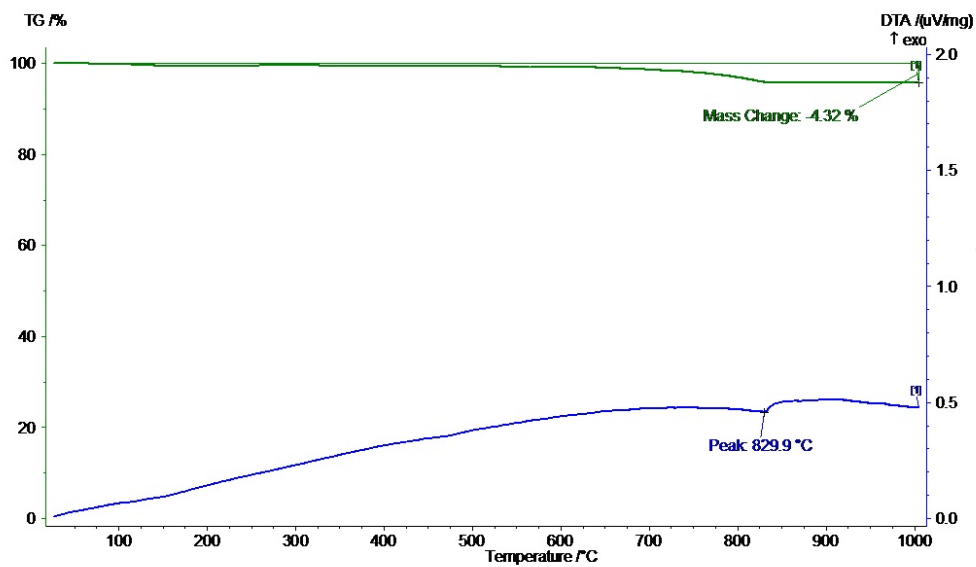
จุด	ปริมาณ(%)					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO
C-1	35.90	47.74	2.73	2.68	6.84	4.12
C-2	21.79	41.50	1.33	24.67	1.30	9.41
C-3	33.88	44.05	1.44	8.06	2.85	9.73
C-4	28.59	47.68	2.37	12.82	1.12	7.43
C-5	39.49	45.60	3.55	7.47	1.85	2.05
C-6	14.17	56.38	3.80	21.90	1.31	2.44
R-1	7.59	62.25	1.45	25.42	0.97	2.32
R-2	4.62	37.92	0.79	52.93	0	3.74
R-3	17.37	35.25	0.59	41.61	0	5.18
R-4	14.05	46.95	0.20	32.42	1.81	4.58
R-5	20.31	33.83	0.49	36.35	0.57	8.45

หมายเหตุ C แสดงถึงอนุภาคของเถ้าลอยที่มีลักษณะเป็นทรงกลมจากภาพ SEM 4.3 a)

R แสดงถึงอนุภาคเถ้าลอยที่มีรูปร่างเป็นเกล็ดเล็กๆ จากภาพ SEM 4.3 a)

6) ผลการทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของเถ้าลอย

จากการตรวจสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง DTA/TG ของเถ้าลอยพบว่า เกิดปฏิกิริยาสลายตัวในช่วง 829.9 °C และมีน้ำหนักของเถ้าลอยหายไปคิดเป็น 4.32% ดังภาพที่ 4.4 ซึ่งการสลายตัวที่อุณหภูมินี้บ่งบอกว่าเป็นการสลายตัวของ CaCO₃⁽²¹⁾ ซึ่งมีการสลายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 650-900 °C

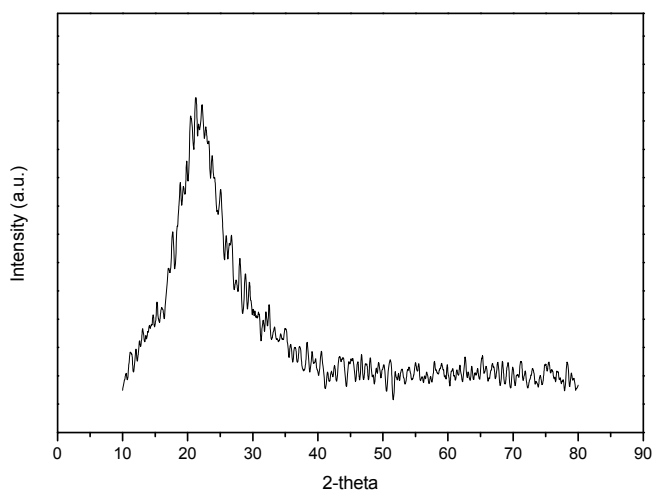


ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบ DTA/TG ของแก้วลอย

4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของแก้วเคลือบ

1) ผลการวิเคราะห์เฟสของแก้วเคลือบ

จากผลการทดสอบ XRD ของแก้วเคลือบพบว่า เฟสของแก้วเคลือบคือ ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous-SiO₂) ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 XRD ของแก้วเคลือบ

2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

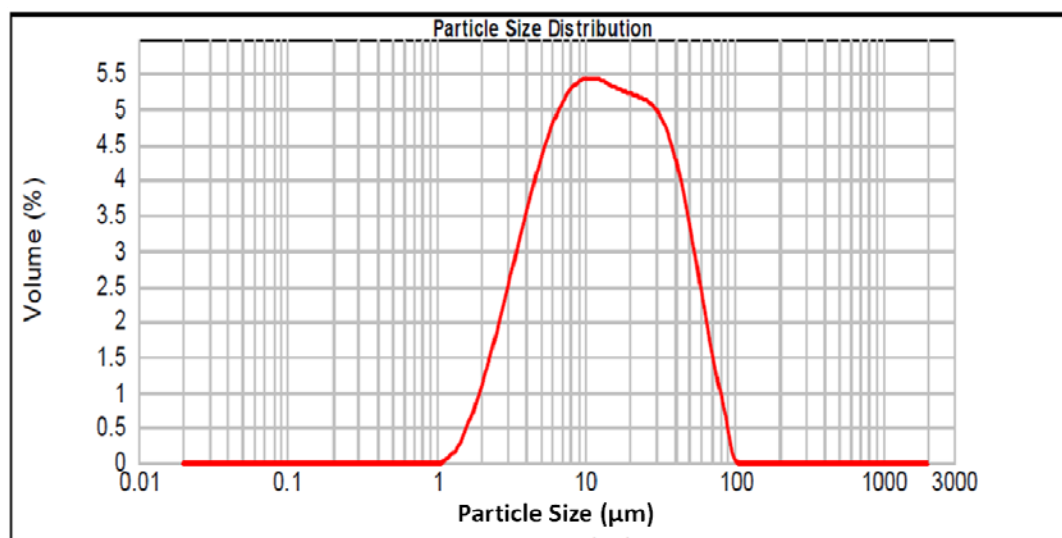
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF ของเถ้าแกลบพบว่า เถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 93.70% นอกนั้นเป็นสารประกอบอื่นๆ อีกเป็นปริมาณเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)	ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)
SiO_2	93.70	SO_3	0.23
Al_2O_3	0.10	K_2O	1.96
Na_2O	0.13	TiO_2	0.01
CaO	0.60	MnO	0.11
MgO	0.38	Fe_2O_3	0.09
P_2O_5	0.60	LOI	2.05

3) ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ

จากการวิเคราะห์ PSD พบว่าอนุภาคเถ้าแกลบมีการกระจายขนาดตั้งแต่ 1-100 μm อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาด 10-50 μm ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของจีโอพอลิเมอร์

4.2.1 ผลการตรวจสอบเฟสของจีโอพอลิเมอร์

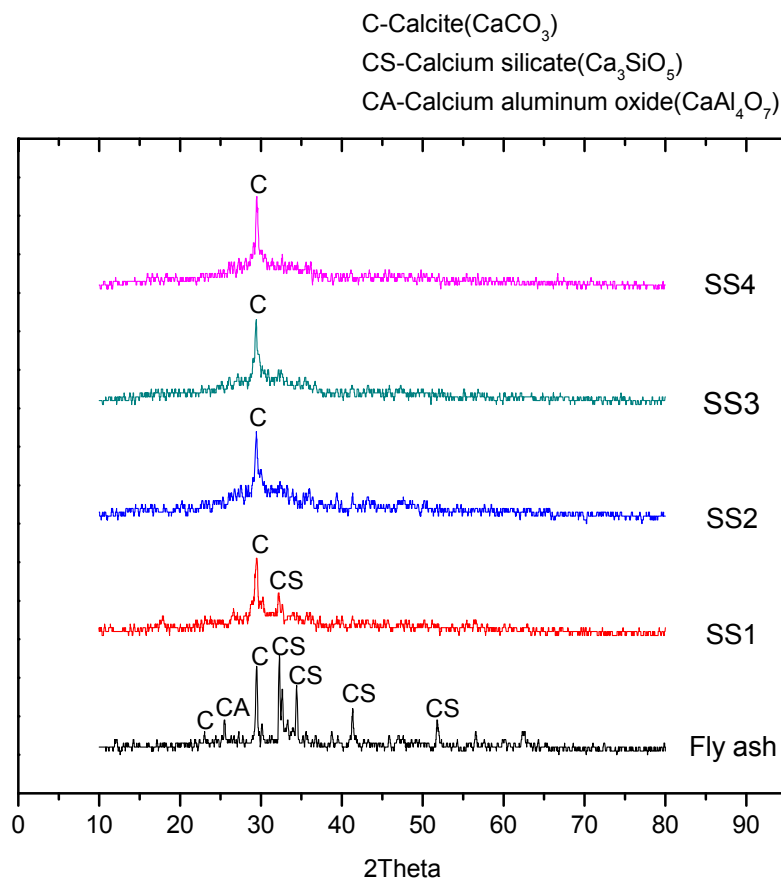
4.2.1.1 ในระบบที่ใช้สารตั้งต้นเป็นเถ้าลอยผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต

จากผลการวิเคราะห์ XRD พบว่าในตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ประกอบด้วย เฟส Calcite และ Calcium silicate ซึ่งเป็นเฟสที่ยังคงหลงเหลืออยู่ของเถ้าลอย เมื่อปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เฟสของ Calcite ยังคงมีอยู่ในทุกตัวอย่าง แต่เฟสของ Calcium silicate ลดลงและหายไป ดังภาพที่ 4.7 และในระบบนี้เมื่อทำการผสมผงเถ้าลอยเข้ากับ สารละลายโซเดียมซิลิเกตพบว่า ความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้นเร็วมาก จนไม่สามารถเทลงในแม่แบบได้ ทางผู้ทดลองจึงไม่ได้ทดสอบสมบัติอื่นๆของระบบนี้ต่อ เนื่องจากในการทดสอบความแข็งแรง จำเป็นต้องรู้ขนาดที่แน่นอนของตัวอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณค่าความแข็งแรง เมื่อไม่สามารถเทของเหลวลงในแม่แบบได้ดี จึงเป็นการยากที่จะระบุขนาดของตัวอย่างได้

จากผลการทดลองของ P. Chindapasirt และคณะ⁽²²⁾ พบว่า การไหลตัวของ จีโอพอลิเมอร์มอดาร์จะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของโซเดียมซิลิเกต เนื่องจากตัวโซเดียมซิลิเกตนั้นมีความหนืดมากอยู่แล้ว เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นก็จะไปลดการไหลตัวของมอดาร์

เมื่อแคลเซียมในวัตถุดิบมีปริมาณสูง จะไปรบกวนกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ และเร่งให้เกิดการแข็งตัว J. Temujin และคณะ⁽²³⁾ ศึกษาผลของการเติม CaO และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ถ่านเถ้าลอย พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เติมแคลเซียมมีความแข็งแรงพอที่จะแกะออกจากแม่แบบได้ในเวลา 1 วัน ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์ที่ไม่เติมแคลเซียมยังคงอ่อนตัวอยู่ J.S.J. Van Denvertter และคณะ⁽²⁴⁻²⁵⁾ กล่าวว่า การปรากฏของแคลเซียมในวัตถุดิบ ทำให้มีตำแหน่งพิเศษ สำหรับการเกิดนิวเคลียสในการตกตะกอนของไอออนที่ละลายออกมา และทำให้จีโอพอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว E.I. Diaz และคณะ⁽²⁶⁾ พบว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO มากกว่า 20% เมื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ จะทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว คือใช้เวลาน้อยกว่า 3 นาที

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย ซึ่งมีปริมาณ $\text{CaO} = 37.74\%$ โดยน้ำหนัก อีกทั้งเป็นการสังเคราะห์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีความหนืดสูง ดังนั้น จีโอพอลิเมอร์ที่ได้จึงมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถเทออกมาขึ้นรูปในแม่แบบได้



ภาพที่ 4.7 XRD ของตัวอย่างที่ใช้สารตั้งต้นเป็นเถ้าลอยและสารละลายไฮเดียมซิลิเกต

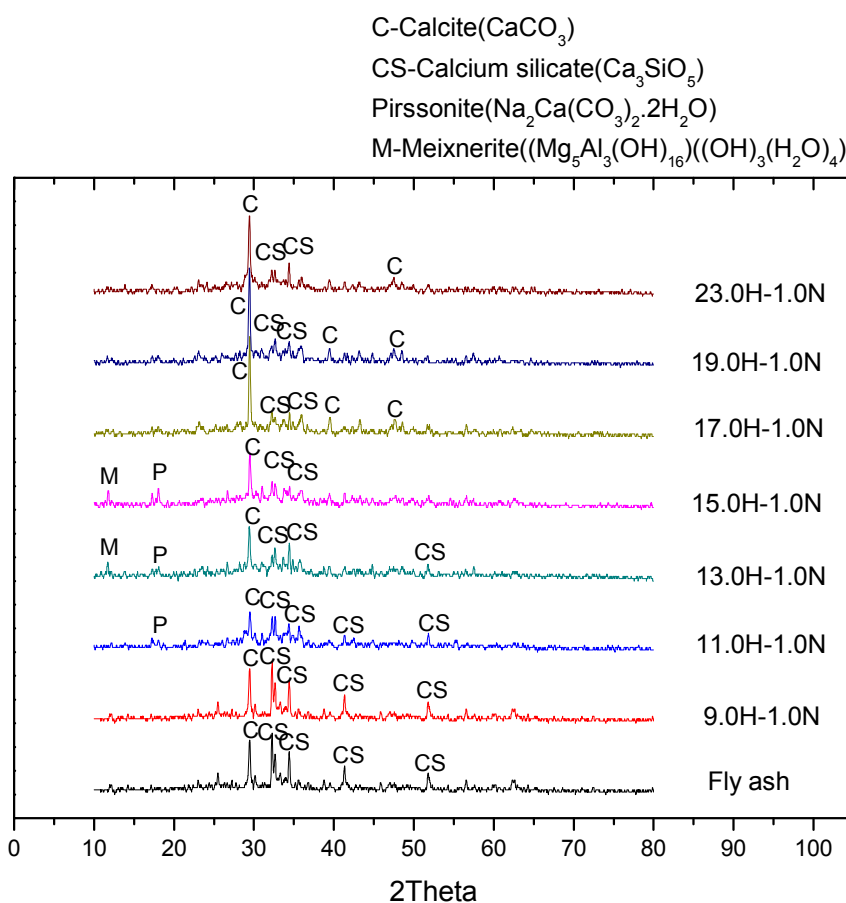
4.2.1.2 ในระบบที่ใช้สารตั้งต้นเป็นเถ้าลอยผสมกับสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์

1) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

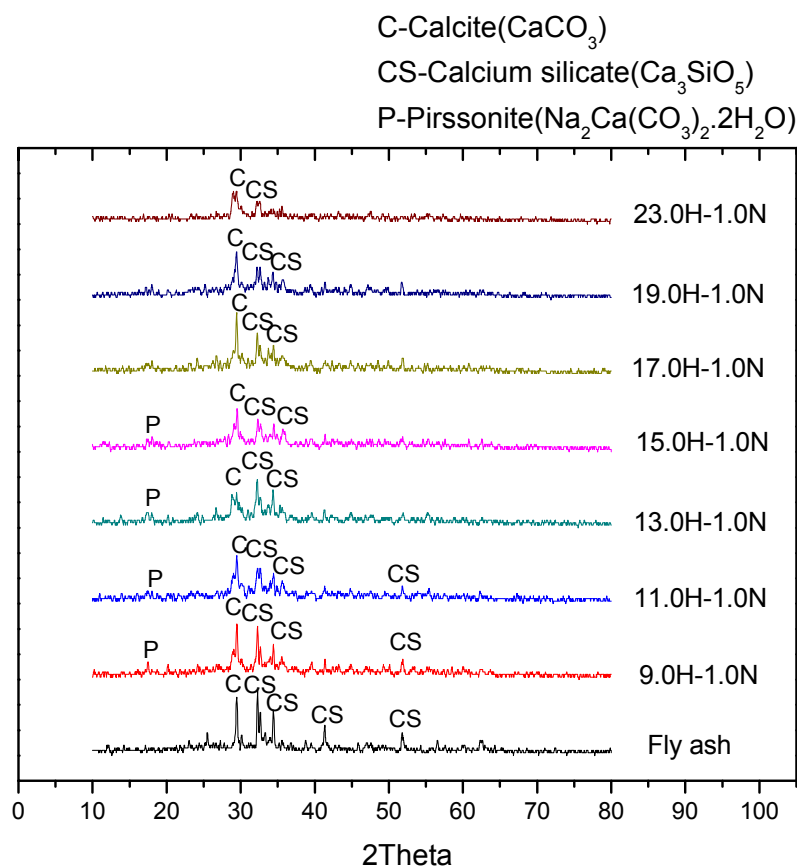
จากการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ และบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เฟสของ Calcite และ Meixnerite ซึ่งเป็นเฟสของเถ้าลอยยังคงอยู่ในทุกตัวอย่าง แต่สัดส่วนของเฟส Calcium silicate มีแนวโน้มลดลง และเริ่มเกิดเฟสของ Pirssonite ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ JCPDS 00-022-0476) ขึ้นที่สัดส่วนปริมาณน้ำ 11.0 โมล ดังภาพที่ 4.8 ซึ่ง Pirssonite นี้เป็นสารประกอบคาร์บอเนตที่เกิดจากไฮเดียมที่บริเวณพื้นผิวของซีโอพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยา carbonation ในบรรยากาศ^(6, 27)

ส่วนตัวอย่างที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60 °C จากการวิเคราะห์ XRD พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเฟสของ Calcite และ Calcium silicate มีแนวโน้มลดลง ส่วน Pirssonite เริ่มปรากฏตั้งแต่ว่าสัดส่วนของน้ำเป็น 9.0 โมล ดังภาพที่ 4.9

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็น 60°C เฟสของ Calcite มีแนวโน้มลดลงซึ่งแตกต่างจากการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ส่วนเฟสของ Calcium silicate มีแนวโน้มลดลงเมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 60°C เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4.8 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



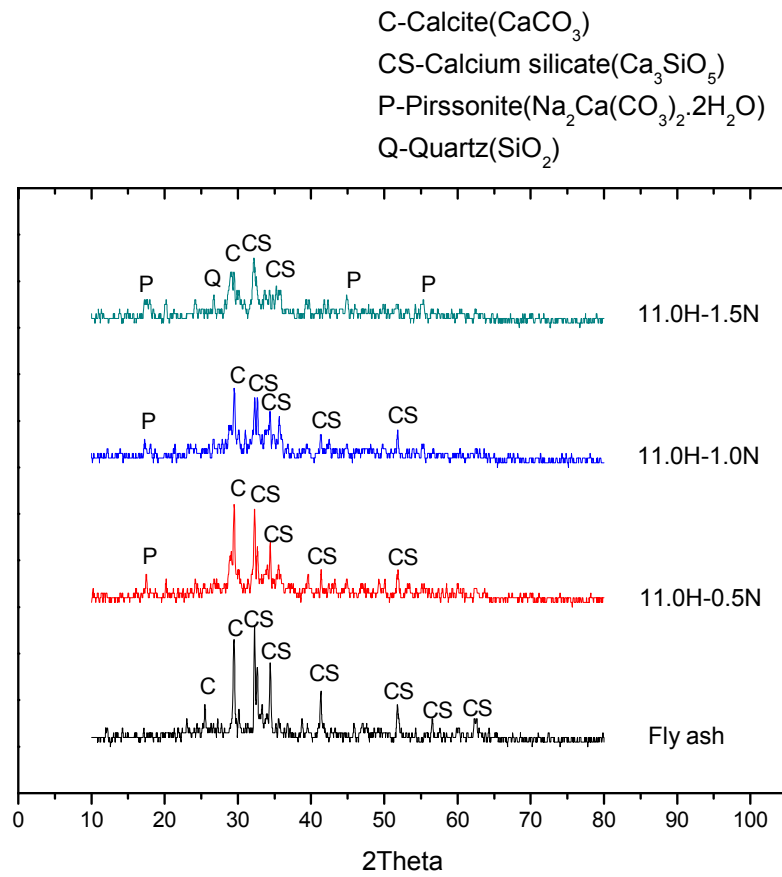
ภาพที่ 4.9 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่ 60°C

2) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2O และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

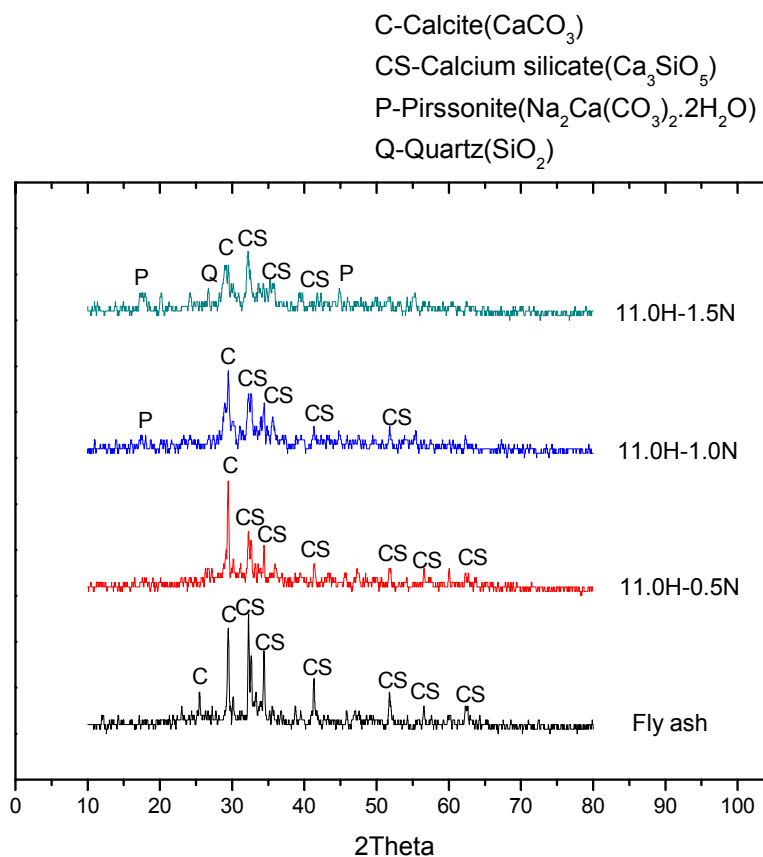
จากการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2O และบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่อปริมาณ Na_2O เพิ่มขึ้น เฟสของ Calcite และเฟสของ Calcium silicate มีแนวโน้มลดลงดังภาพที่ 4.10 โดย Quartz ยังคงหลงเหลืออยู่ และเกิด Pirssonite ในทุกตัวอย่าง

ส่วนตัวอย่างที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60°C จากการวิเคราะห์ XRD พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Na_2O เฟสของ Calcite และ Calcium silicate มีแนวโน้มลดลง Quartz ยังคงหลงเหลืออยู่เช่นเดียวกัน ส่วนเฟสของ Pirssonite เริ่มปรากฏที่สัดส่วนของ Na_2O 1.0 โมล ดังภาพที่ 4.11

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง พบว่า เฟสของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันทั้ง 2 อุณหภูมิ



ภาพที่ 4.10 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2O ปมที่อุณหภูมิห้อง



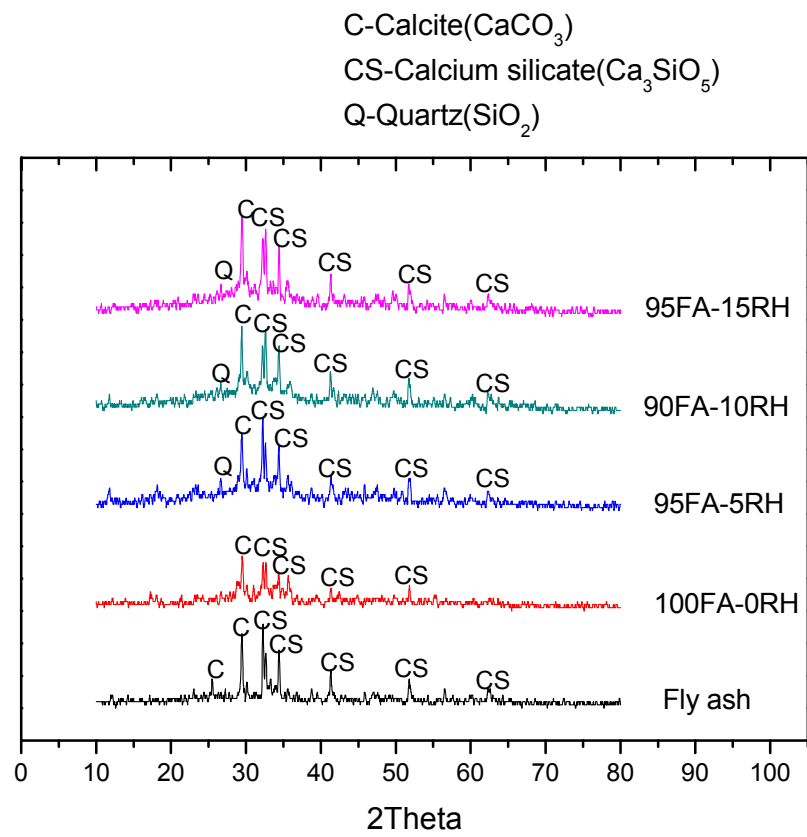
ภาพที่ 4.11 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2O บ่มที่ 60°C

3) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

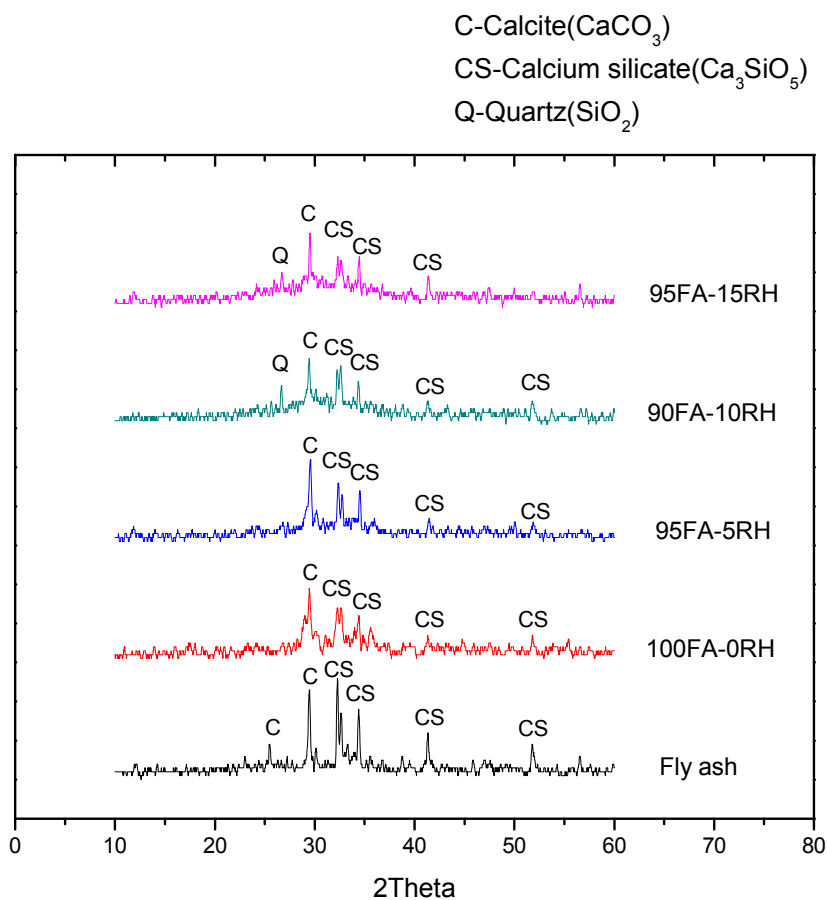
จากการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ (SiO_2) และบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น เฟสของ Calcite และเฟสของ Calcium silicate ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และ Quartz ยังคงหลงเหลืออยู่ในทุกตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.12

ส่วนตัวอย่างที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60°C จากการวิเคราะห์ XRD พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ เถ้าแกลบ เฟสของ Calcite และ Calcium silicate มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนเฟสของ Quartz ก็ยังคงอยู่เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 4.13

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง พบว่า ที่อุณหภูมิห้อง การเติมเถ้าแกลบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิ 60°C Calcium silicate ในตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมเถ้าแกลบลงไป



ภาพที่ 4.12 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.13 XRD ของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากผลการทดสอบ XRD แสดงให้เห็นว่า จีโอฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดนี้มีเฟสเดียวกับเถ้าลอยซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ Calcite และ Calcium silicate แสดงให้เห็นว่าเฟสที่เป็นผลึกของจีโอฟอสเฟตเกิดจากอนุภาคของเถ้าลอยซึ่งไม่เกิดการทำปฏิกิริยา แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของพีค ถ้าความสูงของพีคไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าวัตถุดิบเกิดปฏิกิริยาน้อย⁽²⁸⁾ ซึ่งจะเห็นได้ในตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำและบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อความสูงของพีคลดลงแสดงว่าเฟสของผลึกในตัวอย่างนั้นลดลง⁽¹⁷⁾ เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ Na_2O หรือเถ้าแกลบ จะสังเกตเห็นว่าความเป็นอสัณฐานของจีโอฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเถ้าลอย แต่การเพิ่มปริมาณน้ำจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ไม่ชัดเจนนัก

X. Guo และคณะ⁽⁸⁾ สังเคราะห์จีโอฟอสเฟตจากเถ้าลอย จากการทดสอบ XRD พบว่าเฟสส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน แต่ก็ยังมีเฟสของ Quartz(SiO_2) เกิดขึ้น อันเป็นผลมาจากเถ้าแกลบที่

ไม่เกิดปฏิกิริยา J.C. Swanepoel และ C.A. Strydom⁽⁶⁾ ทดลองสังเคราะห์หี้อิโพลิเมอร์จากดินคาโอลิน เฟสของหี้อิโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วย Quartz Calcite Kaolinite Microcline Albite และ Muscovite ในปริมาณเล็กน้อย Kaolinite ปริมาณมากที่เหลืออยู่แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาการเกิดเป็นหี้อิโพลิเมอร์นี้ไม่สมบูรณ์ E.I. Diaz และคณะ⁽²⁶⁾ สังเคราะห์หี้อิโพลิเมอร์จากถ้ำลอยเช่นกัน เมื่อทดสอบ XRD พบว่ามีทั้งเฟสของสัณฐานและเฟสของผลึก เฟสของผลึกได้แก่ Quartz Mullite และ Calcite ซึ่งเป็นเฟสที่ยังคงอยู่หลังจากการทำปฏิกิริยาของถ้ำลอย U. Rattanasak และ P. Chindaprasit⁽²⁹⁾ ศึกษาการเตรียมหี้อิโพลิเมอร์จากถ้ำลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการทดสอบ XRD พบว่า ประกอบด้วยเฟสของอะลูมิโน-ซิลิเกตอสัณฐาน และเฟสผลึกของ Quartz และ Mullite ซึ่งพบในถ้ำลอยที่เป็นวัตถุดิบ R.A. Fletcher และคณะ⁽³⁰⁾ สังเคราะห์หี้อิโพลิเมอร์จากดินคาโอลินเผา ซิลิกาอสัณฐาน และอะลูมินาอสัณฐาน พบว่าเฟสของหี้อิโพลิเมอร์ประกอบด้วย Gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) Sodium aluminosilicate hydrate และ Thermonatrite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) V.F.F Barbosa และคณะ⁽²⁷⁾ สังเคราะห์หี้อิโพลิเมอร์จากดินคาโอลิน ผลการทดสอบ XRD พบว่าเฟสของ Quartz ซึ่งเป็นสิ่งเจือปนในดินคาโอลิน ยังคงเป็นเฟสหลัก และปรากฏอยู่ในหี้อิโพลิเมอร์ทุกตัว

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นพบว่า มีความคล้ายกันในเฟสของ Quartz Calcite และ Pirssonite แต่แตกต่างกันที่เฟสของ Calcium silicate และ Meixnerite อาจเนื่องมาจากส่วนประกอบของถ้ำลอยจะปรับเปลี่ยนไปตามแหล่งของวัตถุดิบ และถ้ำลอยแม่เกาะที่ใช้ในลดการผลิตนี้มีปริมาณ CaO สูงกว่าถ้ำลอยจากแหล่งอื่นค่อนข้างมาก

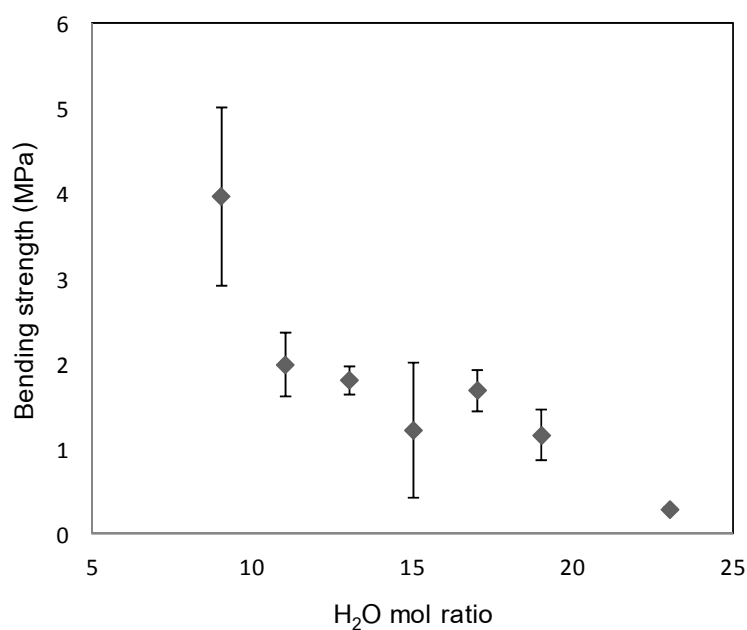
4.2.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

1) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

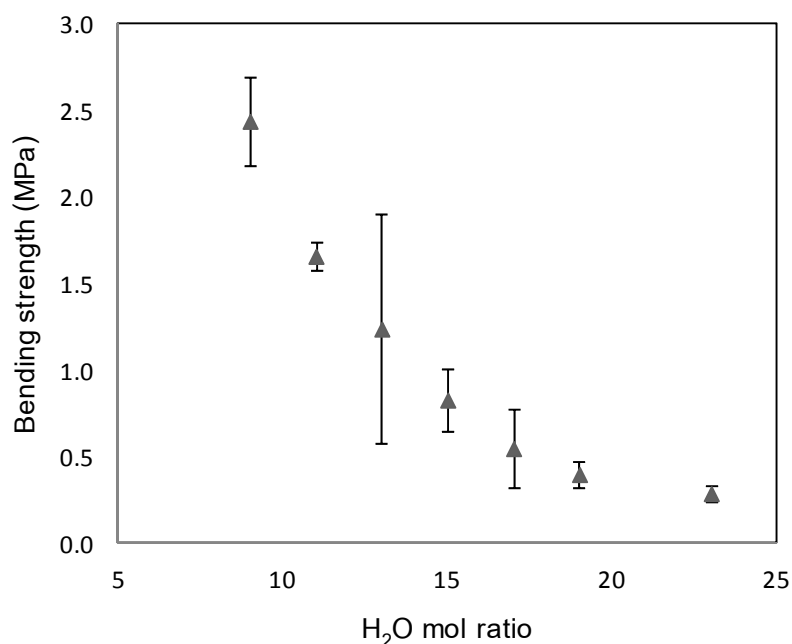
ในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำพบว่าค่าความต้านทานแรงดัดโค้งที่ได้มีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.14 โดยค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วง 0.30-3.98 MPa ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 9.0 โมล และค่าความแข็งแรงต่ำสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 23.0 โมล

ในตัวอย่างที่บ่มที่ 60 °C เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำพบว่าค่าความต้านทานแรงดัดโค้งที่ได้มีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.15 โดยค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วง 0.29-2.44 MPa ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 9.0 โมล และค่าความแข็งแรงต่ำสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 23.0 โมลเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งในตัวอย่างที่ป่มที่อุณหภูมิห้องและในตัวอย่างที่ป่มที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า ค่าความแข็งแรงที่ได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเช่นกัน แต่ตัวอย่างที่ป่มที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่าความแข็งแรงที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ป่มที่อุณหภูมิห้องเล็กน้อย



ภาพที่ 4.14 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ ป่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.15 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่ 60 °C

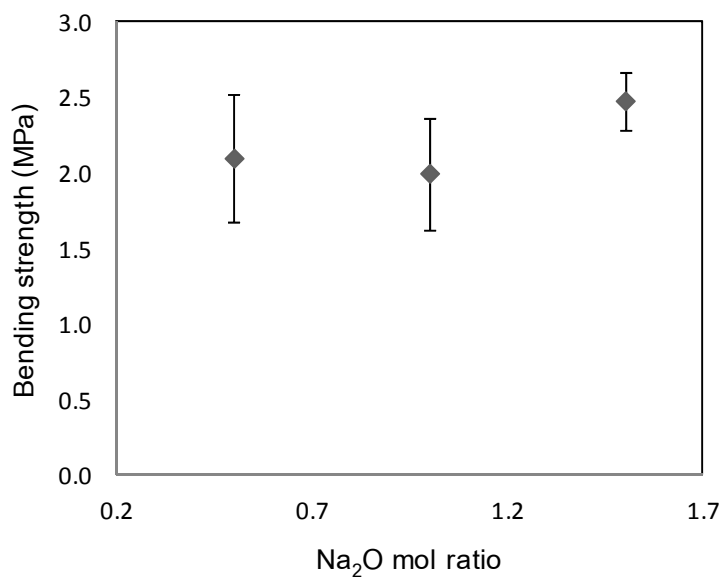
2) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของ Na₂O และบ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 0.5 ไปเป็น 1.0 โมล ความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 1.0 เป็น 1.5 โมล ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.16 โดยมีค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วง 2.00-2.48 MPa ตัวอย่างที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดคือตัวอย่างที่มีสัดส่วนของ Na₂O 1.5 โมล และตัวอย่างที่ให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุดคือตัวอย่างที่มีสัดส่วนของ Na₂O 1.0 โมล

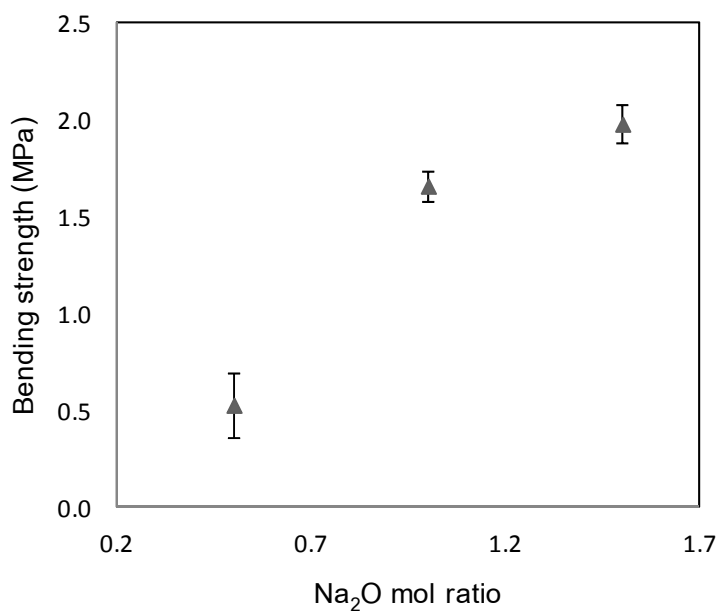
เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของ Na₂O และบ่มที่ 60 °C พบว่า เมื่อปริมาณสัดส่วนของ Na₂O เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพที่ 4.17 โดยความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.53-1.98

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่บ่มตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า เมื่อบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณสัดส่วนของ Na₂O ไม่ส่งผลมากนักต่อความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้ง แต่เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการบ่มเป็น 60 °C เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ Na₂O ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างจะมากขึ้น ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณของ Na₂O ส่งผลในทางที่ดีต่อความต้านทานแรงดัด

โค้ง และตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องมีค่าความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เล็กน้อย



ภาพที่ 4.16 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O บ่มที่อุณหภูมิห้อง



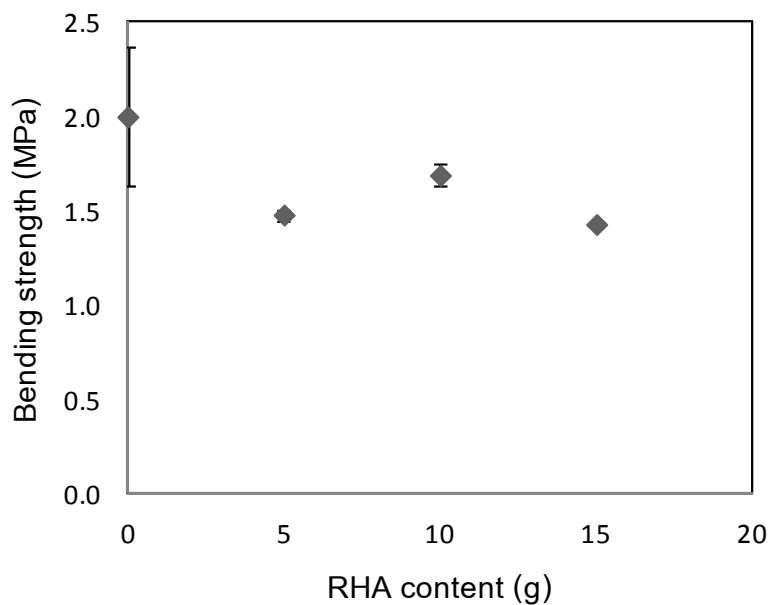
ภาพที่ 4.17 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O บ่มที่ 60 °C

3) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลือบ และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

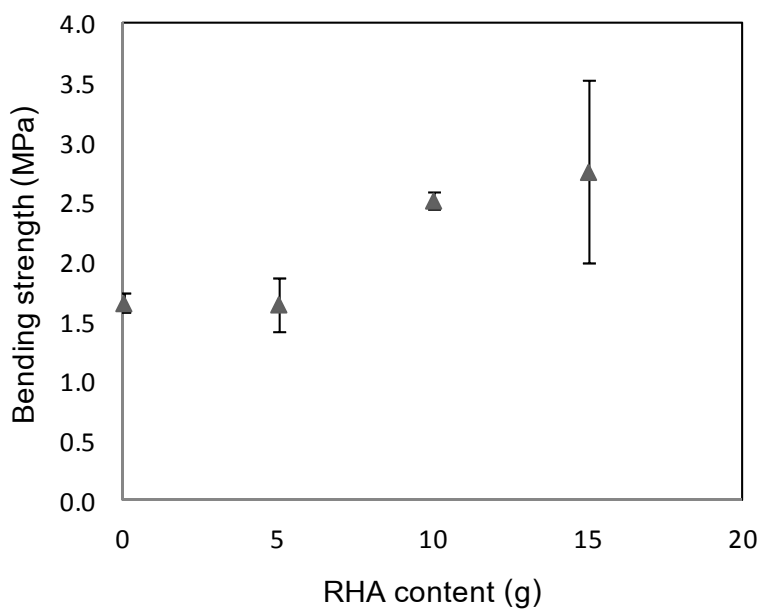
เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของแก้วเคลือบ (SiO_2) และบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า การเพิ่มปริมาณสัดส่วนของแก้วเคลือบ ไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดัดโค้งมากนัก ตัวอย่างที่เติมแก้วเคลือบ มีความแข็งแรงน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมแก้วเคลือบเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.18 ในตัวอย่างที่ไม่ได้เติมแก้วเคลือบ ค่าความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งจะอยู่ที่ 2.00 MPa เมื่อเติมแก้วเคลือบ ความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งจะอยู่ในช่วง 1.43-1.69 MPa

เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของแก้วเคลือบ และบ่มตัวอย่างไว้ที่ 60°C พบว่า การเพิ่มปริมาณสัดส่วนของแก้วเคลือบ ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.19 ในตัวอย่างที่ไม่ได้เติมแก้วเคลือบ ค่าความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งจะอยู่ที่ 1.66 MPa เมื่อเติมแก้วเคลือบ ค่าความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งจะอยู่ในช่วง 1.65-2.76 MPa

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่บ่มตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า เมื่อบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของแก้วเคลือบ จะไม่ส่งผลมากนักต่อความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้ง แต่เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการบ่มเป็น 60°C เมื่อเพิ่มปริมาณของแก้วเคลือบ ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างจะมากขึ้น ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณของแก้วเคลือบ ส่งผลในทางที่ดีต่อความต้านทานแรงดัดโค้ง และตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 60°C มีค่าความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.18 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.19 ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่ 60 °C

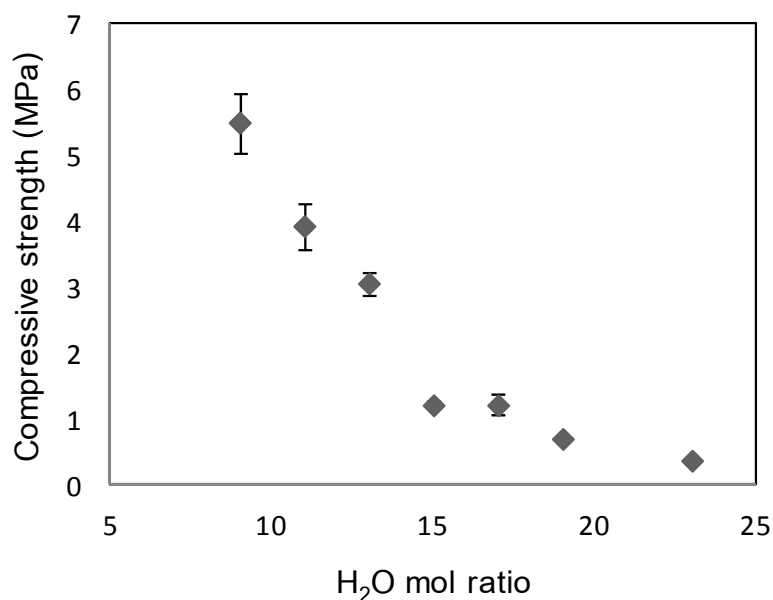
4.2.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดแตก

1) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

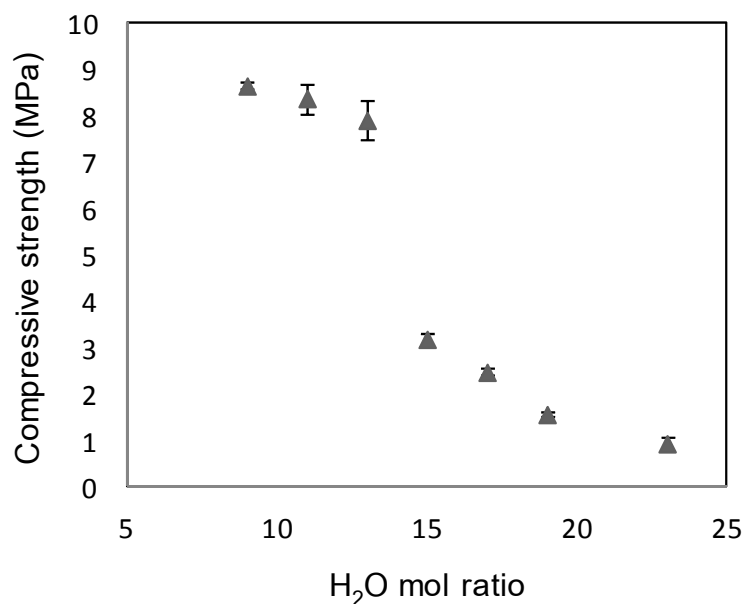
ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนตั้งต้นของน้ำ และบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ค่าความต้านทานแรงกดแตกที่ได้มีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงที่ได้อยู่ในช่วง 0.38-5.51 MPa ตัวอย่างที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 9.0 โมล และความแข็งแรงต่ำสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 23.0 โมล

เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนตั้งต้นของน้ำ และบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 °C ค่าความต้านทานแรงกดแตกที่ได้มีค่าลดลงเช่นกัน ดังภาพที่ 4.21 โดยมีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 0.95-8.66 MPa ตัวอย่างที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 9.0 โมล และความแข็งแรงต่ำสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 23.0 โมล

เมื่อเปรียบเทียบผลของการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างกัน จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างที่บ่มที่ 60 °C ให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเพิ่มสัดส่วนของปริมาณน้ำ ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างจะลดลง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของน้ำ ส่งผลในทางลบต่อความต้านทานแรงกดแตก



ภาพที่ 4.20 ค่าความต้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



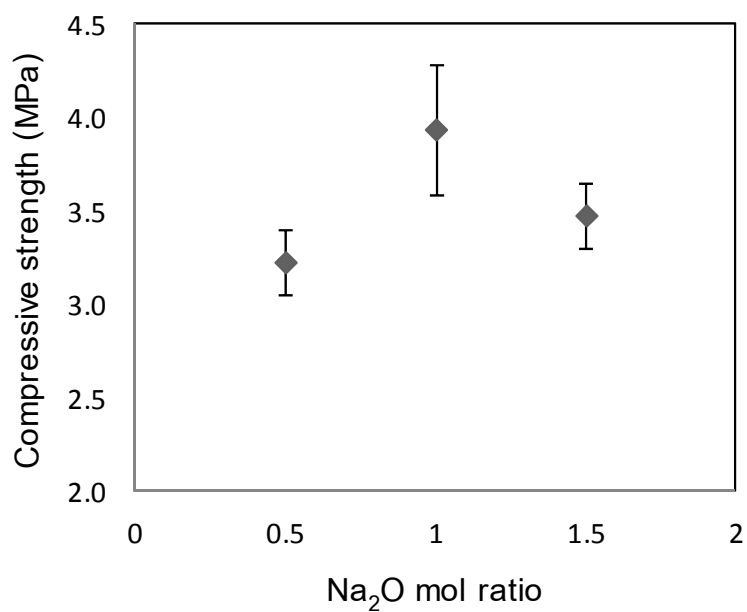
ภาพที่ 4.21 ค่าความต้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่ 60 °C

2) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

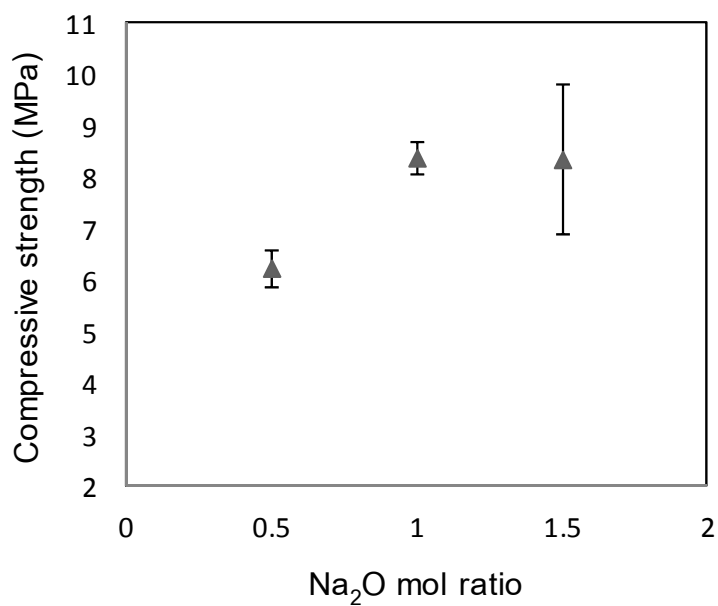
เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของ Na₂O และบ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 0.5 ไปเป็น 1.0 โมล ความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 1.0 เป็น 1.5 โมล ความแข็งแรงจะลดลง ดังภาพที่ 4.22 ค่าความแข็งแรงที่ได้อยู่ในช่วง 3.23-3.94 MPa

เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของ Na₂O และบ่มที่ 60 °C พบว่า พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 0.5 ไปเป็น 1.0 โมล ความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 1.0 เป็น 1.5 โมล ความแข็งแรงจะลดลงเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 4.23 โดยมีค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วง 6.25-8.39 MPa

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่บ่มตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า การบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องและที่ 60 °C เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณสัดส่วนของ Na₂O ไม่ส่งผลมากนักต่อความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตก แต่การบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าการบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.22 ค่าความต้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O บ่มที่อุณหภูมิห้อง



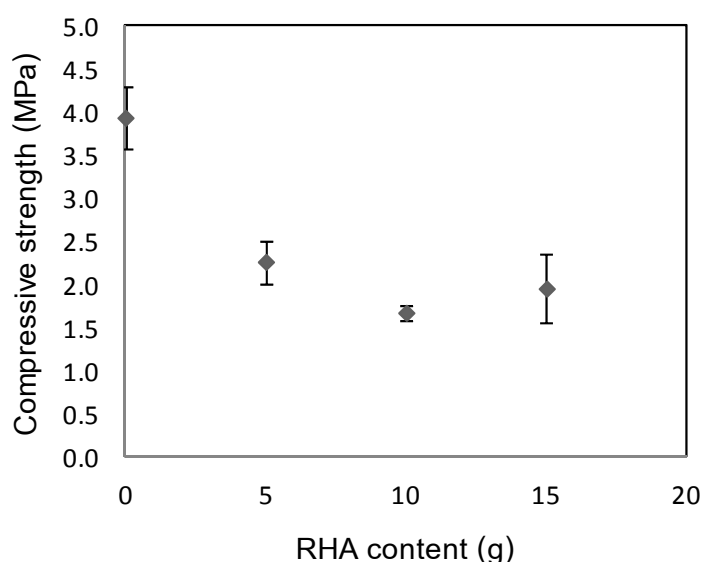
ภาพที่ 4.23 ค่าความต้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O บ่มที่ 60 °C

3) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

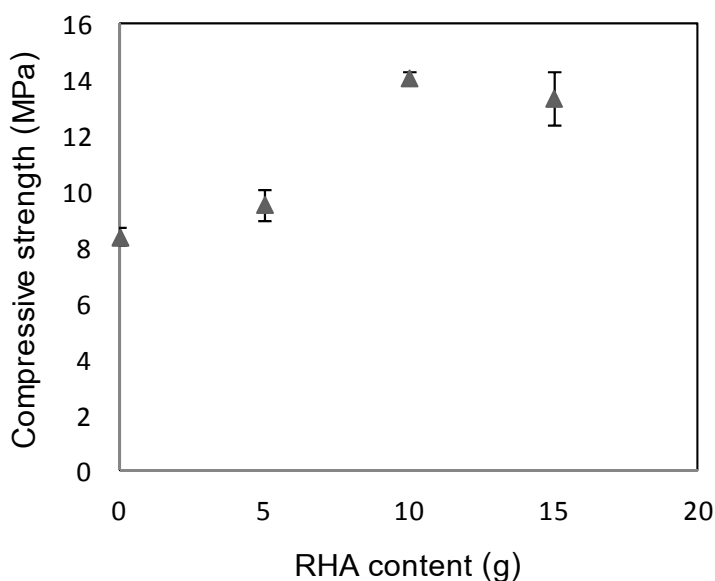
เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของเถ้าแกลบ (SiO_2) และบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า การเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเถ้าแกลบ ความต้านทานแรงกดแตกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ตัวอย่างที่เติมเถ้าแกลบ มีความแข็งแรงน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมเถ้าแกลบ ดังภาพที่ 4.24 ในตัวอย่างที่ไม่ได้เติมเถ้าแกลบ ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกจะอยู่ที่ 3.94 MPa เมื่อเติมเถ้าแกลบ ความแข็งแรงที่ได้จะอยู่ในช่วง 1.68-2.27 MPa

เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของเถ้าแกลบ และบ่มตัวอย่างไว้ที่ 60°C พบว่า การเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเถ้าแกลบ ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกดแตกเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.25 ในตัวอย่างที่ไม่ได้เติมเถ้าแกลบ ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกจะอยู่ที่ 8.39 MPa เมื่อเติมเถ้าแกลบ ค่าความแข็งแรงที่ได้จะอยู่ในช่วง 9.56-14.09

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่บ่มตัวอย่าง จะเห็นได้ว่า เมื่อบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจะให้ค่าความแข็งแรงต่ำกว่าการบ่มตัวอย่างไว้ที่ 60°C และเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของเถ้าแกลบ จะไม่ส่งผลมากนักต่อความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตก แต่เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการบ่มเป็น 60°C เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบ ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างมีแนวโน้มมากขึ้น ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบ ส่งผลในทางที่ดีต่อความต้านทานแรงกดแตก



ภาพที่ 4.24 ค่าความต้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.25 ค่าความต้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ
บ่มที่ 60 °C

จากงานวิจัยของ J. Temuujin และคณะ⁽²³⁾ ที่ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ มีความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกอยู่ที่ประมาณ 10-20 MPa สำหรับตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 20 °C และ 30-70 MPa สำหรับตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 70 °C งานวิจัยของ D. Panius และคณะ⁽³¹⁾ ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกประมาณ 5-25 MPa เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณโซเดียมซิลิเกตพบว่า มีความแข็งแรงที่ประมาณ 20-40 MPa E.I. Diaz และคณะ⁽²⁶⁾ สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แต่มีการเติมทรายและกรวดลงไปเพื่อทำเป็นมอร์ตาร์พบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกประมาณ 40-80 MPa Z. Zuhua และคณะ⁽³²⁾ ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินคาโอไลน์เถ้าลอย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตพบว่า จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงที่ 15-40 MPa J.C. Swanepoel และ C.A. Strydom⁽⁶⁾ สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินคาโอไลน์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตพบว่า จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกประมาณ 1-6 MPa K. Somna และคณะ⁽²⁸⁾ สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะและโซเดียม

ไฮดรอกไซด์พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงที่ 7 วันประมาณ 1-5 MPa ส่วนงานวิจัยนี้พบว่าหลังจาก 7 วัน จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกประมาณ 0.38-14.09 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของท่านอื่นแล้วจะเห็นได้ว่ามีความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกน้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยจากแหล่งอื่น แต่ใกล้เคียงกับจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินคาโอลินและจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแม่เมาะเช่นเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเถ้าลอยแม่เมาะมีส่วนประกอบแตกต่างจากเถ้าลอยจากแหล่งอื่นค่อนข้างมากจึงทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติแตกต่างกันไปด้วย

จากผลการทดสอบความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้งและความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตก แสดงให้เห็นว่า

1) เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในตัวอย่าง ความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้งและความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างมีค่าลดลง V.F.F. Barbosa และคณะ⁽²⁷⁾ กล่าวว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น น้ำส่วนเกินอาจจะไปเจือจางปฏิกิริยา และทำให้ไอออนที่ละลายออกมาลอยไปจากบริเวณที่มีการทำปฏิกิริยา เมื่อปริมาณน้ำในการสังเคราะห์ตัวอย่างลดลง^(28, 31) ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายเพิ่มขึ้น จะไปเร่งอัตราการละลายของออกไซด์และเฟสของอะลูมิโน-ซิลิเกตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของไอออน Si^{4+} Al^{3+} เนื่องจากการละลายของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นนี้ ยังมีส่วนช่วยในกระบวนการเกิดมอนอเมอร์ของ Si หรือ Si-Al ช่วยในการเกิดเป็นพอลิเมอร์และการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ D. Panias และคณะ⁽³¹⁾ พบว่าเมื่อปริมาณน้ำลดลงจะเป็นผลดีต่อกระบวนการเกิดเป็นจีโอพอลิเมอร์ ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์มีความเกี่ยวข้องกับระดับของการเกิดพอลิเมอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการละลายของซิลิเกตและอะลูมิเนตในวัสดุดิบ อัตราการละลายเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ที่พื้นผิว เมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจึงทำให้การละลายของ Si และ Si-Al เพิ่มขึ้นโดยตรง ปริมาณของ Si และ Al นี้เป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดสารตั้งต้นของมอนอเมอร์ ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น X. Hua และ J.S.J. Van Den Verter⁽³³⁾ กล่าวว่า สารละลายไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถละลายวัสดุดิบได้มากกว่าและเร็วกว่าความเข้มข้นต่ำๆ การทำลายโครงสร้างของวัสดุดิบจำเป็นต้องใช้ความเป็นแอลคาไลน์สูง ถ้าปริมาณน้ำมีมากเกินไปจะไปลดอัตราการเกิดเป็นจีโอพอลิเมอร์

2) เมื่อเพิ่มปริมาณ Na_2O จะไม่สามารถเห็นแนวโน้มในทางเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแข็งแรงได้ชัดเจน เนื่องจากความแข็งแรงของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นจากสัดส่วน Na_2O ที่ 0.5 ไปที่สัดส่วน 1.0 โมล แต่ความแข็งแรงจะลดลงที่สัดส่วน Na_2O 1.0 โมล ไปที่ 1.5 โมล

งานวิจัยของ P. D. Silva และ K. S. Crenstil⁽¹⁷⁾ ได้ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินเคโอลินเผาพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ Na_2O ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์จะลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณ Na_2O จะมีแนวโน้มทำให้เกิดเฟสออสซิลอนที่ไม่เสถียร สามารถเกิดการเปลี่ยนไปเป็นเฟสผลึกได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Songpiriyakij และคณะ⁽¹⁸⁾ เมื่อ Na_2O มีปริมาณสูงจะมีแนวโน้มทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากออสซิลอนไปเป็นผลึก แต่งานวิจัยของ X. Guo และคณะ⁽⁸⁾ พบว่า ความต้านทานแรงกดแตกเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Na_2O เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ Na_2O ทำให้การละลายของอะลูมิโน-ซิลิเกตเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ที่สัดส่วนของ Na_2O ในช่วง 0.5-1.0 โมล การเพิ่มปริมาณ Na_2O อาจช่วยให้การละลายของอะลูมิโน-ซิลิเกตในสารละลายเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของตัวอย่างจึงเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แต่เมื่อปริมาณ Na_2O เพิ่มจาก 1.0-1.5 โมล ปริมาณ Na_2O ที่มากเกินไปนี้อาจไปทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากออสซิลอนไปเป็นเฟสของผลึก (Pirssonite) ในตัวอย่าง

3) เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วแกลบ (SiO_2) จะทำให้สัดส่วนของ SiO_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้นด้วย ในทางทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่า⁽³⁴⁻³⁶⁾ พันธะของ Si-O-Si มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะของ Si-O-Al และ Al-O-Al ซึ่งหมายความว่าความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์น่าจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วน Si/Al S. Songpiriyakij และคณะ⁽¹⁸⁾ พบว่าความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ดังนั้นการเติมแก้วแกลบและเปลือกไม้ลงไปในส่วนผสม จะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก้วแกลบและเปลือกไม้เป็นแหล่งให้ Si ซึ่งจะส่งผลทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถเกิดพันธะ Si-O-Si ที่แข็งแรงขึ้นได้ J.L. Provis และ J.S.J. Van Deventer^(3, 37-38) กล่าวว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ สูง จะให้ความแข็งแรงสูง เนื่องจากเมื่อปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาในจีโอพอลิเมอร์จะช้าลง ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดเป็นของแข็งเกิดได้สมบูรณ์ R.A. Fletcher และคณะ^(3, 30) ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินคาโอลินและซิลิกาออสซิลอน พบว่า การที่จีโอพอลิเมอร์มี Al_2O_3 สูง จะทำให้มีความแข็งแรงต่ำ

4.2.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ

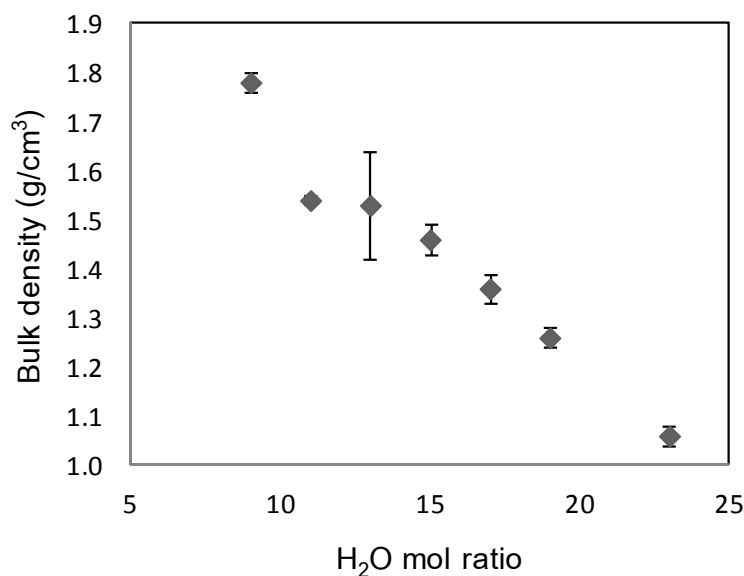
1) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนตั้งต้นของน้ำ เมื่อบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องและที่ 60°C ความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.26 และ 4.28 และมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 4.27 และ 4.29

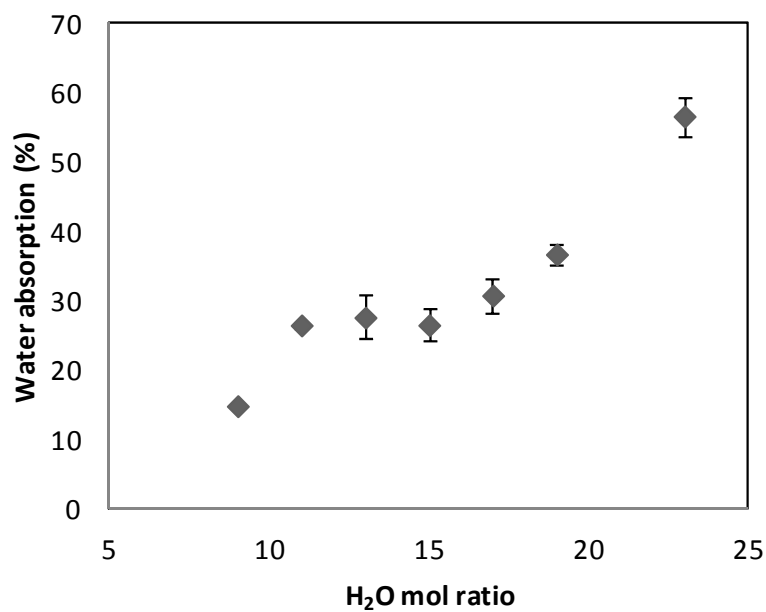
เมื่อปมตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง สัดส่วนของน้ำที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูงสุด คือสูตรที่ใช้ปริมาณน้ำที่ 9.0 โมล ให้ค่าความหนาแน่นที่ 1.78 g/cm^3 และดูดซึมน้ำที่ 14.82% ส่วนค่าความหนาแน่นต่ำสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 23.0 โมล มีค่าความหนาแน่นเป็น 1.06 g/cm^3 และดูดซึมน้ำที่ 56.64 g/cm^3

เมื่อปมตัวอย่างไว้ที่ 60°C สัดส่วนของน้ำที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด คือสูตรที่ใช้ปริมาณน้ำที่ 9.0 โมล ให้ค่าความหนาแน่นที่ 1.72 g/cm^3 และดูดซึมน้ำที่ 12.16% ส่วนค่าความหนาแน่นต่ำสุดอยู่ที่ปริมาณน้ำ 23.0 โมล มีค่าความหนาแน่นเป็น 1.17 g/cm^3 และดูดซึมน้ำที่ 42.59 g/cm^3

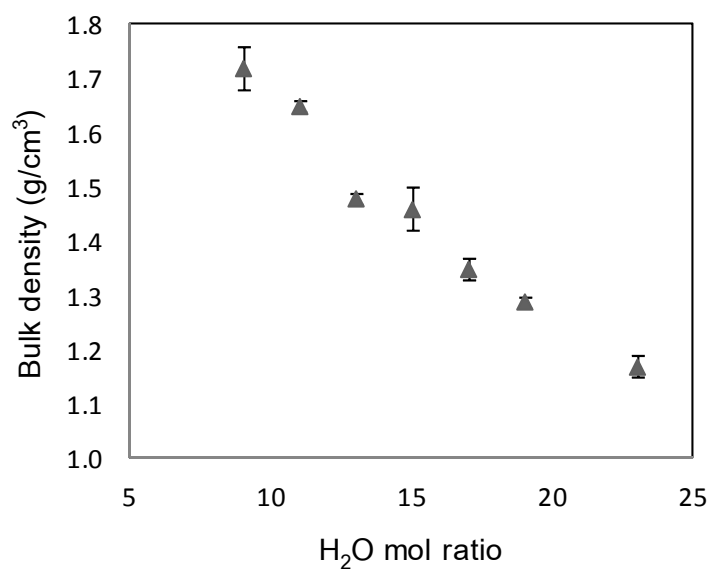
จะเห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณน้ำ ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างลดลง และการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น การปมตัวอย่างไว้ที่ 60°C จะทำให้ตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นมากกว่าตัวอย่างที่ปมที่อุณหภูมิห้องเล็กน้อย



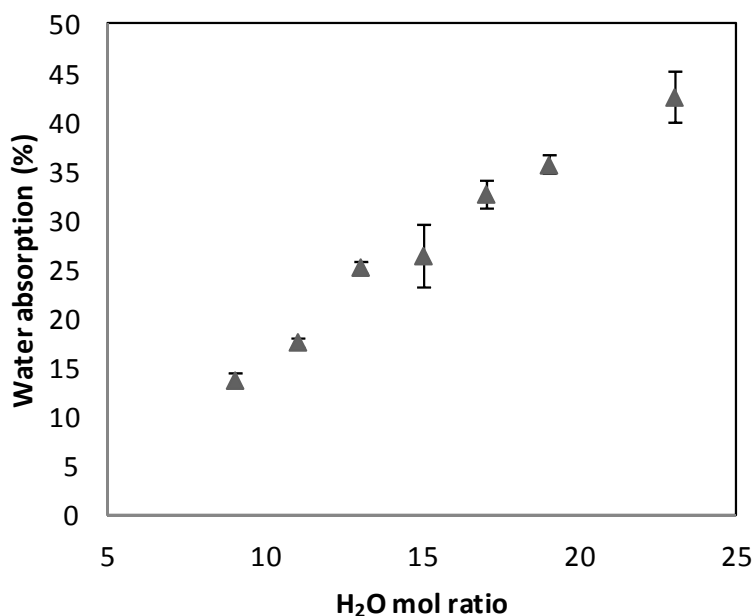
ภาพที่ 4.26 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ ปมที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.27 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ ปมที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.28 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ ปมที่ 60 °C



ภาพที่ 4.29 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่ 60 °C

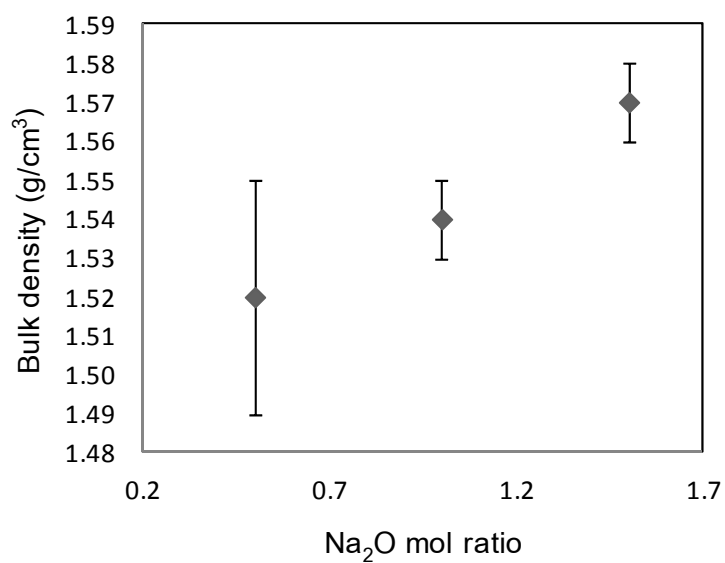
2) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของ Na₂O การบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องและ 60 °C พบว่าค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังภาพที่ 4.30 กับ 4.32 และภาพที่ 4.31 กับ 4.33

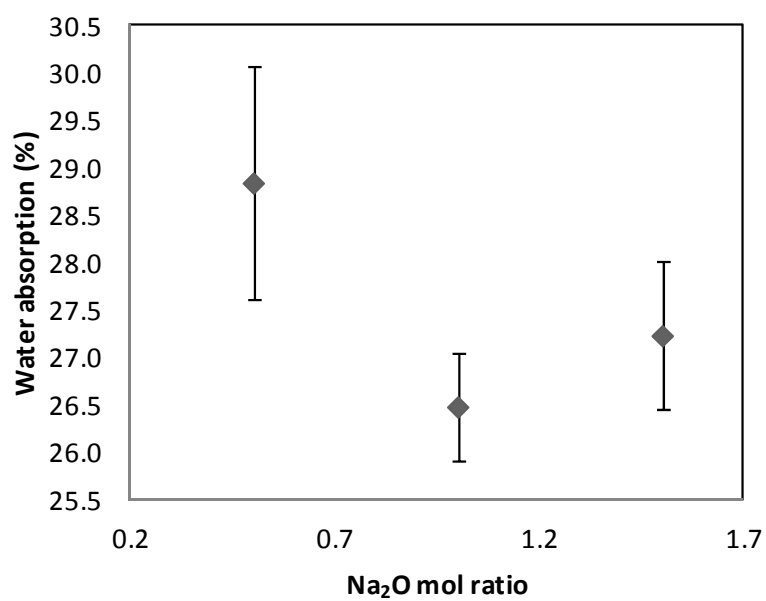
เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง การปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O พบว่าเมื่อสัดส่วนของเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของตัวอย่างก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยตัวอย่างมีความหนาแน่นที่ประมาณ 1.52-1.57 g/cm³ มีการดูดซึมน้ำที่ประมาณ 26.48-28.84%

เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 °C และปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 0.5 ไปเป็น 1.0 โมล ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 1.0 เป็น 1.5 โมล ความหนาแน่นจะลดลง โดยตัวอย่างมีความหนาแน่นประมาณ 1.48-1.65 g/cm³ มีการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 17.65-32.52%

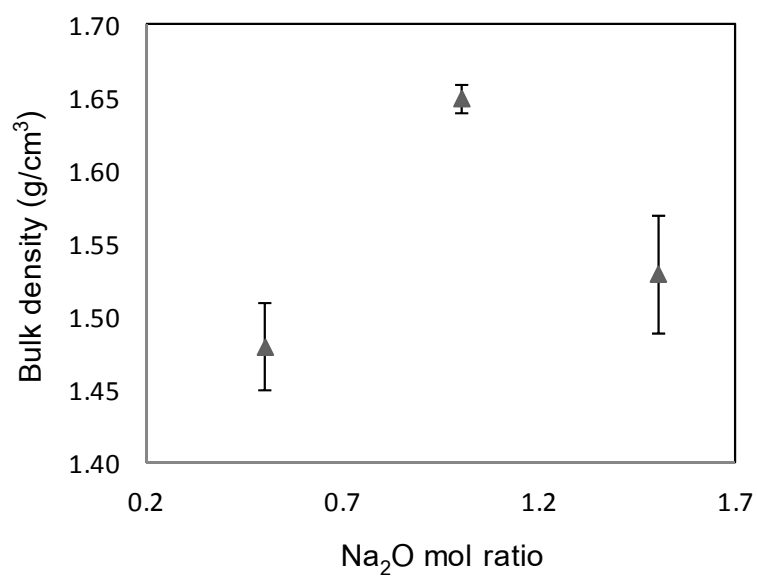
เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่บ่มตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกัน



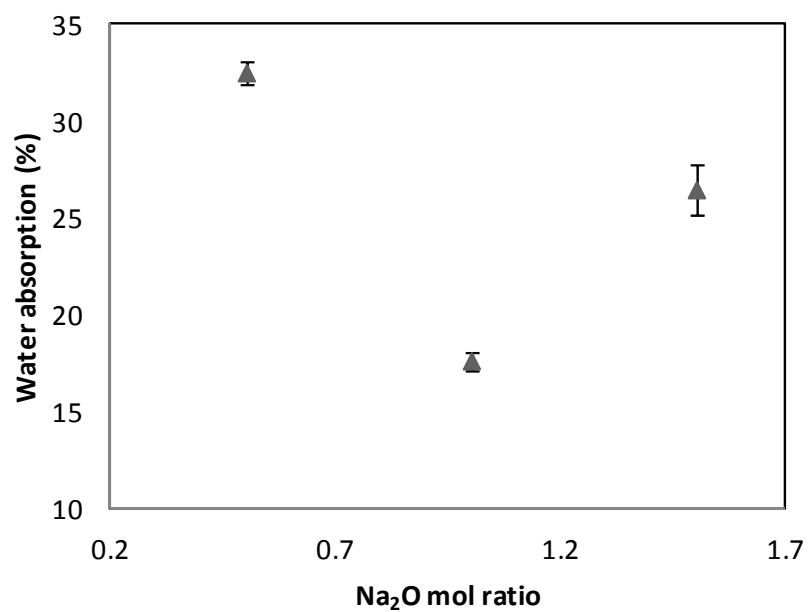
ภาพที่ 4.30 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O ป่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.31 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O ป่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.32 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O บ่มที่ 60 °C



ภาพที่ 4.33 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O บ่มที่ 60 °C

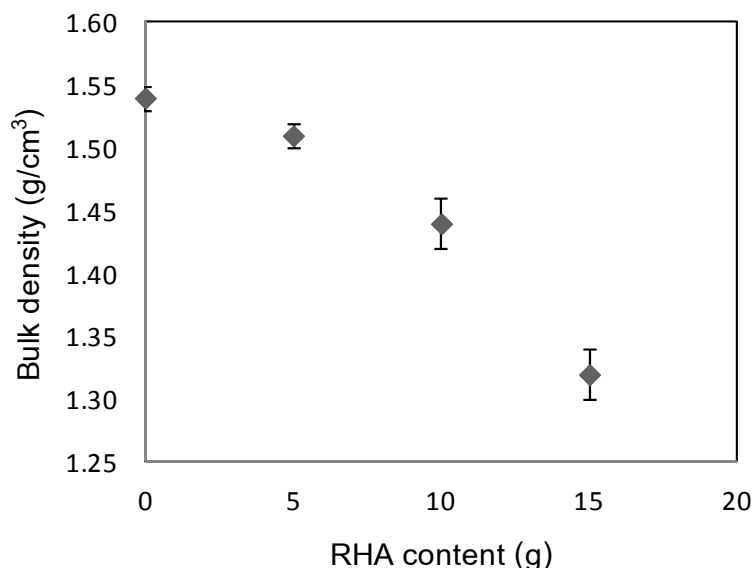
3) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนตั้งต้นของเถ้าแกลบ (SiO_2) และบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า การเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเถ้าแกลบ ความหนาแน่นของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.34 และ 4.35 โดยตัวอย่างที่มีการเติมเถ้าแกลบ จะมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ $1.32\text{-}1.54\text{ g/cm}^3$ มีการดูดซึมน้ำประมาณ $26.48\text{-}36.59\%$

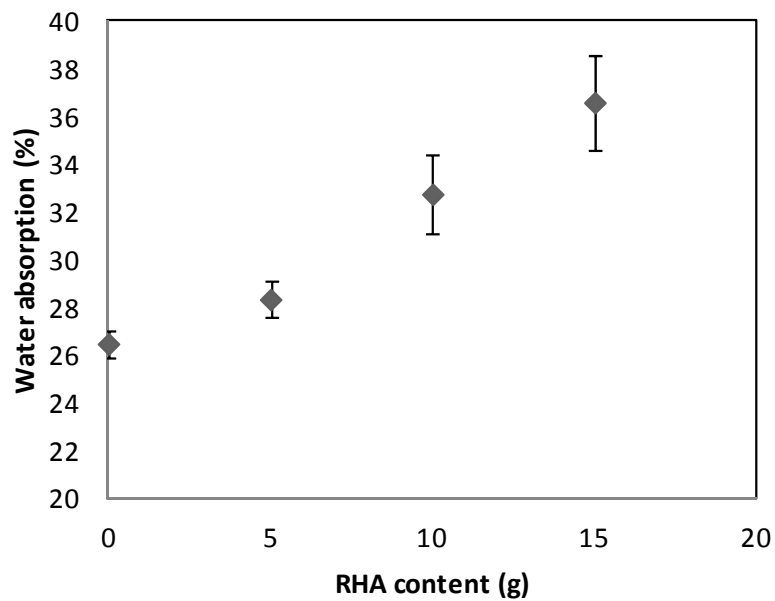
เมื่อบ่มตัวอย่างไว้ที่ 60°C พบว่า การเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเถ้าแกลบ ความหนาแน่น ความหนาแน่นของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงดังภาพที่ 4.36 การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.37 โดยตัวอย่างที่มีการเติมเถ้าแกลบ จะมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ $1.38\text{-}1.65\text{ g/cm}^3$ มีการดูดซึมน้ำประมาณ $17.65\text{-}33.47\%$

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่บ่มตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60°C จะทำให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นน้อยกว่า และการดูดซึมน้ำมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

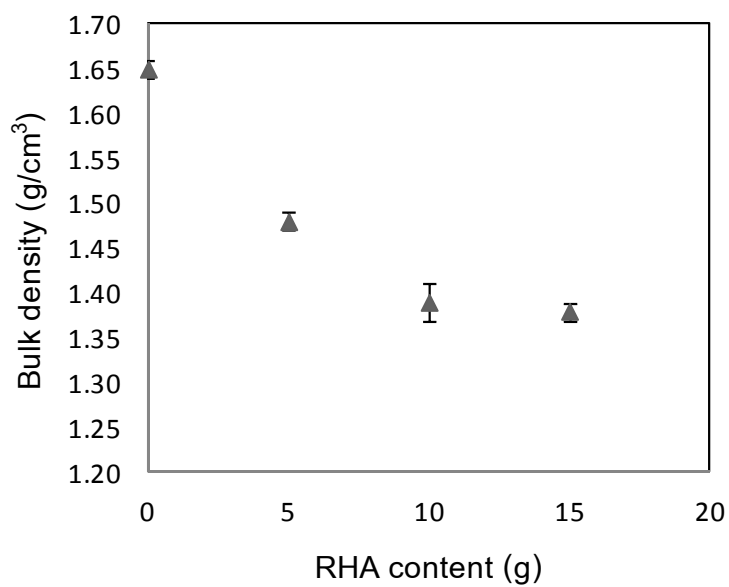
จากงานวิจัยของ S. Detphan และคณะ⁽¹⁹⁾ พบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ จะทำให้สัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบ เนื่องจากเถ้าแกลบมีความหนาแน่นต่ำกว่าเถ้าลอย



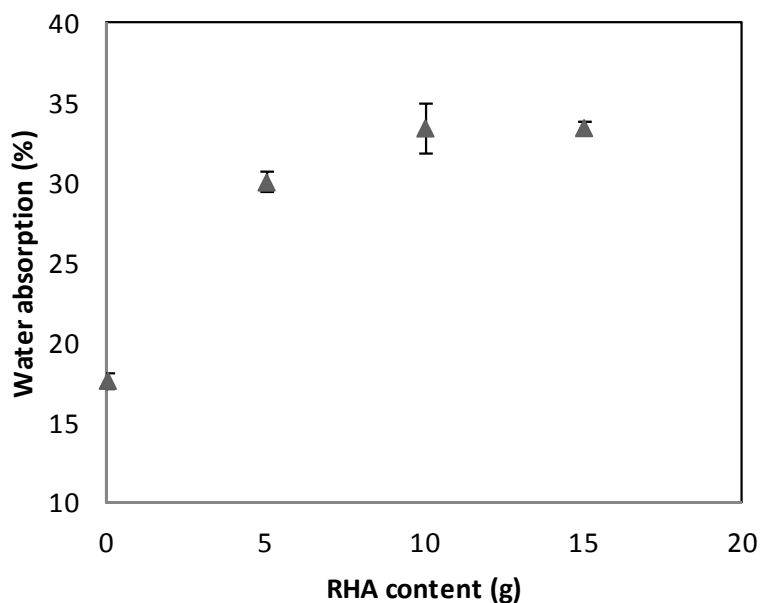
ภาพที่ 4.34 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.35 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.36 ความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่ 60 °C



ภาพที่ 4.37 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าแกลบ บ่มที่ 60 °C

เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์พบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C มีแนวโน้มที่ให้ค่าความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิในการบ่มมีผลต่อการระเหยของน้ำในโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์⁽²³⁾ ในการเกิดโครงสร้างของอะลูมิเนียมซิลิเกตผ่านกระบวนการควบแน่นเป็นพอลิเมอร์ และปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ จะมีการปลดปล่อยน้ำออกมา แต่น้ำส่วนใหญ่ถูกกักอยู่ในโพรงในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีการหดตัวต่ำ การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงไม่เพียงแต่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ แต่ยังเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำออกจากโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิสูงกว่ามีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า

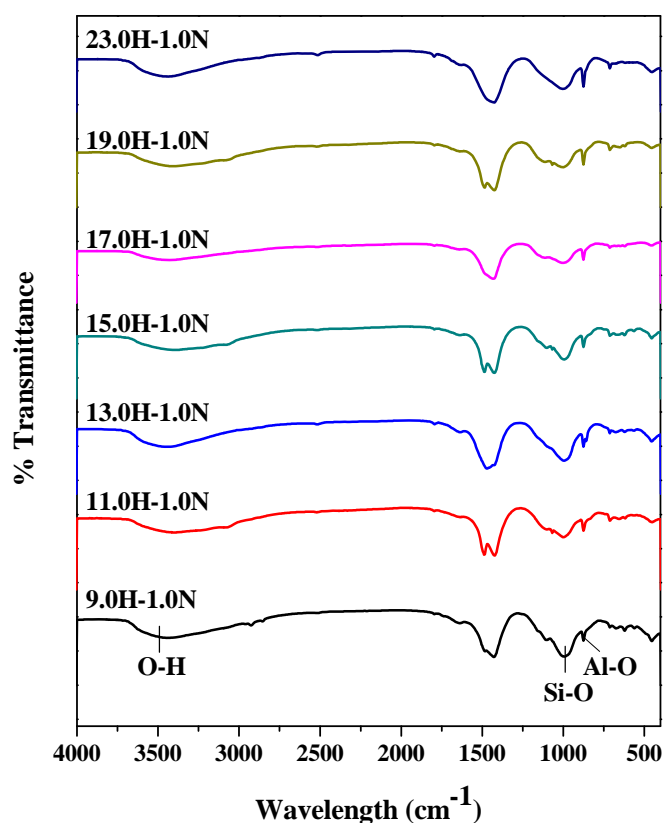
4.2.5 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

1) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำและอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

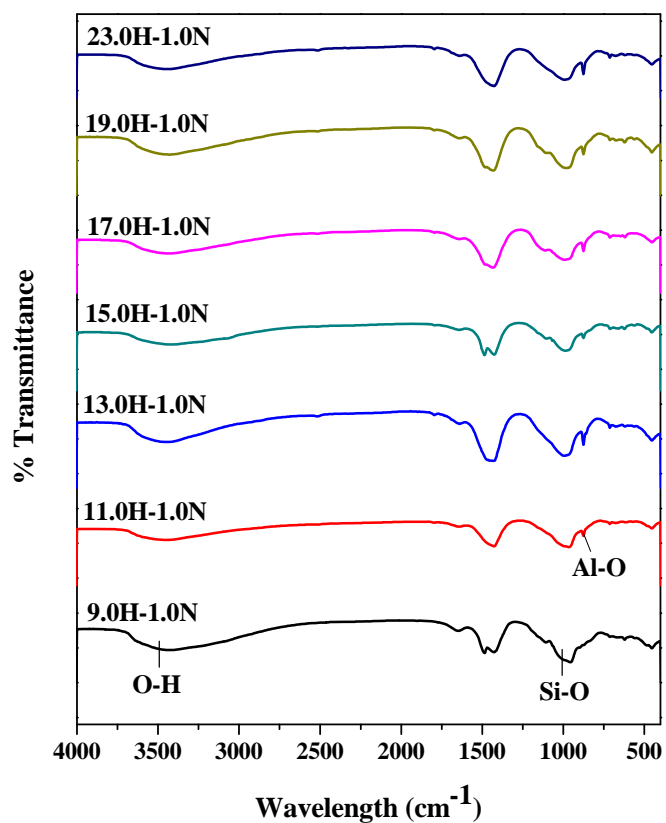
จากการศึกษาพันธะทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์ด้วย FT-IR Spectra^(8, 13, 28, 31, 39-41) พบว่าพีคที่ 950-1200 cm⁻¹ คือพีคของพันธะ Si-O ซึ่งการเกิดจีโอพอลิเมอร์บ่งชี้ด้วยแถบที่ประมาณ 870 ซึ่งแสดงถึง Al-O ใน tetrahedra แถบพีคอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเกิดจีโอพอลิเมอร์คือพีคที่

1650 cm^{-1} และ 3450 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ O-H ส่วนพีคที่ 1460 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับการเกิดสารประกอบคาร์บอเนตซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของของสารอัลคาไลไนไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ความลึกและความถี่ของพีคจะถูกใช้ในการประเมินระดับของการเกิดปฏิกิริยา

จากผลการทดสอบ FT-IR พบว่า ทุกตัวอย่างเกิดพีคที่ประมาณ 3450 cm^{-1} 1420 cm^{-1} 1000 cm^{-1} และ 870 cm^{-1} ดังภาพที่ 4.38 และ 4.39 ซึ่งพีค 3450 cm^{-1} แสดงถึงลักษณะพันธะ O-H ของ Si-OH พีคที่ 1420 cm^{-1} แสดงถึงสารประกอบคาร์บอเนต 1000 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ Si-O-Si และ และ 870 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ Al-O ตามลำดับ เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น พีคของ Si-O-Si มีความลึกน้อยลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ จะทำให้ความแข็งแรงของพันธะ Si-O-Si น้อยลง



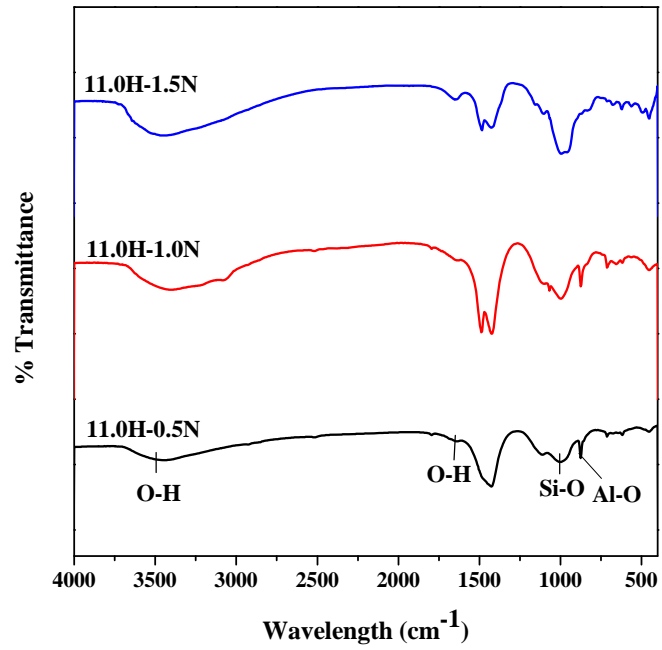
ภาพที่ 4.38 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ ปมที่อุณหภูมิห้อง



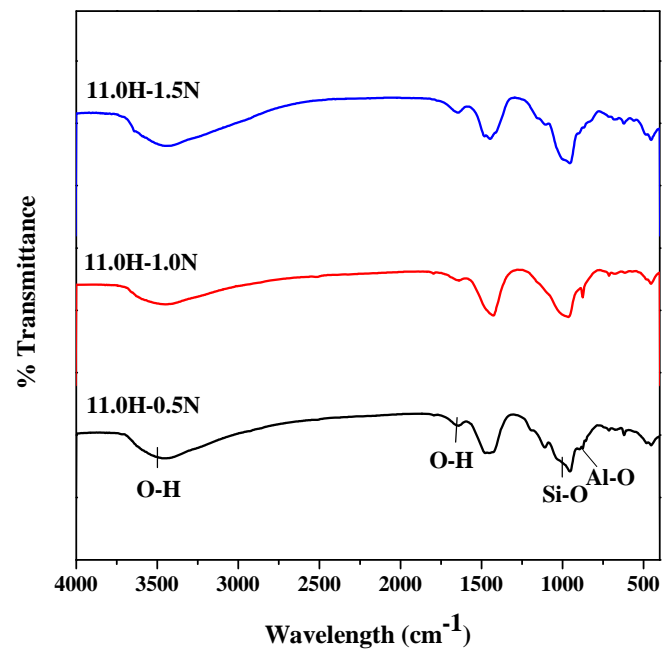
ภาพที่ 4.39 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ บ่มที่ 60 °C

2) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2O และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

จากผลการทดสอบพบว่า ทุกตัวอย่างเกิดพีคที่ประมาณ 3450 cm^{-1} 1420 cm^{-1} และ 1000 cm^{-1} เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 4.40 และ 4.41 คือมีพันธะของ O-H ของ Si-OH Sodium carbonate และพันธะ Si-O-Si แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ Na_2O พีคของ Si-O-Si มีความลึกมากขึ้น ส่วนพีคของพันธะ Al-O ที่ 870 cm^{-1} ปรากฏขึ้นที่สัดส่วน Na_2O 0.5 และ 1.0 โมล แต่พีคนี้จะหายไปเมื่อสัดส่วนของ Na_2O เป็น 1.5 โมล



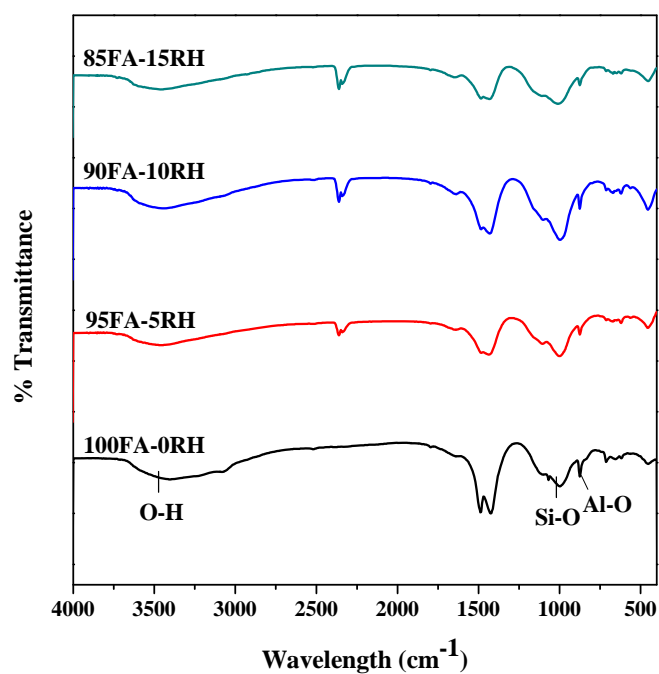
ภาพที่ 4.40 FT-IR ของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O ป่มที่อุณหภูมิห้อง



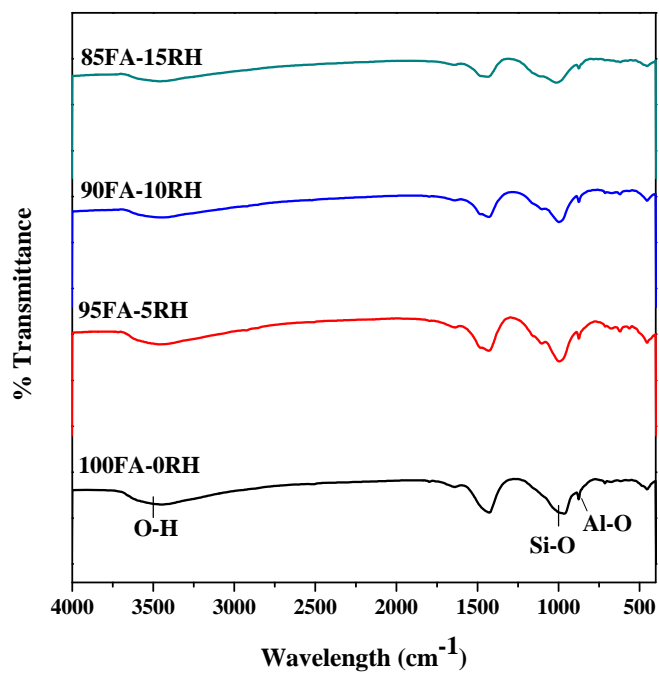
ภาพที่ 4.41 FT-IR ของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O ป่มที่ 60 °C

3) ผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลือบ และอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง

จากผลการทดสอบพบว่า ทุกตัวอย่างเกิดพีคที่ประมาณ 3450 cm^{-1} 1420 cm^{-1} 870 cm^{-1} 1000 cm^{-1} และ 870 cm^{-1} เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 4.42 และ 4.43 คือมีพันธะของ O-H ของ Si-OH พันธะของสารประกอบคาร์บอนเตต พันธะ Si-O-Si และพันธะ Al-O เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วเคลือบพบว่าพีคของพันธะ Si-O-Si ไม่มีความแตกต่างกันมากนักทั้งในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและ 60°C ส่วนพีคของพันธะ O-H มีความถี่ขึ้นเล็กน้อย ซึ่งหมายถึงความแข็งแรงของพันธะ O-H ลดลงเล็กน้อย



ภาพที่ 4.42 FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลือบ บ่มที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.43 FT-IR ของซีโอพอดิเมอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลือบ ปุ่มที่ 60 °C

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า

ในระบบที่ใช้สารตั้งต้นเป็นถ้ำลอยและสารละลายโซเดียมซิลิเกต เมื่อผสมผงวัตถุบับเข้ากับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ความหนืดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถเทตัวอย่างลงในแม่แบบสำหรับนำไปวัดค่าความแข็งแรงได้ เฟสของจีโอพอลิเมอร์ในระบบนี้ประกอบด้วย Calcite และ Calcium silicate ซึ่งเป็นเฟสเนื่องมาจากถ้ำลอยซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มปริมาณของ SiO_2 Al_2O_3 และปริมาณน้ำพบว่า ไม่ส่งผลต่อเฟสของ Calcite แต่เฟสของ Calcium silicate เกิดการละลายได้มากขึ้น

ในระบบที่ใช้สารตั้งต้นเป็นถ้ำลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เฟสที่คงอยู่ยังคงเป็น Calcite และ Calcium silicate เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องพบว่าไม่ส่งผลต่อเฟส Calcite แต่เฟสของ Calcium silicate มีแนวโน้มลดลง เฟสของ Meixnerite จากสารตั้งต้นยังปรากฏอยู่ในตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ และปรากฏเฟสของ Pirssonite เพิ่มขึ้นมา เนื่องจากการทำปฏิกิริยา carbonation ของโซเดียมกับบรรยากาศ เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60°C เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ จะเกิดการละลายของเฟส Calcite และ Calcium silicate เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ Na_2O ในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 60°C พบว่าการละลายของ Calcite และ Calcium silicate เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณของถ้ำกลบ (SiO_2) ในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่าไม่ส่งผลต่อการละลายของ Calcite และ Calcium silicate ส่วนเฟสของ Quartz จากถ้ำลอยยังคงหลงเหลืออยู่ในจีโอพอลิเมอร์ สำหรับตัวอย่างที่บ่มที่ 60°C การเติมถ้ำกลบลงไปส่งผลทำให้การละลายของ Calcite และ Calcium silicate เกิดขึ้นเล็กน้อย และเฟสของ Quartz ยังคงหลงเหลืออยู่เช่นกัน

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งจะลดลงเหมือนกันในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและที่ อุณหภูมิ 60°C เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง การปรับเปลี่ยนปริมาณของ Na_2O จาก 0.5 ไปเป็น 1.0 โมล จะทำให้ความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na_2O จาก 1.0 เป็น 1.5 โมล ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในการบ่มตัวอย่างไว้ที่ 60°C เมื่อเพิ่มสัดส่วน Na_2O พบว่าความแข็งแรงของตัวอย่างที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณถ้ำกลบ (SiO_2) ใน

ตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องพบว่าไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงมากนัก ส่วนตัวอย่างที่บ่มที่ 60 °C ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงกดแตกพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและที่ 60 °C มีความแข็งแรงต้านทานแรงดัดโค้งลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณของ Na₂O ในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและที่ 60 °C จาก 0.5 ไปเป็น 1.0 โมล ความแข็งแรงต้านทานแรงกดแตกค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ Na₂O จาก 1.0 เป็น 1.5 โมล ความแข็งแรงจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วแกลบ (SiO₂) ในตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องพบว่าไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงมากนัก ส่วนตัวอย่างที่บ่มที่ 60 °C ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ทั้งตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องและที่ 60 °C มีค่าความหนาแน่นลดลง การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ Na₂O ทำให้ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วแกลบ พบว่าตัวอย่างมีความหนาแน่นลดลงและการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบ FT-IR พบว่า ทุกตัวอย่างเกิดพีคที่ประมาณ 3450 cm⁻¹ 1420 cm⁻¹ 1000 cm⁻¹ และ 870 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงลักษณะพันธะ O-H ของ Si-OH พันธะของสารประกอบคาร์บอนेट พันธะ Si-O-Si และพันธะ Al-O ตามลำดับ เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงของพันธะ Si-O-Si น้อยลง เมื่อเพิ่มปริมาณ Na₂O ความแข็งแรงของพันธะ Si-O-Si จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วแกลบ พบว่าความแข็งแรงของพันธะ O-H ลดลงเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในตัวอย่างที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเพิ่มปริมาณ Na₂O และปริมาณแก้วแกลบในสารตั้งต้น สมบัติต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากยังทำการทดลองไม่มากพอ จึงไม่สามารถเห็นถึงความแตกต่างได้ชัดเจน ดังนั้นในอนาคตจึงควรทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของ Na₂O และปริมาณแก้วแกลบให้มีความหลากหลายมากขึ้น เช่น ทดลองใช้ปริมาณสัดส่วน Na₂O ที่ 0.5 0.7 1.0 1.2 1.5 2.0 โมล หรือทดลองใช้ปริมาณแก้วแกลบที่ 5 10 15 20 25 30 กรัม เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- (1) Davidovits, J. Geopolymer Chemistry & Applications. 2nd ed. France: Institut Geopolymere, 2008.
- (2) Thailand Concrete Association. Geopolymer Material [Online]. 2008. Available from: http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=80:--geopolymer-material--&catid=44:journal03&Itemid=55 [2011, December 20]
- (3) Komnitsas, K., and Zaharaki, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. Minerals Engineering 20 (2007): 1261-1277.
- (4) Geopolymer Institute. Geopolymer Introduction [Online]. 2006. Available from: <http://www.geopolymer.org/science/introduction> [2011, December 20]
- (5) Xu, H., and Van Deventer, J. S. J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. International Journal of Mineral Processing 59 (2000): 247-266.
- (6) Swanepoel, J. C., and Strydom, C. A. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. Applied Geochemistry 17 (2002): 1143-1148.
- (7) Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., and Lukey, G. C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. Chemical Engineering Journal 89 (2002): 63-73.
- (8) Guo, X., Shi, H., and Dick, W. A. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites 32 (2010): 142-147.
- (9) Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., and Lukey, G. C. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. Materials Letters 57 (2003): 1272-1280.
- (10) Engineering Today. Mae Moh Fly Ash [Online]. 2003. Available from: <http://www.engineeringtoday.net/magazine/articledetail.asp?arid=539&pid=74> [2011, December 22]

- (11) Grand Midas. Fly Ash [Online]. Available from: <http://www.g-midas.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538967484&Ntype=2> [2011, December 20]
- (12) Mae Moh EGAT. Lignite Fly Ash [Online]. Available from: http://maemoh.egat.com/index_maemoh.php?content=sara&topic=2 [2011, December 25]
- (13) Alvarez-Ayuso, E. and others. Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal combustion fly ashes. Journal of Hazardous Materials 154 (2008): 175-183.
- (14) RMUT Physics. Characteristic of Fly Ash [Online]. Available from: http://www.neutron.rmutphysics.com/teaching-glossary/index.php?Itemid=3&id=8105&option=com_content&task=view [2011, December 23]
- (15) ASTM, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete C618-00, 1991.
- (16) National Metal and Materials Technology Center. Rice Husk Ash [Online]. Available from: http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=865&Itemid=36 [2011, December 27]
- (17) De Silva, P., and Sagoe-Crenstil, K. Medium-term phase stability of $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ geopolymer systems. Cement and Concrete Research 38 (2008): 870-876.
- (18) Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt P. Compressive strength and degree of reaction of biomass and fly ash-based geopolymers. Construction and Building Materials 24 (2010): 236-240.
- (19) Detphan, S., and Chindaprasirt, P. Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 16 (2009): 720-726.
- (20) ASTM, Standard Test Methods for Apparent Porosity, Liquid Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure, C830-00, 2006.

- (21) Misra, M. K., Ragland, K. W., and Baker, A. J. Wood ash composition as a function of furnace temperature. Biomass and Bioenergy 4 (1993): 103-116.
- (22) Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites 29 (2007): 224-229.
- (23) Temuujin, J., Van Riessen, A., and Williams, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. Journal of Hazardous Materials 167 (2009): 82-88.
- (24) Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., and Lukey, G. C. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. Journal of Hazardous Materials 139 (2007): 506-513.
- (25) Lee, W. K. W., and Van Deventer, J. S. J. The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements. Cement and Concrete Research 32 (2002): 577-584.
- (26) Diaz, E. I., Allouche, E. N., and Eklund, S. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. Fuel 89 (2010): 992-996.
- (27) Barbosa, V. F. F., MacKenzie, K. J. D., and Thaumaturgo, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2 (2000): 309-317.
- (28) Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. Fuel 90 (2011): 2118-2124.
- (29) Rattanasak, U., and Chindaprasirt, P. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. Minerals Engineering 22 (2009): 1073-1078.
- (30) Fletcher, R. A., MacKenzie, K. J. D., Nicholson, C. L., and Shimada, S. The composition range of aluminosilicate geopolymers. Journal of the European Ceramic Society 25 (2005): 1471-1477.

- (31) Panyas, D., Giannopoulou, I. P., and Perraki, T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 301 (2007): 246-254.
- (32) Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., and Yue, C. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. Applied Clay Science 43 (2009): 218-223.
- (33) Xu, H., and Van Deventer, J. S. J. The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 216 (2003): 27-44.
- (34) Duxson, P. and others. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 269 (2005): 47-58.
- (35) De Jong, B. H. W. S., and Brown Jr, G. E. Polymerization of silicate and aluminate tetrahedra in glasses, melts, and aqueous solutions-I. Electronic structure of $H_6Si_2O_7$, $H_6AlSiO_7^{1-}$, and $H_6Al_2O_7^{2-}$. Geochimica et Cosmochimica Acta 44 (1980): 491-511.
- (36) Duxson, P., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W. M., and Van Deventer, J. S. J. Microstructural characterisation of metakaolin-based geopolymers. Advances in Ceramic Matrix Composites 165 (2005): 71-85, 182.
- (37) Provis, J. L., and Van Deventer, J. S. J. Geopolymerisation kinetics 1. In situ energy-dispersive X-ray diffractometry. Chemical Engineering Science 62 (2007): 2309-2317.
- (38) Provis, J., and Van Deventer, J. Direct measurement of the kinetics of geopolymerisation by in-situ energy dispersive X-ray diffractometry. Journal of Materials Science 42 (2007): 2974-2981.

- (39) Lee, W. K. W., and Van Deventer, J. S. J. Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 211 (2002): 49-66.
- (40) Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. Waste Management 29 (2009): 539-543.
- (41) Bakharev, T. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. Cement and Concrete Research 35 (2005): 1224-1232.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

Pattern : 01-072-1652		Radiation = 1.540598		Quality : Alternate		
CaCO ₃		2th	i	h	k	l
Calcium Carbonate Calcite		23.069	98	0	1	2
		29.452	999	1	0	4
		31.547	21	0	0	6
		35.966	139	1	1	0
		39.429	184	1	1	3
		43.164	145	2	0	2
		47.146	63	0	2	4
		47.646	184	0	1	8
		48.580	193	1	1	6
		56.559	32	2	1	1
		57.401	88	1	2	2
		58.270	10	1	0	10
		60.693	48	2	1	4
		61.113	21	2	0	8
		61.521	26	1	1	9
		63.093	20	1	2	5
		64.654	57	3	0	0
		65.869	32	0	0	12
		69.267	11	2	1	7
		70.410	18	0	2	10
		72.996	24	1	2	8
		73.722	5	3	0	6
		76.264	10	2	2	0
		77.397	17	1	1	12
		78.434	1	2	2	3
		80.224	1	1	3	1
		80.939	5	3	1	2
		81.683	21	2	1	10
		82.426	3	0	1	14
		83.788	37	1	3	4
		84.856	18	2	2	6
		85.913	1	3	1	5
		86.650	5	1	2	11
Lattice : Rhombohedral S.G. : R-3c (167) a = 4.99000 c = 17.00200 Z = 6		Mol. weight = 100.09 Volume [CD] = 366.63 Dx = 2.720 l/lor = 3.20				
ICSD collection code: 018166 Temperature factor: ATF Test from ICSD: At least one TF missing. Remarks from ICSD/CSD: REM M PDF 5-586. Additional pattern: See PDF 85-1108. Data collection flag: Ambient.						
Chessin, H., Hamilton, W.C., Acta Crystallogr., volume 18, page 689 (1965) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuKa1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30=1000(0.0000,30)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ภาพที่ ก1 JCPDS ของ Calcite (CaCO₃)

Pattern : 00-042-0551		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Ca ₃ SiO ₅		2th	i	h	k	l
Calcium Silicate		14.927	12	2	0	1
		16.132	4	2	0	2
		22.962	3	-2	0	5
		23.016	4	1	1	5
		25.223	4	3	1	0
		25.303	2	0	2	0
		27.455	3	3	1	3
		28.028	4	0	1	7
		29.396	40	-4	0	1
		29.505	75	2	2	1
		30.085	12	4	0	2
		30.147	25	-2	2	2
		32.256	85	0	0	9
		32.558	45	-4	0	4
		32.680	75	2	2	4
		33.280	6	-3	1	6
		*33.280	6	3	1	6
		34.413	100	2	2	5
		36.743	9	1	0	10
		38.731	9	-4	0	7
		38.853	20	2	2	7
		41.365	60	3	1	9
		41.685	15	-4	2	4
		41.786	7	1	3	4
		43.805	3	2	3	4
		45.790	5	-6	0	3
		45.937	10	3	3	3
		46.917	7	-4	0	10
		47.046	13	2	2	10
		49.728	7	-6	0	6
		49.932	5	3	3	6
		50.079	6	3	2	10
		51.784	55	6	2	0
		51.974	30	0	4	0
		54.094	2	5	1	10
		54.267	2	5	3	1
		56.029	5	6	0	9
		*56.029	5	3	3	9
		56.555	5	-6	2	6
		56.668	15	6	2	6
		60.069	20	6	1	10
		*60.069	20	6	3	0
		60.634	1	-8	0	1
		60.810	2	4	4	1
		61.211	2	4	4	2
		62.306	10	-6	2	9
		62.399	10	6	2	9
		62.493	10	8	0	4
		62.728	5	-7	0	9
		63.156	2	-3	4	7
		*63.156	2	-8	1	3
		63.590	4	-8	0	5
		63.834	10	4	4	5
		65.392	1	-5	4	1
		66.602	2	8	0	7
		*66.602	2	4	4	7
		68.482	5	2	5	1
		*68.482	5	-8	2	4
<p>Regourd, M., Centre Technique Industriel, Paris, France., Private Communication (1979)</p>						
<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54050</p> <p>SS/FOM : F30= 6(0.0107,447)</p>		<p>Filter : Monochromator crystal</p> <p>d-sp : Guinier</p> <p>External standard : SiO₂</p>				
<p>Lattice : Monoclinic</p> <p>S.G. : P (0)</p> <p>a = 12.23300</p> <p>b = 7.03400</p> <p>c = 24.96000</p> <p>a/b = 1.73912</p> <p>c/b = 3.54848</p>		<p>Mol. weight = 228.32</p> <p>Volume [CD] = 2147.73</p> <p>Dx = 3.178</p>		<p>beta = 90.10</p> <p>Z = 18</p>		
<p>Sample preparation: Synthesized from CaO, Si O₂, Al₂ O₃ and MgO for 1 hour at 1600 C.</p> <p>Analysis: Microprobe analysis (wt.%): CaO 71.7, Si O₂ 25.9, Al₂ O₃ 0.6, MgO 1.8.</p> <p>General comments: Chemical composition close to that of alite from commercial Portland cement clinkers.</p> <p>Deleted and rejected by: Deleted by 49-442, higher F_N; LCA 6/98.</p> <p>Data collection flag: Ambient.</p>						

ภาพที่ ก2 JCPDS ของ Calcium silicate (Ca₃SiO₅)

Pattern : 01-074-1467		Radiation = 1.540598					Quality : Alternate				
CaAl ₄ O ₇		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Calcium Aluminum Oxide		12.303	6	1	1	0	*69.390	23	6	2	2
		14.403	78	2	0	0	69.606	25	9	1	0
		19.287	29	-1	1	1	69.893	7	-4	0	4
		20.022	460	0	2	0	70.084	13	-3	1	4
		22.726	10	1	1	0	70.710	54	4	6	0
		23.911	4	3	1	0	*70.710	54	-4	6	1
		24.751	167	2	2	0	70.843	30	5	5	1
		25.507	999	-3	1	1	71.491	2	-1	1	4
		26.408	20	0	2	1	71.859	14	3	5	2
		27.658	83	-2	2	1	71.960	25	-7	3	3
		29.039	233	4	0	0	72.138	38	8	2	1
		31.112	190	1	3	0	72.466	24	3	3	3
		32.573	272	2	2	1	72.466	24	-5	1	4
		33.071	248	3	1	1	72.699	23	-8	4	1
		34.478	311	0	0	2	*72.699	23	0	0	4
		34.614	492	-1	3	1	73.022	14	-2	6	2
		*34.614	492	-1	1	2	*73.022	14	-2	2	4
		35.526	118	4	2	0	73.541	33	-4	2	4
		35.614	72	-4	2	1	73.715	21	-9	3	1
		36.577	34	-3	1	2	*73.715	21	0	6	2
		36.727	26	1	3	1	74.118	21	7	1	2
		37.029	162	-5	1	0	74.118	21	-6	0	4
		37.505	31	5	1	0	74.416	18	-7	5	1
		37.958	2	5	1	1	75.202	10	8	4	0
		38.309	8	-4	0	2	75.337	27	-10	0	2
		38.587	11	-3	3	1	*75.337	27	-3	5	3
		38.752	108	1	1	2	75.786	20	-9	3	2
		39.149	3	-2	4	0	75.897	10	-9	1	3
		40.190	1	0	2	2	*75.897	10	4	6	1
		40.690	14	0	4	0	76.070	36	-4	6	0
		41.419	95	2	0	2	76.293	20	7	5	2
		43.379	21	4	2	0	*76.293	20	0	2	4
		*43.379	21	2	4	0	76.620	12	5	1	3
		43.594	27	-4	2	2	*76.620	12	1	1	4
		43.915	73	-5	1	2	70.844	11	9	3	0
		44.180	141	6	0	0	77.437	8	-1	7	1
		*44.180	141	3	3	3	*77.437	8	-10	2	1
		44.411	40	0	4	1	77.626	10	10	0	0
		45.217	25	-2	4	1	77.746	6	-6	2	4
		45.411	84	-1	3	2	*77.746	6	-7	5	2
		46.309	55	5	1	1	78.009	4	9	1	1
		46.413	37	2	2	2	78.114	3	2	6	2
		46.985	34	-3	3	2	78.632	21	1	7	1
		47.355	13	-5	3	1	*78.632	21	-1	3	4
		*47.355	13	-6	2	1	78.824	16	-6	6	1
		47.624	6	3	1	2	*78.824	16	-10	2	2
		47.888	84	-6	0	2	79.110	6	3	7	0
		48.119	56	5	3	0	79.227	12	1	5	3
		48.777	66	1	3	2	79.624	2	-5	3	4
		48.950	37	6	2	0	*79.624	2	2	0	4
		50.828	121	-4	4	4	80.025	1	6	6	0
		*50.828	121	-7	1	1	80.173	3	6	4	2
		51.993	95	-3	1	3	81.211	11	10	2	0
		52.115	55	1	5	0	*81.211	11	7	3	2
		*52.115	55	-1	1	3	81.408	6	8	0	2
		52.401	8	-6	2	2	81.800	2	5	5	2
		53.137	7	7	1	0	82.026	16	-8	0	4
		*53.137	7	-5	3	2	82.793	5	-6	6	2
		53.545	5	-2	4	2	*82.793	5	8	4	1
		54.461	60	-1	5	1	82.946	8	-9	3	3
		54.912	12	-7	1	2	83.138	14	2	2	4
		55.257	17	5	3	1	*83.138	14	-8	4	3
		55.962	5	1	5	1	83.655	10	1	3	4
		56.318	17	-5	1	3	*83.655	10	-2	4	4
		56.526	48	4	2	2	83.786	20	-11	1	1
		*56.526	48	3	5	0	*83.786	20	4	4	3
		56.752	51	6	2	1	84.144	7	-4	4	4
		*56.752	51	-4	2	3	84.397	5	-1	7	2
		56.934	56	4	4	1	84.538	2	-11	1	2
		57.116	29	-4	4	2	84.609	2	-2	6	3
		57.323	23	-3	5	1	84.896	1	8	2	2
		59.309	28	-7	3	1	85.015	1	9	3	1
		59.460	49	2	4	2	85.336	13	3	1	4
		59.652	84	5	1	2	*85.336	13	-10	2	3
		60.188	44	8	0	0	85.551	19	-3	7	2
		00.448	178	-8	0	2	*85.551	19	-7	3	4
		*60.448	178	-1	3	3	85.809	16	-5	7	1
		61.390	47	7	3	0	86.105	18	-7	5	3
		*61.390	47	-8	2	1	*86.105	18	6	2	3
		61.617	29	6	4	0	86.376	13	-4	6	3
		*61.617	29	3	5	1	*86.376	13	5	7	0
		62.598	2	-1	5	2	86.512	9	0	6	3
		62.866	27	0	6	0	86.810	5	0	4	4
		63.002	23	-7	3	2	87.780	1	-9	5	1
		63.360	19	2	2	3	88.109	12	-9	1	4
		63.868	19	-3	5	2	*88.109	12	0	8	0
		64.170	21	8	2	0	89.312	1	-10	4	2
		*64.170	21	-5	5	1	89.782	11	-9	5	2
		64.297	26	-5	3	3	*89.782	11	10	2	1
		*64.297	26	-8	2	2					
		64.497	14	-7	1	3					
		64.617	12	-6	4	2					
		*64.617	12	1	3	3					
		64.872	19	2	6	0					
		65.029	19	3	1	3					
		65.339	10	1	5	2					
		65.660	28	6	0	2					
		*65.660	28	0	6	1					
		66.336	8	-2	6	1					
		*66.336	8	-9	1	1					
		66.863	28	-2	4	3					
		67.395	2	5	3	2					
		68.473	109	6	4	1					
		*68.473	109	-9	1	2					
		68.714	59	0	4	4					
		68.911	18	7	3	1					
		*68.911	18	2	6	1					
		69.390	23	-2	0	4					
Lattice : Monoclinic S.G. : C2/c (15) a = 12.83980 b = 8.86240 c = 5.43110 a/b = 1.44879 c/b = 0.61282		Mol. weight = 260.00 Volume [CD] = 591.54 Dx = 2.919 l/ncor = 1.17		beta = 106.83 Z = 4		ICSD collection code : 027264 Temperature factor : ATF Data collection flag : Ambient.		Radiation : CuKa1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30=1000(0.0004,32)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings	
Goodwin, D.W., Lindop, A.J., Acta Crystallogr., Sec. B, volume 26, page 1230 (1970) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)											

ภาพที่ 3 JCPDS ของ Calcium aluminum oxide (CaAl₄O₇)

Pattern : 00-046-1045		Radiation = 1.540598		Quality : High		
SiO ₂		2θ	i	h	k	l
Silicon Oxide Quartz, syn		20.860	16	1	0	0
		26.640	100	1	0	1
		36.544	9	1	1	0
		39.465	8	1	0	2
		40.300	4	1	1	1
		42.450	6	2	0	0
		45.793	4	2	0	1
		50.139	13	1	1	2
		50.622	1	0	0	3
		54.875	4	2	0	2
		55.325	2	1	0	3
		57.235	1	2	1	0
		59.960	9	2	1	1
		64.036	2	1	1	3
		65.786	1	3	0	0
		67.744	6	2	1	2
		68.144	7	2	0	3
		68.318	5	3	0	1
		73.468	2	1	0	4
		75.660	3	3	0	2
		77.675	1	2	2	0
		79.884	2	2	1	3
		80.047	1	2	2	1
		81.173	2	1	1	4
		81.491	2	3	1	0
		83.840	1	3	1	1
		84.957	1	2	0	4
		87.439	1	3	0	3
		90.831	2	3	1	2
		92.788	1	4	0	0
		94.651	1	1	0	5
		95.119	1	4	0	1
		96.238	1	2	1	4
		98.750	1	2	2	3
		102.231	1	1	1	5
		102.567	1	3	1	3
		103.877	1	3	0	4
		104.203	1	3	2	0
		106.593	1	3	2	1
		112.114	1	4	1	0
		114.061	1	3	2	2
		114.467	2	4	0	3
		114.639	2	4	1	1
		115.885	1	2	2	4
		117.537	1	0	0	6
		118.313	1	2	1	5
		120.124	1	3	1	4
		121.853	1	1	0	6
		122.605	1	4	1	2
		127.251	1	3	0	5
		131.203	1	1	1	6
		132.756	1	5	0	1
		134.293	1	4	0	4
		136.424	1	2	0	6
		137.895	2	4	1	3
		140.318	1	3	3	0
		143.251	3	5	0	2
		144.119	1	3	3	1
Lattice : Hexagonal S.G. : P3221 (154) a = 4.91344 c = 5.40524 Z = 3		Mol. weight = 60.08 Volume [CD] = 113.01 Dx = 2.649 Dm = 2.660 l/cor = 3.41				
Color: White Temperature of data collection: Pattern taken at 23(1) C. General comments: Low temperature quartz. General comments: 2 θ determination based on profile fit method. Optical data: B=1.544, Q=1.553, Sign=+ Additional pattern: To replace 33-1161. Data collection flag: Ambient.		Kern, A., Eysel, W., Mineralogisch-Petrograph. Inst., Univ. Heidelberg, Germany., ICDD Grant-in-Aid (1993)				
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30=539(0.0018,31)		Filter : Monochromator crystal d-sp : Diffractometer Internal standard : Si				

ภาพที่ ก4 JCPDS ของ Quartz (SiO₂)

Pattern : 00-050-1684		Radiation = 1.540598		Quality : High		
[Mg ₅ Al ₃ (OH) ₁₆][(OH) ₃ (H ₂ O) ₄]		2th	i	h	k	l
Magnesium Aluminum Hydroxide Hydrate Meixnerite		11.691	100	0	0	3
		23.521	67	0	0	6
		34.232	1	1	0	1
		34.952	11	0	1	2
		35.612	87	0	0	9
		39.532	5	0	1	5
		47.073	15	0	1	8
		48.123	14	0	0	12
		53.263	4	1	0	10
		56.664	1	0	1	11
		60.874	4	1	1	0
		62.224	2	1	1	3
		63.974	2	1	0	13
		66.204	1	1	1	6
Lattice : Rhombohedral	Mol. weight = 597.67					
S.G. : R-3m (166)	Volume [CD] = 181.56					
a = 3.04100	Dx = 2.023					
c = 22.67000	I/cor = 7.00					
Sample source or locality: Specimen from Zeilberg, Maroldsweisach, Bavaria, Germany.						
Color: Colorless						
Analysis: Chemical analysis (wt.%): Mg O 33.7, Al ₂ O ₃ 25.6, H ₂ O 40.3.						
Additional pattern: See 38-478 for calculated data.						
Data collection flag: Ambient.						
Pollmann, H., Witzke, T., Goske, J., Dickschas, D., Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, Germany., ICDD Grant-in-Aid (1998)						
Radiation : CuKα1	Filter : Monochromator crystal					
Lambda : 1.54051	d-sp : Diffractometer					
SS/FOM : F14=125(0.0066,17)	External standard : Si					

ภาพที่ ๓5 JCPDS ของ Meixnerite (Mg₅Al₃(OH)₁₆)((OH)₃(H₂O)₄)

Pattern : 00-022-0476		Radiation = 1.540598		Quality : Indexed		
Na ₂ Ca(CO ₃) ₂ ·2H ₂ O		2th	i	h	k	l
Sodium Calcium Carbonate Hydrate Pirssonite		17.272	70	1	1	1
		17.978	60	2	2	0
		21.342	18	1	3	1
		23.707	6	2	4	0
		27.858	25	1	5	1
		28.309	50	3	1	1
		30.972	50	3	3	1
		31.601	6	4	0	0
		32.828	35	4	2	0
		33.745	90	2	0	2
		34.953	80	2	2	2
		35.803	100	0	8	0
		38.303	14	2	4	2
		39.241	25	2	8	0
		40.340	6	0	6	2
		41.786	4	4	6	0
		42.402	35	3	7	1
		42.931	25	5	1	1
		44.029	18	1	9	1
		44.833	70	5	3	1
		46.209	4	1	1	3
		48.023	18	2	10	0
		48.486	6	4	8	0
		49.127	10	6	2	0
		49.991	25	2	8	2
		51.596	50	1	5	3
		52.133	4	4	6	2
		53.547	14	3	3	3
		53.819	14	5	7	1
		55.008	14	0	10	2
		56.029	6	6	6	0
		56.517	6	1	7	3
		57.480	14	2	12	0
		58.397	6	6	2	2
		59.388	10	7	1	1
		60.854	18	7	3	1
		61.571	10	3	7	3
		63.444	6	5	3	3
		64.729	18	4	12	0
		66.070	6	2	12	2
		67.417	10	2	14	0
		69.057	6	8	4	0
		70.480	4	1	11	3
		71.528	10	4	2	4
		72.935	10	1	15	1
		73.528	4	0	8	4
		74.132	10	4	14	0
		75.515	6	2	14	2
		76.372	6	5	13	1
		77.177	6	7	3	3
		77.699	6	9	1	1
		78.613	6	1	13	3
		79.631	4	7	5	3
		80.353	6	8	6	2
		81.007	6	7	11	1
		81.757	6	9	5	1
		83.660	6	6	12	2
		84.468	6	4	0	0
		85.762	6	9	7	1
		88.189	10	3	1	1
		91.324	10	9	9	1
		92.653	2	3	15	3
		94.029	2	10	2	2
		95.821	6	4	12	4
		96.811	2	8	0	4
		97.956	2	9	11	1
		99.401	10	10	6	2
		100.623	6	3	1	1
		103.334	6	3	3	3
Lattice : Face-centered orthorhombic		Mol. weight = 242.11				
S.G. : Fdd2 (43)		Volume [CD] = 1362.48				
a = 11.32000		Dx = 2.361				
b = 20.06000		Dm = 2.382				
c = 6.00000						
a/b = 0.56431		Z = 8				
c/b = 0.29910						
Optical data : A=1.504, B=1.509, Q=1.573, Sign=+, 2V=27°						
Color : Colorless, white						
Sample source or locality : Specimen from John Hay, Jr., well 1, Sweetwater County, Wyoming, USA.						
Additional pattern : To replace 2-1051.						
Additional diffraction line(s) : Plus additional weak reflections.						
Structure : Suolunite is the Si analogue.						
Data collection flag : Ambient.						
Fahey, J., Mrose, M., U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, volume 405, page 1-50 (1962)						
CAS Number: 10347-59-8						
Radiation : CuKα		Filter : Beta				
Lambda : 1.54180		d-sp : Debye-Scherrer				
SS/FOM : F30= 21(0.0310,46)						

ภาพที่ 6 JCPDS ของ Pirssonite (Na₂Ca(CO₃)₂·2H₂O

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข1 ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ

ชื่อสูตร	ความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้ง (MPa)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
9.0H-1.0N	3.98	1.04	2.44	0.26
11.0H-1.0N	2.00	0.37	1.66	0.08
13.0H-1.0N	1.82	0.16	1.24	0.66
15.0H-1.0N	1.23	0.79	0.83	0.18
17.0H-1.0N	1.70	0.24	0.55	0.23
19.0H-1.0N	1.17	0.30	0.40	0.08
23.0H-1.0N	0.30	0.02	0.29	0.05

ตารางที่ ข2 ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O

ชื่อสูตร	ความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้ง (MPa)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11.0H-0.5N	2.10	0.42	0.53	0.17
11.0H-1.0N	2.00	0.37	1.66	0.08
11.0H-1.5N	2.48	0.19	1.98	0.10

ตารางที่ ข3 ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้งของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลือบ

ชื่อสูตร	ความแข็งแรงด้านทานแรงดัดโค้ง (MPa)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
100FA-0RH	2.00	0.37	1.66	0.08
95FA-5RH	1.48	0.03	1.65	0.22
90FA-10RH	1.69	0.06	2.52	0.07
85FA-15RH	1.43	0.02	2.76	0.76

ตารางที่ ข4 ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ

ชื่อสูตร	ความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตก (MPa)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
9.0H-1.0N	5.51	0.45	8.66	0.08
11.0H-1.0N	3.94	0.35	8.39	0.32
13.0H-1.0N	3.07	0.17	7.92	0.44
15.0H-1.0N	1.22	0.05	3.20	0.11
17.0H-1.0N	1.22	0.16	2.49	0.07
19.0H-1.0N	0.71	0.01	1.58	0.04
23.0H-1.0N	0.38	0.03	0.95	0.14

ตารางที่ ข5 ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2O

ชื่อสูตร	ความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตก (MPa)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11.0H-0.5N	3.23	0.17	6.25	0.36
11.0H-1.0N	3.94	0.35	8.39	0.32
11.0H-1.5N	3.48	0.17	8.36	1.46

ตารางที่ ข6 ค่าความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตกของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้ว
แคลบ

ชื่อสูตร	ความแข็งแรงด้านทานแรงกดแตก (MPa)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
100FA-0RH	3.94	0.35	8.39	0.32
95FA-5RH	2.27	0.25	9.56	0.54
90FA-10RH	1.68	0.08	14.09	0.26
85FA-15RH	1.96	0.39	13.36	0.99

ตารางที่ ๗7 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ

ชื่อสูตร	ความหนาแน่น (g/cm ³)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
9.0H-1.0N	1.78	0.02	1.72	0.04
11.0H-1.0N	1.54	0.01	1.65	0.01
13.0H-1.0N	1.53	0.11	1.48	0.01
15.0H-1.0N	1.46	0.03	1.46	0.04
17.0H-1.0N	1.36	0.03	1.35	0.02
19.0H-1.0N	1.26	0.02	1.29	0.01
23.0H-1.0N	1.06	0.02	1.17	0.02

ตารางที่ ๗8 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na₂O

ชื่อสูตร	ความหนาแน่น (g/cm ³)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11.0H-0.5N	1.52	0.03	1.48	0.03
11.0H-1.0N	1.54	0.01	1.65	0.01
11.0H-1.5N	1.57	0.01	1.53	0.04

ตารางที่ ข9 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วกลบ

ชื่อสูตร	ความหนาแน่น (g/cm ³)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
100FA-0RH	1.54	0.01	1.65	0.01
95FA-5RH	1.51	0.01	1.48	0.01
90FA-10RH	1.44	0.02	1.39	0.02
85FA-15RH	1.32	0.02	1.38	0.01

ตารางที่ ข10 ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ

ชื่อสูตร	การดูดซึมน้ำ (%)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
9.0H-1.0N	14.82	0.31	12.16	0.79
11.0H-1.0N	26.48	0.57	17.65	0.48
13.0H-1.0N	27.61	3.14	25.27	0.63
15.0H-1.0N	26.51	2.40	26.44	3.08
17.0H-1.0N	30.78	2.50	32.71	1.40
19.0H-1.0N	36.72	1.56	35.69	0.95
23.0H-1.0N	56.64	2.79	42.59	2.53

ตารางที่ ข11 ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ Na_2O

ชื่อสูตร	การดูดซึมน้ำ (%)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
11.0H-0.5N	28.84	1.23	32.52	0.56
11.0H-1.0N	26.48	0.57	17.65	0.48
11.0H-1.5N	27.23	0.78	26.48	1.34

ตารางที่ ข12 ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณแก้วเคลือบ

ชื่อสูตร	การดูดซึมน้ำ (%)			
	บ่มที่อุณหภูมิห้อง		บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
100FA-0RH	26.48	0.57	17.65	0.48
95FA-5RH	28.34	0.75	30.07	0.63
90FA-10RH	32.75	1.65	33.45	1.50
85FA-15RH	36.59	1.98	33.47	0.41

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรกมล ไชยภูมิ เกิดวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2552 และได้เข้าศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2552 และสำเร็จการศึกษาเดือนมีนาคม 2555

- การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Influences of Alkali Activators on Physical Properties of Fly Ash Based Geopolymers” ในการประชุม ทางวิชาการ The 1st National Research Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials and The 16th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers ในวันที่ 22 เมษายน 2553 จัดโดย วิทยาลัยปิโตรเลียม และปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ณ ห้องราชมนเฑียรแกรนด์บอลรูม โรงแรม มณเฑียร กรุงเทพมหานคร

- การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Fly Ash and Rice Husk Based Geopolymer” ในการประชุมทางวิชาการ The 6th Mathematics and Physicals Science Graduate Congress ระหว่างวันที่ 13-15 ธันวาคม 2553 จัดโดย Faculty of Science, University of Malaya ประเทศมาเลเซีย

- การนำเสนอผลงานทางวิชาการแบบ Poster presentation เรื่อง “Preparation and Characterization of Fly Ash Based Geopolymer” ในการประชุมทางวิชาการ The 1st Joint Symposium CU-NUT ระหว่างวันที่ 23-24 ธันวาคม 2553 จัดโดยคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

- การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Preparation of Geopolymer Using Fly Ash and Rice Husk Silica as Raw Materials” ใน การประชุมทางวิชาการ The 18th International Conference on Composite Materials (ICCM18) ระหว่างวันที่ 21-26 สิงหาคม พ.ศ. 2554 จัดโดย The Korean Society for Composite Materials ณ เกาะเจจู ประเทศเกาหลีใต้ และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding