

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนโดยใช้สารก่อฟองอินทรีย์

นายอาณัติ สายกระสุน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF POROUS GEOPOLYMER USING INORGANIC FOAMING AGENTS

Mr. Anut Saikrasoon



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนโดยใช้สารก่อฟองอินทรีย์
โดย	นายอาณัติ สายกระสุน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุจฤทัย พงษ์เก๋า คชะสีมา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ปาจรีย์ ถาวรนิติ)

อาณัติ สายกระสุน : การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนโดยใช้สารก่อฟองอนินทรีย์ (SYNTHESIS OF POROUS GEOPOLYMER USING INORGANIC FOAMING AGENTS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. พัทธ์ชัย เหล่ารัตนกุล, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์พูนฐานดินขาวเผาโดยใช้สารก่อฟองอนินทรีย์ได้แก่ ซิลิกาฟุ่ม ตะกรันอะลูมิเนียม และผงอะลูมิเนียม โดยการเตรียมดินขาวเผาทำได้ด้วยการนำดินขาวไปบดเพื่อลดขนาดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 150 เมช หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สำหรับการใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟองสามารถแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วนคือ ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแอลคาไลน์ต่อสมบัติจีโอพอลิเมอร์พูนโดยใช้สัดส่วนดินขาวเผาต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนที่สองศึกษาผลของสัดส่วนดินขาวเผาต่อซิลิกาฟุ่มต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์พูน โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ที่ 10 โมลาร์ บ่มด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องจนครบ 28 วัน นำไปทดสอบสมบัติการนำความร้อน พบว่าชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนมีการนำความร้อนต่ำ นอกจากนี้จากการทดสอบการละลายน้ำของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานทุกสัดส่วนมีความไม่เสถียรเมื่ออยู่ในน้ำ สำหรับการทดลองที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วนคือ ศึกษาผลของปริมาณตะกรันอะลูมิเนียมในปริมาณต่างๆ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์พูน ส่วนที่สองศึกษาผลของสัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนที่สามศึกษาผลของสัดส่วนของแข็งต่อของเหลว จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนคือ ชิ้นงานที่เติมตะกรันอะลูมิเนียม 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 และสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 0.86 ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีกำลังอัด 11.76 เมกะพาสคัล ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (มอก. 1505-2541) และมีค่าการนำความร้อน 0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอิฐมอญ นอกจากนี้จากผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของผงอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นสารก่อฟองในจีโอพอลิเมอร์พูน พบว่าชิ้นงานที่เหมาะสมที่สุดคือ ชิ้นงานที่ใช้ปริมาณผงอะลูมิเนียม 0.7 เปอร์เซ็นต์ ได้กำลังอัดเท่ากับ 15.27 เมกะพาสคัล และมีค่าการนำความร้อน 0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

ภาควิชา	วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5572178823 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: METAKAOLIN BASED GEOPOLYMER / POROUS GEOPOLYMER / SILICA FUME / ALUMINIUM DROSS / ALUMINIUM POWDER / FOAMING AGENT

ANUT SAIKRASOON: SYNTHESIS OF POROUS GEOPOLYMER USING INORGANIC FOAMING AGENTS. ADVISOR: ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., CO-ADVISOR: PITAK LAORATANAKUL, Ph.D., 80 pp.

This work aims to synthesis metakaolin based porous geopolymer using inorganic foaming agents such as silica fume (SF), aluminum dross, and aluminum powder. Metakaolin (MK) was prepared by crushing and sieving through mesh number #150 after that calcined at 700 °C for 6 hrs. Two parameters of Porous geopolymer using silica fume as foaming agent are studied. First, the effects of alkaline concentration were investigated. The ratio of MK to SF was fixed at 60:40 by weight and the powder were mixed with different NaOH concentrations. Second, the effect of MK:SF ratios were investigated. 10 molar NaOH solution was used. The samples were cured at 70°C for 24 hours and at room temperature for 28 days. Thermal conductivity results show that porous geopolymers have low thermal conductivity however the samples were not stable in water. For sample that using aluminum dross as foaming agent, 3 parameters were studied. First, the effect of aluminum dross contents were investigated. Second, the effect of Na₂SiO₃:NaOH ratios were investigated. The final, the effect of solid to liquid ratios were investigated. The results show that 1.5% of aluminum dross, Na₂SiO₃:NaOH ratio of 2.5 and solid to liquid ratio of 0.86 has compressive strength of 11.76 MPa which is higher than the Thai Industrial Standards (TIS. 1505-2541, autoclaved aerated lightweight concrete elements). In addition, thermal conductivity of product is 0.27 W m⁻¹ K⁻¹ which is lower than clay brick. For sample that using aluminum powder as foaming agent, the effect of aluminium powder contents was investigated. The sample that composed of 0.7% aluminum powder has compressive strength of 15.27 MPa, and thermal conductivity of 0.27 W m⁻¹ K⁻¹.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Ceramic Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากหลายๆ ฝ่าย ทั้งทางด้านวิชาการ ด้านธุรการและท่านทั้งหลายที่เกี่ยวข้องดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแก้ไขปัญหาลดระยะเวลาในการทำวิจัย และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและให้ความรู้เกี่ยวกับการทดลอง

คณะกรรมการสอบทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์และถูกต้องมากยิ่งขึ้น

คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้ได้แก่ เครื่องทดสอบกำลังอัดชิ้นงาน เครื่องทดสอบการนำความร้อน เครื่องทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ขอขอบคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่สนับสนุนด้านการศึกษา การทำงานวิจัยและการนำเสนอผลงาน

ขอขอบคุณ คุณศุภิรินทร์ พันธุ์เลิศ และคุณวิรพงษ์ ครพนม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือแนะนำการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	16
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.1 จีโอพอลิเมอร์.....	18
2.2.1 ความหมายและคำจำกัดความ.....	18
2.2.2 ปฏิกริยาของจีโอพอลิเมอร์.....	18
2.2.3 การรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	20
2.2 คอนกรีตมวลเบา.....	21
2.3 การนำจีโอพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งาน	23
2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลาน	24
2.4.1 ดินขาว (kaolin).....	25
2.4.2 การผลิตดินขาวเผา (metakaolin)	26
2.4.3 ซิลิกาฟูม.....	26

2.5 สารก่อฟอง (foaming agent).....	27
2.6 ตะกรันอะลูมิเนียม.....	28
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	40
3.1 การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.1.1 การเตรียมดินขาวเผา	40
3.1.2 การเตรียมตะกรันอะลูมิเนียม.....	40
3.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างเฟสของวัตถุดิบจีโอพอลิเมอร์พูน ...	41
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	41
3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของวัตถุดิบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์....	41
3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด.....	41
3.2.4 การวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาควัตถุดิบ	42
3.2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	42
3.3 การผลิตจีโอพอลิเมอร์พูน.....	42
3.3.1 การเตรียมสารละลายแอลคาไลน์.....	42
3.3.2 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟอง	43
3.3.3 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อ ฟอง.....	43
3.3.4 สูตรส่วนผสมและการเรียกชื่อ	44
3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน.....	46
3.4.1 การวัดความหนาแน่น.....	46
3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน.....	46
3.4.3 การทดสอบการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน.....	47

3.4.4 การหาพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน.....	48
3.5 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	49
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	50
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเคมีของวัสดุดิบ	50
4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติทางเคมีของดินขาวเผา ซิลิกาฟูม และผงตะกรันอะลูมิเนียม ด้วยเทคนิค XRF	50
4.1.2 ผลการทดสอบโครงสร้างเฟสของดินขาวนราธิวาส ดินขาวเผา ซิลิกาฟูม และผง ตะกรันอะลูมิเนียม ด้วยเทคนิค XRD.....	50
4.1.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุดิบ	51
4.2 การวิเคราะห์การเตรียมชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน.....	52
4.2.1 การใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารก่อฟอง	52
4.2.1.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน.....	52
4.2.1.1.1 ผลการทดสอบการนำความร้อนและพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงาน จีโอพอลิเมอร์พูน	52
4.2.1.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ พูน.....	53
4.2.1.3 ผลการทดสอบสมบัติทางเฟสของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน	54
4.2.1.2 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนดินขาวเผาและซิลิกาฟูมต่อสมบัติต่าง ๆ... ..	56
4.2.1.3 การทดสอบการละลายน้ำของชิ้นงานที่ใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารก่อฟอง.....	58
4.2.2 การใช้ผงตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง.....	59
4.2.2.1 การศึกษาปริมาณตะกรันอะลูมิเนียมและสัดส่วน $\text{NaSiO}_3:\text{NaOH}$ ที่ส่งผล ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์.....	59
4.2.2.1.1 ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ พูน.....	59

4.2.2.1.2 การหาพื้นที่รูปพหุนเจดีย์และการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน	60
4.2.2.1.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสและหมู่ฟังก์ชันของชิ้นงาน ..	62
4.2.2.2 ผลของสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์	64
4.2.3 การใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง	67
4.2.4 การทดสอบการละลายน้ำของชิ้นงานที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม	72
รายการอ้างอิง	73
ภาคผนวก	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	80

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาแต่ละประเภท	22
ตารางที่ 2.2	ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ.....	23
ตารางที่ 2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 (1991).....	25
ตารางที่ 2.4	ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ใน ด้านปริมาณคิดเป็นร้อยละของสาร	25
ตารางที่ 2.5	สมบัติต่าง ๆ ของซิลิกาฟูมเปรียบเทียบกับปอซต์แลนดซ์ซีเมนต์	26
ตารางที่ 2.6	องค์ประกอบทางเคมีของฟลักซ์ A138 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	29
ตารางที่ 2.7	ค่ากำลังอัดแตกหักของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สัดส่วนโดยโมลของซิลิกาและ อะลูมินาที่แตกต่างกัน	32
ตารางที่ 2.8	กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ฐานเถ้าลอย	37
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารก่อฟอง	44
ตารางที่ 3.2	ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกัณอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง	45
ตารางที่ 3.3	ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง.....	45
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผา และซิลิกาฟูม (เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก)	50
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของผงตะกัณอะลูมิเนียม (เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก).....	50
ตารางที่ 4.3	ค่าขนาดกลางของอนุภาค.....	51
ตารางที่ 4.4	เลขคลื่นการสั่นพันธะในโมเลกุล.....	56

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	กลไกการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์.....	19
รูปที่ 2.2	หน่วยย่อยของปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (ก) สัดส่วน Si:Al = 1:1 (ข) (ค) สัดส่วน Si:Al = 2:1 และ (ง) (จ) มีสัดส่วน Si:Al = 3:1.....	20
รูปที่ 2.3	ความแตกต่างของ 2 ปฏิกิริยา.....	21
รูปที่ 2.4	การนำจีโอพอลิเมอร์ไปใช้งาน (ก) เป็นวัสดุซ่อมแซมพื้นสนามบิน (ข) จีโอพอลิเมอร์พูน (ค) ผนังจีโอพอลิเมอร์.....	24
รูปที่ 2.5	การผลิตโลหะซิลิคอนและการดักจับซิลิกาฟุ้ง.....	26
รูปที่ 2.6	แผนผังแสดงกระบวนการหลอมเศษอะลูมิเนียม.....	28
รูปที่ 2.7	โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ PBO ₁ : (a และ b); PBO ₄ : (c และ d); PDib ₁ : (e และ f).....	30
รูปที่ 2.8	กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์.....	30
รูปที่ 2.9	ATR spectra ของชิ้นงานที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง (a) จีโอพอลิเมอร์ (b) จีโอพอลิเมอร์พูน.....	31
รูปที่ 2.10	โครงสร้างเฟสของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สัดส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา ที่ต่างกัน.....	32
รูปที่ 2.11	ลักษณะของจีโอพอลิเมอร์หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	33
รูปที่ 2.12	ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยดินต่างชนิดกัน.....	34
รูปที่ 2.13	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตะกรันอะลูมิเนียมที่ผ่านการต้ม และไม่ผ่านการต้ม.....	34
รูปที่ 2.14	ลักษณะทางจุลภาคและความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิค FSP.....	35
รูปที่ 2.15	ชิ้นงานเซรามิกพูนที่ผ่านการเผา (a) 7×10^{-3} (b) 2.1×10^{-2} (c) 4.2×10^{-2} และ (d) 7×10^{-2} โมลาร์.....	35
รูปที่ 2.16	ตัวอย่างของฟองอากาศที่ล้อมรอบด้วยน้ำและ SLS ที่ละลายอยู่ในน้ำ.....	36
รูปที่ 2.17	(a) ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เปลี่ยนแปลงไปของซีเมนต์เพสต์ (b) อุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่เปลี่ยนแปลงไป (c) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (Li_2CO_3 , 0.005 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ	

ตัวห่วงปฏิริยา (H_3BO_4 , 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ต่อปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่เปลี่ยนแปลงไป (d) ผลของตัวเร่งปฏิริยาและตัวห่วงปฏิริยาต่ออุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงอะลูมิเนียม 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส..... 38

รูปที่ 2.18 ไดอะแกรมแสดงการกักตัวของอะลูมิเนียมในน้ำ (25 องศาเซลเซียส)..... 39

รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องทดสอบกำลังอัด ยี่ห้อ ELE international รุ่น ADR-Auto (ข) ลักษณะของการออกแรงและรูปทรงของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ..... 47

รูปที่ 3.2 (ก) เครื่อง Thermal Constants Analyzer ยี่ห้อ Hot Disk รุ่น TPS 2500 S (ข) การวางชิ้นงานทดสอบ (ค) การไหลผ่านความร้อนของเซนเซอร์ Hot disk ให้กับชิ้นงาน.... 48

รูปที่ 3.3 (ก) กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Stemi 2000 (ข) การเกิดภาพจากกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป (ค) ภาพที่ใช้ในการหาพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยด้วย..... 48

รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้สารก่อกองชนิดต่างๆ..... 49

รูปที่ 4.1 ผลทดสอบ XRD ของ (ก) ดินขาวระนอง (ข) ดินขาวเผา (ค) ผงตะกัณอะลูมิเนียม และ (ง) ซิลิกาฟูม..... 51

รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของวัตถุดิบ (ก) ดินขาวเผา (ข) ซิลิกาฟูม (ค) ตะกัณอะลูมิเนียม และ (ง) ผงอะลูมิเนียม 52

รูปที่ 4.3 (ก) การนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารก่อกอง (ข) พื้นที่รูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารก่อกอง..... 53

รูปที่ 4.4 ลักษณะทางจุลภาคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย แอลคาไลน์แตกต่างกัน (ก) ผสมสารละลายแอลคาไลน์ 6 โมลาร์ (ข) ผสมสารละลายแอลคาไลน์ 10 โมลาร์ และ (ค) ผสมสารละลายแอลคาไลน์ 14 โมลาร์ 54

รูปที่ 4.5 กราฟ XRD ของวัตถุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน 54

รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของวัตถุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน..... 55

รูปที่ 4.7 (ก) ค่าการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) เปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพรุนเฉลี่ย..... 57

รูปที่ 4.8 กราฟ XRD ของจีโอพอลิเมอร์พูน 57

รูปที่ 4.9 กราฟ FTIR ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนเปรียบเทียบกับวัตถุดิบ 58

รูปที่ 4.10 ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (ก) $1.00S_{20-0}^{3.5-10}$ (ข) $1.00S_{30-0}^{3.5-10}$ และ (ค) $1.00S_{50-0}^{3.5-10}$ 59

รูปที่ 4.11 (ก) กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ผสมผงตะกั่วอะลูมิเนียมต่างกัน (ข) ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่เติมผงตะกั่วอะลูมิเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน ระยะเวลาบ่ม 28 วัน.....	60
รูปที่ 4.12 ภาพจากกล้องสแตอริโอไมโครสโคปของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ผงตะกั่วอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองปริมาณแตกต่างกัน (ก) $0.86D_{0-0.5}^{1.5-10}$ (ข) $0.86D_{0-1.0}^{1.5-10}$ (ค) $0.86D_{0-1.5}^{1.5-10}$	61
รูปที่ 4.13 (ก) ค่าการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง (ข) พื้นที่รูพูนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง.....	62
รูปที่ 4.14 กราฟ XRD ของวัตถุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองปริมาณ 0 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ 2.5	63
รูปที่ 4.15 กราฟ XRD ของวัตถุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมปริมาณ 0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ 1.5 และ 2.5	63
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน	64
รูปที่ 4.17 (ก) กำลังอัดชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ (ข) ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์หลังจากบ่มชิ้นงานครบ 28 วัน	65
รูปที่ 4.18 (ก) ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) เปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพูนเฉลี่ย	66
รูปที่ 4.19 กราฟ XRD ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน	66
รูปที่ 4.20 กราฟหมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน	67
รูปที่ 4.21 (ก) กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน	68
รูปที่ 4.22 (ก) การนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) พื้นที่รูพูนเฉลี่ย.....	69
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบ XRD ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์.....	69
รูปที่ 4.24 กราฟ FTIR ของจีโอพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัตถุดิบ	70

รูปที่ 4.25 ชั้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (ก) $0.86D_{0-1.5}^{2.5-10}$
(ข) $0.86P_{0-0.7}^{2.5-10}$ (ค) $0.86D_{0-0.5}^{2.5-10}$ 70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะกลุ่มของวัสดุก่อสร้าง เช่น คอนกรีตมวลเบา เป็นวัสดุที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในตัวอาคาร ทำให้สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศลงได้ คอนกรีตมวลเบาจึงเป็นวัสดุฉนวนความร้อนที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก แต่เนื่องด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีตมวลเบาซึ่งได้จากกระบวนการที่ใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก และยังปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงซึ่งเป็นต้นเหตุของภาวะเรือนกระจก อีกทั้งวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารก่อฟองในงานคอนกรีตมวลเบา มีราคาค่อนข้างสูง จึงทำให้คอนกรีตมวลเบา ยังมีราคาค่อนข้างสูงซึ่งเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ๆ

จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน จีโอพอลิเมอร์ใช้วัตถุดิบที่มีแร่ธาตุอยู่ในรูปอสัณฐานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยแอลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทำให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวและรับกำลังอัดได้ ซึ่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ยังใช้พลังงานที่ต่ำกว่าในกระบวนการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านฉนวนความร้อนจึงเติมสารก่อฟอง เรียกว่า จีโอพอลิเมอร์ฟรูน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้เป็นสารก่อฟอง ได้แก่ ซิลิกาฟูนและตะกรันอะลูมิเนียม (Aluminium Dross) ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณของเสียอุตสาหกรรมและเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย โดยซิลิกาฟูน เป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตซิลิคอนและเฟอร์โรซิลิคอนอัลลอยด์ด้วยกระบวนการรีดักชันจากควอตซ์ ลักษณะของซิลิกาฟูนเป็นฝุ่นผงละเอียดสีเทา ส่วนตะกรันอะลูมิเนียมเป็นของเสียที่มาจากอุตสาหกรรมหล่อขึ้นรูป โดยตะกรันอะลูมิเนียมที่ได้มาจากส่วนที่ไม่ละลายในกระบวนการหลอมเหลว ซึ่งเกิดจากการนำเศษอะลูมิเนียมที่ถูกตัดออกจากแม่แบบ หรือเศษที่เกิดจากการขัดผิวตกแต่งชิ้นส่วนอะลูมิเนียมนำกลับมาหลอมใหม่ โดยตะกรันที่ได้เป็นผงสีดำ

ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฟรูนโดยใช้ ซิลิกาฟูน ผงอะลูมิเนียม ตะกรันอะลูมิเนียม เป็นสารก่อฟอง ในปริมาณที่แตกต่างกัน หลังจากสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฟรูนแล้วได้นำไปศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความหนาแน่น การนำความร้อน รวมถึงการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ กับคอนกรีตมวลเบาทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฟรูนฐานดินขาวเผาด้วยการใช้ซิลิกาฟูน ตะกรันอะลูมิเนียม และผงอะลูมิเนียม เป็นสารก่อฟอง และศึกษาสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ฟรูนที่ใช้ซิลิกาฟูน ตะกรันอะลูมิเนียม และผงอะลูมิเนียม เป็นสารก่อฟอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พรุณฐานดินขาวเผาด้วยการใช้ซิลิกาฟุ่ม ตะกรันอะลูมิเนียม และ ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

1.3.2 วิเคราะห์สมบัติของจีโอพอลิเมอร์และความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้จีโอพอลิเมอร์พรุณที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุฉนวน ความร้อนได้



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากในปัจจุบันวัสดุก่อสร้างมีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ โดยวัสดุอีกชนิดที่กำลังได้รับความสนใจคือ จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดภาวะโลกร้อน

นอกจากจีโอพอลิเมอร์จะสามารถประยุกต์ใช้งานในการรับกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตแล้วยังมีการประยุกต์ใช้งานจีโอพอลิเมอร์ในด้านวัสดุฉนวนความร้อนโดยทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความพรุนตัวด้วยการเติมสารก่อฟองเรียกว่า จีโอพอลิเมอร์พรุน โดยทั่วไปจะใช้ผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เป็นสารก่อฟอง แต่มีราคาแพง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจใช้ประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งจากโรงงานเพื่อนำมาใช้ทดแทนผงอะลูมิเนียม ได้แก่ ซิลิกาฟุ้งและตะกอนอะลูมิเนียม โดยซิลิกาฟุ้งเป็นเศษเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตโลหะซิลิคอน ส่วนตะกอนอะลูมิเนียมเป็นเศษเหลือทิ้งจากโรงงานหลอมและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียม ซึ่งเป็นเศษอะลูมิเนียมที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ นอกจากนี้จะเป็นการใช้ประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งแล้วยังเป็นการสร้างมูลค่าให้กับเศษเหลือทิ้งเหล่านั้นด้วย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทั้งในเรื่องวัตถุดิบ ตะกอนอะลูมิเนียม กระบวนการผลิตขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียม การได้มาของตะกอนอะลูมิเนียม และการประยุกต์ใช้สารก่อฟองในงานจีโอพอลิเมอร์

2.1 จีโอพอลิเมอร์

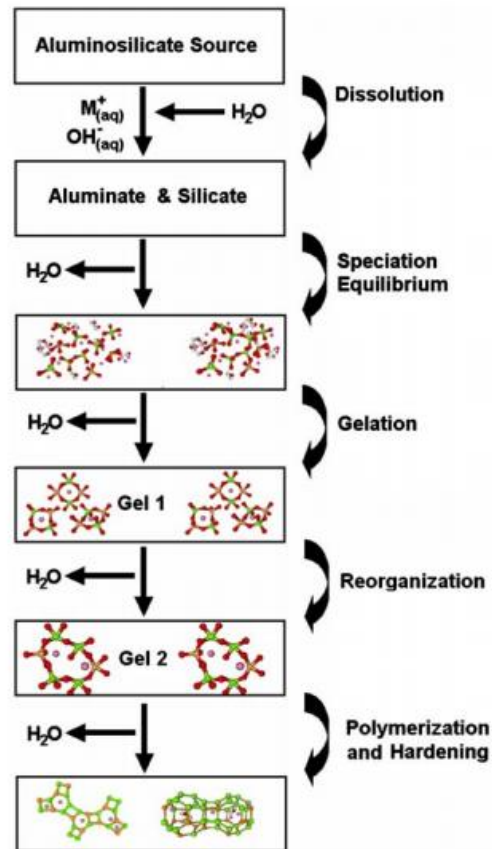
2.2.1 ความหมายและคำจำกัดความ

จีโอพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ กระบวนการในการสังเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน ค้นพบครั้งแรกโดย Glukhovsky ประเทศสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งเป็นสารผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยที่จีโอพอลิเมอร์ นิยามครั้งแรกโดย Davitodovits นักวิทยาศาสตร์เชี่ยวชาญด้านวัสดุ ชาวฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1970 ได้อธิบายไว้ว่า “จีโอพอลิเมอร์” เป็นวัสดุยึดประสานแร่ธาตุ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับซีโอไลท์ (zeolite) แต่มีโครงสร้างอยู่ในรูปของอสัณฐาน (amorphous) และโครงสร้างเคมีอยู่ในรูปพอลิไซอะเลท (polysialate) ต่อมามีการพัฒนาจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุก่อสร้างเหมือนปูนซีเมนต์^[1]

2.2.2 ปฏิกริยาของจีโอพอลิเมอร์

สารตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของอะลูมินาและซิลิกาเป็นหลัก หรือวัสดุปอซโซลาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ โดยกลไกการเกิดจีโอพอลิเมอร์ เริ่มต้นจากสารตั้งต้นถูกชะละลายด้วยสารละลายต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้อะลูมินาและซิลิกาอสัณฐานที่บริเวณผิวของวัตถุดิบถูกชะออกมา ไอออนซิลิคอน อะลูมิเนียมและสารละลายต่างเกิดการก่อตัวเป็นเจลที่ผิวของอนุภาควัตถุดิบ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการชะของวัตถุดิบ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (polymerization) ซิลิคอนแคปไฮดรอกไซด์และอะลูมิเนียมแคปไฮดรอกไซด์ที่ชะออกมาเกิดการรวมตัวกับไอออนออกซิเจนเป็นโมเลกุลทรง

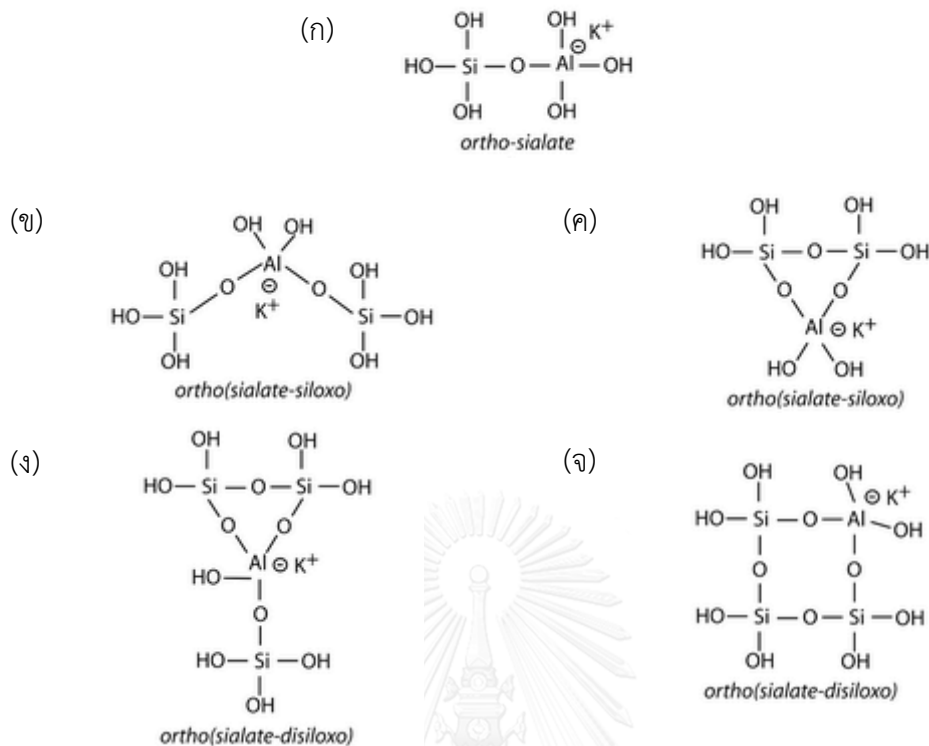
เหลี่ยมสี่หน้า เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของซิลิคอน ออกซิเจน และอะลูมิเนียม ได้ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์^[2]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

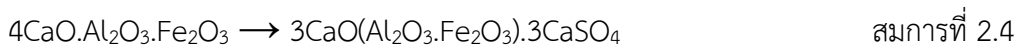
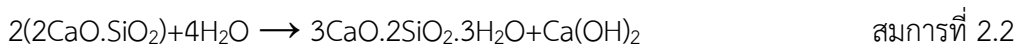
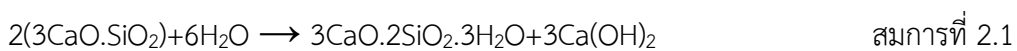
โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับสัดส่วน Si:Al ของหน่วยย่อย มีค่า 1:1 2:1 และ 3:1 มีชื่อเรียกดังนี้ ortho(sialate) ortho(sialate-siloxo) และ ortho(sialate-disiloxo) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.2



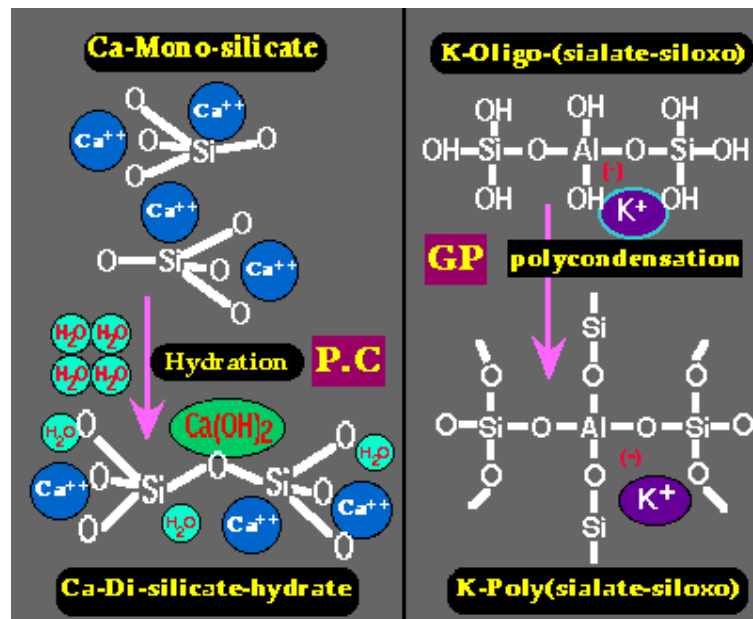
รูปที่ 2.2 หน่วยย่อยของปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (ก) สัดส่วน Si:Al = 1:1
(ข) (ค) สัดส่วน Si:Al = 2:1 และ (ง) (จ) มีสัดส่วน Si:Al = 3:1^[3]

2.2.3 การรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) ที่ได้จากการบดเม็ดปูนกับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ดังสมการที่ 2.1-2.4 ทำให้สามารถรับกำลังอัดได้



จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีความแตกต่างจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตรงที่การพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ไม่ได้มาจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์ แต่จีโอพอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้วพัฒนา กำลังอัดจากการรวมตัวแบบควบแน่น (polycondensation) ของ SiO_2 และ Al_2O_3 ภายใต้สภาวะละลายเบสสูงดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความแตกต่างของ 2 ปฏิกิริยา^[4]

2.2 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตที่จะจัดอยู่ในประเภทของคอนกรีตมวลเบาจะต้องมีความหนาแน่นน้อยกว่า 2000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร^[5] ซึ่งคอนกรีตมวลเบาแบ่งตามวิธีการผลิตได้เป็น 2 วิธี คือ คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตโดยไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (non-autoclaved system) และคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตโดยผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (autoclaved system)

คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตโดยไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง จะแบ่งประเภทจากวัสดุที่ทำให้คอนกรีตเบาได้คือ ใช้วัสดุทดแทนมวลรวม เพื่อให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาขึ้น เช่น ขี้เลื่อย เม็ดโฟม เป็นต้น และใช้สารเคมีเพื่อให้คอนกรีตมีการฟูตัว เช่น สารก่อฟองประเภทโปรตีน เป็นต้น คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตโดยผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง สามารถแบ่งประเภทได้จากวัสดุที่นำมาใช้ผลิตคือ ประเภทที่หนึ่ง ใช้ปูนขาวเป็นองค์ประกอบหลัก โดยคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้จะมีการดูดซึมน้ำมาก ประเภทที่สอง ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบหลักจะมีความสม่ำเสมอของเนื้อชิ้นงาน และมีความแข็งแรงมากกว่าประเภทแรกเพราะสามารถเกิดการตกผลึกของแคลเซียมซิลิเกตในเนื้อปูนได้ สมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาแต่ละประเภท^[6]

ประเภทของคอนกรีตมวลเบา	ชนิดของมวลรวม	กำลังอัด (MPa)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	การนำความร้อน (W m ⁻¹ K ⁻¹)
คอนกรีตมวลเบาที่ได้จากสารกักฟองอากาศ	-	0.5-2.4	300-1900	0.05-1.30
คอนกรีตมวลเบาที่ได้จากธรรมชาติ	เพอร์ไลต์ (perlite)	0.4-3.0	300-1120	0.07-0.10
	พูไมซ์ (pumice)	1.0-3.0	800-1800	0.15-0.30
	เถ้าลอยที่ผ่านการเผาผนึก	2.0-5.5	1120-1280	0.17-0.30
คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด	มวลรวมน้ำหนักเบา	2.0-5.5	880-1360	-
คอนกรีตเบาชนิดทำเป็นโครงสร้าง	ตะกรันเหล็ก	8.0-50	1440-2080	0.34-0.74
	สินแร่ที่ผ่านการเผาผนึก	11-63	1440-1900	0.52-1.10
คอนกรีตเบาที่ใช้มวลรวม	ดินเหนียว ดินดาน เถ้าลอย หินชนวน	11-50	1360-1840	0.51-0.95

สมบัติของคอนกรีตมวลเบาคือมีน้ำหนักเบาและมีการนำความร้อนต่ำเพราะภายในคอนกรีตมวลเบาจะมีรูพรุนประกอบด้วยอากาศบรรจุอยู่ภายใน ซึ่งอากาศนี้เองที่ทำให้คอนกรีตพรุนมีการนำความร้อนต่ำ แต่คอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปจะดูดซึมน้ำ การนำไปใช้จึงมีการฉาบเพื่อป้องกันการดูดน้ำมากเกินไป โดยคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1505-2541 ได้กำหนดชั้นคุณภาพไว้ 4 ชั้น แบ่งตามความหนาแน่นได้ 7 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

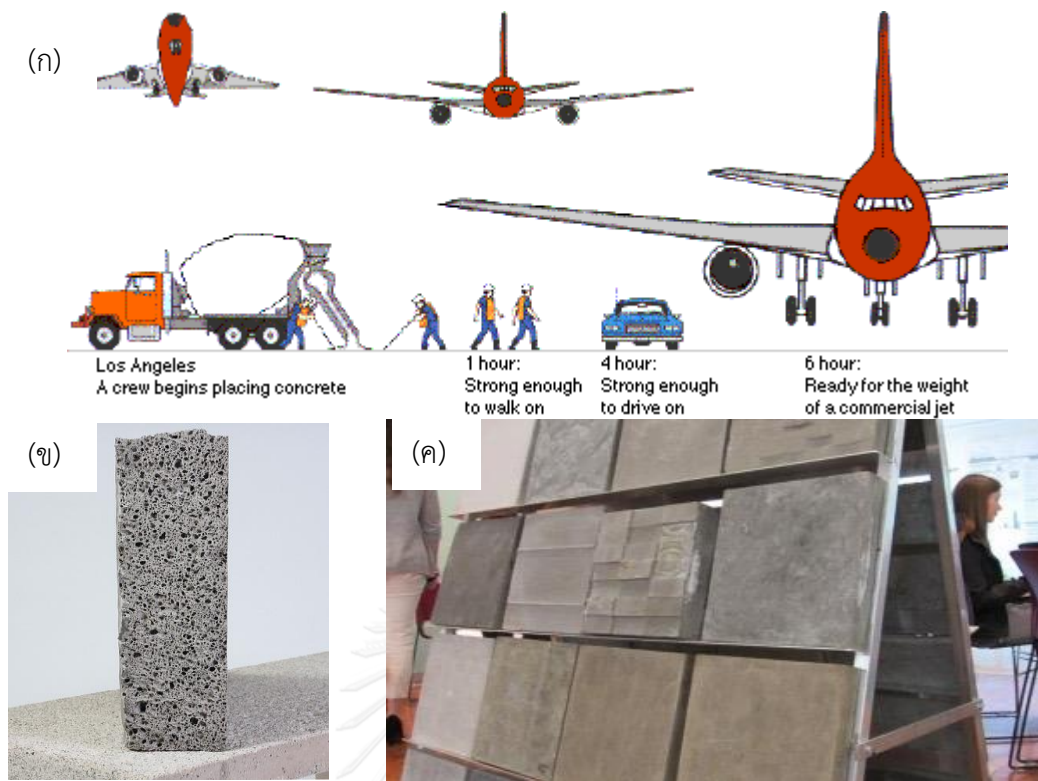
ตารางที่ 2.2 ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ^[7]

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงอัด นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร		ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ย (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร)
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		
2	2.5	2.0	0.4	0.31 ถึง 0.40
			0.5	0.41 ถึง 0.50
4	5.0	4.0	0.6	0.51 ถึง 0.60
			0.7	0.61 ถึง 0.70
			0.8	0.71 ถึง 0.80
6	7.5	6.0	0.7	0.61 ถึง 0.70
			0.8	0.71 ถึง 0.80
8	10.0	8.0	0.8	0.71 ถึง 0.80
			0.9	0.81 ถึง 0.90
			1.0	0.91 ถึง 1.00

2.3 การนำจีโอพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งาน

จีโอพอลิเมอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ตั้งแต่การค้นพบจีโอพอลิเมอร์เป็นครั้งแรกเมื่อปี 1976 ได้มีการพัฒนาและถูกนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมแล้วในประเทศแถบยุโรป และสหรัฐอเมริกา ซึ่งนำจีโอพอลิเมอร์ไปใช้หลายด้าน ได้แก่ จีโอพอลิเมอร์โม่ใช้เป็นฉนวนความร้อน จีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์ใช้ในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอแทนปูนซีเมนต์ จีโอพอลิเมอร์เซรามิกใช้ทำกระเบื้องเนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำในการผลิต จีโอพอลิเมอร์ผสม (geopolymer composite) ใช้เป็นเนื้อเมทริกซ์ของเส้นใยเสริมแรง

สำหรับวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทย ยังไม่ได้นำเอาเทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์มาใช้งาน เนื่องจากความรู้ในด้านจีโอพอลิเมอร์ยังไม่แพร่หลาย หากมีการเผยแพร่องค์ความรู้และการประยุกต์ใช้อย่างจริงจังจากนักวิชาการที่มีประสบการณ์การวิจัย จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติ เนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน และการผลิตจีโอพอลิเมอร์ใช้พลังงานในการเผาไหม้น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์^[8]



รูปที่ 2.4 การนำจีโอพอลิเมอร์ไปใช้งาน (ก) เป็นวัสดุซ่อมแซมพื้นสนามบิน^[9] (ข) จีโอพอลิเมอร์พูน (ค) ผนังจีโอพอลิเมอร์

2.4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่วัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน” แบ่งวัสดุปอซโซลานเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1 ชั้นคุณภาพ N (class N) เป็นปอซโซลานธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ

2 ชั้นคุณภาพ F (class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านแอนทราไซต์ (anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (silica oxide, SiO_2) อะลูมินา (alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และสารอื่นตามตารางที่ 2.3

3 ชั้นคุณภาพ C (class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 และสารอื่นตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 (1991)^[8]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃) ไอร์ออนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃), ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0

วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ได้มาจาก 2 แหล่งคือ ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) และปอซโซลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) สำหรับวัสดุปอซโซลานจากการผลิต ได้แก่ ถ้ำลอย ถ้ำกลบ ถ้ำชานอ้อย ถ้ำถ่านหิน ซิลิกาฟูม เป็นต้น ส่วนวัสดุปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ไตอะตอมมาเซียสเอิร์ธ ถ้ำภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ ดินขาว เป็นต้น ซึ่งวัสดุปอซโซลานประเภทนี้ส่วนใหญ่จะต้องผ่านกรรมวิธีในการบดลดขนาดและเผาก่อนที่จะนำมาใช้

2.4.1 ดินขาว (kaolin)

ดินขาวเคโอลิน มักพบในแหล่งที่เป็นภูเขาหรือที่ราบซึ่งแหล่งเดิมเป็นหินฟันม้า หรือที่ลุ่มที่เป็นทางผ่านของน้ำ เมื่อหินฟันม้าเกิดผุกร่อนจากอากาศก็จะเกิดเป็นดินขาวอยู่ที่บริเวณนั้น ส่วนประกอบทางเคมีของดินขาวที่เป็นผลึกบริสุทธิ์คือ Al₂Si₂O₅(OH)₄ ดินขาวมีประโยชน์ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่ อุตสาหกรรมถ้วยชามและสุขภัณฑ์ อุตสาหกรรมอิฐทนไฟ เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยมีแหล่งดินขาวในหลายจังหวัดได้แก่ ระนอง ปราจีน ลำปาง นราธิวาส อุตรดิตถ์ เชียงราย โดยดินขาวแต่ละจังหวัดมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ในด้านปริมาณคิดเป็นร้อยละของสาร^[8]

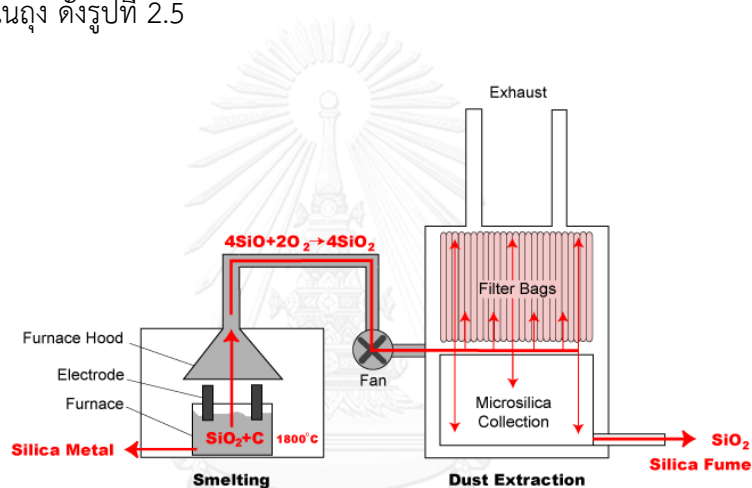
องค์ประกอบทางเคมี	ดินขาวระนอง	ดินขาวนราธิวาส	โคกไม้ลายปราจีนบุรี	บ้านวังยางอุตรดิตถ์	เวียงป่าเป้าเชียงราย	ปางคำลำปาง
SiO ₂	48.75	47.30	48.10	68.56	44.50	59.70
Al ₂ O ₃	34.58	35.72	36.10	19.32	38.20	27.60
Fe ₂ O ₃	0.71	0.38	1.47	2.21	0.80	0.85
TiO ₂	0.02	0.20	0.79	0.21	0.20	0.07
CaO	0.07	0.11	0.20	0.05	0.10	0.13
MgO	0.34	1.01	0.14	0.53	-	0.25
K ₂ O	2.52	1.76	0.16	4.99	0.80	5.85
Na ₂ O	0.48	0.39	0.13	0.22	-	0.15

2.4.2 การผลิตดินขาวเผา (metakaolin)

การผลิตดินขาวเผาทำได้ด้วยการนำดินขาวไปเผาที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส^[8] เพื่อให้เกิดการสูญเสียกลุ่ม OH จากโมเลกุลของเคโอลิน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นอยู่กับชนิดของดินแต่ละแหล่ง จึงควรนำดินขาวไปทดสอบด้วยเทคนิค DTA เพื่อหาที่คปฏิกิริยาต่อความร้อนซึ่งเป็นช่วงที่ดินขาวเกิดปฏิกิริยา dehydroxylation

2.4.3 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิคอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิคอนอัลลอยด์ จากกระบวนการรีดักชันควอตซ์ (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นโลหะซิลิคอนโดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (fume) ของซิลิคอน ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลับตัวที่อุณหภูมิปกติกลายเป็นอนุภาคซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับเก็บไว้ในถุง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การผลิตโลหะซิลิคอนและการดักจับซิลิกาฟุ้ง^[10]

ซิลิกาฟุ้งมีขนาดอนุภาคเล็ก ทรงกลม ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงจึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี แต่ซิลิกาฟุ้งมีปัญหาในการขึ้นรูปเนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่มากแสดงดังตารางที่ 2.5 ทำให้ต้องการน้ำปริมาณมากในการหล่อลื่นผิวของซิลิกาฟุ้งเพื่อที่จะให้ไหลตัวได้ดี

ตารางที่ 2.5 สมบัติต่าง ๆ ของซิลิกาฟุ้งเปรียบเทียบกับปอซต์แลนดซ์ซีเมนต์^[11]

สมบัติ	ปอซต์แลนดซ์ซีเมนต์	ซิลิกาฟุ้ง
SiO_2 (%)	21	85-97
Al_2O_3 (%)	5	-
Fe_2O_3 (%)	3	-
CaO (%)	62	<1
Specific surface (m^2/kg)	370	15,000-30,000
Specific gravity	3.15	2.22

2.5 สารก่อฟอง (foaming agent)

สารก่อฟอง เป็นสารที่ทำให้เกิดฟองซึ่งสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาทางเคมีในระหว่างการผสมหรือเกิดจากการกักอากาศของสารก่อฟองด้วยการลดแรงตึงผิวของสารละลาย สารก่อฟองที่ใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาจำแนกสารตามสารตั้งต้นได้เป็น 2 ประเภท คือ สารก่อฟองอินทรีย์ และสารก่อฟองอนินทรีย์

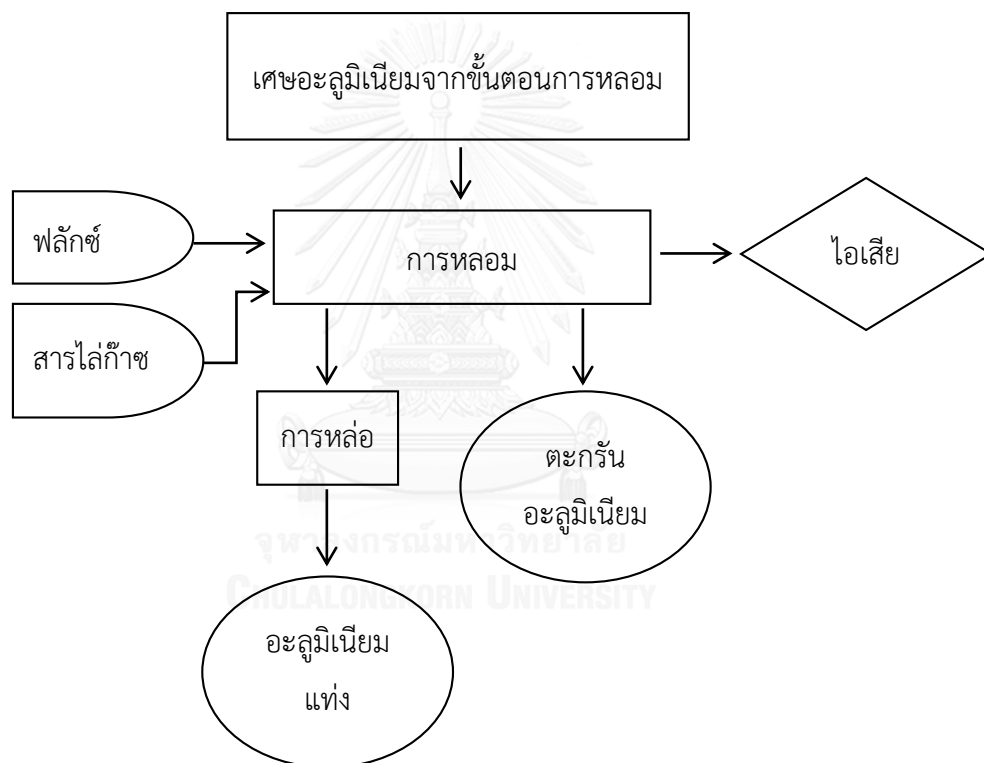
สารก่อฟองอินทรีย์ มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว ทำหน้าที่ในการกักฟองอากาศด้วยการลดแรงตึงผิวของสารละลายและช่วยให้ฟองอากาศมีความเสถียรคงรูปอยู่ได้ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารก่อฟองที่ผลิตจากโปรตีนธรรมชาติ และสารก่อฟองที่ผลิตจากโปรตีนสังเคราะห์ มีงานวิจัยอยู่จำนวนมากที่ศึกษาการใช้สารก่อฟองจากโปรตีนธรรมชาติ ได้แก่ สารสกัดจากโปรตีนถั่วเหลือง^[12] สารสกัดจากโปรตีนเขาสัตว์และกระดูกสัตว์^[13] สารสกัดจากโปรตีนน้ำมันที่ใช้แล้ว^[14] สารสกัดจากโปรตีนเลือดสัตว์^[15] เป็นต้น ส่วนสารก่อฟองที่ผลิตจากโปรตีนสังเคราะห์จะผลิตจากสารแอมฟิโปรติก (amphiprotic substance) ซึ่งเป็นสารที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส ตัวอย่างของสารก่อฟองที่ผลิตจากโปรตีนสังเคราะห์ เช่น polyoxyethylene sorbitan monooleate (tween80, $C_{24}H_{44}O_6(C_2H_4O)_n$)^[16], sodium dodecyl sulfate (SDS, $C_{12}H_{25}NaO_4S$)^[17, 18] เป็นต้น ความแตกต่างของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารก่อฟองทั้งสองประเภทคือ สารก่อฟองที่ผลิตจากโปรตีนธรรมชาติ จะได้ชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเนื่องจากสารก่อฟองที่ผลิตจากโปรตีนสังเคราะห์ จะเกิดความไม่เข้ากันระหว่างโมเลกุลของสารก่อฟองและอนุภาคปูนซีเมนต์จึงส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา^[19] โดยที่ประสิทธิภาพของสารก่อฟองที่ผลิตจากโปรตีนธรรมชาติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ในอุตสาหกรรมผลิตเซลล์คอนกรีต (cellular concrete) นิยมใช้สารก่อฟองอินทรีย์ โดยทั่วไปขนาดของชิ้นงานที่เป็นเซลล์คอนกรีตไฟเบอร์จะมีขนาดรูพรุน 10-500 ไมโครเมตร^[20]

สารก่อฟองอนินทรีย์ ได้แก่ ผงอะลูมิเนียม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น แต่ในทางอุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตอัดอากาศ (aerated concrete) และคอนกรีตอัดอากาศอบไอน้ำ (autoclaved aerated concrete) นิยมใช้ผงอะลูมิเนียมและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อนานานมานี้ได้มีการศึกษาการนำซิลิกาฟุ้งซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตโลหะซิลิคอนมาประยุกต์ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ฟรูน ปฏิกิริยาการเกิดฟองของซิลิกาฟุ้งเนื่องมาจากโลหะซิลิคอนอิสระที่อยู่ในซิลิกาฟุ้งทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำเกิดก๊าซไฮโดรเจน เขียนสมการการเกิดฟองของผงอะลูมิเนียมซึ่งสามารถเป็นได้ดังสมการที่ 2.5-2.7^[21]



2.6 ตะกรันอะลูมิเนียม

ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตอะลูมิเนียมและชิ้นส่วนอะลูมิเนียม ตะกรันอะลูมิเนียมแบ่งได้ 2 ชนิดได้แก่ ตะกรันอะลูมิเนียมขาว (white dross) และ ตะกรันอะลูมิเนียมดำ (black dross) ตะกรันอะลูมิเนียมขาวได้จากกระบวนการผลิตแท่งอะลูมิเนียม จากแร่บ็อกไซต์ซึ่งเรียกว่าการผลิตอะลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิ ในขณะที่ตะกรันอะลูมิเนียมดำได้จาก กระบวนการหลอมชิ้นส่วนหรือเศษอะลูมิเนียมที่ใช้แล้วเพื่อสกัดเอาอะลูมิเนียม ในประเทศไทยไม่มี อุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิเนื่องจากไม่มีแหล่งแร่บ็อกไซต์^[22] ซึ่งในการสกัดเอา อะลูมิเนียมจากชิ้นส่วนอะลูมิเนียมหรือเศษอะลูมิเนียมทำได้โดยการนำไปบดแยกขนาดแล้วนำไป หลอมกับฟลักซ์ทำให้ได้อะลูมิเนียมและตะกรันอะลูมิเนียมในขั้นสุดท้ายดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงกระบวนการหลอมเศษอะลูมิเนียม^[6]

ในกระบวนการแยกอะลูมิเนียมออกมาจากเศษตะกรันอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะใช้สารเคมีที่ ช่วยในการแยกอะลูมิเนียมหลอมเหลวออกมาจากตะกรันเรียกว่า ฟลักซ์ ตัวอย่างฟลักซ์ที่ใช้ในงานใน อุตสาหกรรมคือ A138 มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.6 ทำหน้าที่ในการแยกอะลูมิเนียมที่อยู่ใน ตะกรันอะลูมิเนียมช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวและความสามารถในการไหล (fluidity) ของอะลูมิเนียมที่ถูกกักอยู่ในตะกรัน ซึ่งตะกรันอะลูมิเนียมที่เหลือในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นของเหลือ ทิ้งและต้องมีการกำจัดให้ถูกวิธีเนื่องจากเป็นสารที่ประกอบด้วยเกลือคลอไรด์และสารที่เป็นพิษ ถ้า สัมผัสกับน้ำหรือความชื้นแล้วไหลลงสู่ที่องน้ำจะทำให้เกิดเป็นมลพิษ อีกทั้งยังก่อให้เกิดกลิ่นระคาย

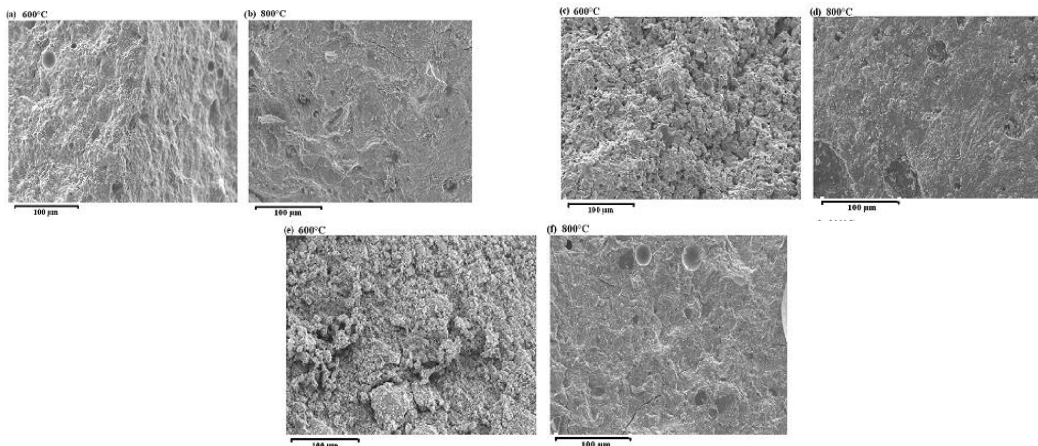
เคื่องจากก๊าซแอมโมเนียที่เกิดจากอะลูมิเนียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งในตะกอนอะลูมิเนียมยังคงมีโลหะอะลูมิเนียมปะปนอยู่ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสารก่อกองในงานจีโอพอลิเมอร์ ดังสมการที่ 2.5-2.7

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของฟลักซ์ A138 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก^[6]

องค์ประกอบทางเคมีของฟลักซ์ A138	เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก
Na	30
Cl	25
Si	3
F	3
C	2
S	3
N	5
K	15
O	4

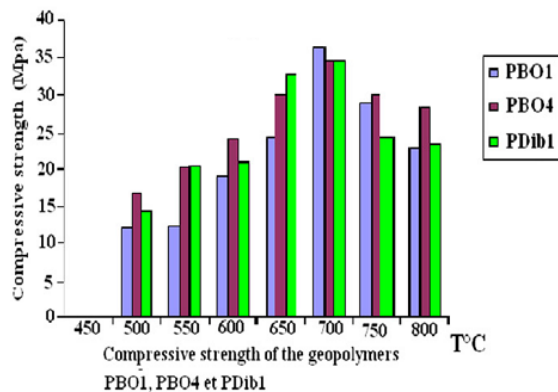
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Elimbi, A. และคณะ^[23] ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผาแคลไซน์ของดินเคโอลินต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ในการศึกษาใช้ดินเคโอลินท้องถิ่น 3 ชนิด (PBO₁, PBO₄, PDib₁) เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 500 550 600 650 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นจีโอพอลิเมอร์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินขาวเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน สามารถเห็นความแตกต่างแสดงดังรูปที่ 2.7 จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยดินเมตาเกอลินเผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge-like aspect) ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินเมตาเกอลินเผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะหนาแน่น บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ได้ดีในดินเมตาเกอลินที่เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



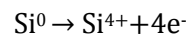
รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ PBO₁: (a และ b); PBO₄: (c และ d); PDib₁: (e และ f)[23]

เมื่อนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินเคโอลินที่อุณหภูมิเผาแตกต่างกัน ไปทดสอบกำลังอัดพบว่าอุณหภูมิเผา 700 องศาเซลเซียส ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังอัดสูงเนื่องจากดินเมตาเกอลินมีความไม่เป็นระเบียบ (state of disorder) สูงที่สุดที่อุณหภูมินี้ ซึ่งนำไปสู่สมบัติที่ดีขึ้นของจีโอพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.8

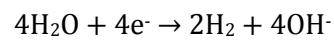


รูปที่ 2.8 กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์[23]

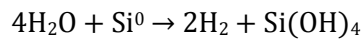
Prud'homme, E. และคณะ[24] ได้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนโดยใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟอง ในการศึกษาชิ้นทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนที่อุณหภูมิต่ำ (25-80 องศาเซลเซียส) และจากการตรวจสอบพบว่า การนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ผลิตได้มีค่า 0.22 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน นักวิจัยเสนอปฏิกิริยาที่ทำให้ชิ้นงานมีความพูนตัวดังนี้ (i) ซิลิกาฟุ่มเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดก๊าซไฮโดรเจน (ii) จีโอพอลิเมอร์เพสต์มีความหนืดเพิ่มขึ้น และ (iii) เกิดการแข็งตัวของวัสดุ เขียนสมการปฏิกิริยาออกซิเดชันของซิลิกาฟุ่มได้ดังนี้



สมการที่ 2.8

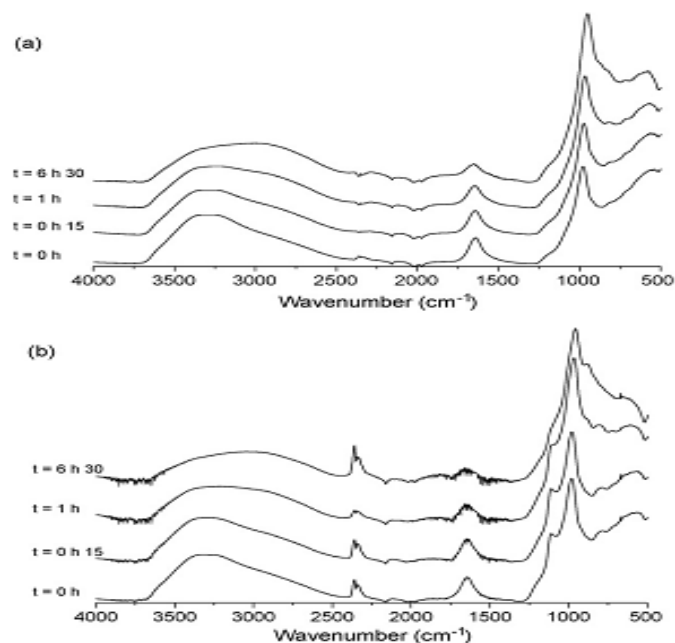


สมการที่ 2.9



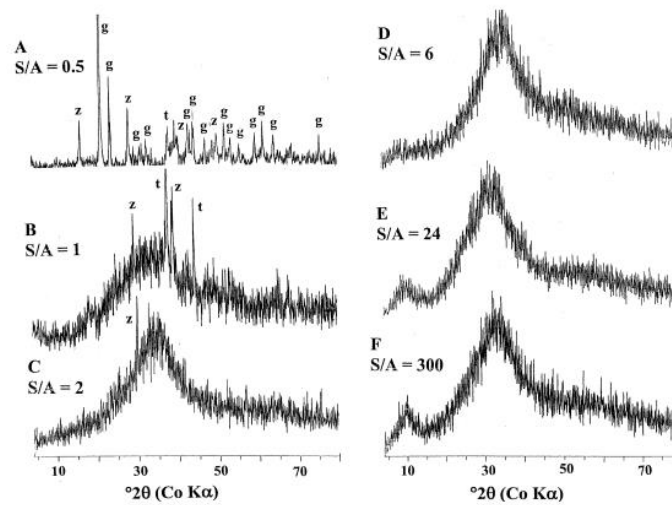
สมการที่ 2.10

การมีอยู่ของ $\text{Si}(\text{OH})_4$ จากสมการที่ 2.10 สามารถยืนยันได้ด้วยการทดสอบ ATR ดังรูปที่ 2.9 พีคของ $\text{Si}(\text{OH})_4$ มีความถี่ 3255 cm^{-1} จะค่อย ๆ ลดลงเปรียบเทียบกับพีค Si-O-Al เมื่อให้เวลาการควบแน่น (condensation) บ่งบอกถึงการเกิดเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ยิ่งไปกว่านั้นการเลื่อนของพีคจาก 979 cm^{-1} ไป 946 cm^{-1} เป็นพีคของ Si-O-M^+ ยังสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่รายงานว่าเป็นการชะละลายของอะลูมิเนียมซิลิเกตในดินเมตาเทกาลิน



รูปที่ 2.9 ATR spectra ของชิ้นงานที่ป้อนที่อุณหภูมิห้อง (a) จีโอพอลิเมอร์ (b) จีโอพอลิเมอร์พูน^[24]

Fletcher, R.A. และคณะ^[25] ได้ศึกษาอิทธิพลของซิลิกาต่ออะลูมินาของจีโอพอลิเมอร์ฐานดินขาวเผาในช่วง 0.5-300 โดยโมล โดยศึกษาผลต่อการเกิดเฟส ความต้านทานแรงอัด และพฤติกรรมคั้นรูปแบบอิลาสติกของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ วัสดุที่ใช้คือดินเมตาเทกาลิน อะลูมินา และแอโรซิลซิลิกา (aerosil SiO_2) ในการทดลองใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ 11 โมลาร์ สัดส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกามีค่า 0.3 และสัดส่วนโดยโมลของน้ำต่อซิลิกามีค่า 11 จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน



รูปที่ 2.10 โครงสร้างเฟสของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สัดส่วนโดยโมลของซิลิกาและอะลูมินาที่ต่างกัน^[25]

เมื่อใช้สัดส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามีค่า 2 ถึง 0.5 ลักษณะเฟสของชิ้นงานจะปรากฏความเป็นผลึกของเฟสกีปไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ซีโอไลต์และเทอร์โมนาไทร (thermonatrite) ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเกิดจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไป แต่เมื่อสัดส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา มีค่า 1 จะเริ่มปรากฏเฟสความเป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.10 (D-E) โครงสร้างเฟสของจีโอพอลิเมอร์ ปรากฏพีคเล็ก ๆ ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 10 องศา แต่ที่พีคบริเวณนี้จะหายไปเมื่อนำชิ้นงานไปบ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มากเกินไปที่เกิดจากการใช้แอมอร์ฟัสซิลิกา ในปริมาณมาก เมื่อนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ไปทดสอบความต้านทานการแตกหัก (crushing strength) พบว่าชิ้นงานมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแทนที่จะเกิดการแตกหักที่สัดส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามากกว่า 24

ตารางที่ 2.7 ค่ากำลังอัดแตกหักของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สัดส่วนโดยโมลของซิลิกาและอะลูมินาที่แตกต่างกัน^[25]

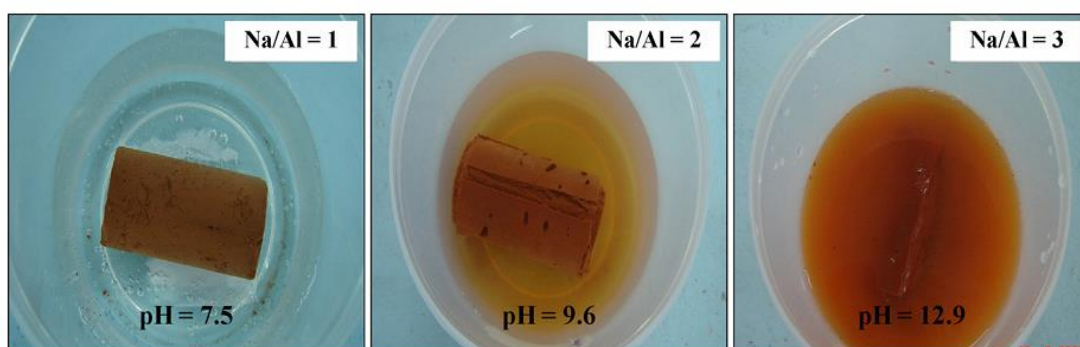
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	Relative crushing strength (MPa)	XRD phases ^b
0.5	0.66	7.2	0.7	g, z, t
1	0.66	7.2	1.0	am, z, t
2	0.88	9.7	7.8	am, z? (tr)
4	1.1	12.6	5.7	am
6	1.3	14	6.5	am
8	2.4	24	8.7	am
16	5	54	10.9	am
24	6.5	72	2.8	am
36	9	102	3.5	am
48	13	145	Nd ^a	am
60	16	175	Nd	am
72	21	233	Nd	am
85	21	231	Nd	am
100	30	326	Nd	am
150	45	490	Nd	am
200	59	653	Nd	am
300	87	960	Nd	am

b = broad, tr = trace, sh = shoulder.

^a Not determined.

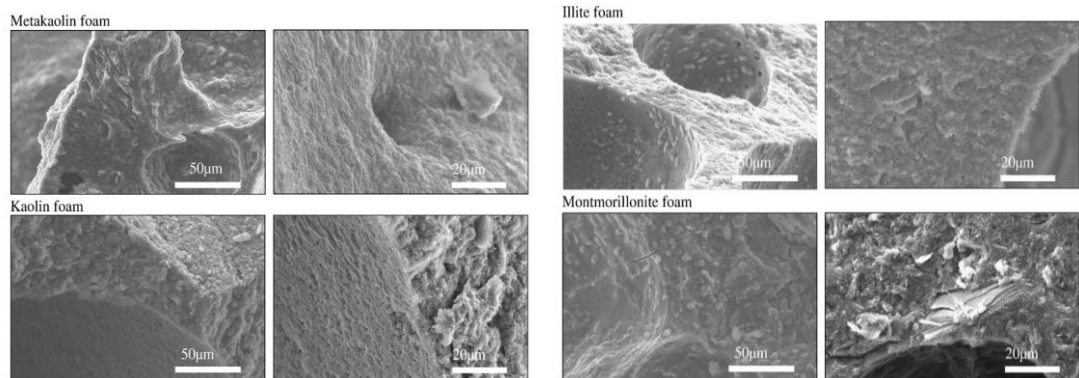
^b Key: am = X-ray amorphous, G = $\text{Al}(\text{OH})_3$ (PDF no. 70-2038), Z = $1.08\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.68\text{SiO}_2 \cdot 1.8\text{H}_2\text{O}$ (PDF no. 31-1271), T = $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (PDF no. 8-448).

Pimraksa, K. และคณะ^[26] ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เบาจากดินเบา (ไดอะตอมไมต์) ผสมกับเถ้าแกลบ โดยเผาแคลไซต์ดินเบาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และใช้สารละลายอัลคาไลน์ต่างชนิดกัน (โซเดียมและโพแทสเซียม) โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาและสัดส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาให้มีค่า 13-33.5 และ 0.66-3.00 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่ใช้โซเดียมเป็นสารละลายอัลคาไลน์จะมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่ใช้โพแทสเซียมเป็นสารละลาย และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการบ่มคือ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 วัน ชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้มีความหนาแน่น 0.88 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัด 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ชิ้นงานที่มีสัดส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินามากกว่า 1.5 จะละลายเมื่อแช่ในน้ำ



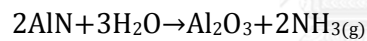
รูปที่ 2.11 ลักษณะของจีโอพอลิเมอร์หลังจากแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง^[26]

Prud'homme, E. และคณะ^[27] ได้ศึกษาสมบัติของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารก่อฟองจากดินชนิดต่าง ๆ และใช้อุณหภูมิในการบ่มต่ำ โดยดินที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ดินเคโอลิน ดินเมตาเกอลิน ดินอิลไลต์ และดินมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งจีโอพอลิเมอร์พูนฐานเมตาเกอลินมีสัดส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมินามีค่า 4.18 ผลการศึกษาสามารถสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนที่อุณหภูมิต่ำ (60 องศาเซลเซียส) และสังเคราะห์ได้กับดินทุกชนิดที่กล่าวมาข้างต้น จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่ผลิตได้มีลักษณะทางมหภาคเหมือนกัน แต่จะมีความแตกต่างในระดับจุลภาคดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าควอตซ์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ปะปนอยู่ในเนื้อพาสต์แตกต่างกัน จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของ ชนิดดิน ความเป็นผลึกของดิน ที่ส่งผลต่อลักษณะของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่สังเคราะห์ได้

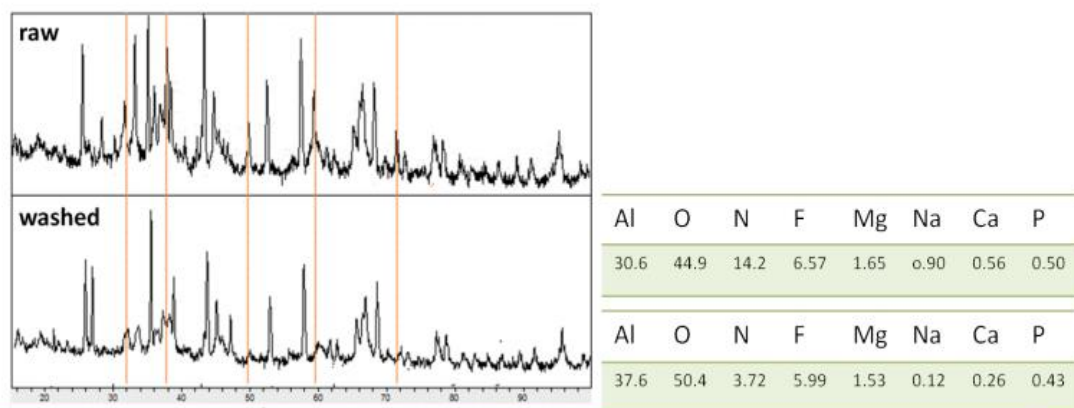


รูปที่ 2.12 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยดินต่างชนิดกัน^[27]

Chen Dai^[28] ศึกษาการใช้ตะกรันอะลูมิเนียมในงานด้านวิศวกรรม ผลิตเป็นสารก่อฟองในงานคอนกรีตทนความร้อนและอะลูมิเนียมคอมโพสิต จากการศึกษาพบว่าตะกรันอะลูมิเนียมจะถูกทำความสะอาดก่อนด้วยการนำไปต้มกับน้ำเดือดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที เพื่อกำจัดสารเจือปน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 2.13 จากข้อมูลพบว่าตะกรันอะลูมิเนียมก่อนต้มและหลังต้มมีความแตกต่างของพีคอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยพีคของอะลูมิเนียมไนไตรด์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตะกรันอะลูมิเนียมที่ยังไม่ได้ต้ม เนื่องจากอะลูมิเนียมไนไตรด์ทำปฏิกิริยากับน้ำภายใต้ความร้อนเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์และก๊าซแอมโมเนียดังสมการที่ 2.11



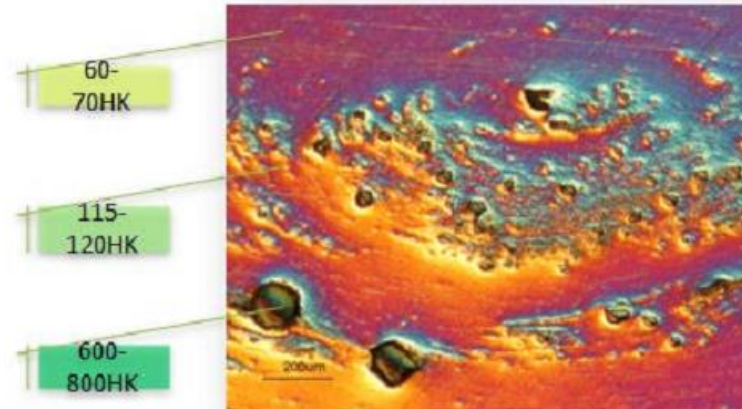
สมการที่ 2.11



รูปที่ 2.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตะกรันอะลูมิเนียมที่ผ่านการต้มและไม่ผ่านการต้ม^[28]

ในการศึกษาความแข็งของของตะกรันอะลูมิเนียม ทำได้ด้วยการกระจายตะกรันอะลูมิเนียมบนเมทริกซ์โลหะอะลูมิเนียมเกรด A203 จากนั้นทำการขัดด้วยเทคนิค FSP แล้ววัดความแข็งค่าที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.14 ทดสอบความแข็ง 3 บริเวณ บริเวณที่ 1 บริเวณที่ไม่มีตะกรันอะลูมิเนียมความแข็งมีค่า 60-70HK บริเวณที่ 2 มีตะกรันอะลูมิเนียมกระจายตัวอยู่มีค่าความแข็ง 115-120HK มีค่า

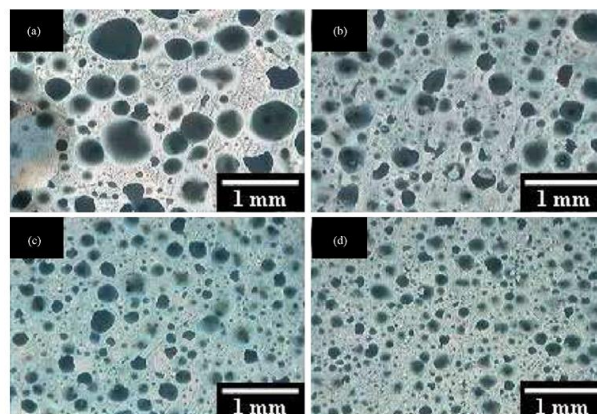
มากกว่าเนื้อเมทริกซ์ 2 เท่า บริเวณที่ 3 เป็นอนุภาคขนาดใหญ่มีค่าความแข็ง 600-800HK มีค่ามากกว่าเมทริกซ์ 10 เท่า แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำตะกั่วอะลูมิเนียมไปเป็นวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 2.14 ลักษณะทางจุลภาคและความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิค FSP^[28]

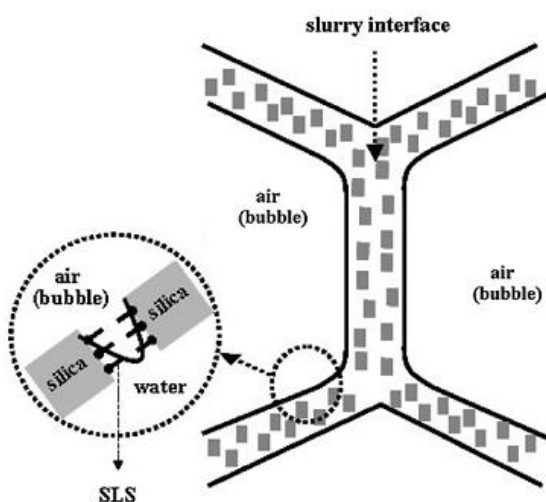
Hyunjung Kim และคณะ^[29] ได้ศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่อขนาดรูพรุนของเซรามิกโฟม ในการทดลองใช้ โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate, SLS) เป็นสารลดแรงตึงผิว โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นดังนี้ 7×10^{-3} 2.1×10^{-2} 4.2×10^{-2} 7×10^{-2} โมลาร์ เนื้อเพสต์ประกอบไปด้วยพอลิเอททิลีนมีน (Polyethyleneimine, PEI) ปริมาณ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอีพ็อกซี่เรซิน ปริมาณ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการตีฟองด้วยเครื่องผสมใบพัด หลังจากได้ฟองแล้วเทเนื้อเพสต์ลงไปผสมและทิ้งไว้ให้แห้ง นำชิ้นงานไปอบ จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาไฟโรไลซีซที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

$$\Delta P = \gamma_{air/slurry} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{สมการที่ 2.12}$$



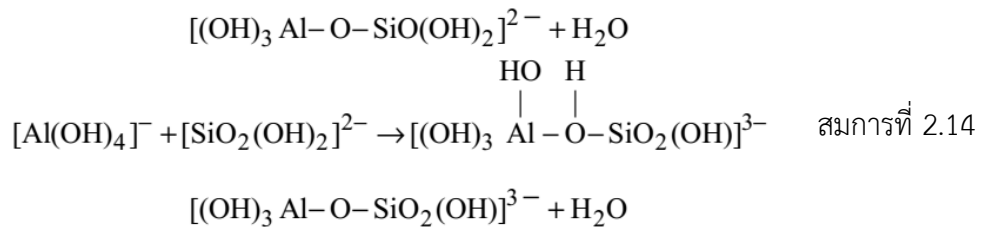
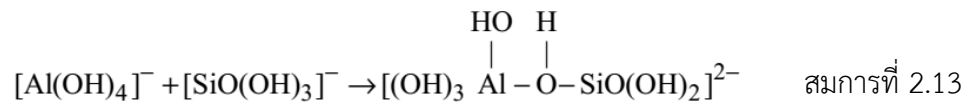
รูปที่ 2.15 ชิ้นงานเซรามิกพรุนที่ผ่านการเผา (a) 7×10^{-3} (b) 2.1×10^{-2} (c) 4.2×10^{-2} และ (d) 7×10^{-2} โมลาร์^[29]

จากการศึกษาพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองอากาศมีขนาดลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SLS อธิบายได้จากสมการลาปลาซ (สมการที่ 2.12) เมื่อโมเลกุลของ SLS ละลายในน้ำ จะส่งผลให้พลังงานพื้นผิว ($\gamma_{air/slurry}$) ลดลง เนื่องจากผิวรอยต่อระหว่างอากาศกับสเลอรีเกิดขึ้นได้ง่าย โดยโมเลกุลของน้ำจะเกาะกับอนุภาคซิลิกาใน SLS ทำให้ลดพลังงานพื้นผิวที่เกิดจากการสัมผัสกันของอากาศ น้ำ และซิลิกา แสดงดังรูปที่ 2.16 เมื่อพลังงานผิวน้อยลงทำให้ออกาสในการเกิดผิวใหม่ง่ายขึ้น ส่งผลให้เกิดฟองขนาดเล็ก อีกทั้งเมื่อความเข้มข้นของ SLS มากขึ้น จะส่งผลให้อนุภาคซิลิกามีความหนาแน่นมากขึ้น เป็นผลให้สเลอรีมีความหนืดสูง และความสามารถในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศหรือโมเลกุลเคลื่อนที่ได้ยาก นอกจากนี้ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ของอนุภาคซิลิกามีส่วนในการลดการเชื่อมต่อของฟองอากาศ โดยจับกับโมเลกุลของน้ำแทน



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของฟองอากาศที่ล้อมรอบด้วยน้ำและ SLS ที่ละลายอยู่ในน้ำ [29]

Irena N. และคณะ [30] ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์ฐานแก้วลอย โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ สัดส่วนของแข็งต่อของเหลว ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.8 พบว่าสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ชิ้นงานมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้น (ชิ้นงาน FA1-4) โดยมีน้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการชะละลายอนุภาคแก้วลอย และส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในการชะละลายอะลูมิเนียมไอออนและซิลิกอนไอออนจากแก้วลอย แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการควบแน่นจะเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ แสดงดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 ซึ่งปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะชะลอกระบวนการควบแน่นเป็นผลให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ไม่แข็งแรง สำหรับการเพิ่มสัดส่วนของแข็งต่อของเหลว ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ลดลงและเกิดกระบวนการควบแน่นเชิงซ้อนได้ดีขึ้น เป็นผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น



ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังอัดมากที่สุดเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH) จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ในการชะละลายอะลูมิเนียมไอออนและซิลิคอนไอออนจากแก้วลอย เกิดหน่วยย่อยและควบแน่นเป็นเจลอะลูมิเนียมซิลิเกต จนทำให้เกิดการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ต่ำลง เพราะความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายต่ำ และลดการชะละลายที่ผิวของอนุภาคแก้วลอย ทำให้กำลังอัดของชิ้นงานมีค่าลดลงตามไปด้วย

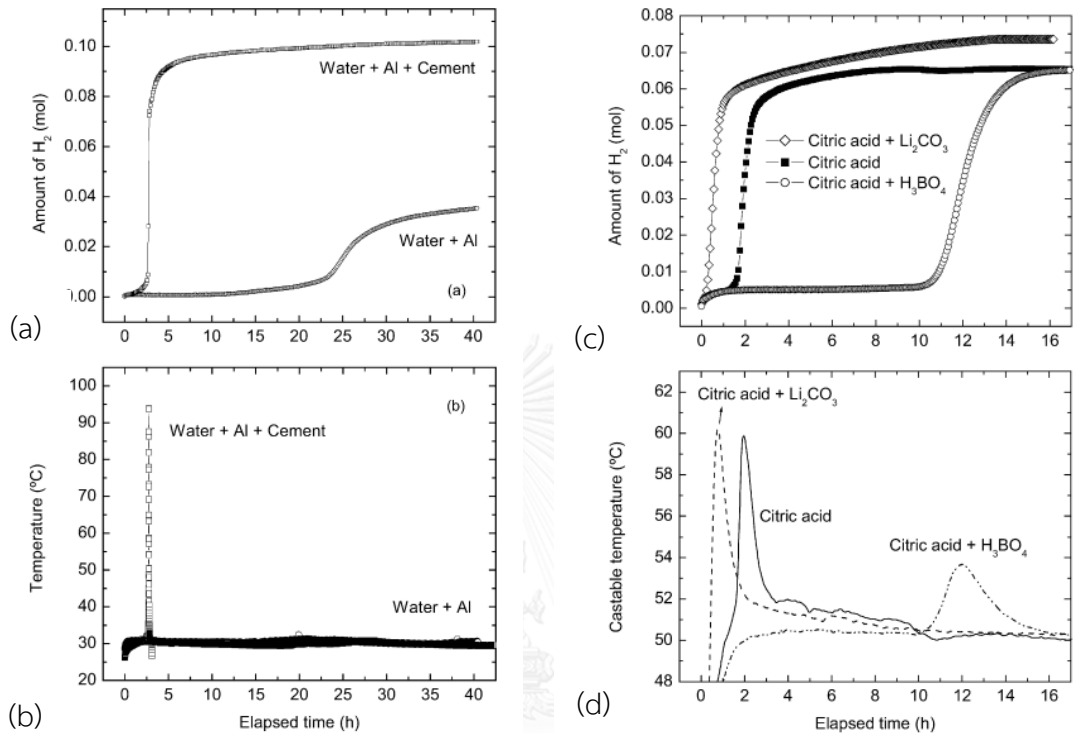
ตารางที่ 2.8 กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ฐานแก้วลอย^[30]

Sample	S/L	$c(\text{NaOH}) / \text{mol dm}^{-3}$	$m(\text{Na}_2\text{SiO}_3)/m(\text{NaOH})$	Compressive strength, MPa
FA1	0.5	10	1.5	—
FA2	0.75	10	1.5	12.18
FA3	1	10	1.5	15.43
FA4	1.25	10	1.5	18.27
FA5	1	7	1.5	13.35
FA6	1	13	1.5	14.71
FA7	1	10	1	14.62
FA8	1	10	2	11.7

อย่างไรก็ตามกำลังอัดของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 1 เป็น 1.5 เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์อย่างดีขึ้น จึงทำให้กำลังอัดของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 2 พบว่าชิ้นงานมีค่ากำลังอัดลดลงเนื่องจากปริมาณซิลิเกตที่มากเกินไปส่งผลทำให้ปริมาณไอออนของไฮดรอกไซด์อิสระลดลง และมีผลต่อการชะละลายอะลูมิเนียมไอออนและซิลิคอนไอออนจากผิวของแก้วลอย

A.R. Studart et al. และคณะ^[21] ได้ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างโลหะอะลูมิเนียมกับน้ำในซีเมนต์หล่อทนไฟ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กรดบอริก (H_3BO_4) เป็นตัวหน่วงปฏิกิริยา และกรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_8$) เป็นสารช่วยกระจายตัว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปริมาณผงอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน (0.1 0.2 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ซึ่งจากผลการศึกษา

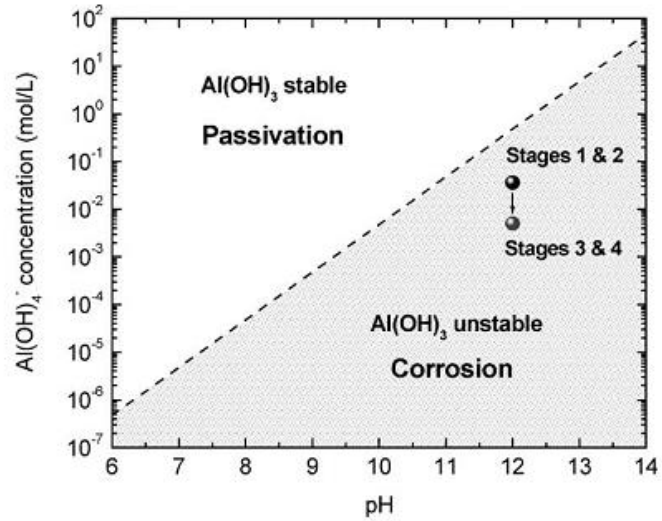
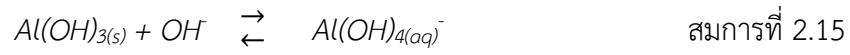
พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวหน่วงปฏิกิริยาส่งผลต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและความร้อนที่ปล่อยออกมา โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นสารแอลคาไลน์ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและความร้อนเกิดขึ้นได้เร็วดังรูปที่ 2.17(c-d)



รูปที่ 2.17 (a) ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เปลี่ยนแปลงไปของซีเมนต์เพสต์ (b) อุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่เปลี่ยนแปลงไป (c) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (Li_2CO_3 , 0.005 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และตัวหน่วงปฏิกิริยา (H_3BO_4 , 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ต่อปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่เปลี่ยนแปลงไป (d) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวหน่วงปฏิกิริยาต่ออุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงอะลูมิเนียม 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส^[21]

เมื่อโลหะอะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดขึ้นของไฮดรอกไซด์ปกคลุมอนุภาคโลหะอะลูมิเนียม การชะละลายของชั้นไฮดรอกไซด์สามารถอธิบายได้ด้วยค่าพีเอช จากการศึกษาพบว่าค่าพีเอชที่มากกว่า 6 แต่น้อยกว่า 9 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) มีความเข้มข้นสูงทำให้ชั้นของไฮดรอกไซด์เสถียร แสดงดังรูปที่ 2.18 ป้องกันโลหะอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 11 แต่น้อยกว่า 14 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะมีความเข้มข้นต่ำทำให้ชั้นไฮดรอกไซด์ไม่เสถียรเกิดการละลาย ทำให้โลหะอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำ จากการศึกษาพบว่าในซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใส่ตัวเร่งจะใช้เวลา 30-60 นาที ในการเพิ่มค่าพีเอชไปถึง 11 และเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้ถึงจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) ซึ่งเป็นจุดที่โลหะอะลูมิเนียมจะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกชัน ในซีเมนต์เพสต์ที่ศึกษานี้มีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์-

ไอออน 0.035 โมลต่อลิตร ซึ่งยังต่ำกว่าค่าการอิ่มตัว (saturation) ส่งผลให้เกิดการชะละลายผิว อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ตามสมการที่ 2.15



รูปที่ 2.18 ไดอะแกรมแสดงการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมในน้ำ (25 องศาเซลเซียส)^[21]



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยจะกล่าวถึงการทดสอบสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของ วัสดุดิบ โดยประกอบไปด้วย การหาค่าองค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวรวมถึง วิธีการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์พูนและการทดสอบกำลัง การนำความร้อน และการหาพื้นที่รูพรุนเฉลี่ย ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

3.1 การเตรียมวัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุดิบที่ใช้ในการวิจัยคือดินขาวที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาและซิลิกาเป็นหลักและ วัสดุดิบที่ใช้เป็นสารก่อฟองได้แก่ ผงตะกักรันอะลูมิเนียม ซิลิกาฟูม และผงอะลูมิเนียม

3.1.1 การเตรียมดินขาวเผา

นำดินขาวนราธิวาสไปบดแห้งเพื่อลดขนาดอนุภาค ด้วยเครื่องบดความเร็วสูง ในสัดส่วนลูก บดอะลูมินาต่อดินขาวนราธิวาส 350:300 กรัม บดเป็นเวลา 10 นาที นำดินที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 100 เมช และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเรียกดินที่ผ่านการเผาว่า ดินขาวเผา (Metakaolin) หลังจากนั้นนำดินขาวเผาที่ได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ องค์ประกอบทาง เคมีด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence, XRF) ผลิตโดยบริษัท Phillips รุ่น PW-2404 ประเทศเนเธอร์แลนด์ วิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction, XRD) ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8-Advance ประเทศสหรัฐอเมริกา วิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480LV ประเทศญี่ปุ่น วิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัว ของอนุภาค ผลิตโดยบริษัท Malvern รุ่น Mastersizer 2000 ประเทศสหราชอาณาจักร และ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) ผลิตโดยบริษัท Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 การเตรียมตะกักรันอะลูมิเนียม

นำตะกักรันอะลูมิเนียมที่ได้จากบริษัทเมืองทองอะลูมิเนียม จังหวัดสมุทรปราการ ไปบดลด ขนาดอนุภาคด้วยเครื่องบดความเร็วสูง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เมช ตะกักรันอะลูมิเนียมที่ได้จะถูกนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย เทคนิค XRF วิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิค XRD วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM วิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

3.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างเฟสของวัสดุบิโพลิเมอร์พูน

ในหัวข้อนี้จะศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุบิโพลิเมอร์พูน ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF และวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิค XRD การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุบิโพลิเมอร์พูนด้วยเทคนิค SEM การวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาควัสดุบิโพลิเมอร์พูน และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์บิโพลิเมอร์พูนฐานดินขาวเผาซึ่งมีส่วนของอะลูมินาต่อซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ทำให้ต้องนำวัสดุบิโพลิเมอร์พูนไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง โดยเตรียมชิ้นงานที่ทดสอบคือ นำวัสดุบิโพลิเมอร์พูนอย่างละ 1 กรัม ผสมกับ Hoechst wax C ขนาดไมโครเมตร 5 กรัม นำไปบดในโกร่ง จากนั้นอัดด้วยเครื่องอัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 เซนติเมตร หนาไม่เกิน 5 เซนติเมตร เทคนิคนี้จะสามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง

สำหรับเทคนิค XRF อาศัยหลักการของแสงเมื่อตัวอย่างได้รับรังสี X-ray ที่มีพลังงานสูง ตัวอย่างหรือชิ้นงานจะเกิดการปลดปล่อยพลังงาน (photon) ออกมาโดยพลังงานโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากธาตุที่ต่างชนิดกัน ชิ้นงานจะมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันทำให้สามารถจำแนกหรือบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในชิ้นงานดังกล่าวได้^[31]

3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของวัสดุบิโพลิเมอร์พูนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเครื่อง XRD โดยใช้หลอดคอปเปอร์ (Cu-tube) อัตราหมุน 2 องศาต่อนาที ศึกษา 2 θ ในช่วง 5-80 องศา สำหรับการเตรียมชิ้นงานในการวิเคราะห์ทำได้โดยการนำผงวัสดุบิโพลิเมอร์พูนไปบดให้ละเอียด จากนั้นนำไปวางในที่ใส่ตัวอย่าง (sample holder) และปาดให้เรียบ ก็จะได้ชิ้นงานที่พร้อมสำหรับทดสอบ ด้วยเทคนิคนี้จะสามารถวิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุบิโพลิเมอร์พูนและชิ้นงานบิโพลิเมอร์พูน โดยในงานวิจัยนี้คาดหวังจะเห็นความเป็นออสซิลลูมหรือความเป็นสารกึ่งผลึกของบิโพลิเมอร์พูนที่สังเคราะห์ได้

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก ของสารประกอบในสารตัวอย่าง^[31]

3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุบิโพลิเมอร์พูนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM ใช้ ความต่างศักย์ (voltage) 15 กิโลโวลต์ เทคนิคนี้จะสามารถศึกษาสัญญาณวิทยาของวัสดุบิโพลิเมอร์พูน รวมถึงลักษณะทางจุลภาคของชิ้นงานบิโพลิเมอร์พูนที่สังเคราะห์ขึ้นมา

เทคนิค SEM เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้ากำลังสูงแก่ขั้วหลอดทังสเตน (อิเล็กตรอนปืน) จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก

(condenser lens) ทำให้ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงาน และส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากชิ้นงานซึ่งมีหลายระดับพลังงาน โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) จะถูกใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณผิวชิ้นงาน^[32]

3.2.4 การวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาควัตถุ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Particle sized analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของสาร การเตรียมสารสำหรับทดสอบ ทำได้โดยการเทสารลงในบีกเกอร์ที่มีเอทานอล จากนั้นนำโซนิเคตเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ เทคนิคนี้ทำให้ทราบถึงขนาดเฉลี่ยของอนุภาควัตถุคือ ค่าขนาดกลางอนุภาค (d_{50})

การหาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง โดยแหล่งกำเนิดแสงคือ เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมครอน เมื่ออนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางผ่านลำแสงชั่วระยะเวลาหนึ่ง ใช้สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนกลับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์หาการกระจายตัวของอนุภาคได้^[33]

3.2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR เตรียมตัวอย่างได้โดยบดสารผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium Bromide) แล้วอัดเป็นแผ่นบาง วางในที่ใส่ตัวอย่างแล้วนำไปทดสอบ โดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเป็นเทคนิคที่พิจารณาจากพลังงานที่สารดูดกลืน หรือปลดออกมาเพื่อใช้ในการสั่นของโมเลกุลในรูปแบบต่าง ๆ ในการทดลองนี้ต้องการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของวัตถุและชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ โดยคาดหวังว่าจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในวัสดุอีโพลีเมอร์

เทคนิค FTIR เป็นเทคนิคที่นิยมในการวิเคราะห์ตรวจสอบเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่นของโมเลกุล โดยใช้แสงอินฟราเรดในช่วง 2.5-25 ไมครอนเมตร ที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมจะเกิดการสั่นของโมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุล และเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า IR spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะ ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมของ functional groups ในโมเลกุลนั้น ๆ^[34]

3.3 การผลิตอีโพลีเมอร์พูน

3.3.1 การเตรียมสารละลายแอลคาไลน์

สารละลายแอลคาไลน์ประกอบไปด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ajax finechem Ltd., โซเดียมไฮดรอกไซด์เกรดความบริสุทธิ์ 97%) ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (SiO_2 มีค่า 25.5, Na_2O มีค่า 11, H_2O มีค่า 63.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ดังตารางที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตัวอย่างการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาณ 22.18

กรัม ทำได้ด้วยการซังสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 6.34 กรัม ละลายน้ำปริมาณ 15.84 กรัม จากนั้นนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตปริมาณ 77.64 กรัม แล้วนำไปปั่นจนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.3.2 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารก่อฟอง

นำซิลิกาฟุ้ง (GS energy Ltd., ประเทศไทย) ไปผสมกับดินขาวเผา สารแอลคาไลน์ที่เตรียมตามหัวข้อ 3.3.1 สัดส่วนดังตารางที่ 3.1 เทในหม้อผสม Hobert เปิดเครื่องผสมความเร็วเบอร์ 1 เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที ความเร็วเบอร์ 2 จนครบ 5 นาที จะได้จีโอพอลิเมอร์เพสต์ข้นเหลว จากนั้นเทจีโอพอลิเมอร์เพสต์ลงในแม่แบบทรงกระบอก นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากงานวิจัยของ Prud'homme, E. และคณะ^[24] ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฟุ้งใช้สารก่อฟองเป็นซิลิกาฟุ้ง บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณซิลิกาฟุ้งมีผลต่อการฟุ้งตัวของชิ้นงาน และปริมาณของซิลิกาฟุ้งควรมีปริมาณอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถึงจะส่งผลต่อการขยายตัวอย่างมีนัยสำคัญของชิ้นงาน เมื่อคำนวณสัดส่วนโดยโมลของอะลูมินาต่อซิลิคอนของชิ้นงาน พบว่ามีค่า 0.64-0.24 ทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฟุ้งโดยใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารก่อฟอง โดยใช้สัดส่วนโดยโมลของอะลูมินาต่อซิลิคอนมีค่าอยู่ในช่วง 0.64-0.27

3.3.3 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ตะกัณอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

นำตะกัณอะลูมิเนียมหรือผงอะลูมิเนียม (himedia laboratories Pvt. Ltd., ความบริสุทธิ์ 99.0%) ผสมกับดินขาวเผา สารละลายแอลคาไลน์ ตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ผสมให้เข้ากันด้วยหม้อผสม Hobert จะได้จีโอพอลิเมอร์เพสต์ข้นเหลว จากนั้นเทจีโอพอลิเมอร์เพสต์ลงในแม่แบบทรงกระบอก ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แกะออกจากแม่แบบและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 14 21 และ 28 วัน

สำหรับตะกัณอะลูมิเนียมแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือการศึกษาปริมาณของตะกัณอะลูมิเนียมและสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของจีโอพอลิเมอร์ ส่วนที่สองคือการศึกษาสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อสมบัติต่าง ๆ โดยในส่วนแรกจะเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกัณอะลูมิเนียม จากงานวิจัยของ Pimpawee K. และคณะ^[35] ได้ศึกษาการใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองในจีโอพอลิเมอร์ฐานดินขาวเผา ปริมาณผงอะลูมิเนียมที่ใช้คือ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งในงานวิจัยของ Peter D. และ Y.M. Liew^[35, 36] ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฐานดินขาวเผา โดยใช้สัดส่วนโดยโมลของซิลิคอนต่ออะลูมินาและสัดส่วนของแข็งที่แตกต่างกัน พบว่าสัดส่วนโดยโมลของซิลิคอนต่ออะลูมินามากกว่า 1.40 สามารถช่วยให้ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์มีรูพรุนน้อยลง และสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวมีค่า 0.80 ทำให้ชิ้นงานสามารถรับกำลังอัดที่สูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตะกัณอะลูมิเนียมปริมาณ 0 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ใช้สัดส่วนโดยโมลของซิลิคอนต่ออะลูมินามากกว่า 1.40 และสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวมีค่า 0.86 จากนั้นเปลี่ยนแปลงสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เป็น 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน ส่วนที่สองศึกษาสัดส่วนของแข็งต่อของเหลว เลือกสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวมีค่าเท่ากับ 0.72 0.86 และ 1.03 โดยจากผล

การศึกษาในส่วนแรกพบว่ากำลังอัดที่สูงสุดที่ 28 วัน ทำให้การศึกษาในส่วนนี้เลือกใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

สำหรับการศึกษาปริมาณผงอะลูมิเนียมที่แตกต่างกันในการวิจัยนี้เลือกใช้ปริมาณ 0 0.3 0.5 และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการใช้ปริมาณผงอะลูมิเนียมที่มากเกินไป ส่งผลทำให้ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวที่เร็วขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการผสมเนื้อจีโอพอลิเมอร์กับผงอะลูมิเนียม โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับโลหะอะลูมิเนียมส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว โดยชิ้นงานที่ใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง จะเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน

3.3.4 สูตรส่วนผสมและการเรียกชื่อ

ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้สารก่อฟอง 3 ชนิดและมีการปรับสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ รวมถึงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีชิ้นงานเป็นจำนวนมาก จึงมีวิธีเรียกชื่อชิ้นงานดังต่อไปนี้

กำหนดให้ GA_{b-c}^{d-e} เป็นชื่อชิ้นงาน โดยที่

G คือ สัดส่วนของของแข็งต่อของเหลว

A คือ ชนิดของสารก่อฟองที่ใช้

โดย S หมายถึง ซิลิกาฟุ่ม

D หมายถึง ตะกรันอะลูมิเนียม

P หมายถึง ผงอะลูมิเนียม

b คือ ปริมาณซิลิกาฟุ่ม หน่วยเป็นกรัม

c คือ ปริมาณตะกรันอะลูมิเนียม/ผงอะลูมิเนียม หน่วยเป็นกรัม

d คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$

e คือ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สำหรับส่วนผสมที่ใช้ในการผสมแสดงดังตารางที่ 3.1-3.3 และวิธีในการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์พูนรวมถึงสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์และทดสอบชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้เป็นไปตามรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟอง

ชื่อ	วัตถุดิบ			c(NaOH) / mol kg ⁻¹	Na ₂ SiO ₃	NaOH	สัดส่วนโดยโมล			H ₂ O, wt%	บ่ม (°C)
	ดิน ขาว เผา	ซิลิกา ฟุ่ม	ตะกรัน อะลูมิเนียม				SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Na ₂ O/ SiO ₂	H ₂ O/ Na ₂ O		
1.00S ₅₀₋₀ ^{3.5-10}	50	50	-	10	77.67	22.18	7.68	0.14	16.66	32.61	70
1.00S ₃₀₋₀ ^{3.5-10}	70	30	-	10	77.67	22.18	4.99	0.15	16.66	32.61	70
1.00S ₄₀₋₀ ^{3.5-6}	60	40	-	6	77.67	22.18	6.11	0.13	19.48	33.63	70
1.00S ₄₀₋₀ ^{3.5-10}	60	40	-	10	77.67	22.18	6.11	0.14	16.66	32.61	70
1.00S ₄₀₋₀ ^{3.5-14}	60	40	-	14	77.67	22.18	6.11	0.16	14.86	31.79	70

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกอนอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

ชื่อ	วัตถุดิบ			c(NaOH) / mol kg ⁻¹	Na ₂ SiO ₃	NaOH	สัดส่วนโดยโมล			H ₂ O, wt%	บ่ม (°C)
	ดิน ขาว เผา	ซิลิกา ฟุ่ม	ตะกอน อะลูมิเนียม				SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Na ₂ O/ SiO ₂	H ₂ O/ Na ₂ O		
0.86D ₀₋₀ ^{1.5-10}	100	-	-	10	54.60	36.38	2.89	0.24	14.84	35.76	RT
0.86D _{0-0.5} ^{1.5-10}	100	-	0.5	10	54.60	36.38	2.89	0.24	14.84	35.76	RT
0.86D _{0-1.0} ^{1.5-10}	100	-	1.0	10	54.60	36.38	2.89	0.24	14.84	35.76	RT
0.86D _{0-1.5} ^{1.5-10}	100	-	1.5	10	54.60	36.38	2.89	0.24	14.84	35.76	RT
0.86D ₀₋₀ ^{2.5-10}	100	-	-	10	82.70	33.07	3.02	0.21	15.95	35.29	RT
0.86D _{0-0.5} ^{2.5-10}	100	-	0.5	10	82.70	33.07	3.02	0.21	15.95	35.29	RT
0.86D _{0-1.0} ^{2.5-10}	100	-	1.0	10	82.70	33.07	3.02	0.21	15.95	35.29	RT
0.86D _{0-1.5} ^{2.5-10}	100	-	1.5	10	82.70	33.07	3.02	0.21	15.95	35.29	RT
0.72D _{0-1.5} ^{2.5-10}	100	-	1.5	10	99.92	39.95	3.20	0.24	15.95	38.35	RT
1.03D _{0-1.5} ^{2.5-10}	100	-	1.5	10	69.20	27.67	2.88	0.19	15.95	32.36	RT

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

ชื่อ	วัตถุดิบ			c(NaOH) / mol kg ⁻¹	Na ₂ SiO ₃	NaOH	สัดส่วนโดยโมล			H ₂ O, wt%	บ่ม (°C)
	ดิน ขาว เผา	ซิลิกา ฟุ่ม	ตะกอน อะลูมิเนียม				SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Na ₂ O/ SiO ₂	H ₂ O/ Na ₂ O		
0.86P _{0.3} ^{2.5}	100	-	0.3	10	82.70	33.07	3.02	0.21	15.95	35.29	RT
0.86P _{0.5} ^{2.5}	100	-	0.5	10	82.70	33.07	3.02	0.21	15.95	35.29	RT
0.86P _{0.7} ^{2.5}	100	-	0.7	10	82.70	33.07	3.02	0.21	15.95	35.29	RT

3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนได้แก่ การวัดความหนาแน่น การทดสอบความแข็งแรง การทดสอบการนำความร้อน และการหาพื้นที่รูพูนเฉลี่ย เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อกองทุกสูตรจะไม่เสถียรในน้ำ ทำให้ไม่มีการวัดความหนาแน่นและการทดสอบความแข็งแรง

3.4.1 การวัดความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่นจะนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนไปวัดขนาดด้วยเวอร์เนีย และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง จากนั้นคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงานได้ด้วยสมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

m คือ น้ำหนักชิ้นงาน มีหน่วยเป็น กรัม

V คือ ปริมาตรชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

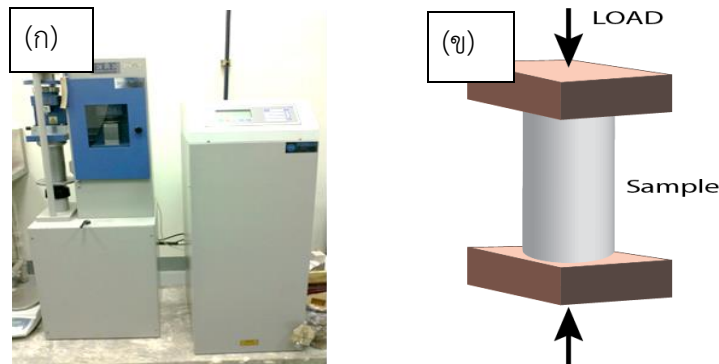
การทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน โดยนำชิ้นงานไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด ยี่ห้อ ELE international รุ่น ADR-Auto ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน ASTM C39^[37] ในการทดสอบกำลังอัด ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะถูกขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก มีความสูงเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง สามารถคำนวณกำลังอัดได้จากสมการที่ 3.2

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

โดยที่ σ คือ กำลังอัด มีหน่วยเป็น เมกะพาสคัล

F คือ แรงกด มีหน่วยเป็น กิโลนิวตัน

A คือ พื้นที่ผิวรับแรงกด มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 (ก) เครื่องทดสอบกำลังอัด ยี่ห้อ ELE international รุ่น ADR-Auto (ข) ลักษณะของการออกแรงและรูปทรงของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ

3.4.3 การทดสอบการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

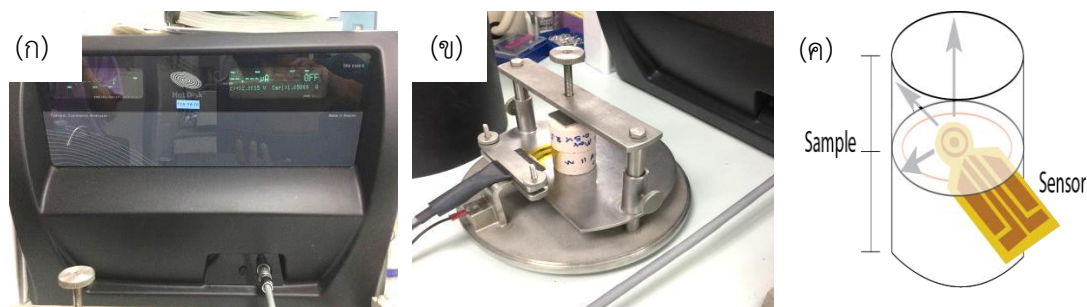
เพื่อศึกษาการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน ได้นำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนไปทดสอบการนำความร้อนด้วยเทคนิค Hot disk ด้วยเครื่อง Thermal constants analyzer ดังรูปที่ 3.2 (ก) โดยใช้เซนเซอร์ Hot disk มีขนาดรัศมี 2.001 มิลลิเมตร นำชิ้นงานมาประกบกันโดยให้เซนเซอร์อยู่ระหว่างชิ้นงานดังรูปที่ 3.2 (ข) โดยในแต่ละสูตรส่วนผสมจะทดสอบอย่างละ 2 ชิ้นงาน

ในการวัดการนำความร้อนของชิ้นงานจะประกอบด้วยเครื่องที่ใช้ในการประมวลข้อมูลและเซนเซอร์ที่ใช้รับข้อมูล โดยเซนเซอร์ของการวัดการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Hot disk จะทำหน้าที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบและวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซนเซอร์และชิ้นงานทดสอบ โดยทั่วไปเซนเซอร์ Hot disk จะมีความหนาประมาณ 10 ไมโครเมตร ประกอบไปด้วยโลหะนิเกิลและโพลิเมอร์ที่เป็นฉนวนความร้อนทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงของโลหะนิเกิลและทำให้โลหะนิเกิลทรงรูปอยู่ได้ ในการคำนวณค่าการนำความร้อนของชิ้นงานจะเป็นไปตามสมการที่ 3.3^[38] โดยสมการจะแสดงค่าของ $\Delta T_{ave}(\tau)$ เป็นแกน y และค่าของ $D(\tau)$ เป็นแกน x ทำให้สามารถหาค่าการนำความร้อนได้จากความชันของกราฟ

$$\Delta T_{ave}(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} \cdot a \cdot \Lambda} \cdot D(\tau) \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

โดยที่

- $\Delta T_{ave}(\tau)$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิตั้งกับชิ้นงานกับเซนเซอร์ มีหน่วยเป็นเคลวิน
- P_0 คือ กำลังไฟฟ้าที่ให้กับเซนเซอร์ มีหน่วยเป็นวัตต์
- a คือ รัศมีของเซนเซอร์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- Λ คือ ค่าการนำความร้อน มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน
- $D(\tau)$ คือ ฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาไม่มีหน่วย

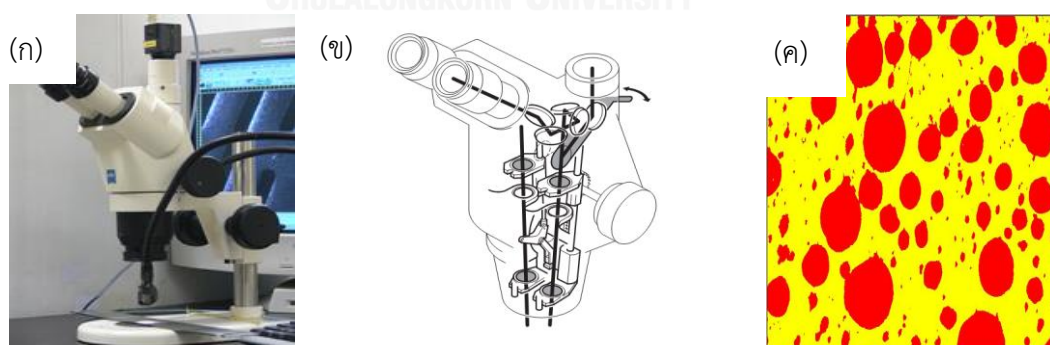


รูปที่ 3.2 (ก) เครื่อง Thermal Constants Analyzer ยี่ห้อ Hot Disk รุ่น TPS 2500 S (ข) การวางชิ้นงานทดสอบ (ค) การไหลผ่านความร้อนของเซนเซอร์ Hot disk ให้กับชิ้นงาน

3.4.4 การหาพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

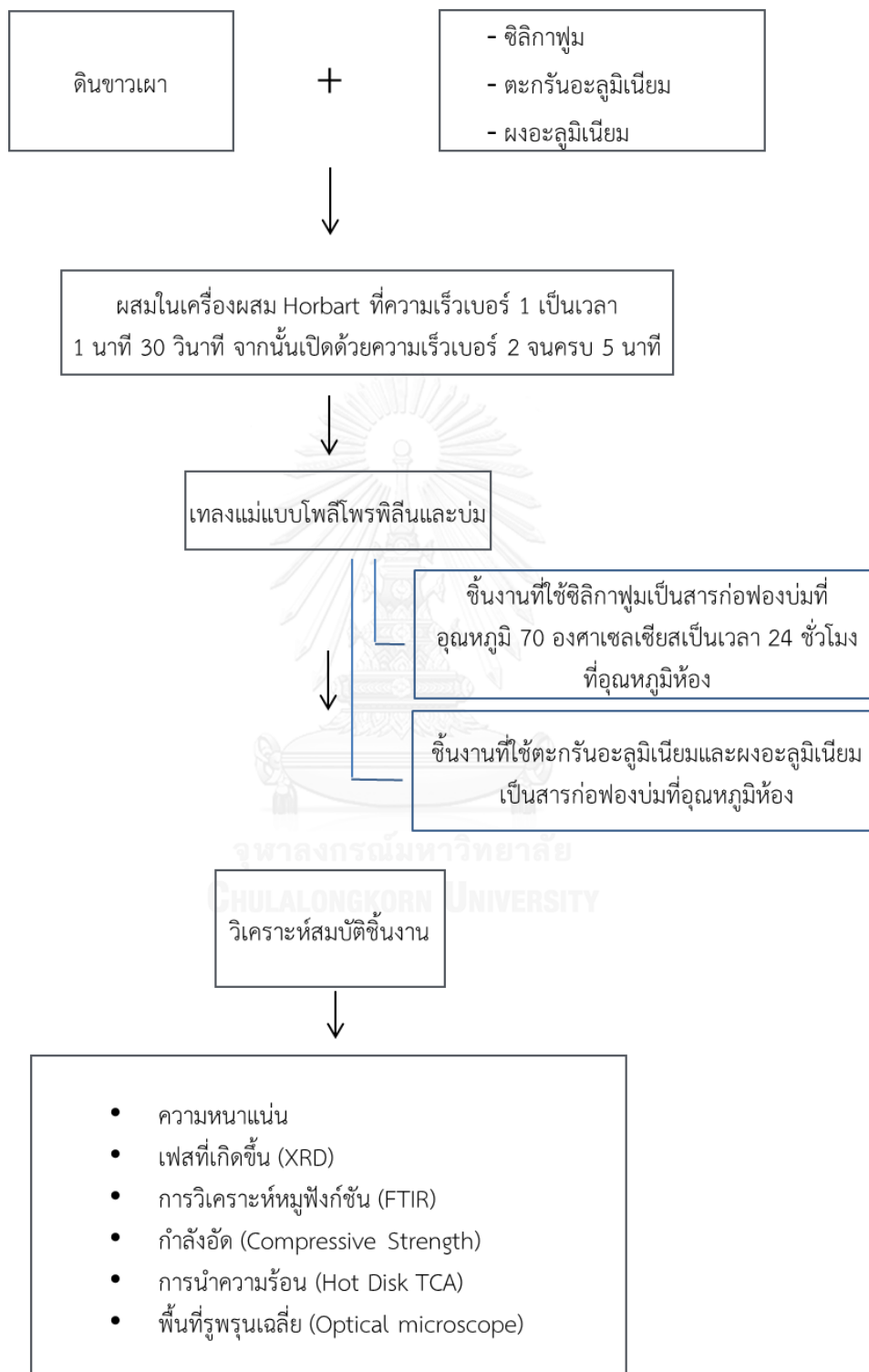
การหาพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนทำได้โดยการนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้แสงแบบสเตอริโอจำนวน 8 ภาพ โดยแต่ละภาพมีขนาด 6x4.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำภาพที่ได้ไปเข้าโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image-pro Plus ver.5.1 เพื่อหาพื้นที่รูพรุนเฉลี่ย

กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ ยี่ห้อ Zeiss รุ่น Stemi 2000 เป็นกล้องชนิดเลนส์วัตถุคู่ (greenough optical system) ดังรูปที่ 3.3 (ก) ทำให้เกิดภาพ 3 มิติ ใช้ศึกษาวัตถุที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถแยกรายละเอียดได้ด้วยตามองเห็น โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือน มีความชัดลึกและเป็นภาพสามมิติ หัวกล้อง ประกอบไปด้วยเลนส์ตาจำนวน 2 กระบอก เอน 11 องศา มีช่วงปรับภาพ 0.8 เท่า ถึง 5 เท่า ส่วนระบบเลนส์และกำลังขยายของกล้อง ประกอบด้วยเลนส์ตากำลังขยาย 10 เท่า เห็นภาพกว้าง 23 มิลลิเมตร เลนส์วัตถุมีระยะทำงานไม่น้อยกว่า 115 มิลลิเมตร กำลังขยายของภาพอยู่ในช่วง 8-50 เท่า โดยมีระบบส่องสว่างแยกออกจากตัวกล้อง (external transformer) โดยแขนของชุดส่องสว่าง สามารถปรับเอนได้



รูปที่ 3.3 (ก) กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Stemi 2000 [39] (ข) การเกิดภาพจากกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป [40] (ค) ภาพที่ใช้ในการหาพื้นที่รูพรุนเฉลี่ยด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image-Pro Plus Ver. 5.1

3.5 แผนผังการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้สารก่อฟองชนิดต่างๆ

บทที่ 4 ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสารก่อฟองเป็นสารประกอบอนินทรีย์ 3 ชนิดได้แก่ ซิลิกาฟุ้ง ผงตะกรัน อะลูมิเนียม และผงอะลูมิเนียม ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี จากนั้นจึงนำสารก่อฟองไปผสมกับจีโอพอลิเมอร์เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

4.1 การวิเคราะห์สมบัติเคมีของวัตถุดิบ

4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติทางเคมีของดินขาวเผา ซิลิกาฟุ้ง และผงตะกรันอะลูมิเนียม ด้วยเทคนิค XRF

ใช้เทคนิค XRF เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ จากข้อมูลพบว่าดินขาวเผา มีปริมาณซิลิกามากที่สุด 54.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รองลงมาคืออะลูมินา 42.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซิลิกาฟุ้งมีปริมาณซิลิกามากที่สุดถึง 97.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผงตะกรันอะลูมิเนียม มีปริมาณโลหะอะลูมิเนียมมากที่สุด 60.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผา และซิลิกาฟุ้ง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

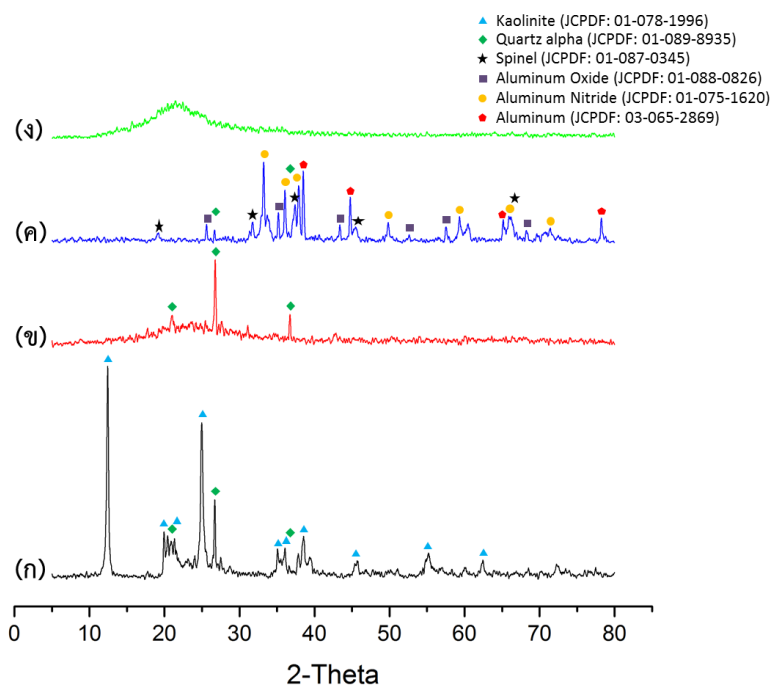
วัตถุดิบ	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃
เมตา เกาลิน	0.02	0.13	42.32	54.30	1.25	0.04	1.06	0.68	0
ซิลิกาฟุ้ง	0.35	0.31	0.11	97.71	0.42	0.46	0	0	0.48

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงตะกรันอะลูมิเนียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

วัตถุดิบ	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
ผงตะกรัน อะลูมิเนียม	30.31	0.54	1.77	60.25	2.56	0.26	0.80	0.39	0.71	0.68	1.15

4.1.2 ผลการทดสอบโครงสร้างเฟสของดินขาวราธิวาส ดินขาวเผา ซิลิกาฟุ้ง และผงตะกรันอะลูมิเนียม ด้วยเทคนิค XRD

การทดสอบโครงสร้างเฟสทำได้ด้วยการนำดินขาวราธิวาส ดินขาวเผา ซิลิกาฟุ้ง และผงตะกรันอะลูมิเนียมมาทดสอบองค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD จากข้อมูลพบว่าดินขาวราธิวาส มีองค์ประกอบของเกาลินไนต์และควอตซ์เป็นหลัก ดินขาวเผา มีองค์ประกอบของควอตซ์ ผงตะกรันอะลูมิเนียม มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปของคอร์ันดัม อะลูมิเนียมไนไตรต์ และโลหะอะลูมิเนียม ซิลิกาฟุ้ง มีองค์ประกอบของซิลิกาซึ่งอยู่ในรูปของอัสัญฐาน อะลูมิเนียม



รูปที่ 4.1 ผลทดสอบ XRD ของ (ก) ดินขาวระนอง (ข) ดินขาวเผา (ค) ผงตะกรันอะลูมิเนียม และ (ง) ซิลิกาฟุ่ม

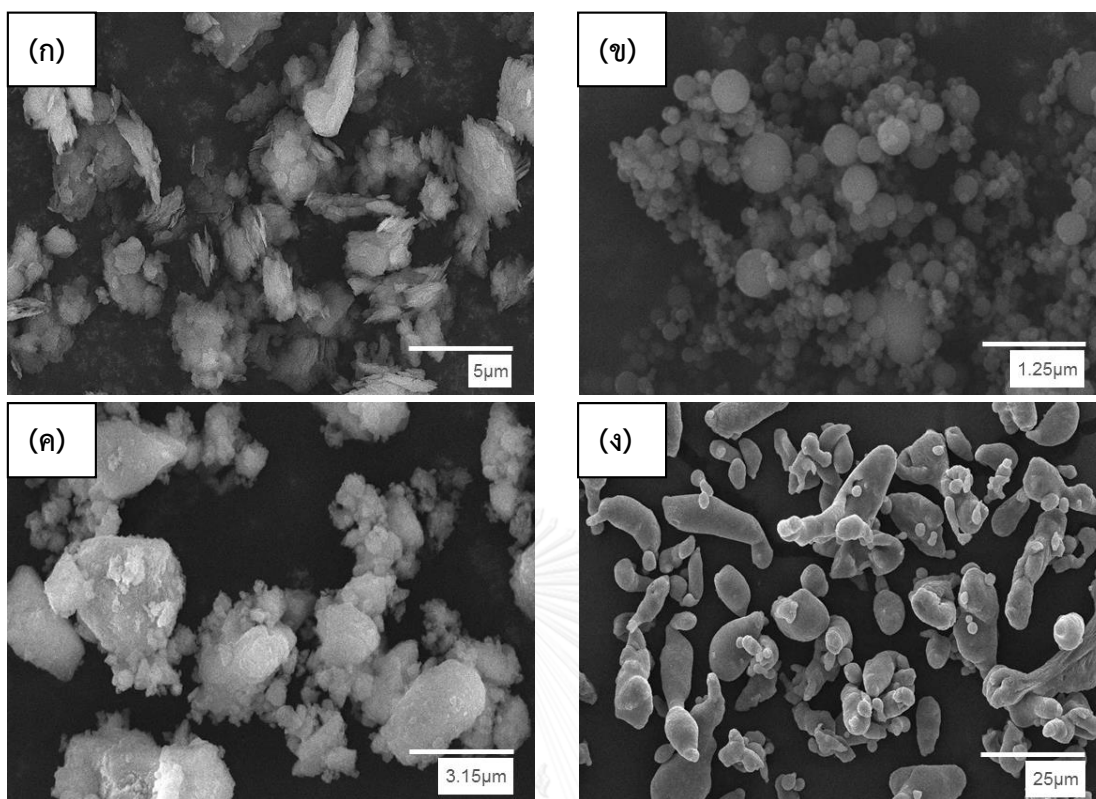
4.1.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและลักษณะสัณฐานวิทยาของวัตถุดิบ

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัตถุดิบถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนแสง โดยค่าที่นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองคือค่าขนาดกลางอนุภาค (D_{50}) แสดงดังตารางที่ 4.3 ค่าขนาดกลางของอนุภาค ดินขาวเผา ซิลิกาฟุ่ม ตะกรันอะลูมิเนียม และผงอะลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 8.04 6.96 8.64 และ 19.01 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าขนาดกลางของอนุภาค

วัตถุดิบ	ค่าขนาดกลางอนุภาค (D_{50}) (ไมโครเมตร)
ดินขาวเผา	8.04
ซิลิกาฟุ่ม	6.96
ตะกรันอะลูมิเนียม	8.64
ผงอะลูมิเนียม	19.01

เมื่อนำผงวัตถุดิบไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM จะเห็นได้ว่าดินขาวเผา มีลักษณะทางจุลภาคเป็นแผ่นแบน ซ้อนกัน ซิลิกาฟุ่มมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม ผิวเรียบ ตะกรันอะลูมิเนียมจะมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวไม่เรียบ และผงอะลูมิเนียมจะมีลักษณะเป็นแท่งยาว ผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของวัตถุดิน (ก) ดินขาวเผา (ข) ซิลิกาฟุ้ง (ค) ตะกรันอะลูมิเนียม และ (ง) ผงอะลูมิเนียม

4.2 การวิเคราะห์การเตรียมชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

4.2.1 การใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารก่อฟอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน โดยศึกษา 2 ส่วน คือการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์พูน และการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนดินขาวเผาต่อซิลิกาฟุ้งที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์พูน

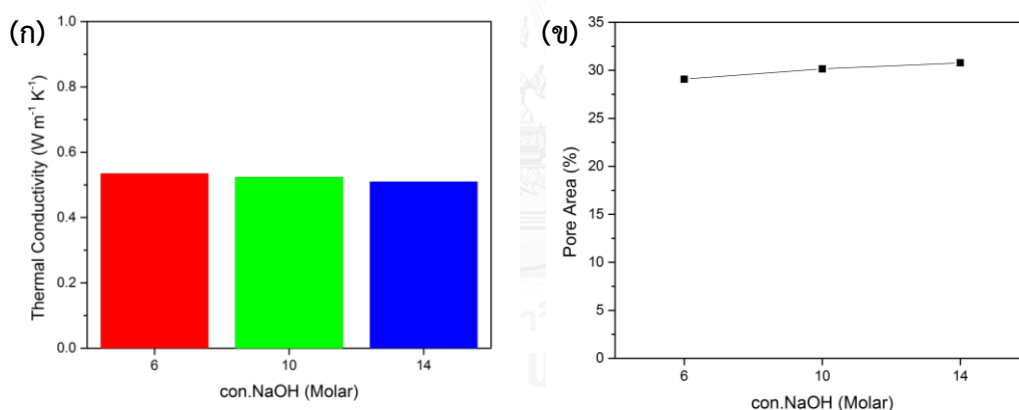
4.2.1.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน

4.2.1.1.1 ผลการทดสอบการนำความร้อนและพื้นที่รูพูนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

ในส่วนนี้ได้สังเคราะห์ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนดินขาวเผาต่อซิลิกาฟุ้ง 60:40 ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 10 และ 14 โมลาร์ จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บ่มที่อุณหภูมิห้องจนครบ 28 วัน และนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (optical microscope) และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (image analysis pro 5.1) ในการหาพื้นที่รูพูนเฉลี่ย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) แนวโน้มของพื้นที่รูพูนเฉลี่ยมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้ความเข้มข้นของ

สารละลายแอลคาไลน์สูงจะมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำในระบบน้อยกว่าชิ้นงานที่มีความเข้มข้นของสารละลายแอลคาไลน์ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ส่งผลให้เนื้อเพสต์ของจีโอพอลิเมอร์พูนมีความหนืดมากกว่า ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศน้อยลง และยับยั้งการรวมตัวกันของรูพูน[41, 42] ทำให้ชิ้นงานมีความพรุนต่ำ

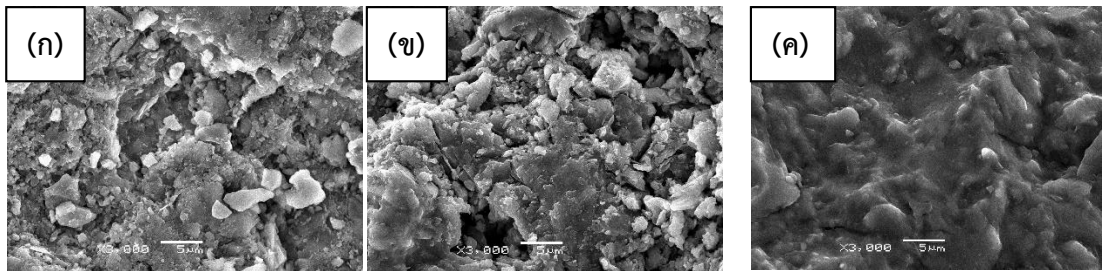
สำหรับค่าการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนแสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหล่อชิ้นงานตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายและหินเกล็ดเป็นมวลรวมในสัดส่วน 1:1:2 บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนครบ 28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบการนำความร้อนด้วยเทคนิค Hot disk เช่นเดียวกับชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ จากผลการทดสอบได้ค่าการนำความร้อน 1.33 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน สำหรับชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟองมีค่าการนำความร้อนต่ำ (0.53-0.51 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน) เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลฉนวน (1.15 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)[43] และคอนกรีต ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแอลคาไลน์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนโดยทำให้ชิ้นงานมีพื้นที่รูพูนเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีปริมาณของอากาศในชิ้นงานจำนวนมากขึ้น อากาศจะทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน



รูปที่ 4.3 (ก) การนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟอง
(ข) พื้นที่รูพูนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟอง

4.2.1.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

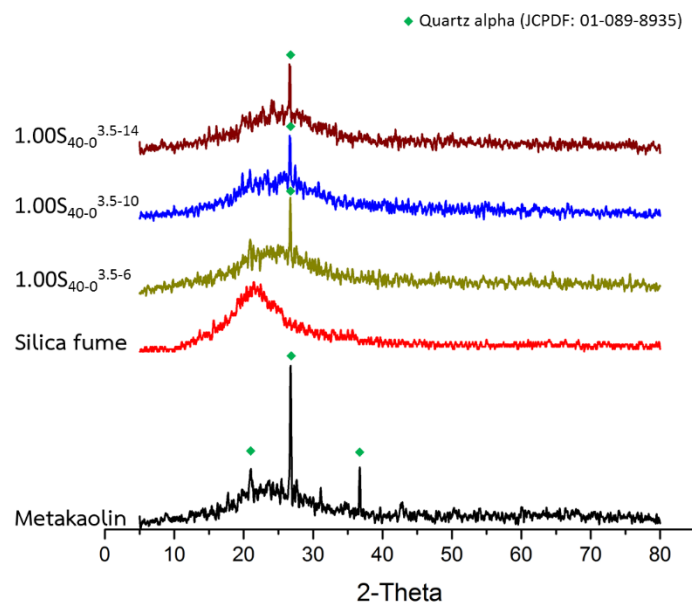
เมื่อนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนไปศึกษาลักษณะทางจุลภาค ด้วยเทคนิค SEM จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่ามีอนุภาคดินกระจายอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ของจีโอพอลิเมอร์พูน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอลคาไลน์พบว่าปริมาณของอนุภาคดินที่กระจายในเนื้อเมทริกซ์ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนมีปริมาณลดลง เนื่องมาจากชิ้นงานสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 14 โมลาร์สามารถเกิดเนื้อเมทริกซ์จะมีความความหนาแน่นมากที่สุด สังเกตได้จากรูปที่ 4.4 (ค)



รูปที่ 4.4 ลักษณะทางจุลภาคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย แอลคาไลน์แตกต่างกัน (ก) ผสมสารละลายแอลคาไลน์ 6 โมลาร์ (ข) ผสมสารละลายแอลคาไลน์ 10 โมลาร์ และ (ค) ผสมสารละลายแอลคาไลน์ 14 โมลาร์

4.2.1.3 ผลการทดสอบสมบัติทางเฟสของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

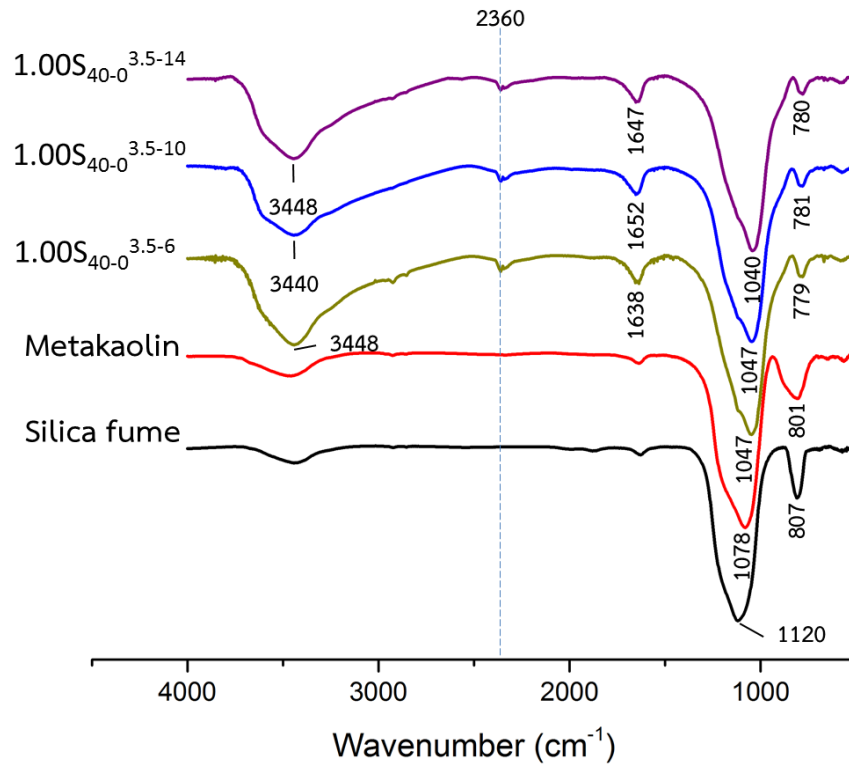
หลังจากบ่มชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนครบ 28 วัน นำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์การเลื่อนตำแหน่งของพีคด้วยเทคนิค XRD จากผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์มีการเลื่อนตำแหน่ง 2θ ของพีคกว้าง (broad peak) ในบริเวณ 18-25 องศา ไปทางตำแหน่ง 2θ ที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดิบ (ดินขาวเผาและซิลิกาฟุ้ง) บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์และการชะละลายของอะลูมิเนียมแคโทไอออนและซิลิคอนแคโทไอออนในวัสดุดิบ^[24]



รูปที่ 4.5 กราฟ XRD ของวัสดุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าพีคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนเลื่อนไปที่เลขคลื่นต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเลขคลื่นของวัสดุดิบ โดยพีคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์จะเลื่อนไปในช่วงเลขคลื่น $1080-1000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นเลขคลื่นการสั่นของพันธะ

T-O (T คือ Si หรือ Al) แสดงดังตารางที่ 4.4 และสามารถพบได้ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์^[44, 45] โดยตำแหน่งที่แน่นอนของของพีคขึ้นอยู่กับความยาวและมุมของพันธะ T-O^[24]



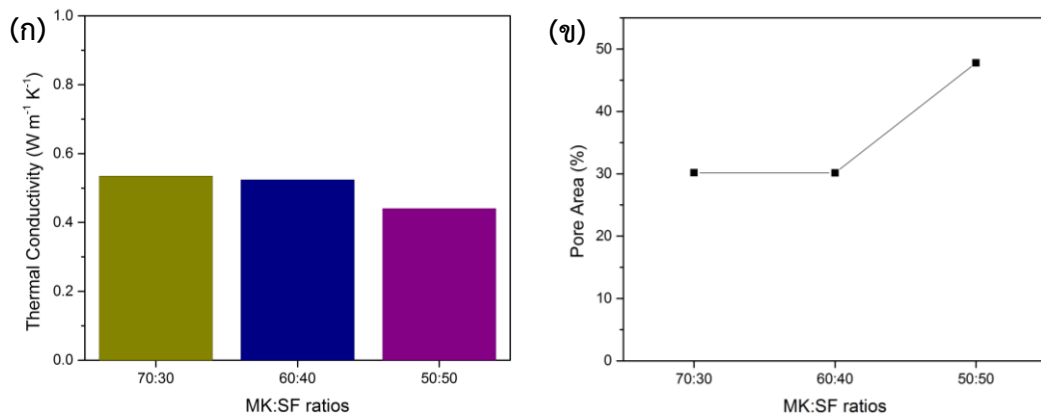
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของวัสดุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นการสั่นพันธะในโมเลกุล^[44-47]

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	ชนิด	พันธะ
696	Vibration of tetrahedral	T-O (T=Al, Si)
777	Vibration	Si-O-Si
800	Bending (AlO ₆ octahedral)	Al-O
1080	Asymmetric stretching	Si-O-Si
1120	Asymmetric stretching	Si-O-Si
807	Symmetric stretching	Si-O-Si
460	Bending	O-Si-O
1036	Asymmetric stretching	T-O (T=Si,Al)
1670	Stretching	H-O-H
3450	Adsorbed atmospheric water	H-O-H
2359	Bending	C=O
1077	Asymmetric stretching	Al-O-Si

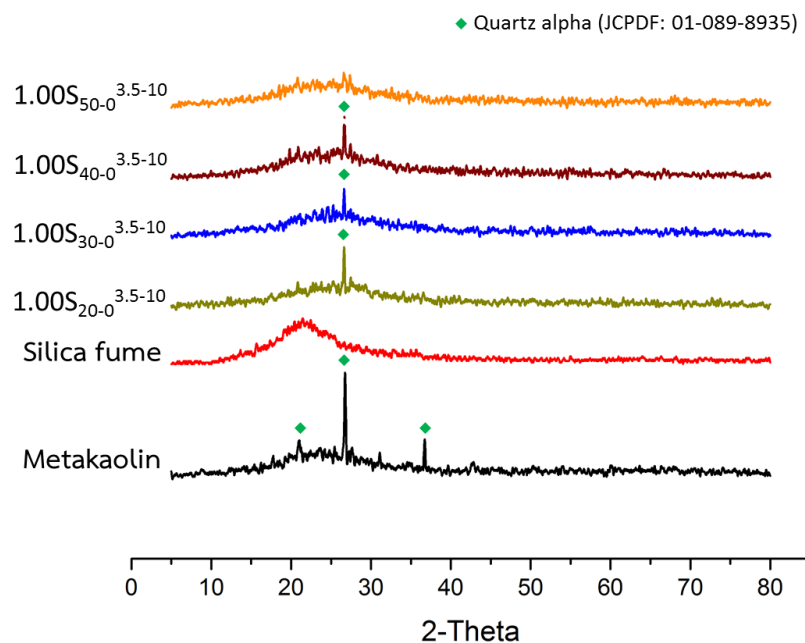
4.2.1.2 การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนดินขาวเผาและซิลิกาฟุ่มต่อสมบัติต่าง ๆ

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฟรูนโดยใช้สัดส่วนของดินขาวเผาต่อซิลิกาฟุ่ม 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ หลังจากบ่มเป็นเวลา 28 วัน นำชิ้นงานไปทดสอบการนำร้อนและหาพื้นที่รูฟรูนเฉลี่ย จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 (ก-ข) ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ฟรูน มีค่าการนำความร้อนลดลงตามปริมาณของซิลิกาฟุ่มที่เพิ่มขึ้น (0.53-0.44 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน) ซึ่งสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่รูฟรูนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รูฟรูนเฉลี่ยสามารถอธิบายได้จากปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะซิลิคอนอิสระในซิลิกาฟุ่มกับน้ำ โดยในงานวิจัยของ Prud'homme, E. และคณะ^[24] ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฟรูนโดยใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นสารก่อฟอง บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกาฟุ่ม (0 5 10 14 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



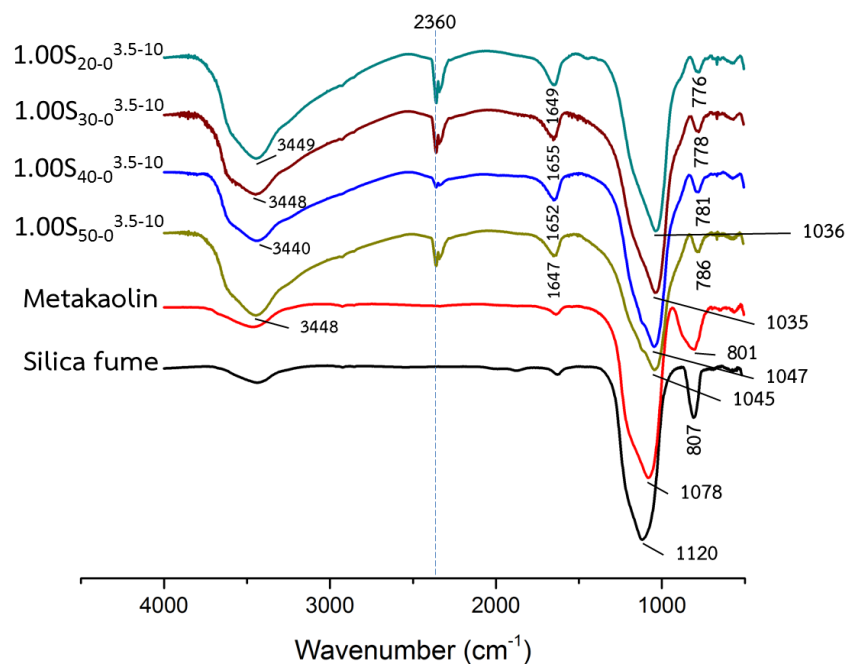
รูปที่ 4.7 (ก) ค่าการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) เปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพูนเฉลี่ย

เมื่อศึกษาสัดส่วนดินขาวเผดต่อซิลิกาฟุ่มที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน (ที่สัดส่วน 80:20 70:30 60:40 50:50) พบว่าสัดส่วนของดินขาวเผดต่อซิลิกาฟุ่มที่ 80:20 เกิดการเลื่อนของพีคตำแหน่ง 2θ ที่ 18-25 องศา ไปทางค่า 2θ มากขึ้น แต่ยังคงมีพีคของควอตซ์หลงเหลืออยู่ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไม่สมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟุ่มจากสัดส่วนดินขาวเผดต่อซิลิกาฟุ่มจาก 70:30 ไปเป็น 50:50 จะเริ่มปรากฏพีคที่ตำแหน่งเดียวกันกับซิลิกาฟุ่ม นอกจากนี้ความเข้มพีคของควอตซ์ลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่น แต่ไม่เห็นการเลื่อนอย่างชัดเจนของพีคกว้างที่มุม 2θ ประมาณในช่วง 18-25 องศา แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ในชิ้นงานที่มีสัดส่วนดินขาวเผดต่อซิลิกาฟุ่มไม่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากการวิเคราะห์หุ้ฟังก์ชันแสดงดังในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 กราฟ XRD ของจีโอพอลิเมอร์พูน

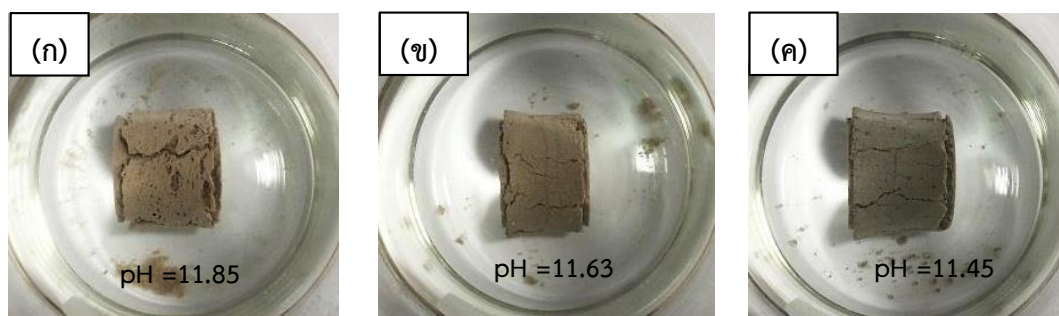
เมื่อนำชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR โดยเปรียบเทียบกับ วัตถุคียบ คือ ดินขาวเผาและซิลิกาฟุ้ง พบว่าเลขคลื่นการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ พรมมีค่า $1036-1045\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นเลขคลื่นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน T-O (T คือ Al หรือ Si) พบได้ใน วัสดุจีโอพอลิเมอร์ เปรียบเทียบกับวัตถุคียบที่มีเลขคลื่นการสั่นที่ $1120\ 807\ 460\ 1078$ และ 800 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ Si-O-Si O-Si-O Al-O-Si และ Al-O ที่พบในซิลิกาฟุ้ง และ ดินขาวเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 กราฟ FTIR ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พรมเปรียบเทียบกับวัตถุคียบ

4.2.1.3 การทดสอบการละลายน้ำของชิ้นงานที่ใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารก่อฟอง

เมื่อนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พรมในสัดส่วนต่างๆ ไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าพีเอชของน้ำก่อนแช่และหลังแช่ชิ้นงาน จากข้อมูลพบว่าค่าพีเอชของน้ำก่อนแช่มีค่า 7.62 หลังจากแช่ ชิ้นงานพบว่าค่าพีเอชเปลี่ยนจาก 7.62 เป็น 11.85 11.63 และ 11.45 แสดงดังรูปที่ 4.10 นอกจากนี้ ยังพบว่าชิ้นงานทุกสัดส่วนไม่เสถียรในน้ำ เนื่องมาจากซิลิกาฟุ้ง เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง ถ้าใส่ใน ปริมาณที่เหมาะสม ซิลิกาฟุ้งจะทำหน้าที่เป็น micro-filler สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างในชิ้นงาน แต่ ถ้ามีปริมาณของซิลิกาฟุ้งมากเกินไปจะทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวเปียก (wetting area) ให้กับชิ้นงาน ส่งผล ทำให้ชิ้นงานเกิดการดูดซับน้ำมากขึ้น^[48] และชิ้นงานเกิดการบวมตัวและแตกในที่สุด โดยจาก งานวิจัยของ Hisham M.^[48] สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ฐานดินขาว โดยใช้ปริมาณซิลิกาฟุ้ง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นและค่ากำลังอัดลดต่ำลง รูปที่ 4.10 เป็นภาพ ตัวอย่างของจีโอพอลิเมอร์พรมบางส่วนผสม โดยชิ้นงานทั้งหมดที่ใช้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารก่อฟองไม่มี ความเสถียรในน้ำ



รูปที่ 4.10 ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (ก) $1.00S_{20-0}^{3.5-10}$ (ข) $1.00S_{30-0}^{3.5-10}$ และ (ค) $1.00S_{50-0}^{3.5-10}$

4.2.2 การใช้ผงตะกักรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

สำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ผงตะกักรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง จะศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความพูนตัว ได้แก่ ปริมาณตะกักรันอะลูมิเนียม สัดส่วนของ $NaSiO_3:NaOH$ และ สัดส่วนของของแข็งต่อของเหลว

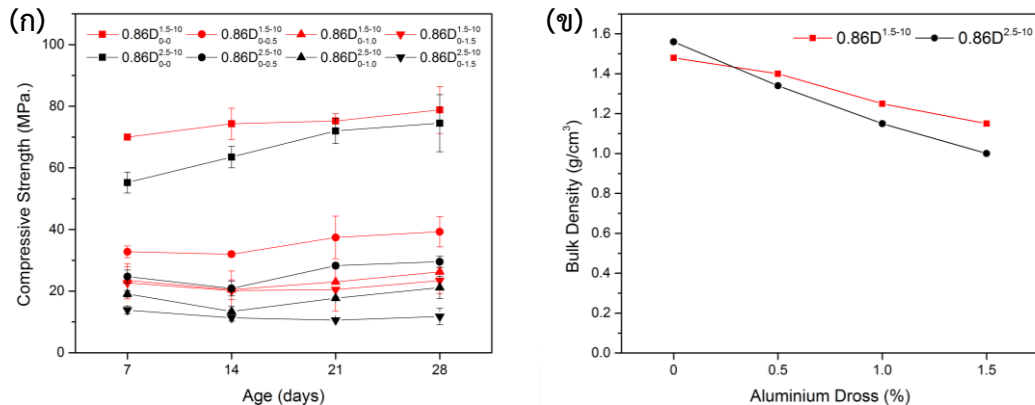
4.2.2.1 การศึกษาปริมาณตะกักรันอะลูมิเนียมและสัดส่วน $NaSiO_3:NaOH$ ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

4.2.2.1.1 ผลการทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกักรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง โดยเติมผงตะกักรันอะลูมิเนียมในปริมาณ 0 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ และใช้สัดส่วนของ $NaSiO_3:NaOH$ 1.5 และ 2.5 ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนจะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดที่ระยะบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 (ก) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และกำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่เติมผงตะกักรันอะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณตะกักรันอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าลดลงตามปริมาณของผงตะกักรันอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในผงตะกักรันอะลูมิเนียมประกอบไปด้วยโลหะอะลูมิเนียม เมื่อโลหะอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำในสารละลายแอลคาไลน์จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซไฮโดรเจนและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.5-2.7 ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนจะถูกกักไว้ในเนื้อชิ้นงานส่งผลให้ชิ้นงานมีความพูนตัว

จากรูปที่ 4.11 (ก) สัดส่วนของ $Na_2SiO_3:NaOH$ มีผลต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้สัดส่วนของ $Na_2SiO_3:NaOH$ 2.5 จะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าสัดส่วน 1.5 เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นน้อยกว่าส่งผลให้ชิ้นงานมีกำลังอัดต่ำกว่า นอกจากนี้ปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์พูนมีความหนืดสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของฟองอากาศยากขึ้น นอกจากนี้ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ของอนุภาคซิลิกอนสามารถช่วยในการเชื่อมต่อกันของฟองอากาศ โดยดึงโมเลกุลของน้ำมาเกาะและเชื่อมฟองอากาศเข้าด้วยกัน^[29] ชิ้นงานที่เติมตะกักรันอะลูมิเนียม 1.5 เปอร์เซ็นต์ ใช้

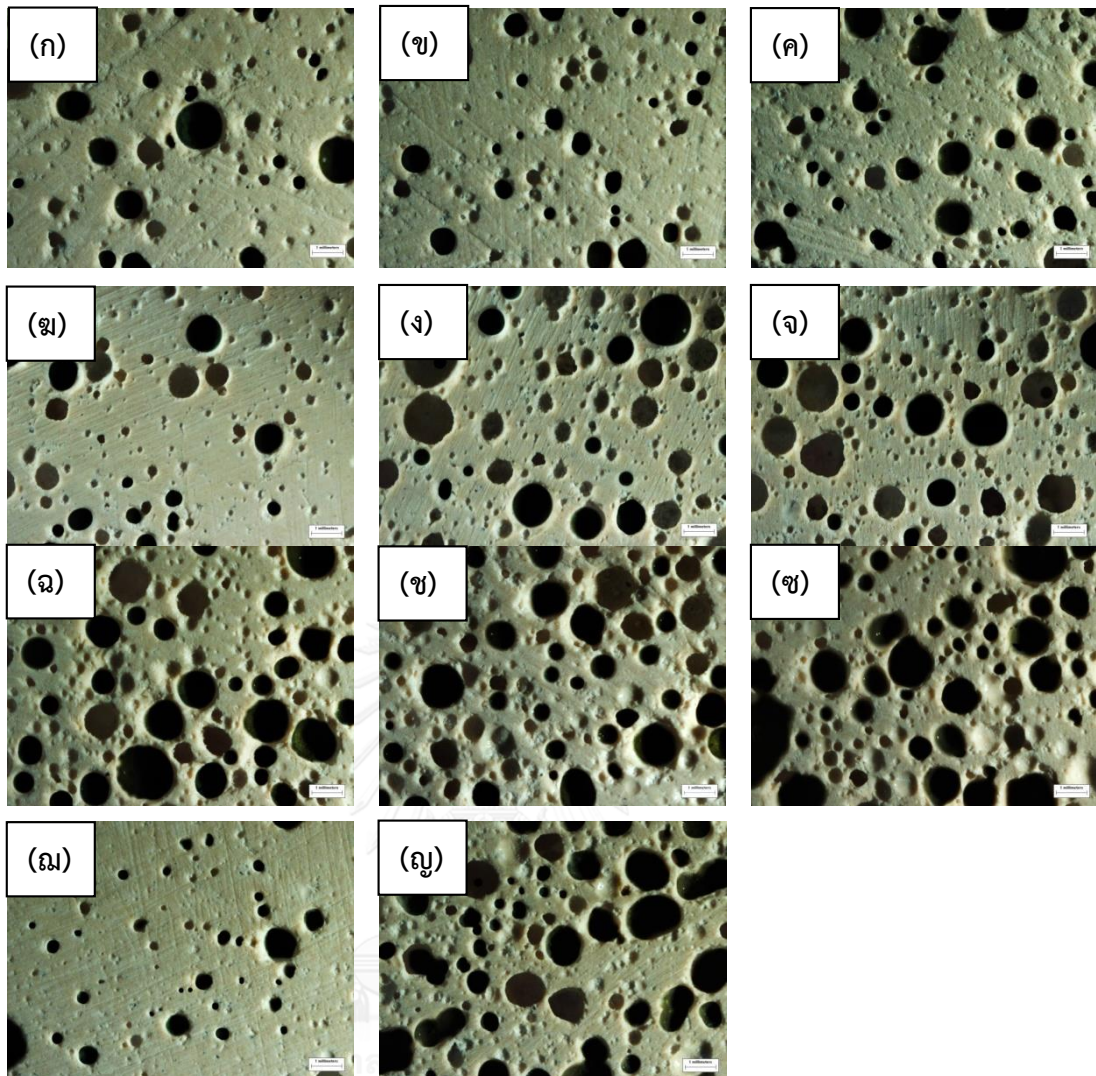
สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 2.5 ให้ความแน่นแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และกำลังอัดมีค่า 11.76 เมกะพาสคัล ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ มอก. 1505-2541 ประเภทที่ 4 สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุฉนวนความร้อน ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมและสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ นี้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.11 (ก) กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ผสมผงตะกั่วอะลูมิเนียมต่างกัน (ข) ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่เติมผงตะกั่วอะลูมิเนียมในปริมาณที่แตกต่างกัน ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

4.2.2.1.2 การหาพื้นที่รูพูนเฉลี่ยและการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน

เมื่อนำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนมาวิเคราะห์ลักษณะรูพูนจากพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการหล่อชิ้นงานเป็นทรงกระบอก ส่งผลให้ขนาดรูพูนมีขนาดไม่เท่ากันในแต่ละช่วงความสูง เนื่องจากฟองอากาศจะลอยตัวขึ้นจากส่วนล่างของชิ้นงานไปสู่ด้านบนของชิ้นงาน โดยฟองอากาศเกิดการรวมตัวส่งผลให้บริเวณส่วนบนของชิ้นงานมีขนาดรูพูนใหญ่กว่าส่วนอื่น ๆ จึงได้ตัดชิ้นงานแต่ละสูตรที่ความสูงเท่ากันก่อนที่จะนำไปทดสอบ จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ใช้สัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 1.5 และ 2.5 ใช้ปริมาณตะกั่วอะลูมิเนียมเท่ากันคือ 0 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก-จ) พบว่าลักษณะของรูพูนมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงตะกั่วอะลูมิเนียมที่เติม เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้น จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำกับโลหะอะลูมิเนียมที่อยู่ในตะกั่วอะลูมิเนียมแสดงดังสมการที่ 2.5 เมื่อพิจารณาปริมาณของตะกั่วอะลูมิเนียมที่ใช้เท่ากันแต่ใช้สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ต่างกันพบว่ารูพูนในชิ้นงานมีปริมาณเพิ่มขึ้น และมีขนาดใหญ่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เป็นเพราะเหตุผลที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.2.2.1.1

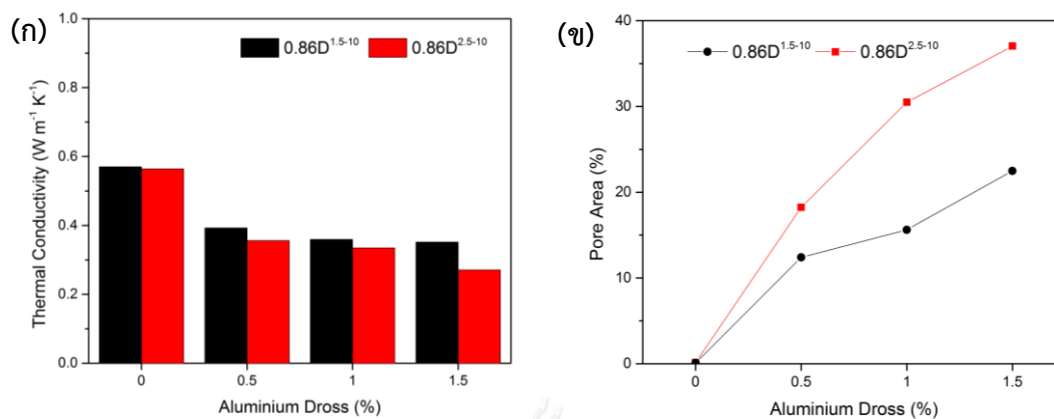


รูปที่ 4.12 ภาพจากกล้องสแตโรไมโครสโคปของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ผงตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองปริมาณแตกต่างกัน (ก) $0.86D_{0.5}^{1.5-10}$ (ข) $0.86D_{0.10}^{1.5-10}$ (ค) $0.86D_{0.15}^{1.5-10}$ (ง) $0.86D_{0.5}^{2.5-10}$ (จ) $0.86D_{0.10}^{2.5-10}$ (ฉ) $0.86D_{0.15}^{2.5-10}$ (ช) $0.86P_{0.3}^{2.5-10}$ (ซ) $0.86P_{0.5}^{2.5-10}$ (ฅ) $0.86P_{0.7}^{2.5-10}$ (ณ) $0.72D_{0.15}^{2.5-10}$ (ญ) $1.03D_{0.15}^{2.5-10}$

เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพูนด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ พบว่าพื้นที่รูพูนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงตะกรันอะลูมิเนียมที่เติมเข้าไป 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

โดยค่าการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนแสดงดังรูปที่ 4.13 (ก) พบว่าชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของชิ้นงานที่ใช้สัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ ที่แตกต่างกัน โดยสัดส่วนของ $Na_2SiO_3:NaOH$ 2.5 มีค่าการนำความร้อนในช่วง 0.56-0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ต่ำกว่าสัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ 1.5 ที่มีค่าการนำความร้อนในช่วง 0.57-0.35 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์รูพูนเฉลี่ยสัมพันธ์กับค่าการนำความร้อนของวัสดุ เนื่องจากรูพูนที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ใน

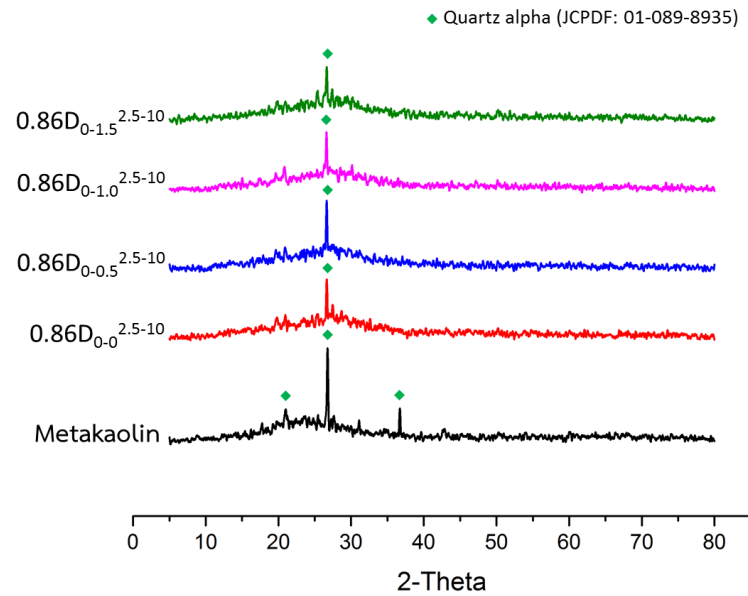
การกักอากาศ ดังนั้นถ้ารูพรุนมีขนาดใหญ่หรือมีปริมาณรูพรุนจำนวนมากจะสามารถกักอากาศได้มาก ทำให้ความร้อนไหลผ่านได้ไม่ดี



รูปที่ 4.13 (ก) ค่าการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พรุนที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง (ข) พื้นที่รูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พรุนที่ใช้ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

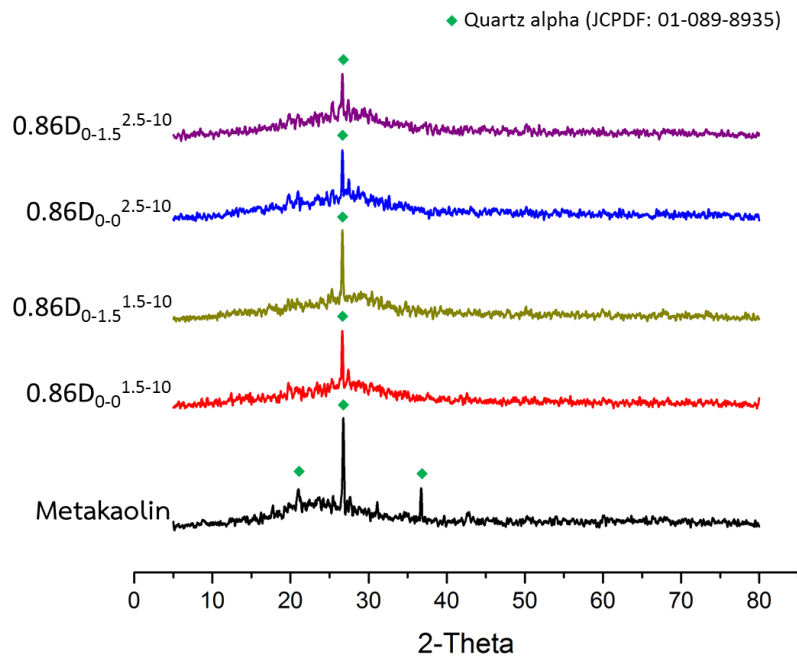
4.2.2.1.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบเฟสและหมู่ฟังก์ชันของชิ้นงาน

หลังจากทดสอบกำลังอัดของชิ้นงานที่ 28 วัน นำเศษชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีการเลื่อนตำแหน่ง 2θ ของพีคกว้าง ในบริเวณ 18-25 องศา ไปทางค่า 2θ ที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับดินขาวเผา ซึ่งการเลื่อนของพีคบอกถึงการชะละลายของอะลูมิเนียมแคทไอออนและซิลิคอนแคทไอออนในดินขาวเผา^[24] ที่เกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ระหว่างวัตถุดิบกับสารละลายแอลคาไลน์ แต่ยังคงปรากฏพีคของควอตซ์ในทุกสูตร ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจากข้อมูลพบว่าปริมาณตะกรันอะลูมิเนียมที่เติมเข้าไป ไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบเฟสของจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากไม่ปรากฏพีคที่แตกต่างกัน เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกรันอะลูมิเนียม สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pimpawee K. และคณะ^[35]



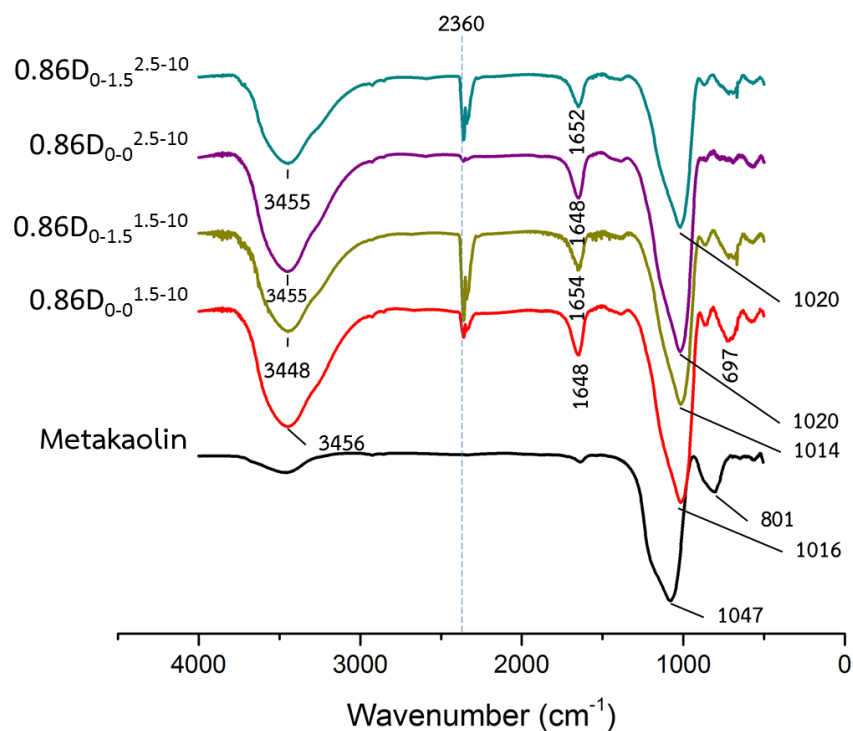
รูปที่ 4.14 กราฟ XRD ของวัตถุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองปริมาณ 0 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 2.5

จากรูปที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบเฟสของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ แตกต่างกัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันขององค์ประกอบเฟส แต่สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะทำให้ความเข้มพีคของควอตซ์ลดลง



รูปที่ 4.15 กราฟ XRD ของวัตถุดิบและชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ตะกั่วอะลูมิเนียมปริมาณ 0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 1.5 และ 2.5

เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าดินขาวเผามีการสั่นที่ความถี่ 800 1078 1670 และ 3450 cm^{-1} ซึ่งตรงกับความถี่การสั่นของหมู่ฟังก์ชัน Al-O Al-Si-O H-O-H ส่วนจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พรมมีการเลื่อนของพีคในตำแหน่ง 1078 cm^{-1} ไปทางความถี่ที่น้อยลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1013-1020 cm^{-1} ซึ่งตรงกับความถี่การสั่นของ T-O (T คือ Al หรือ Si) พบได้ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ตำแหน่งที่แน่นอนของหมู่ฟังก์ชันจะขึ้นอยู่กับความยาวและมุมพันธะของ T-O^[24] และการเลื่อนไปของพีคนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาการเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังปรากฏพีคกว้างที่ความถี่ 3456 cm^{-1} และ 1648 ตรงกับความถี่การสั่นของหมู่ฟังก์ชัน H-O-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของน้ำที่เกาะอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน พีคที่ความถี่ 2360 cm^{-1} ตรงกับความถี่การสั่นของหมู่ฟังก์ชัน O=C=O พีคที่ความถี่ 696 cm^{-1} ตรงกับความถี่การสั่นของหมู่ฟังก์ชัน T-O (T คือ Al หรือ Si) ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในทรงเหลี่ยมหกหน้า (Octahedral) พบในวัสดุจีโอพอลิเมอร์



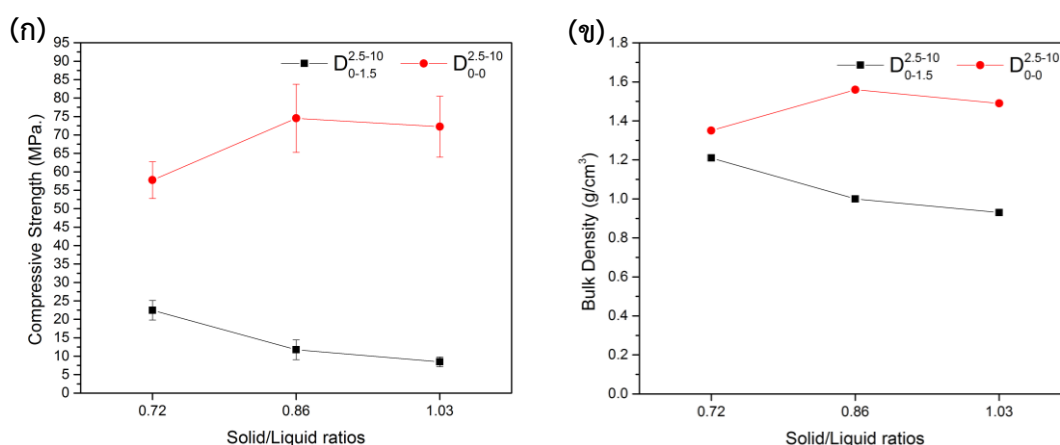
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พรม

4.2.2.2 ผลของสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษากำลั้งอัดของชิ้นงานที่กล่าวมาข้างต้นศึกษาผลของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ และปริมาณของตะกัรันอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่มีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ปริมาณตะกัรันอะลูมิเนียม 1.5 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ คงที่ที่ 2.5 ตามลำดับ โดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่ 0.72 0.86

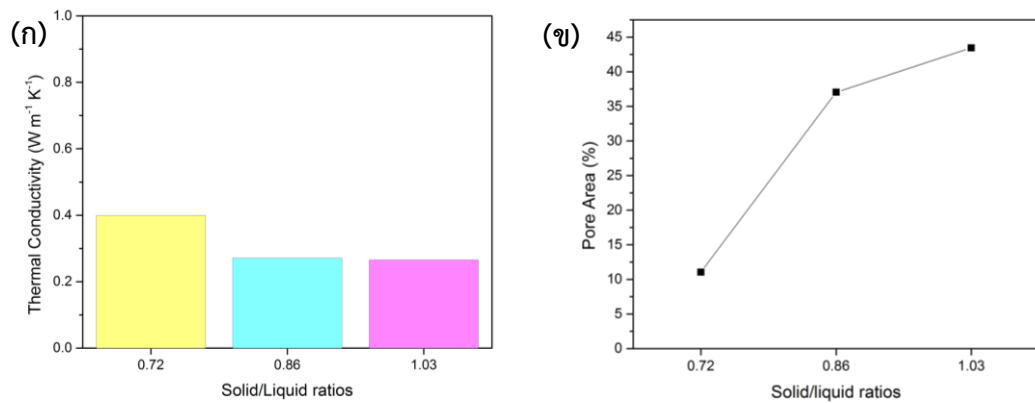
และ 1.03 พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนแสดงดังรูปที่ 4.12 (ฉ) และ (ญ) โดยลักษณะรูพูนของชิ้นงานมีความแตกต่างกัน คือชิ้นงานจะมีขนาดและปริมาณของรูพูนมากขึ้นตามสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลว เนื่องมาจากสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มากขึ้น ซึ่งเป็นการยับยั้งการเคลื่อนที่ของฟองอากาศส่งผลทำให้การรวมตัวของรูพูนเกิดได้น้อย อีกทั้งก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะอะลูมิเนียมค่อยๆ สะสมเกิดเป็นพูนขนาดเล็ก เมื่อฟองอากาศรวมตัวกันได้ยาก จะทำให้เกิดรูพูนที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีโอกาสสะสมในรูพูนมากขึ้นเรื่อยๆ

จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่เติมตะกั่วอะลูมิเนียม 1.5 เปอร์เซ็นต์ กับไม่เติม บ่มระยะเวลา 28 วัน เปรียบเทียบกำลังอัด แสดงดังรูปที่ 4.17 (ก) พบว่าชิ้นงานที่ไม่เติมตะกั่วอะลูมิเนียม มีค่ากำลังอัดมากที่สุดที่ 74.02 เมกะพาสคัล โดยสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 0.86 และค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มหรือลดสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลว ในขณะที่แนวโน้มของค่ากำลังอัดชิ้นงานที่เติมตะกั่วอะลูมิเนียมลดลงตามสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.17 (ข) ที่แสดงให้เห็นถึงความพูนตัวของชิ้นงานที่มากขึ้นจากสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามกำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่มีสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลว 1.03 มีค่า 8.48 เมกะพาสคัล ยังต่ำกว่ากำลังอัด มอก. 1505-2541 ประเภทที่ 4 ที่เป็นมาตรฐานของคอนกรีตมวลเบาที่มีฟองอากาศ-อบไอน้ำ



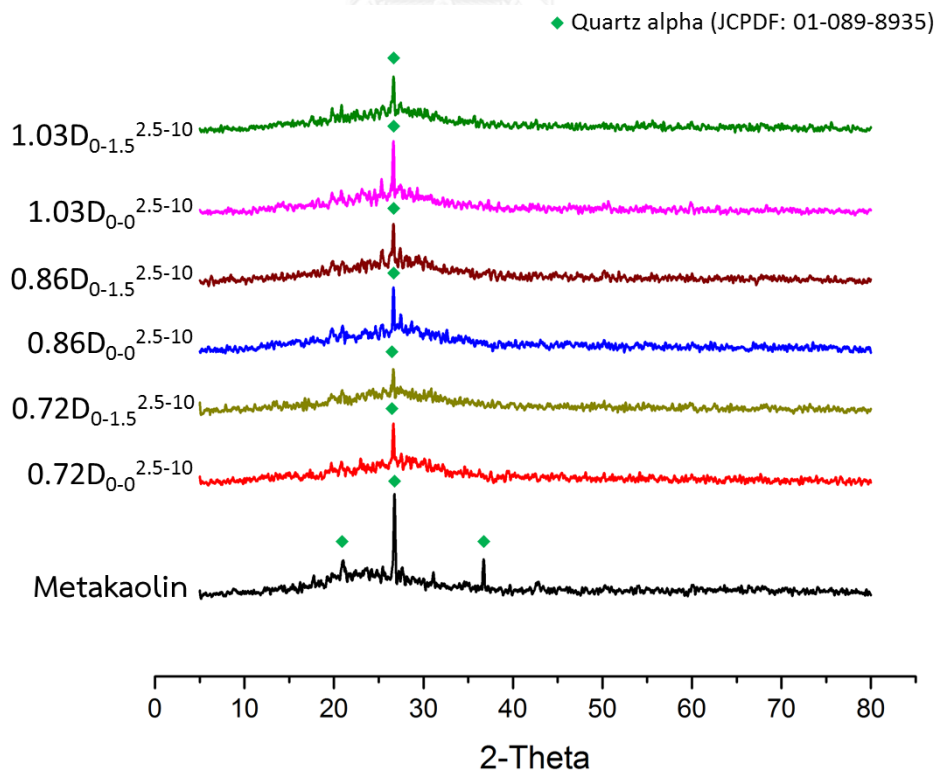
รูปที่ 4.17 (ก) กำลังอัดชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ (ข) ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์หลังจากบ่มชิ้นงานครบ 28 วัน

เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบการนำความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.18 (ก) พบว่าค่าการนำความร้อนของตัวอย่างมีค่า 0.40-0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตหรืออิฐมอญที่มีค่าการนำความร้อน 1.33 และ 1.15 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน^[43] จึงถือได้ว่าชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์มีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี โดยค่าการนำความร้อนที่ต่ำ สัมพันธ์กับพื้นที่รูพูนเฉลี่ย โดยการนำความร้อนจะลดลงตามเปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพูนที่เพิ่มขึ้น



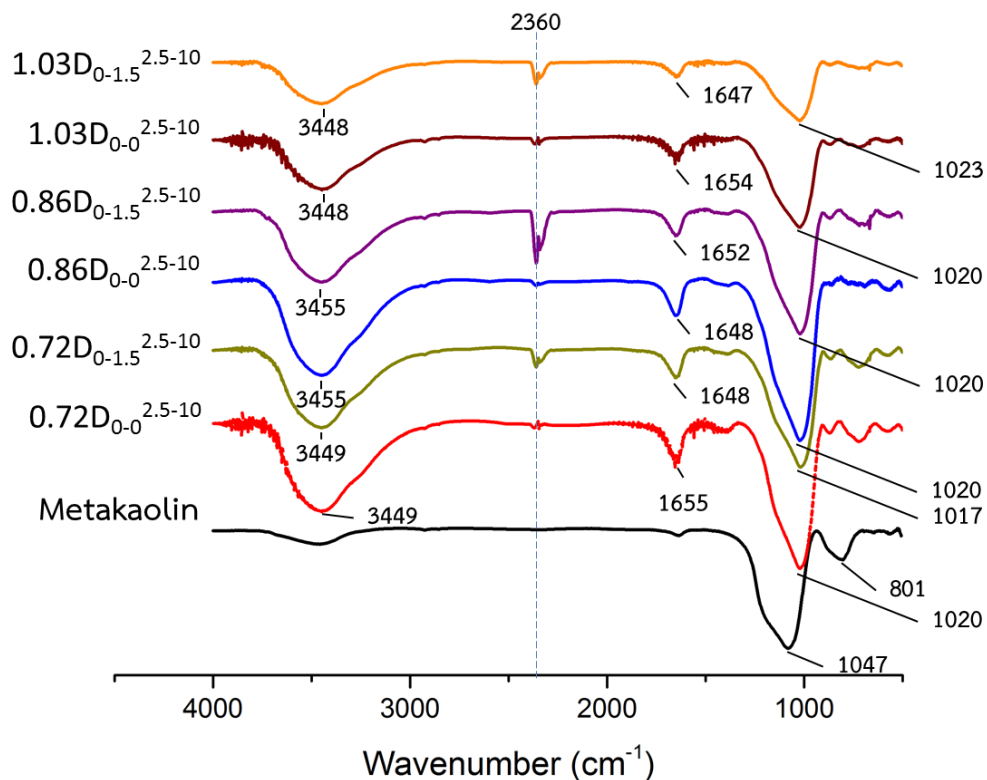
รูปที่ 4.18 (ก) ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) เปอร์เซ็นต์พื้นที่รูพูนเฉลี่ย

หลังจากการทดสอบกำลังอัดของชิ้นงานที่บ่ม 28 วัน นำเศษที่แตกของชิ้นงานมาทดสอบองค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.19 พบว่าทุกชิ้นงานมีการเลื่อนตำแหน่ง 2θ ของพีคกว้าง ในบริเวณ 18-27 องศา ไปทางขวามือ ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามเฟสของควอตซ์ยังคงปรากฏในทุกชิ้นงาน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.19 กราฟ XRD ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.20 เปรียบเทียบกับ ดินขาวเผา พบว่าจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูนมีการเลื่อนของพีคที่ตำแหน่ง 1078 cm^{-1} ไปที่ ตำแหน่ง $1024\text{-}1017\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ จากตารางที่ 4.4 พบว่า การสั่นในช่วงความถี่ดังกล่าวคือพีคที่ตำแหน่ง 1078 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ Al-O-Si พบได้ใน ดินขาวเผา พีคที่ตำแหน่ง $1024\text{-}1017\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคของหมู่ฟังก์ชัน T-O (T คือ Al หรือ Si) พบได้ใน วัสดุจีโอพอลิเมอร์ การเลื่อนของพีคที่แสดงหมู่ฟังก์ Al-O-Si และ Al-O ไปยังความถี่ที่น้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น [49, 50] ซึ่งสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการ เปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน



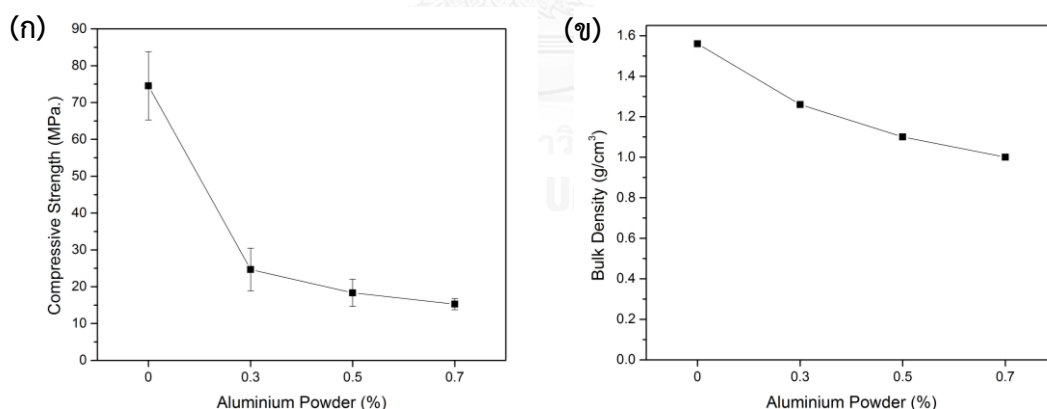
รูปที่ 4.20 กราฟหมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน

4.2.3 การใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

สำหรับการสังเคราะห์ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนโดยใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง โดยใช้ ปริมาณ 0.3 0.5 และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะหน้าตัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองแสดงดังรูปที่ 4.12 (ฉ) (ช) (ซ) จะเห็นได้ว่ารูพูนของชิ้นงานค่อนข้าง ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมาปฏิกิริยาคายความร้อนที่รุนแรงของน้ำกับของโลหะอะลูมิเนียมทำให้เกิดก๊าซ ไฮโดรเจนและความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยกลไกที่ควบคุมการเกิดก๊าซไฮโดรเจนไม่สามารถอธิบาย ได้เพียงจากสมการที่ 2.5 แต่ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจะถูกควบคุมด้วยชั้นอะลูมิเนียม-

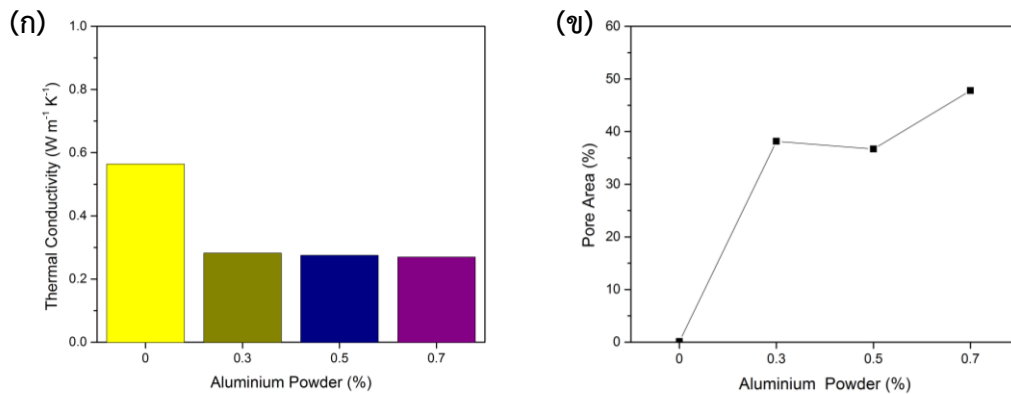
ไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วรอบๆ อนุภาคโลหะอะลูมิเนียม เมื่อโลหะอะลูมิเนียมสัมผัสกับน้ำ ชั้นบางๆ ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์นี้เอง มีส่วนป้องกันโลหะอะลูมิเนียมถูกออกซิไดซ์จากโมเลกุลของน้ำ ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะอะลูมิเนียมดีขึ้น แต่ในจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นต่างในการสังเคราะห์ และส่งผลต่อการชะละลายชั้นของไฮดรอกไซด์ที่ผิวของโลหะอะลูมิเนียม เนื่องจากความสามารถในการละลาย (solubility) ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วงพีเอช 11.5-12.5 ทำให้โลหะอะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาและเกิดก๊าซด้วยความร้อนได้ตั้งแต่เริ่มต้นผสม ดังสมการที่ 2.15 จนกระทั่งปฏิกิริยาดำเนินไปถึงจุดอิ่มตัวจะเกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{NaAl}(\text{OH})_4$) การกร่อนชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลดลง และปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและความร้อนลดลง ซึ่งการใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อกองมีผลต่อการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ โดยจากการศึกษาของ A.R. Studart และคณะ^[21] พบว่าการใช้ผงอะลูมิเนียมในการผลิตคอนกรีตทนไฟ ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟูริก และลิเทียมคาร์บอเนต จะส่งผลให้ปริมาณความร้อนและก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดสูงในช่วง 3 นาทีแรกของการผสม

เมื่อนำชิ้นงานที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันไปทดสอบกำลังอัด พบว่ากำลังอัดของชิ้นงานมีค่าลดลงตามปริมาณของผงอะลูมิเนียมที่เติมเข้าไป เนื่องจากชิ้นงานมีความหนาแน่นลดลง แสดงดังรูปที่ 4.21 (ก-ข) โดยชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 0.7 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดที่ต่ำที่สุด 15.27 เมกะพาสคัล มีความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำลังอัดของ มอก. 1505-2541 ประเภทที่ 4 ซึ่งเป็นมาตรฐานของคอนกรีตมวลเบาที่มีฟองอากาศ-อบไอน้ำ



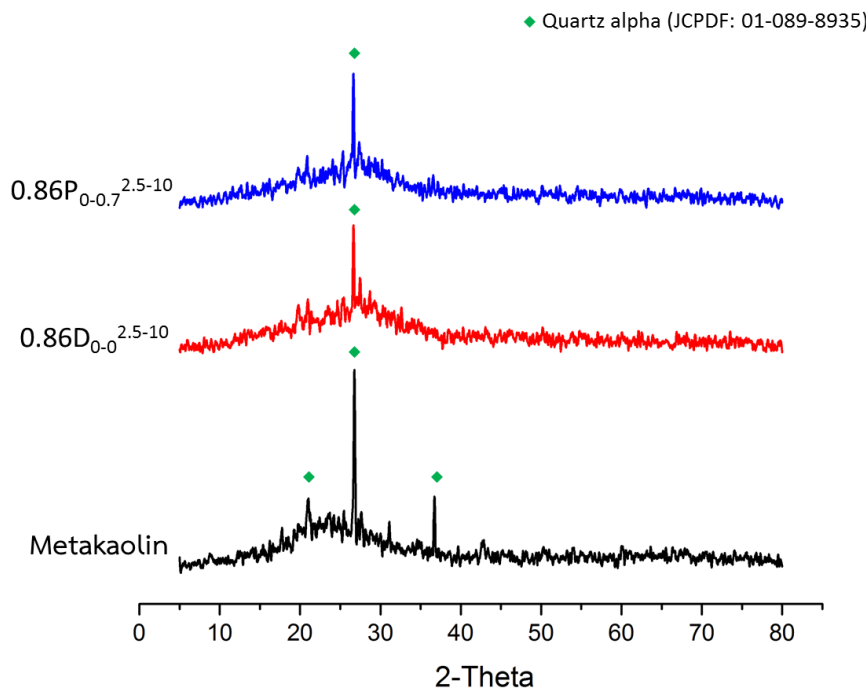
รูปที่ 4.21 (ก) กำลังอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน

สำหรับชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูนที่เติมผงอะลูมิเนียม 0, 0.3, 0.5, และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ และบ่มครบ 28 วัน จะถูกทดสอบการนำความร้อน แสดงเป็นดังรูปที่ 4.22 (ก) พบว่าการนำความร้อนมีค่าลดลงตามปริมาณการเติมผงอะลูมิเนียม และพื้นที่ผิวรูปพูนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงอะลูมิเนียมที่เติมเข้าไป



รูปที่ 4.22 (ก) การนำความร้อนของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน (ข) พื้นที่รูพูนเฉลี่ย

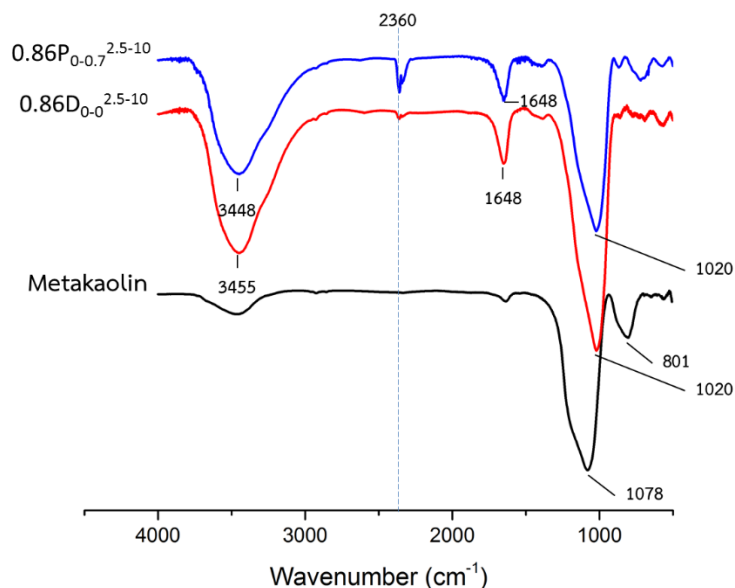
หลังจากทดสอบกำลังอัดชิ้นงานที่บ่มครบ 28 วัน นำเศษชิ้นงานมาตรวจสอบองค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.23 ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พูนที่ใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองมีการเลื่อนของพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 18-25 องศา ไปทางขวามือ ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ พีคของควอตซ์ยังคงปรากฏอยู่ที่ทั้งในจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน แสดงถึงปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบ XRD ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูนของชิ้นงานที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เปรียบเทียบกับดินขาวเผา พบว่าชิ้นงานที่ใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารเพิ่มฟองเกิดการเลื่อนที่

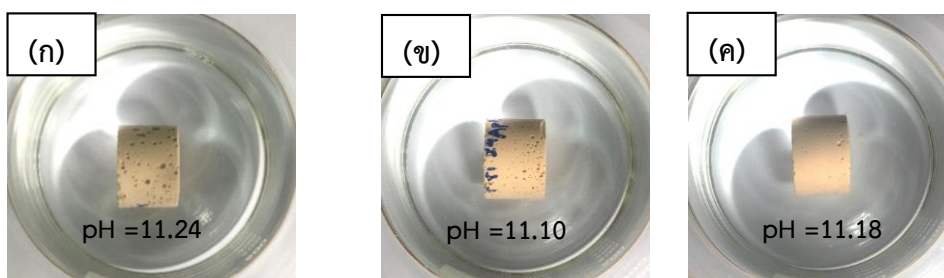
ตำแหน่ง 1078 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน Al-O-Si ไปทางความถี่ 1020 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน T-O (T คือ Al หรือ Si) พบในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพันธะในโมเลกุลของดินขาวเผา



รูปที่ 4.24 กราฟ FTIR ของจีโอพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัตถุดิบ

4.2.4 การทดสอบการละลายน้ำของชิ้นงานที่ใช้ตะกอนอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟอง

นำชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พรมในสัดส่วนต่าง ๆ ไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชิ้นงาน จากข้อมูลพบว่าค่าพีเอชของน้ำก่อนแช่มีค่า 7.62 หลังจากแช่ชิ้นงานพบว่าค่าพีเอชเปลี่ยนจาก 7.62 เป็น 11.24 11.10 และ 11.18 แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งเป็นเพียงตัวอย่างชิ้นงานบางส่วนผสม จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานทั้งหมดที่ใช้ตะกอนอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองมีความเสถียรในน้ำ



รูปที่ 4.25 ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์พรมหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (ก) $0.86D_{0.1.5}^{2.5-10}$ (ข) $0.86P_{0.0.7}^{2.5-10}$ (ค) $0.86D_{0.0.5}^{2.5-10}$

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนฐานดินขาวเผาโดยใช้สารก่อฟองอนินทรีย์ได้แก่ ซิลิกาฟูม ตะกรันอะลูมิเนียม ผงอะลูมิเนียม และทดสอบสมบัติต่างๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. จีโอพอลิเมอร์พูนที่สังเคราะห์โดยสารก่อฟองอนินทรีย์ทั้งสามชนิดมีค่าการนำความร้อนต่ำ (0.53-0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)
2. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดจีโอพอลิเมอร์เกิดได้ดีขึ้น
3. จีโอพอลิเมอร์พูนที่สังเคราะห์โดยใช้ซิลิกาฟูมเป็นสารก่อฟองไม่เสถียรในน้ำ
4. จีโอพอลิเมอร์พูนที่สังเคราะห์โดยใช้ตะกรันอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองมีความหนาแน่นลดลงตามปริมาณของสารก่อฟองที่เพิ่มขึ้น และปริมาณของตะกรันอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมมีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ แต่ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงเคมีของจีโอพอลิเมอร์พูน
5. สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ มีผลต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์พูน โดยสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ มีค่า 2.5 เมื่อใช้สารก่อฟองปริมาณเท่ากัน ทำให้จีโอพอลิเมอร์พูนมีกำลังอัด ความหนาแน่น และการนำความร้อนน้อยกว่า สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ มีค่า 1.5
6. สัดส่วนของแข็งต่อของเหลวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์พูนมีขนาดรูพรุนใหญ่
7. สูตรที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูน คือ การใช้ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 2.5 สัดส่วนของของแข็งต่อของเหลว 0.86 ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงเชิงกล 11.76 เมกะพาสคัล ความหนาแน่น 1.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าการนำความร้อน 0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน สำหรับชิ้นงานที่ใช้ผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองปริมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 2.5 สัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวมีค่า 0.86 จะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงเชิงกล 15.27 เมกะพาสคัล ความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าการนำความร้อน 0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม

1. การใช้ตะกรันอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองจะเกิดกลิ่นเหม็นของก๊าซแอมโมเนียจึงควรมีกรรมวิธีในการกำจัดก๊าซแอมโมเนียออก
2. การใช้ผงอะลูมิเนียมควรมีการใช้สารหน่วงปฏิกิริยาเพื่อลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะอะลูมิเนียมกับต่าง



รายการอ้างอิง

- [1] สารจีโอโพลิเมอร์[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.electron.rmutphysics.com/teachingglossary/index.php?option=com_content&task=view&id=8105&Itemid=3 [20 พฤษภาคม 2558]
- [2] Duxson, P., A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, and J.S.J. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of Materials Science 42(9) (2006): 2917-2933.
- [3] Scientific means of investigation[online]. Available from: <http://www.geopolymer.org/science/scientific-means-of-investigation> [2015, May 17]
- [4] Portland Cement Chemistry vs. Geopolymer Chemistry[online]. Geopolymer Institute, Available from: <http://www.geopolymer.org/science/portland-cement-chemistry-vs-geopolymer-chemistry> [2015, March 6]
- [5] Just, A. and B. Middendorf, Microstructure of high-strength foam concrete. Materials Characterization 60(7) (2009): 741-748.
- [6] ชลธิชา กันภัย. การศึกษาผลกระทบของตะกอนอะลูมิเนียมต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบา. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2555.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2541. คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. มอก. 1505-2541.
- [8] อภาพกร พรหมเพชร. การสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและกากของเสียจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2556.
- [9] Introduction: developments and applications in geopolymer[online]. Available from: <http://www.geopolymer.org/applications/introduction-developments-and-applications-in-geopolymer-2> [2015, May 28]
- [10] Suppliers of Silica Fume[online]. Available from: http://www.bulkmaterialsinternational.net/bmi_silica_fume.html [2015, May 25]
- [11] Silica fume[online]. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Silica_fume [2015, May 28]
- [12] Milagros P., M. Hojilla-Evangelista, B. Larson, and J. Dunn, Foaming Properties of Soybean Protein-Based Plywood Adhesives. Journal of the American Oil Chemists' Society 78(6) (2001): 567-572.
- [13] Synthetic foaming agents V/S Protien based foams[online]. Available from: <https://www.linkedin.com/grp/post/3128334-48561990> [2015, May 30]
- [14] M. M. A. Hafiz, A. R. M. Ridzuan, M. A. Fadzil, and J. Nurliza, Chemical Characterization of Used Cooking Oil Foaming Agent as Admixture in Foamed

- Concrete. Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference 2013 (2014): 191-200.
- [15] Remadnia, A., R.M. Dheilily, B. Laidoudi, and M. Quéneudec, Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates. Construction and Building Materials 23(10) (2009): 3118-3123.
- [16] Sell Polyoxyethylenesorbitan Monooleate, Tween80, 9005-67-8[online]. Available from: <http://1193602.en.makepolo.com/products/Sell-Polyoxyethylene-sorbitan-Monooleate-Tween80-9005-67-p86469151/img.html> [2015, June 1]
- [17] Qin, B., Y. Lu, F. Li, Y. Jia, C. Zhu, and Q. Shi, Preparation and Stability of Inorganic Solidified Foam for Preventing Coal Fires. Advances in Materials Science and Engineering (2014): 1-10.
- [18] Sodium dodecyl sulfate[online]. Available from: http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium_dodecyl_sulfate [2015, June 1]
- [19] Panesar, D.K., Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. Construction and Building Materials (2013): 575-584.
- [20] Lightweight Fiber Concrete (LWFC)[online]. Available from: <http://www.lwfc.info/#!lightweight-fiber-concrete-lwfc/c4t0> [2015, March 6]
- [21] Studart, A.R., M.D.M. Innocentini, I.R. Oliveira, and V.C. Pandolfelli, Reaction of aluminum powder with water in cement-containing refractory castables. Journal of the European Ceramic Society 25(13) (2005): 3135-3143.
- [22] อุตสาหกรรมหลอมหล่อเศษและตะกั่วอะลูมิเนียม[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry27.asp [20 มิถุนายน 2558]
- [23] Elimbi, A., H.K. Tchakoute, and D. Njopwouo, Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. Construction and Building Materials 25(6) (2011): 2805-2812.
- [24] Prud'homme, E., P. Michaud, E. Joussein, C. Peyratout, A. Smith, S. Arrii-Clacens, J.M. Clacens, and S. Rossignol, Silica fume as porogent agent in geo-materials at low temperature. Journal of the European Ceramic Society 30(7) (2010): 1641-1648.
- [25] Fletcher, R.A., K.J.D. MacKenzie, C.L. Nicholson, and S. Shimada, The composition range of aluminosilicate geopolymers. Journal of the European Ceramic Society 25(9) (2005): 1471-1477.
- [26] Pimraksa, K., P. Chindaprasirt, A. Rungchet, K. Sagoe-Crentsil, and T. Sato, Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various

- Na₂O/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ ratios. Materials Science and Engineering: A 528(21) (2011): 6616-6623.
- [27] Prud'homme, E., P. Michaud, E. Joussein, C. Peyratout, A. Smith, and S. Rossignol, In situ inorganic foams prepared from various clays at low temperature. Applied Clay Science 51(1-2) (2011): 15-22.
- [28] Chen Dai. Development of Aluminum Dross-based Material for Engineering Applications. Degree of Master of Science Material Science and Engineering, Worcester polytechnic institute. 2012.
- [29] Kim, H., S. Lee, Y. Han, and J. Park, Control of pore size in ceramic foams: Influence of surfactant concentration. Materials Chemistry and Physics 113(1) (2009): 441-444.
- [30] Nikolić, I., D. Đurović, R. Zejak, L. Karanović, M. Tadić, D. Blečić, and V.R. Radmilović, Compressive strength and hydrolytic stability of fly ash-based geopolymer. Journal of the Serbian Chemical Society 78(6) (2013): 851-863.
- [31] เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/28-x-ray> [5 กุมภาพันธ์ 2558]
- [32] หัสวิภา หายมั้น. Scanning Electron Microscope : SEM [ออนไลน์]. มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2555. แหล่งที่มา: <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html> [5 กุมภาพันธ์ 2558]
- [33] อารี ธนบุญสมบัติ, ภัทรารวรรณ คหะวงศ์, และศุภมาส ด้านวิทยากุล. เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค [ออนไลน์]. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2545. แหล่งที่มา: <http://training.pwa.co.th/picfiledownload/56077.pdf> [5 กุมภาพันธ์ 2558]
- [34] การใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิค FTIR Spectrometer และ Microscope [ออนไลน์]. สภาวิศวกร, แหล่งที่มา: http://www.coe.or.th/e_engineers/news_detail.php?id=23 [5 กุมภาพันธ์ 2558]
- [35] Keawpapasson, P., C. Tippayasam, S. Ruangjan, P. Thavorniti, T. Panyathanmaporn, A. Fontaine, C. Leonelli, and D. Chayasuwat, Metakaolin-Based Porous Geopolymer with Aluminium Powder. Key Engineering Materials 608 (2014): 132-138.
- [36] Duxson, P., J.L. Provis, G.C. Lukey, S.W. Mallicoat, W.M. Kriven, and J.S.J. van Deventer, Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 269(1-3) (2005): 47-58.

- [37] American Society for Testing and Materials, ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 2004, Vol. 04.02, Philadelphia.
- [38] Hot disk TCA. Instruction Manual Hot Disk Thermal Constants Analyser Software version 5.9. Sweden. (Unpublished Manuscript)
- [39] ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์[ออนไลน์]. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, แหล่งที่มา: <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-25-50> [17 กุมภาพันธ์ 2558]
- [40] Stemi 1000-2000-2000C Stereomicroscope operating manual[online]. Fisher Bioblock Scientific, Available from: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xcLVlwo7Pj8J:https://physics.ucsd.edu/neurophysics/Manuals/Zeiss/Stemi%25201000-2000-2000C%2520Stereomicroscope%2520operating%2520manual.pdf+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=th> [2015, April 20]
- [41] Lounis, M. and K. Bekkour, Rheological characterization of SDS/PEO based foams. Journal of Materials Science Letters 21(22) (2002): 1573-1575
- [42] Sepulveda, P., Evaluation of the In Situ Polymerisation Kinetics for the Gelcasting of Ceramic Foams. Chemistry of Materials. Chemistry of Materials 13(11) (2001): 3882-3887.
- [43] อิฐมวลเบาคิวดคอน O-con[ออนไลน์]. RT Home builder, แหล่งที่มา: <http://www.reanthai.com> [20 พฤษภาคม 2558]
- [44] Deventer, W.K.W.L.a.J.S.J.v., Use of Infrared Spectroscopy to Study Geopolymerization of Heterogeneous Amorphous Aluminosilicates. Langmuir 19(21) (2003): 8726-8734.
- [45] Palomo, A.y.G., F.P., Chemically-Bonded cementitious material based on metakaolin. British Ceramic Transactions and Journal 91(1992): 107-112.
- [46] Madani, A., ²⁹Si and ²⁷Al NMR study of zeolite formation from alkali-leached kaolinites. Influence of thermal preactivation. The Journal of Physical Chemistry 94 (1990): 760-765.
- [47] Hidalgo, A., C. Domingo, C. Garcia, S. Petit, C. Andrade, and C. Alonso, Microstructural changes induced in Portland cement-based materials due to natural and supercritical carbonation. Journal of Materials Science 43(9) (2008): 3101-3111.
- [48] M., H., Effect of silica fume on the characterization of the. International Journal of Advance Structural Engineering 5(12) (2013): 2-10.

- [49] Heah, C.Y., H. Kamarudin, A.M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul Nizar, C.M. Ruzaidi, and Y.M. Liew, Kaolin-based geopolymers with various NaOH concentrations. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials 20(3) (2013): 313-322.
- [50] Wang, H., H. Li, and F. Yan, Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 268(1-3) (2005): 1-6.



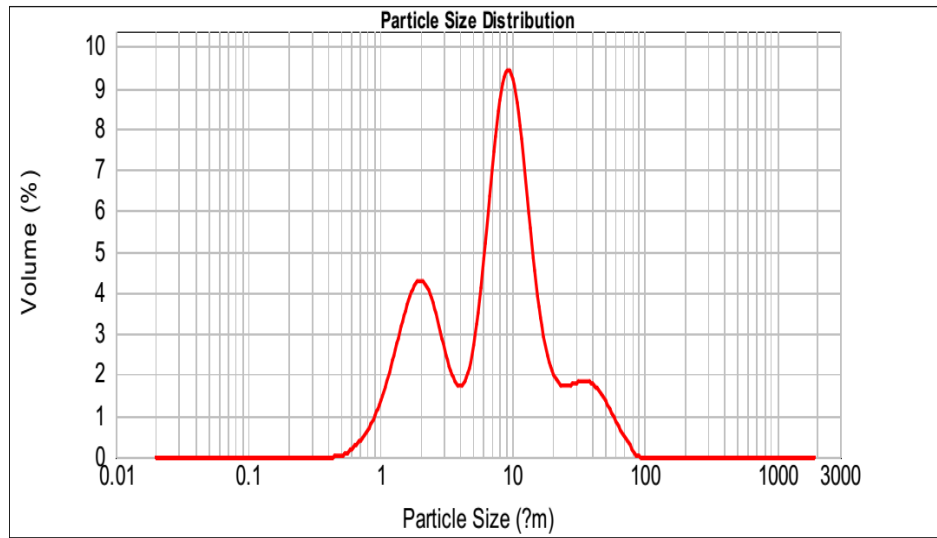
ภาคผนวก

การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงวัตุดิบ

d(0.1): 1.605 um

d(0.5): 8.037 um

d(0.9): 25.495 um

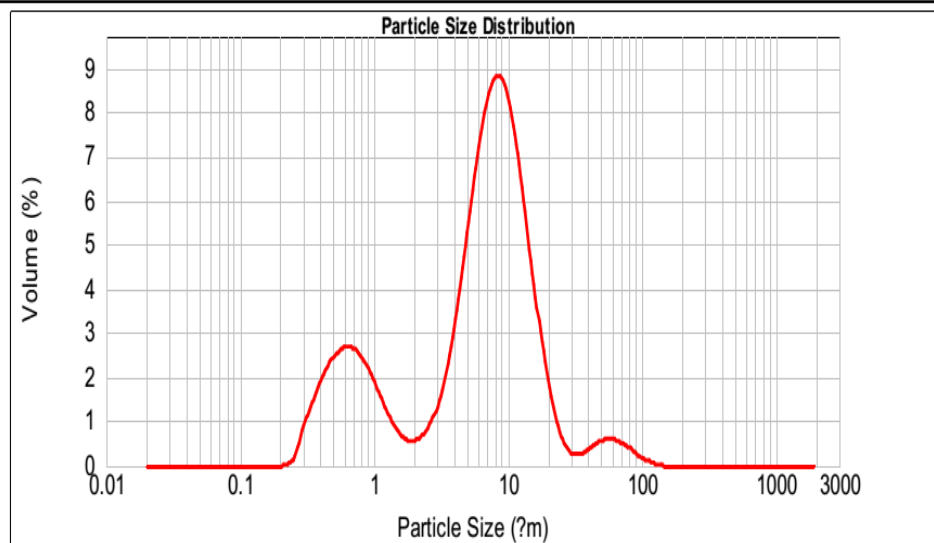


รูปที่ 1 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงดินขาวเผา

d(0.1): 0.616 um

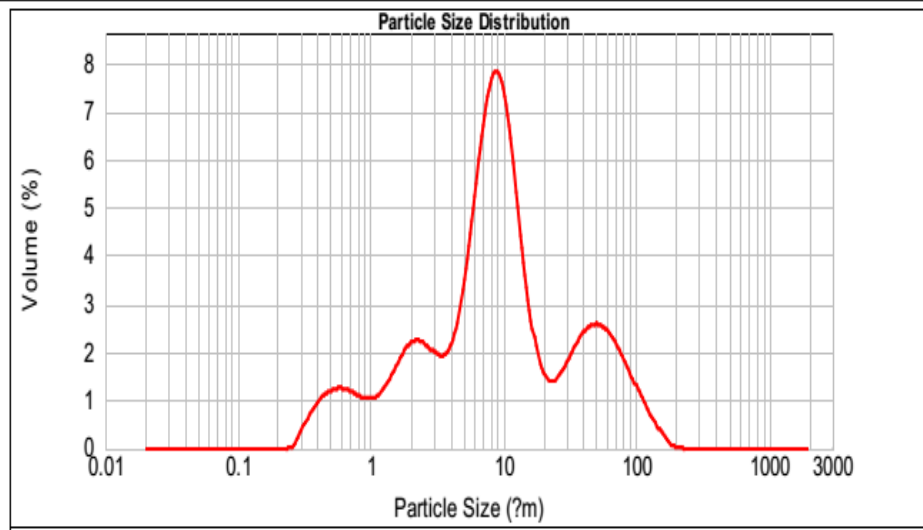
d(0.5): 6.958 um

d(0.9): 15.898 um



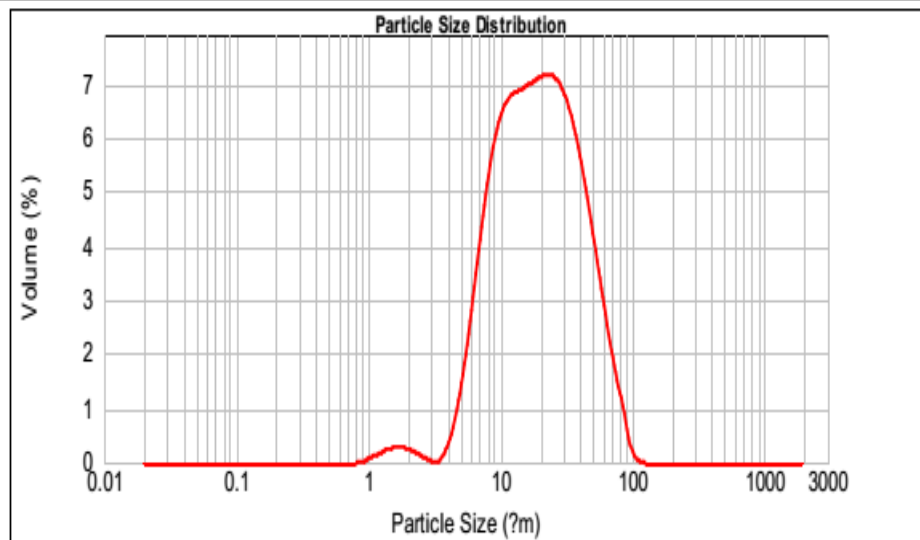
รูปที่ 2 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูล

d(0.1): 1.258 um d(0.5): 8.644 um d(0.9): 56.032 um



รูปที่ 3 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงตะกรันอะลูมิเนียม

d(0.1): 7.343 um d(0.5): 19.014 um d(0.9): 49.298 um



รูปที่ 4 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงอะลูมิเนียม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอาณัติ สายกระสุน เกิดเมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม 2533 ที่จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหา บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาในปี 2558

ในระหว่างการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษานั้น ได้มีโอกาสไปนำเสนอผลงานทางวิชาการ รูปแบบโปสเตอร์ ในการประชุมทางวิชาการ International conference on traditional and advanced ceramics ระหว่างวันที่ 11-13 กันยายน 2556 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบ เทค กรุงเทพมหานคร จัดโดย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นำเสนอในหัวข้อ Effect of silica fume contents and curing temperatures on fabricated porous geopolymer in terms of its properties; density and compressive strength

นำเสนอผลงานทางวิชาการรูปแบบโปสเตอร์ ในการประชุมทางวิชาการ The 8th international conference on materials and technology ระหว่างวันที่ 15-16 ธันวาคม 2557 ณ โรงแรมสวิสโฮเต็ล เลอ คองคอร์ด กรุงเทพมหานคร จัดโดย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ วัสดุแห่งชาติ นำเสนอในหัวข้อ Influence of alkaline concentration on physical properties of porous geopolymer using silica fume as foaming agent ตีพิมพ์ในรูปแบบ Journal ของ Key Engineering Materials

นำเสนอผลงานทางวิชาการรูปแบบโปสเตอร์ ในการประชุมทางวิชาการ The third joint symposium CU-NUT วันที่ 5 มกราคม 2558 ณ ตึกมหามกุฏ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นำเสนอในหัวข้อ Effect of alkaline concentration on thermal properties of porous geopolymer using silica fume as foaming agent