



การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาว  
เถ้าปาล์ม และของเสียกากซีไประเหย

The Characteristic Study of Geopolymer Material from Kaolin,  
Palm Ash and Concentrated Latex Waste Sludge

พัชราภรณ์ ธรรมบำรุง

Patcharaporn Thumbumrung

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering  
Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาว เถ้าปาล์ม และของเสียกากซีเมนต์
ผู้เขียน	นางสาวพัชราภรณ์ ธรรมบำรุง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

---

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**
**คณะกรรมการสอบ**

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)

.....ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วรวพจน์ ประชาเสรี)

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุอุปการ)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล ประยงค์พันธ์)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุอุปการ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุอุปการ)  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ .....

(นางสาวพัชราภรณ์ ธรรมบำรุง)  
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวพัชราภรณ์ ธรรมบำรุง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาว เถ้าปาล์ม และของเสียกากซีเมนต์
ผู้เขียน	นางสาวพัชราภรณ์ ธรรมบำรุง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเถ้าปาล์มและของเสียกากซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม การศึกษาประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินขาว เถ้าปาล์ม และกากซีเมนต์ อุณหภูมิในการเผาดินขาว ผลของกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ และคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่ดินขาวเผาด้วยเถ้าปาล์มและกากซีเมนต์ อัตราส่วนคงที่ร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา เถ้าปาล์ม กากซีเมนต์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ และอัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ในแบบหล่อขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตรและทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28 และ 90 วัน จากการศึกษพบว่าอุณหภูมิในการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 90 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังอัดมากกว่า  $1,000 \text{ kg/cm}^2$  นอกจากนี้ยังพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียกากซีเมนต์ ร้อยละ 20 มีน้ำหนักเบา และทนความร้อนได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมอื่น โดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วง  $100\text{-}400 \text{ kg/cm}^2$  สามารถนำไปพัฒนาเป็นอิฐมวลเบาและอิฐทนไฟได้

<b>Thesis Title</b>	The Characteristic Study of Geopolymer Material from Kaolin, Palm Ash and Concentrated Latex Waste Sludge
<b>Author</b>	Ms. Patcharaporn Thumbumrung
<b>Major Program</b>	Environmental Engineering
<b>Academic Year</b>	2014

### ABSTRACT

This research emphasizes on the properties of geopolymer mixed with palm ash and concentrated latex waste sludge, which are the waste from industries. The study comprises of physical and chemical properties of kaolin, palm ash and concentrated latex waste sludge, the effects of temperature and duration of burning of kaolin, the compressive strength of geopolymer and the characteristics of geopolymer which metakaolin is replaced in terms of palm ash and concentrated latex waste sludge by 0, 10 and 20 percent by weight. The raw materials of geopolymer consist of metakaolin, palm ash, concentrated latex waste sludge with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide (NaOH) solution. Using NaOH solution was conducted by varying concentration at 5, 10 and 15 molar whereas the ratio of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and NaOH was 0.5, 1.5 and 2.5 by weight. The geopolymer paste was prepared in  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  cubic molds then it was cured at  $70^\circ\text{C}$  for 24 hours. Then the effect of ambient curing period at 7, 14, 28 and 90 days, on the compressive strength of the geopolymer paste was also studied. The results revealed that the optimum calcined temperature of kaolin was  $750^\circ\text{C}$  for 3 hours. The compressive strength of geopolymer increased with the increasing of NaOH concentration and the ratio of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and NaOH. The curing period at 90 days, that the geopolymer had a compressive strength greater than  $1,000 \text{ kg/cm}^2$ . In addition the geopolymer prepared by mixing raw materials with concentrated latex waste sludge with 20 percent had lower weight and high heat resistance when compared with others accord. The strength is in the range of  $100\text{-}400 \text{ kg/cm}^2$  to be developed as a autoclaved aerated concrete block and a refractory brick.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุปการ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็น ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และเสนอแนวทางในการศึกษาค้นคว้าด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดมา ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง และความทุ่มเทของอาจารย์ทั้งสองท่านจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวจน์ ประชาเสรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล ประยงค์พันธ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำเพิ่มเติม จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนอุดหนุนเงิน งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2555 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รหัสโครงการเลขที่ ENG5500535 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยาล้างจาน จำกัด และ บริษัท ทำฉางสวนปาล์ม น้ำมันอุตสาหกรรม จำกัด เป็นอย่างสูง สำหรับความกรุณาในการอนุเคราะห์วัสดุในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยวิจัยเทคโนโลยี สีเขียว คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกต่างๆ ตลอดการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ญาติพี่น้อง เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่านที่คอย เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยเสมอมา

คุณประโยชน์ใดๆ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนสถาบันการศึกษาที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา และขอมอบแด่ทุกท่านที่มีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

พัชราภรณ์ ธรรมบำรุง

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 จีโอพอลิเมอร์	6
2.2 น้ำยางชั้น	15
2.3 กากซีเมนต์	18
2.4 การกำจัดกากซีเมนต์	24
2.5 ถังปาล์ม	25
2.6 ดินขาว	27
2.7 เครื่องมือและวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุประสานและจีโอพอลิเมอร์	32
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์	39
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	45
3.1 ขอบเขตของการวิจัย	45
3.2 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย	45
3.3 ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	51
3.4 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์	52



## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	59
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ	59
4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์	64
4.3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสี้ยกากชี้แป็ง	80
4.4 การทดสอบการทนความร้อนของจีโอพอลิเมอร์ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C	95
4.5 ผลการทดสอบการชะละลายของธาตุอาหารและโลหะหนัก	99
4.6 แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
5.1 สรุปผลการวิจัย	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม	104
ภาคผนวก	110
ภาคผนวก ก	110
ภาคผนวก ข	127
ประวัติผู้เขียน	136

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว	14
2-2 ปริมาณธาตุอาหารของกากซีแบ็งอบแห้ง	22
2-3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไยปาล์มและเถ้าปาล์ม	26
2-4 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวมาตรฐานอังกฤษกับแหล่งดินขาวในประเทศไทย	31
3-1 ปริมาณสัดส่วนผสมโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์	55
3-2 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์	53
4-1 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคและความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	59
4-2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินขาว เถ้าปาล์ม และกากซีแบ็ง	62
4-3 คุณสมบัติของดินขาวและเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับมาตรฐานสารปอซโซลาน	63
4-4 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์	64
4-5 องค์ประกอบทางเคมีของสารละลายโซเดียมซิลิเกต	64
4-6 ผลการทดสอบการชะละลายธาตุอาหารและโลหะหนักของจีโอพอลิเมอร์	99
ก-1 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5$ )	111
ก-2 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$ )	114
ก-3 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ )	117
ก-4 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5 ; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5, 10, 15 โมลาร์)	120
ก-5 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 1.5 ; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5, 10, 15 โมลาร์)	121
ก-6 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 2.5 ; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5, 10, 15 โมลาร์)	122
ก-7 แสดงรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์	123

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1-1 ก. กากซีเมนต์จากเครื่องบดแห้ง ข. กากซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อน ค. กากซีเมนต์ผ่านการอบแห้งและบดละเอียด	2
1-2 ของเสียเก่าปาล์มจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม	3
2-1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate	8
2-2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Aluminate	8
2-3 โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือโพลีไซอะเลต	9
2-4 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดโพลีไซอะเลต	10
2-5 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซี	11
2-6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซี	12
2-7 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง	13
2-8 แผนภูมิการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์	15
2-9 ส่วนประกอบต่างๆของน้ำยางสดหลังการปั่นแยก	17
2-10 การผลิตน้ำยางข้นและการเกิดของเสียของโรงงานน้ำยางข้น	18
2-11 กากซีเมนต์จากเครื่องบดแห้ง	19
2-12 กากซีเมนต์ในถังตกตะกอน	19
2-13 ลักษณะเบื้องต้นของกากซีเมนต์	20
2-14 ปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ของกากซีเมนต์อบแห้ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	23
2-15 Beckman Coulter LS 230	32
2.16 หลักการทำงานของ X-Ray Fluorescence	33
2.17 Philips PW2400	33
2-18 Philips X'Pert MPD	34
2-19 หลักการวัด SAXS/WAXS	35
2-20 แสดงหลักการทำงานของ SEM	36
2-21 FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)	37
2-22 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)	38
3-1 เครื่องบด Abrasion Machine	47
3-2 วัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100	47
3-3 สารละลาย NaOH	48
3-4 สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3$	48
3-5 ผสมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์	48

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3-6 การกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน	48
3-7 การเทตัวอย่างใส่แบบหล่อ	49
3-8 การหุ้มแบบหล่อด้วยพลาสติกใส	49
3-9 การบ่มจีโอพอลิเมอร์ในตู้อบ	49
3-10 การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน	49
3-11 แผนผังการทำวิจัย	58
4-1 การกระจายขนาดอนุภาคของดินขาว (MK) เถ้าปาล์ม (PA) และกากซีเมนต์ (LW)	60
4-2 โครงสร้างขนาดเล็กของวัสดุประสาน ก) ดินขาว ข) เถ้าปาล์ม ค) กากซีเมนต์	60
4-3 X-ray diffraction pattern ดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากซีเมนต์	61
4-4 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ของดินขาวที่ไม่ผ่านการเผาเปรียบเทียบกับดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C และ 750°C	65
4-5 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตรผสม ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยสังเคราะห์จากการใช้ดินขาวไม่เผาเปรียบเทียบกับการใช้ดินขาวเผาที่ 600°C	66
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน	67
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน	68
4-8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทดสอบที่ 7, 14 และ 28 วัน	69
4-9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แปรผันตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ทดสอบที่ 7, 14 และ 28 วัน	71
4-10 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7, 14, 28 และ 90 วัน	73
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	74
4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	74
4-13 ลักษณะพื้นผิวและสีของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5, 1.5$ และ $2.5$	77
4-14 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7, 28 และ 90 วัน	81
4-15 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่ม 7, 28 และ 90 วัน	84

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-16 ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์	86
4-17 ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5, 1.5$ และ 2.5	88
4-18 ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว	90
4-19 เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C	93
4-20 จีโอพอลิเมอร์สูตร 100MK0PA0LW-15M(2.5) ก่อนและหลังทำการเผา	95
4-21 จีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ก่อนและหลังทำการเผา	96
4-22 จีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ก่อนและหลังทำการเผา	97
4-23 คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งาน	101
ข-1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวที่ไม่ผ่านการเผา	127
ข-2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	128
ข-3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 750 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	128
ข-4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของเถ้าปาล์ม	129
ข-5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของกากซีเมนต์	129
ข-6 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 100MK0PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	130
ข-7 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	130
ข-8 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	131
ข-9 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK0PA20LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	131
ข-10 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 100MK0PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	132
ข-11 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	132
ข-12 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	133

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
ข-13 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK0PA20LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	133
ข-14 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 100MK0PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน	134
ข-15 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน	134
ข-16 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน	135
ข-17 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK0PA20LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน 131	135

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันมีการนำปูนซีเมนต์มาใช้กันอย่างแพร่หลายงานคอนกรีต ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีอุณหภูมิสูงถึง 1400-1600 องศาเซลเซียส ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งส่งผลทำให้โลกร้อน จากปัญหาดังกล่าวจึงนำไปสู่การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการหาวัสดุเพื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้คือวัสดุพอลิโพรพิลีน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยมีกลุ่มอุตสาหกรรมหลัก 2 กลุ่ม ได้แก่ อุตสาหกรรมน้ำยางข้น และอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน สำหรับกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมน้ำยางข้น จะเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่เกิดขึ้นทั้งในรูปของน้ำเสียและของเสีย โดยของเสียชนิดหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้นคือ ตม หรือที่เรียกว่า กากซีแพ่ง ดังรูปที่ 1-1 (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี และคณะ, 2547 และ วราศรี เอกประสิทธิ์, 2543) ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งตะกอนสีขาว เกิดจากการกระบวนการผลิตน้ำยางข้นซึ่งมีการปั่นแยกน้ำยาง (Centrifugation) โดยมีการเติมแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Diammonium Hydrogen Phosphate: DAHP) ลงในน้ำยางสดเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง ก่อนเข้าสู่กระบวนการปั่นแยกเป็นน้ำยางข้นและแยกส่วนตะกอนแมกนีเซียมที่มีอยู่ในน้ำยางสด (Gazeley, 1988; Sathyseelan, 2006 และ White, 2001) จากกระบวนการปั่น นอกจากนี้น้ำยังสามารถแยกแหล่งที่มาของกากซีแพ่งจากส่วนต่างๆ ตั้งแต่ขั้นตอนการรับวัตถุดิบไปจนถึงการปั่นแยกในสัดส่วนปริมาณที่แตกต่างกัน นอกเหนือจาก ตะกอนจากการเติม DAHP และตะกอนจากการปั่นแยกซึ่งได้กล่าวไปแล้ว คือ กากตะกอนในน้ำยางสดที่รับซื้อจากภายนอกและกากตะกอนในบ่อเก็บน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งท้ายที่สุดจะถูกรวบรวมเข้าไว้ด้วยกันรอการจัดการต่อไป ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น กากซีแพ่งถือว่าเป็นของเสียที่ทางโรงงานไม่ต้องการ จากการศึกษาข้อมูลของโรงงานผลิตน้ำยางข้นในประเทศไทยพบว่าเกิดของเสียประเภทกากซีแพ่งประมาณ 10,000 ตันต่อปี เฉพาะในพื้นที่ภาคใต้เกิดของเสียประเภทกากซีแพ่งมากถึง 9,900 ตันต่อปี ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 99 ของกากซีแพ่งทั้งประเทศ และในเขตจังหวัดสงขลาพบว่าการผลิตน้ำยางข้นจะทำให้เกิดปริมาณของเสียในรูปของกากซีแพ่งโดยเฉลี่ยประมาณ 9.7 - 10.3 กก.น้ำหนักเปียก/ตันน้ำยางสด คิดเป็นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำยางสดที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำยางข้น กล่าวคือ จะมีของเสียในรูปกากซีแพ่งเกิดขึ้นในแต่ละโรงงานประมาณ 0.39-1.58 ตันต่อวัน (วราศรี เอกประสิทธิ์, 2543 และ วันชัย แก้วยอด, 2540) ขึ้นกับขนาดการผลิต

กากซีเมนต์ ประกอบด้วยสิ่งเจือปนต่าง ๆ จำพวกฝุ่น ทราย เศษไม้ ฟอสฟอรัส ซีลีเนียม และตะกอนของโลหะแมกนีเซียม มี pH ค่อนข้างเป็นกลางถึงต่างอ่อน ๆ ซึ่งอาจเกิดจากการเติมแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง (วิภาวรรณ อุบล, 2550) และมีค่าของแข็งระเหยได้ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ปริมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก ในการทดลองจะต้องทำการแยกขนาดกากซีเมนต์เพื่อแยกประมาณสารอินทรีย์ออก (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี และคณะ, 2547; วราศรี เอกประสิทธิ์, 2543 และ Blackley, 1997) และในการกำจัดกากซีเมนต์นั้น ทางโรงงานมักจะดำเนินการกำจัดด้วยการทิ้งไปหรือใช้ถมพื้นที่ ถมถนน รวมทั้งการเผาทิ้ง (สมทิพย์ ด่านธีรวณิช และคณะ, 2545) ซึ่งอาจเป็นวิธีการกำจัดที่ไม่เหมาะสม เพราะอาจก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้

กากซีเมนต์มีส่วนประกอบของธาตุอาหารประเภทแมกนีเซียมเป็นหลัก ซึ่งแมกนีเซียมจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน และทำปฏิกิริยาได้ดีเมื่อมีการรวมตัวกับน้ำ ทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับต่างได้ดีขึ้น (Peter Duxson and John L. Provis, 2008) นอกจากนี้แมกนีเซียมยังมีคุณสมบัติในการช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับจีโอพอลิเมอร์ อีกทั้งยังช่วยลดค่าการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ได้ (Warintorn Banchapattanasakda, 2009) แม้แมกนีเซียมจะไม่ใช้สารตั้งต้นหลักในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของอะลูมิเนียมซิลิเกต แต่หากนำกากซีเมนต์ดังกล่าวมาผสมกับสารปอโตโซลานธรรมชาติ เช่น เถ้าลอย และดินขาว จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 1-1 ก) กากซีเมนต์จากเครื่องปั่นเหวี่ยง ข) กากซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อน  
ค) กากซีเมนต์ผ่านการอบแห้งและบดละเอียด (วัชรพร บึงก้าน, 2551)

นอกจากนี้โรงงานอุตสาหกรรมในภาคใต้ยังมีเถ้าปาล์ม (Palm ash) ดังแสดงในรูปที่ 1-2 ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตความร้อนเพื่อผลิตไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 5 ล้านไร่ มีผลผลิตผลปาล์มสด 11.33 ล้านตัน ผลิตเป็นน้ำมันปาล์มดิบได้ 1.93 ล้านตัน และเกิดของเสียเถ้าปาล์มมากถึง 296,000 ตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555) โดยเถ้าปาล์มดังกล่าวนั้นมีการกำจัดโดยการนำไปทิ้งอย่างเปล่าประโยชน์ การกำจัดด้วยวิธีการดังกล่าวส่งผลให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองจากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมาก



จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าเถ้าปาล์มประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดแต่ที่พบมากคือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซึ่งส่วนประกอบดังกล่าวเมื่อนำไปผสมกับดินขาวซึ่งมีองค์ประกอบของสารอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) จะเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์เป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งเกิดจากสารละลายอัลคาไลน์เข้มข้น ทำปฏิกิริยาและใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุคล้ายปูนซีเมนต์ สามารถรับแรงอัดได้ดี โดยความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมที่ใช้ และยังเป็นวัสดุที่สามารถทนความร้อนได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549) การประยุกต์ใช้งานจีโอพอลิเมอร์สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง การซ่อมแซมถนน งานโครงสร้าง หรือเป็นอิฐทนความร้อน และวัสดุตกแต่งสวน เป็นต้น



รูปที่ 1-2 ของเสียเถ้าปาล์มจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม

ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการนำกากขี้เียงจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น และของเสียเถ้าปาล์มจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มไปเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ นำไปสู่การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้จะศึกษาในประเด็นของการพัฒนาสูตรส่วนผสมให้ได้คุณสมบัติตามต้องการเพื่อนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันโดยมุ่งเน้นในเรื่องของการจัดการของเสียเป็นหลักด้วยการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

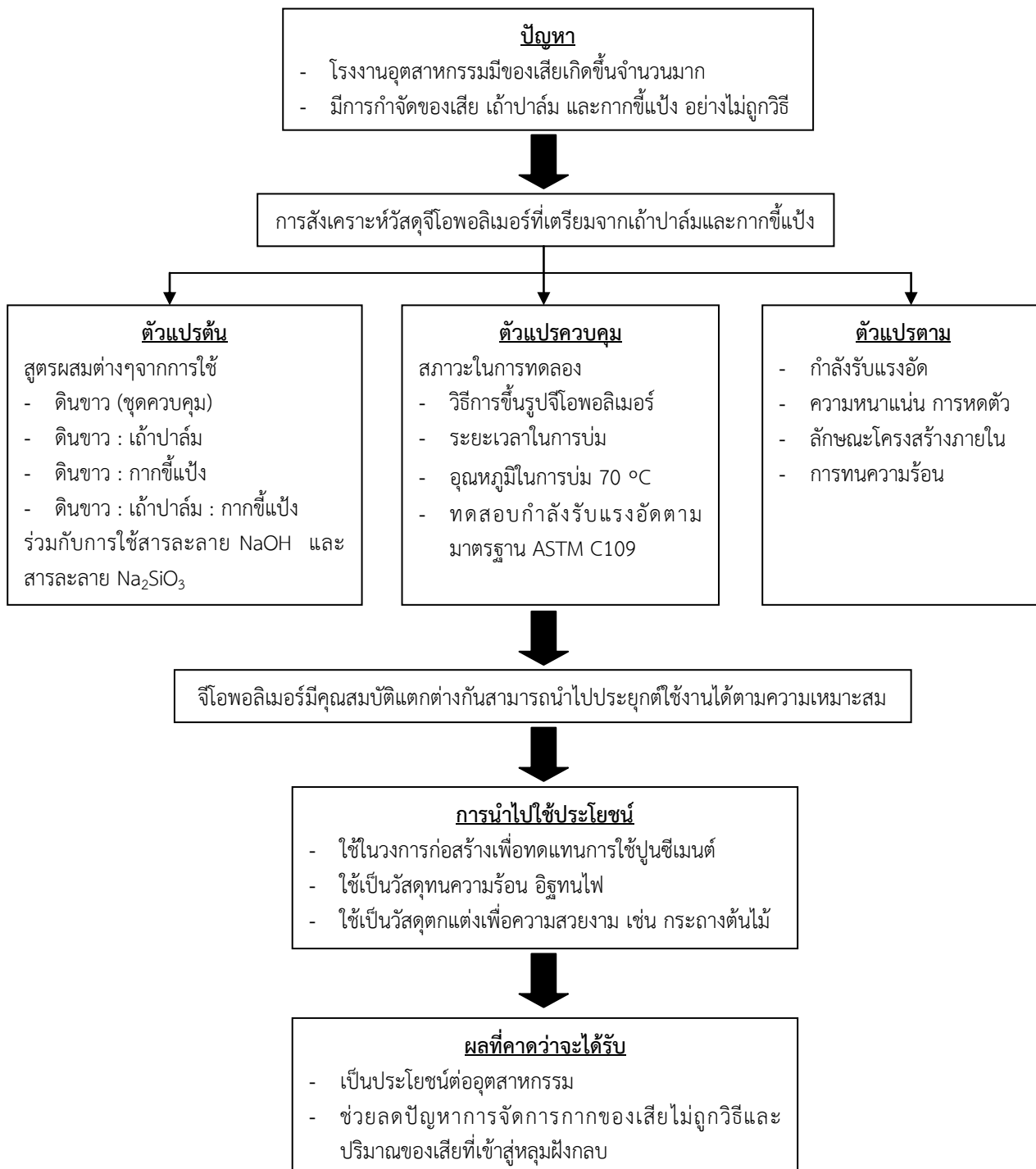
## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและพัฒนาส่วนผสมและวิธีการขึ้นรูปจากส่วนผสมที่เป็นของเสียอุตสาหกรรมประเภทกากขี้เียงและของเสียเถ้าลอยจากเตาเผาเพื่อให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้
- 2) ศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่ได้โดยเน้นเรื่องการจัดการของเสียเป็นหลักรองลงมาคือความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์

### 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ความรู้เกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียกากซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพเพื่อเป็นประโยชน์ต่อวงการก่อสร้างและการพัฒนาไปเป็นวัสดุใช้งานอื่นๆ เช่น วัสดุตกแต่งสวน อิฐจีโอพอลิเมอร์และกระถางต้นไม้
- 2) แนวทางการจัดการกากซีเมนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น และเถ้าลอยจากเตาเผา เพื่อลดปริมาณของเสียดังกล่าวที่จะนำไปกำจัด และลดปัญหาการกำจัดที่ไม่ถูกวิธี
- 3) เป็นการส่งเสริมให้มีการใช้วัสดุที่เป็นของเสียมาทำเป็นจีโอพอลิเมอร์เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเผาปูนซีเมนต์นำไปสู่การลดภาวะโลกร้อนได้

## กรอบแนวคิดของงานวิจัย



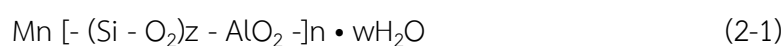
## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 จีโอพอลิเมอร์

##### 2.1.1 ความหมายของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (geopolymers) หรือเรียกอีกอย่างว่า พอลิเซียเลต (polysialate) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Davidovits, J., 1999) โครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์แสดงได้ดังสมการที่ 2-1



โดย	M	คือ ธาตุอัลคาไลน์
	-	คือ การยึดเกาะพันธะ (bond)
	z	คือ จำนวนโมเลกุลของ $\text{SiO}_2$ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
	n	คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ Degree of Polymerization
	w	คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสานในลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ของ  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  และ  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  โดยมีโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) หรือโพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) ในการทำให้ประจุสมดุล ณ ตำแหน่งของ  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้การใช้พลังงานลดลงไปมากและต้นทุนในการผลิตต่ำลงซึ่งการใช้พลังงานที่ลดลงจะนำไปสู่การลดผลกระทบต่อโลกร้อนอีกด้วย

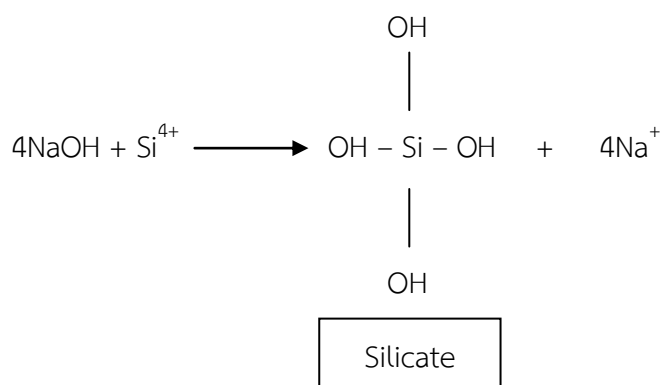
จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานของสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และแคลเซียมออกไซด์ แต่การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์

### 2.1.2 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

สารจีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอะลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าอุณหภูมิปกติ และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี โดยปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน (Fernandez-Jimenez et al., 2003) คือ

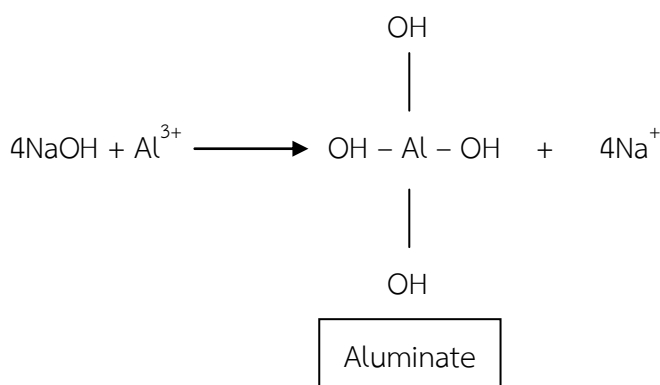
#### 1. การชะละลาย (dissolution)

เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆออกมา โดยอะลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมามากเนื่องจากเป็นสารหลัก ได้เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้าของ Si และ Al ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล (Fernandez-Jimenez et al., 2003) การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate และ Aluminate ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และ 2-2 (Hench, L.,1998) ตามลำดับ



รูปที่ 2-1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate

ที่มา : Hench, L.,1998



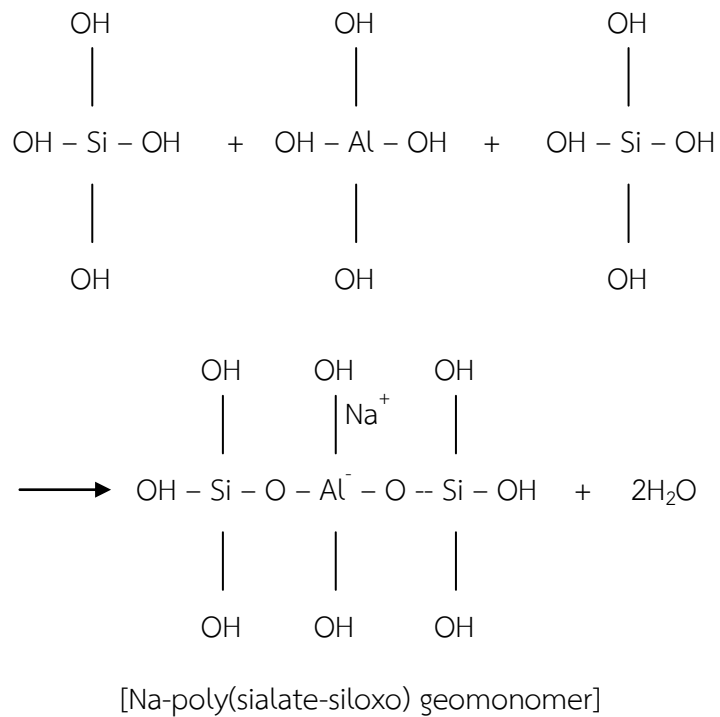
รูปที่ 2-2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Aluminate

ที่มา : Hench, L.,1998

## 2. การทำปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ (condensation-polymerization)

ในปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้น กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ที่มีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยพีรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สามและสี่หน่วย ดังแสดงในรูปที่ 2-3 ซึ่งได้แก่ พอลิเซียเลต (polysialate, PS) พอลิเซียเลตไฮดรอกโซ (polysialate siloxo, PSS) และพอลิเซียเลต-ไดไฮดรอกโซ (polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Hench, L.,1998) ดังแสดงในรูปที่ 2-4

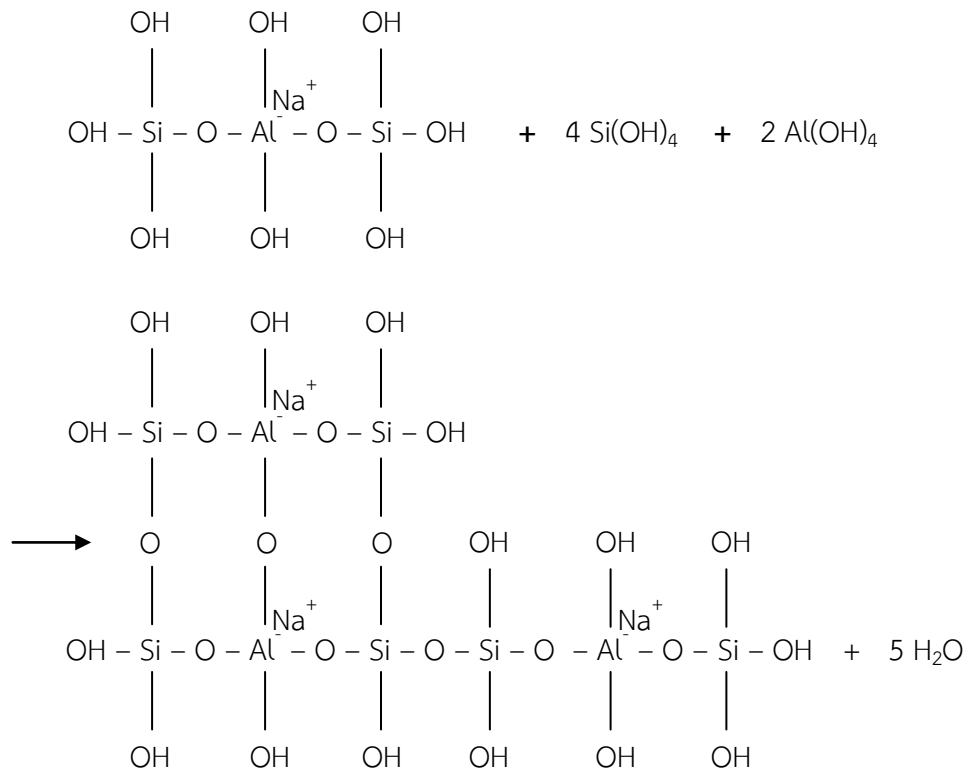




**รูปที่ 2-4** ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดพอลิเซียเลต  
ที่มา : Hench, L.,1998

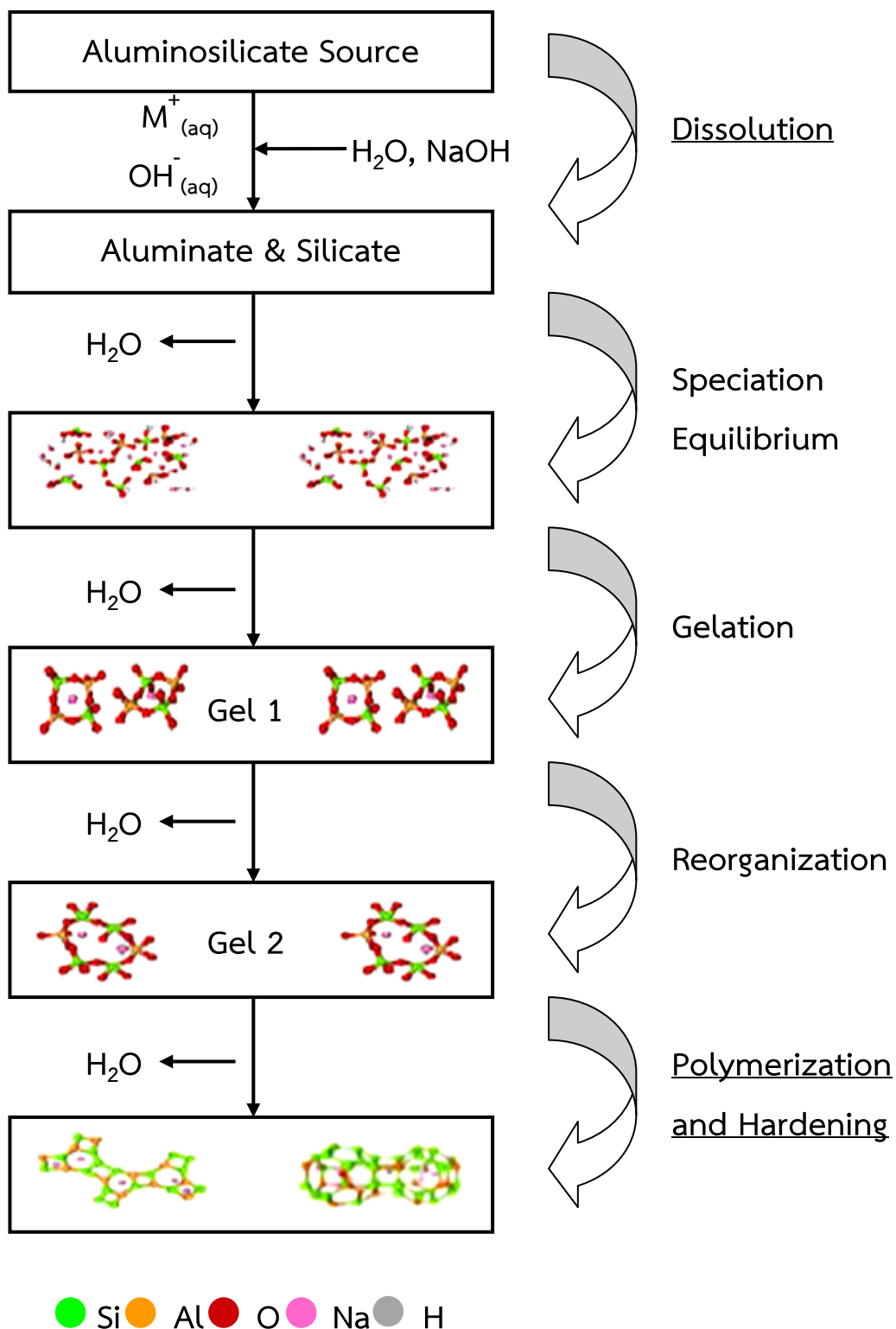
จากนั้นจะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะของพอลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้ (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547) การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Hench, L.,1998) ดังแสดงในรูปที่ 2-5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซีซิลิเกต ดังแสดงในรูปที่ 2-6





รูปที่ 2-5 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซี

ที่มา : Hench, L.,1998

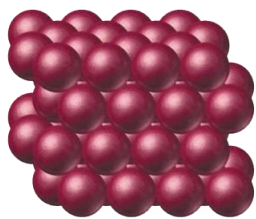


รูปที่ 2-6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์เรซิน  
ที่มา : Geopolymer Institute, 2549

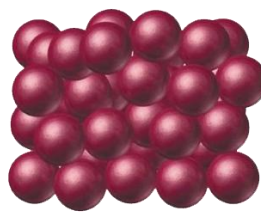
ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะได้ของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นอสัณฐานซึ่งโดยทั่วไปของแข็งแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

**ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึก (crystalline solid)** เป็นของแข็งที่มีพื้นผิวที่ทำมุมกันด้วยค่าที่แน่นอน ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงเป็นระเบียบของอนุภาคของของแข็ง ดังรูปที่ 2-7 ก) ผลึกที่มีขนาดใหญ่เมื่อทำให้เล็กลงก็ยังคงรักษาลักษณะรูปผลึกเดิมอยู่ สารบางอย่างอาจมีรูปผลึกได้หลายแบบซึ่งเราจะเรียกว่าปรากฏการณ์อัญรูป (polymorphism) เช่น เพชร แกรไฟต์ สารบางชนิดอาจจะมีรูปร่างผลึกที่เหมือนกันได้ ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ภาวะรูปร่างเหมือน (isomorphism) เช่น NaCl, KCl, RbBr และ CaS นอกจากนี้ ผลึกยังมีสมบัติที่เรียกว่า *anisotropy* อันได้แก่ความแข็งแรงทนทานทางกล ดรรชนีหักเห และการนำไฟฟ้า ถ้าวัดในทิศทางที่ต่างกันค่าที่ได้จะไม่เท่ากัน

**ของแข็งอสัณฐาน (amorphous solid)** หรือของแข็งที่ไม่มีรูปผลึก อนุภาคเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเช่น แก้ว พอลิเมอร์ ยางธรรมชาติ ฯลฯ มีสมบัติต่างๆ ไปคล้ายผลึก แตกต่างกันที่ไม่มีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน ดังรูปที่ 2-7 ข) ดังนั้นจึงมีสมบัติที่เรียกว่า *isotropy* คือ ค่าดรรชนีหักเห การนำไฟฟ้า และคุณสมบัติอื่นๆ จะเหมือนกันหมดทุกทิศทาง นอกจากนี้ของแข็งอสัณฐานจะมีจุดหลอมเหลวไม่เด่นชัด เมื่อได้รับความร้อนจะค่อยๆ อ่อนตัวจนกระทั่งไหลได้ อุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวจึงอยู่ในช่วงที่ยาว ต่างจากผลึกซึ่งจะมีจุดหลอมเหลวที่เด่นชัดและอุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวอยู่ในช่วงที่แคบ (คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558)



ก) crystalline solid



ข) amorphous solid

รูปที่ 2-7 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง

ที่มา : <http://www.scimath.org>

### 2.1.3 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วย

1. สารปอซโซลาน (pozzolanic) ตั้งต้นคือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถชะละลายได้ง่าย วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่งได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) และปอซโซลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิตได้แก่เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติได้แก่

ดินไดอะตอมล่ำปาง (diatomaceous earth) ถ้าภูเขาไฟดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อน เช่น การเผา การทำให้แห้ง เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2. อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้กันได้แก่ สารละลายเบส อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ หมู่ 1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้จีโอพอลิเมอร์คุณภาพดีกว่า แต่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากราคาไม่แพง หาได้ง่าย โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2518) คือ

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำลักษณะทั่วไปเป็นของเหลว ไม่มีสี

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาด ซึ่งสามารถนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการได้

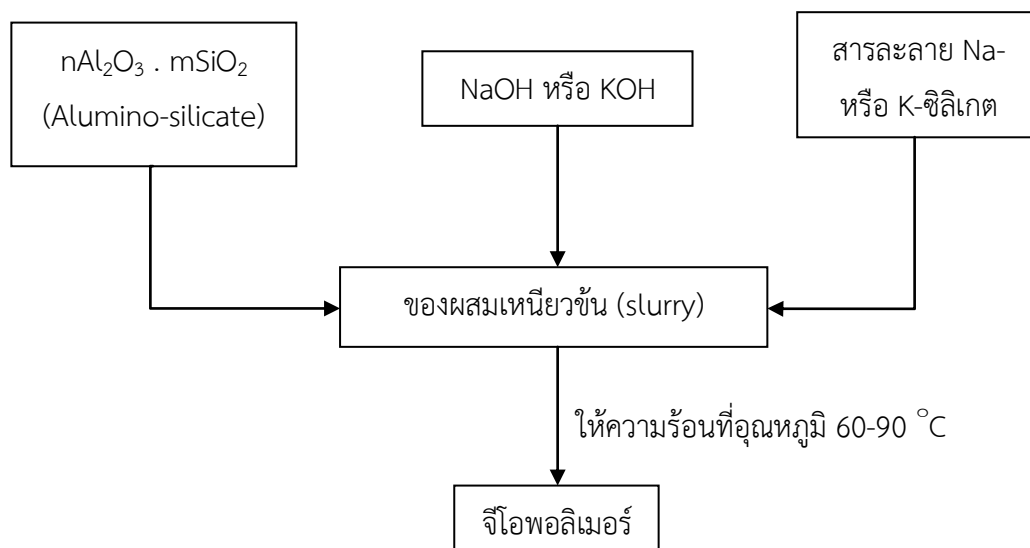
3. สารประกอบซิลิเกต สารประกอบซิลิเกตที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งเป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปเป็นสีเทาอ่อนถึงสีเทาเข้ม โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม แบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ ) จากน้อยไปหามากออกเป็น 3 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539) ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

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

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539

4. น้ำ สารจีโอพอลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำกลั่น โดยแผนผังการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 แผนผังการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

ที่มา : ปริญา จินดาประเสริฐ, 2549

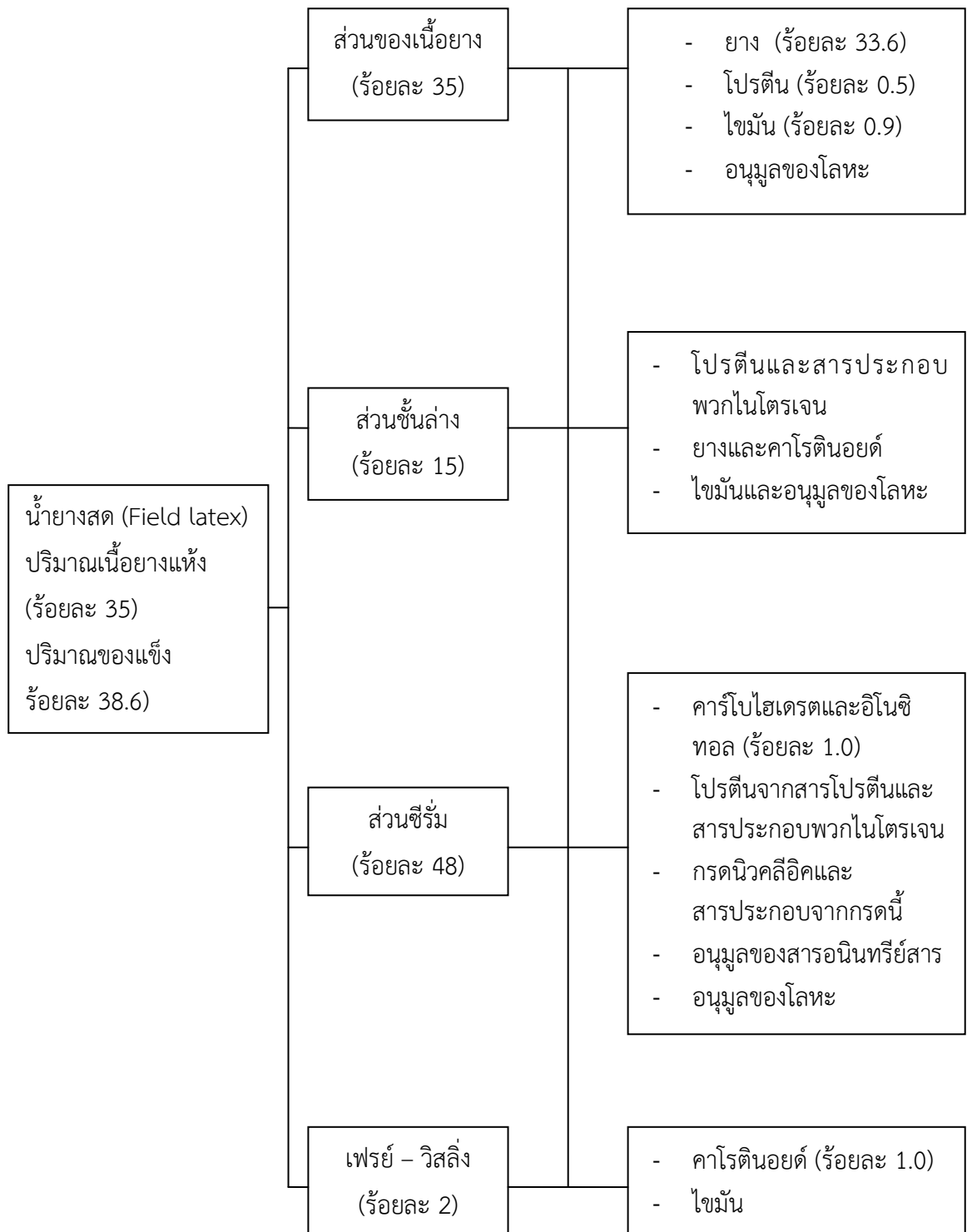
## 2.2 น้ียงขั่น

### 2.2.1 น้ียงธรรมชาติ

เมื่อนำน้ียงสดมาปั่นด้วยความเร็วสูงประมาณ 20,000 รอบต่อนาที จะสามารถแยกน้ียงออกได้ 5 ส่วน เรียงจากด้านบนถึงด้านล่างของภาชนะ ได้แก่ ส่วนของน้ียง อนุภาคเพรย์-วิลลิ่ง เซรั้มและส่วนขั่นล่างดังรูปที่ 2-9 ส่วนของน้ียงอยู่ด้านบนสุด มีลักษณะเป็นครีมสีขาว เป็นอนุภาคของยางอาจมีของแข็งอื่น เช่น อนุมูลของโลหะ อื่นเจือปนบ้างเล็กน้อย ส่วนที่อยู่ติดกับน้ียงมีลักษณะเป็นอนุภาคเช่นเดียวกับขั่นยางแต่มีสีเหลือง เป็นอนุภาคของเพรย์-วิลลิ่ง เวลาปั่นมักปนอยู่ในส่วนของเซรั้ม โดยเซรั้มจะมีสีใสนเหลือง เป็นฟองง่าย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย โปรตีน ฟอสฟอรัส ทองแดง โปแตสเซียมและแมกนีเซียม ส่วนอยู่ของล่างสุดเป็นตะกอนสีเหลือง น้ำตาลคล้ำ หรือสีขาว ส่วนใหญ่เป็นสารพวกธาตุอาหาร เช่น แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และซ้เถ้า (เสาวนีย์ ก่อวุฒิ กุรังสี, 2543)

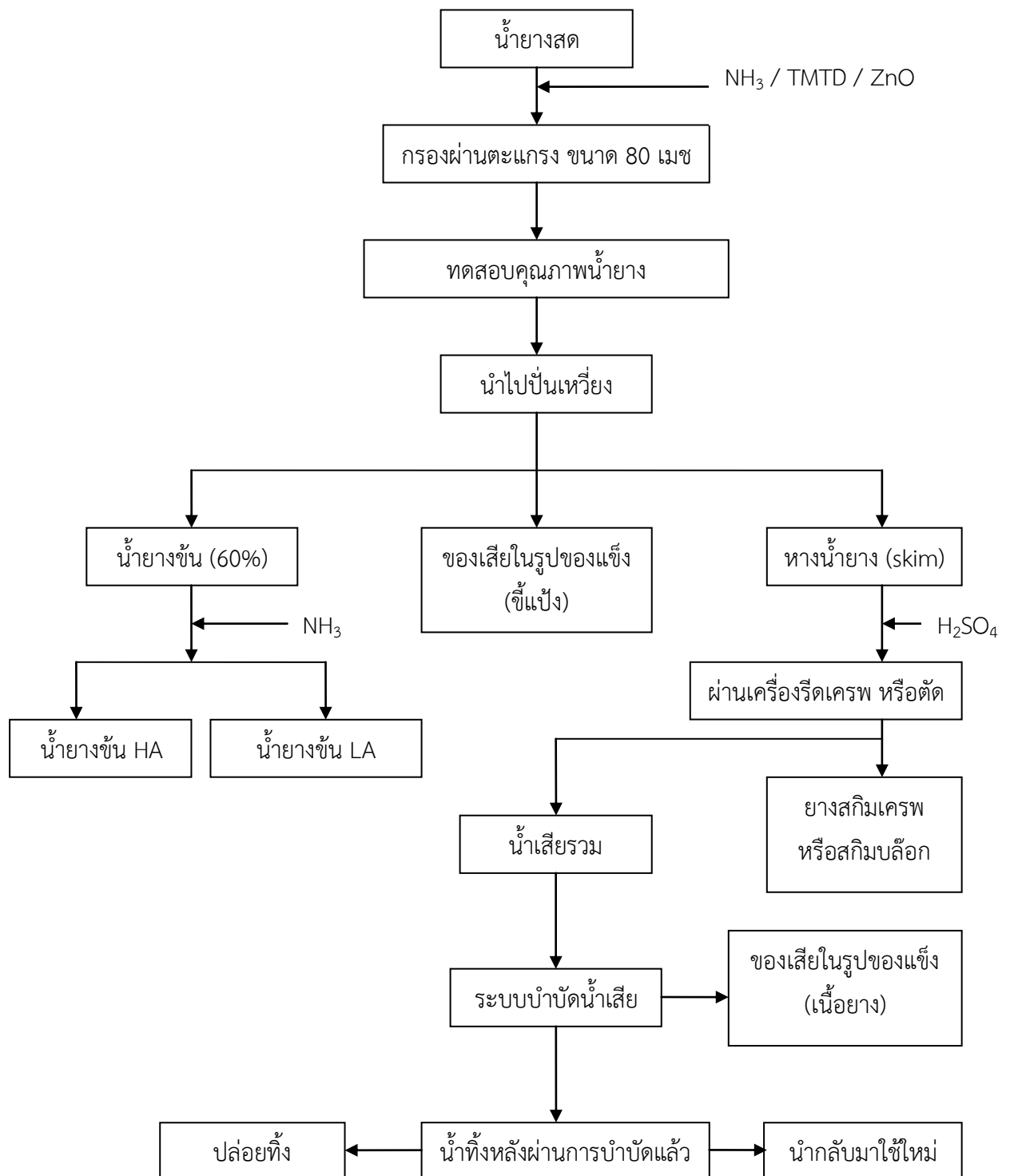
## 2.2.2 การผลิตน้ำยางข้น

การผลิตน้ำยางข้นจากน้ำยางสด ส่วนใหญ่ใช้วิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ ดังแสดงในรูปที่ 2-10 โดยการนำน้ำยางสดจากสวนยางมาใส่สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางป้องกันน้ำยางจับตัว เมื่อน้ำยางสดเข้าโรงงานผลิตน้ำยางข้น จะร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช (Mesh) จากนั้นนำตัวอย่างน้ำยางมาทดสอบหาปริมาณเนื้อยางแห้ง หลังจากนั้นผ่านแก๊สแอมโมเนียสู่น้ำยางปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 0.4 ของน้ำหนักยาง ตั้งทิ้งไว้ 1 วันเพื่อปล่อยให้น้ำยางตกตะกอนเอาพวกสิ่งแปลกปลอมออกมาทดสอบปริมาณแมกนีเซียม หากน้ำยางมีปริมาณแมกนีเซียมสูงเกิน 50 ppm ให้เติม diammonium hydrogen phosphate (DAHP) เพื่อตกตะกอนโลหะแมกนีเซียม เกิดปฏิกิริยา เป็น Magnesium ammonium phosphate ตะกอนเหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำยาง (เมื่อปั่นเป็นน้ำยางข้นแล้วควรมีแมกนีเซียมไม่เกิน 20 ppm) (Gazeley, 1988; White, 2001 และ Sathyseelan, 2006) หลังจากนั้นนำน้ำยางไปปั่นเหวี่ยงได้น้ำยางข้นชนิดร้อยละ 60 และหางน้ำยาง (Skim latex) ร้อยละ 60 เก็บรักษาด้วยแอมโมเนีย ปริมาณร้อยละ 0.7 เรียกว่าน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia ,HA) ถ้าใช้แอมโมเนียร้อยละ 0.2 ร่วมกับสารช่วยเก็บรักษาน้ำยางอื่น เรียกว่าน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia,LA) ส่วนของหางน้ำยางนำมาจับตัวเนื้อยางด้วยกรดซัลฟิวริก แล้วผ่านเครื่องรีดยางเครพ หรือตัดย่อยทำสกิมเครพ หรือสกิมบล็อก โดยในกระบวนการผลิตของเสียเกิดขึ้น น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้นจะมีค่า BOD เฉลี่ย 2,390 มิลลิกรัมต่อลิตรและมี pH เฉลี่ย 8.88 ส่วนน้ำเสียจากการผลิตยางสกิมเครพมีค่า BOD เฉลี่ย 10,489 มิลลิกรัมต่อลิตร และมี pH เฉลี่ย 4.47 (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2546 อ้างถึง วันชัย, 2540)



รูปที่ 2-9 ส่วนประกอบต่างๆของน้ำยางสดหลังการปั่นแยก

ที่มา : เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี, 2547



รูปที่ 2-10 การผลิตน้ำยางชั้นและการเกิดของเสียของโรงงานน้ำยางชั้น

ที่มา : เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี, 2547



### 2.3 กากซีแพ่ง

โรงงานผลิตน้ำยางข้นก่อให้เกิดกากซีแพ่งซึ่งสามารถเกิดขึ้นบริเวณถังปั่น ดังรูปที่ 2-11 และถึงพักน้ำยางซึ่งจะตกตะกอนโลหะแมกนีเซียมก่อนนำน้ำยางมาปั่นดังรูปที่ 2-12 ซึ่งกากซีแพ่งที่เกิดขึ้นนี้จัดเป็นของเสียที่โรงงานไม่ต้องการ และเกิดขึ้นปริมาณมากถึงร้อยละ 0.5 ของน้ำยางข้น



รูปที่ 2-11 กากซีแพ่งจากเครื่องปั่นเหวี่ยง



รูปที่ 2-12 กากซีแพ่งในถังตกตะกอน

### 2.3.1 ลักษณะเบื้องต้นของกากชี้แป้ง

ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของกากชี้แป้งจากโรงงานผลิตน้ำยางชั้นพบว่า กากชี้แป้งสด มีลักษณะคล้ายโคลนตม สีขาวเทา บางครั้งมีสีเหลือง เนื้อละเอียดตั้งรูปที่ 2-13 ส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และซีลีเนียม (Blackley, 1997) กากชี้แป้งมีสภาพค่อนข้างเป็นกลาง โดยในกระบวนการผลิตน้ำยางชั้นจะมีการเติมแอมโมเนียลงไปใต้น้ำยางสด หลังจากนั้นทำการปล่อยน้ำยางเข้าทางท่อรับน้ำยางส่วนบนสุดของตัวเครื่องปั่นแยกน้ำยาง เครื่องปั่นจะทำการปั่นแยกน้ำยางได้น้ำยางชั้น หางน้ำยาง และกากชี้แป้ง ในขณะที่ทำการปั่นแอมโมเนียที่มีอยู่ในกากชี้แป้งมีน้อย เมื่อนำมาวัดค่า pH ในกากชี้แป้งจึงได้ค่าที่ค่อนข้างจะเป็นกลาง (เสาวนีย์ ก่อวุฒิ กุศลรังสี, 2547)



รูปที่ 2-13 ลักษณะเบื้องต้นของกากชี้แป้ง

#### ความหนาแน่นของกากชี้แป้ง

กากชี้แป้งจะมีสิ่งเจือปนอื่นมากกว่าน้ำยางสด ทำให้กากชี้แป้งมีความหนาแน่นมากกว่าซึ่งน้ำยางสดโดยทั่วไปมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 – 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร อนุภาคยางมีความหนาแน่น 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร (เสาวนีย์ ก่อวุฒิ กุศลรังสี, 2543) เมื่อนำน้ำยางสดมาทำการปั่นด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ด้วยความเร็ว 20,000 รอบต่อนาที จะสามารถแยกส่วนของอนุภาคยาง เซรัมและกากชี้แป้งออกจากกันได้ ซึ่งความหนาแน่นของกากชี้แป้งมีค่าประมาณ 1.16 – 1.63 กรัมต่อมิลลิลิตร เนื่องจากส่วนประกอบของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในน้ำยาง ได้แก่ เรซิน โลหะหนัก แป้ง โปรตีน ไขมัน และสารเคมีที่เติมลงไปก่อนนำน้ำยางมาผลิตเป็นน้ำยางชั้น เช่น การเติม  $\text{NH}_3$ , TMTD

และ ZnO เพื่อเก็บรักษาน้ำยาง และมีการเติม DAHP ลงไปเพื่อตกตะกอนโลหะแมกนีเซียม ดังนั้นเมื่อทำการปั่นแยกน้ำยางด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ ส่วนประกอบของกากซีแป้งจะมีลักษณะเป็นโคลนตมสีเหลือง หรือสีขาวเทา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารพวกแมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และซีเถ้า ทำให้กากซีแป้งมีความหนาแน่นที่สูงกว่าน้ำยางประมาณร้อยละ 18.97 – 66.33

### ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content; TSC) และปริมาณความชื้น (Moisture content; MC)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดของกากซีแป้งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยฟอสฟอรัสและแมกนีเซียม ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจากการเติม DAHP เพื่อตกตะกอนแมกนีเซียมที่มีอยู่ในน้ำยาง โดย DAHP จะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมกลายเป็น Magnesium ammonium phosphate ตะกอนเหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำยางตรงบริเวณถังพักน้ำยาง เมื่อนำน้ำยางสดมาเซนตริฟิวส์ด้วยถังปั่นตะกอนที่เหลืออยู่จะรวมอยู่ในส่วนของกากซีแป้ง นอกจากนี้ยังมีสารพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต แป้ง น้ำตาลและส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำยาง (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2543) ส่วนของลูทอย์ในน้ำยางที่บวมแล้วเกิดการแตก ของเหลวภายในซึ่งเป็นสารแขวนลอยที่มีประจุบวกและไอออนของโลหะ เช่น แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนจะกระจายอยู่ในน้ำยาง ส่วนผนังชั้นเดียวที่เป็นเยื่อบางของลูทอย์ที่แตกออกมีรูปร่างไม่แน่นอน จะเกิดจากการจับตัวกันเองเป็นก้อนติดอยู่บนผิวนอกของอนุภาคยางทำให้อนุภาคยางเกิดการสูญเสียความเสถียรได้ง่าย แยกตัวออกจากเนื้อยางและเกาะรวมกันอยู่ด้านล่างซึ่งเป็นส่วนของกากซีแป้งสามารถแยกออกได้เมื่อเซนตริฟิวส์ สำหรับอนุภาคเพอร์-วิสลิง ซึ่งเป็นสารไม่ใช่อินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้นมีปริมาณไม่มากนักประกอบด้วยสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ (Blackley, 1997) สามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรัมเมื่อทำการปั่นก็สามารถแยกออกมาอยู่ในส่วนของกากซีแป้ง ส่วนปริมาณของความชื้นที่มีอยู่ในกากซีแป้งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยส่วนของน้ำและแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในกากซีแป้งหลังการเซนตริฟิวส์ ซึ่งปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าประมาณร้อยละ 58.05-62.96 โดยน้ำหนัก และความชื้นประมาณร้อยละ 37.05-41.95 โดยน้ำหนัก

### ปริมาณของแข็งที่คงอยู่ (FS) และปริมาณของแข็งที่ระเหยได้

ปริมาณของแข็งที่คงอยู่ส่วนใหญ่ในกากซีแป้ง ประกอบไปด้วยสารพวกคาร์บอนและพวกโลหะหนักที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิ  $550 \pm 50$  องศาเซลเซียส ส่วนพวกสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่มีอยู่ในกากซีแป้งจะเกิดการระเหยกลายเป็นแก๊สซึ่งส่วนนี้คือปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ (APHA, AWWA

และ WEF, 2005) ซึ่งกากขี้แ่งมีปริมาณของแข็งคงอยู่มีค่าระหว่างร้อยละ 24-28 โดยน้ำหนัก และของแข็งที่ระเหยได้มีค่าระหว่างร้อยละ 72-76 โดยน้ำหนัก (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2547)

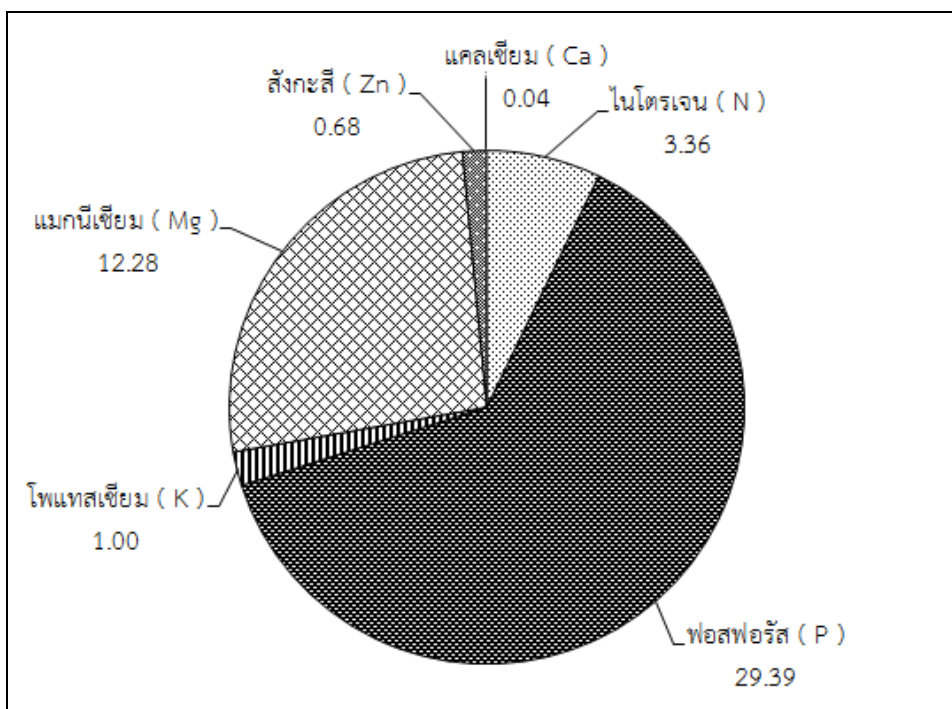
#### กากขี้แ่งอบแห้ง

นำกากขี้แ่งมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24-48 ชั่วโมง เพื่อเอาน้ำ เซรัม และแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในกากขี้แ่งออก บดกากขี้แ่งอบแห้งให้เป็นผงละเอียด จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในกากขี้แ่งอบแห้ง ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม สังกะสี และแคลเซียม ซึ่งพบว่ากากขี้แ่งอบแห้งมีปริมาณธาตุอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2-2 และรูปที่ 2-14

#### **ตารางที่ 2-2 ปริมาณธาตุอาหารของกากขี้แ่งอบแห้ง**

ธาตุอาหาร	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1.ไนโตรเจน ( N )	3.07-3.65
2.ฟอสฟอรัส ( P )	14.22-15.17
3.โพแทสเซียม ( K )	0.79-1.20
4.โลหะหนัก	
4.1 แมกนีเซียม ( Mg )	11.69-12.86
4.2 สังกะสี ( Zn )	0.37-0.98
4.3 แคลเซียม ( Ca )	0.01-0.06

ที่มา : เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2547



รูปที่ 2-14 ปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ของกากขี้แ่งอบแห้ง (รำละเอียดโดยน้ำหนัก)  
ที่มา : เสาวนีย์ ก่อวุฒิกรุงศรี, 2547

#### ปริมาณไนโตรเจน (Total Nitrogen)

ปริมาณไนโตรเจนในกากขี้แ่งอบแห้งส่วนใหญ่ได้มาจากส่วนของโปรตีนบนอนุภาคของยางที่สลายตัวออกมาและเป็นส่วนของผนังลูทอยด์ซึ่งเกาะบนอนุภาคยางแล้วทำให้อนุภาคยางเกิดการสูญเสียสภาพจับตัวเป็นก้อน เมื่อทำการเซนตริฟิวส์จึงรวมตัวอยู่ในส่วนของกากขี้แ่ง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณไนโตรเจนในกากขี้แ่ง สำหรับสารละลายแอมโมเนียที่เติมลงไปในน้ำยางเพื่อเก็บรักษาน้ำยางนั้น จะเกิดการระเหยกลายเป็นไอในระหว่างการนำกากขี้แ่งไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะไม่เหลืออยู่ในกากขี้แ่ง จากตารางที่ 2-2 จะเห็นว่ากากขี้แ่งอบแห้งมีปริมาณไนโตรเจนอยู่ระหว่างร้อยละ 3.07-3.65 โดยน้ำหนัก

#### ปริมาณฟอสฟอรัส (Total Phosphorus)

ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ได้มาจากการเติม DAHP (diammonium hydrogen phosphate) เพื่อตกตะกอนโลหะแมกนีเซียมที่มีอยู่ในน้ำยางสด จากตารางที่ 2-2 พบว่ากากขี้แ่งจะมีธาตุฟอสฟอรัสประมาณร้อยละ 14.22-15.17 โดยน้ำหนัก

### ปริมาณโพแทสเซียม (Total Potassium)

ปริมาณโพแทสเซียมที่มีอยู่ในกากซีเป้งคาดว่าได้จากอนุภาคยาง และเซรัมที่เหลือจากการเซนตริฟิวส์ และจากแร่ธาตุที่ต้นยางพาราดูดซึมมาจากดิน ซึ่งจากตารางที่ 2-2 พบว่ามีปริมาณโพแทสเซียมอยู่ในกากซีเป้งประมาณร้อยละ 0.79-1.20 โดยน้ำหนัก

### ปริมาณโลหะอื่นๆ

น้ำยางสดจากสวนก่อนนำมาผลิตเป็นน้ำยางข้น จะมีการเติม DAHP (diammonium hydrogen phosphate) ที่ใส่ลงไปใต้น้ำยางสด เพื่อตกตะกอนแมกนีเซียมที่มีอยู่ในน้ำยาง โดย DAHP ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ Magnesium ammonium phosphate) สารนี้จะตกตะกอนหรือจะถูกแยกออกจากน้ำยาง โดยปริมาณแมกนีเซียมที่อยู่ในกากซีเป้ง คาดว่าเป็นส่วนของตะกอนที่เหลืออยู่ในน้ำยางสดที่ทำการตกตะกอนแมกนีเซียมออกไปแล้ว เมื่อเซนตริฟิวส์ด้วยถังปั่น แมกนีเซียมที่เหลืออยู่ก็จะรวมอยู่ในส่วนของกากซีเป้งจากตารางที่ 2-2 พบว่าในกากซีเป้งมีธาตุแมกนีเซียมโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 11.69-12.86 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้กากซีเป้งยังมีธาตุอื่นๆอีกได้แก่ สังกะสีและแคลเซียม มีค่าประมาณร้อยละ 0.37-0.98 และ 0.01-0.06 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยปริมาณของสังกะสีได้จากกระบวนการผลิตน้ำยางข้น เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำยางข้นจะมีการเติมซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นสารกระตุ้นและเก็บรักษาน้ำยางจึงทำให้มีสังกะสีในกากซีเป้ง และแคลเซียมได้จากลูทอยด์โดยในสภาพอากาศร้อน อุณหภูมิสูงขึ้น ลูทอยด์จะเกิดการแตกตัวทำให้ของเหลวที่อยู่ในลูทอยด์ซึ่งมีลักษณะเป็นสารแขวนลอยเกิดการไหล และปะปนรวมอยู่ในเซรัมเมื่อเซนตริฟิวส์สารแขวนลอยจะประกอบไปด้วยประจุบวก และไอออนของโลหะ เช่น แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน พวกโลหะหนักเหล่านี้ก็จะรวมอยู่ที่ก้นถังกลายเป็นกากซีเป้งสามารถแยกออกมาได้ แต่ปริมาณของแคลเซียมที่พบในกากซีเป้งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าของธาตุตัวอื่นๆ

ปริมาณฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและโลหะหนักในกากซีเป้งที่ได้มีค่าแตกต่างกัน อาจเนื่องจากความแตกต่างในส่วนของการผลิต ปริมาณสารเคมี สารเคมีพวก DAHP ซึ่งใส่ลงไปใต้น้ำยางและบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง ทำให้ค่าที่ได้แตกต่างกัน (เสาวนีย์ ก่อวุฒิภูรังสี, 2547)

## 2.4 การกำจัดกากซีเป้ง

ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น กากซีเป้งถือว่าเป็นของเสียที่ทางโรงงานไม่ต้องการจากการศึกษาข้อมูลของโรงงานผลิตน้ำยางข้นในเขตจังหวัดสงขลาพบว่า กากซีเป้งจะเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำยางสดที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำยางข้น กล่าวคือ จะมีของเสียในรูปกากซีเป้งเกิดขึ้นในแต่ละโรงงานประมาณ 0.39-1.58 ตันต่อวัน ขึ้นกับขนาดการผลิต

(วราศรี เอกประสิทธิ์, 2543: วันชัย แก้วยอด, 2540) กากขี้แ่งที่เกิดขึ้นจากบริเวณถังปั่นเซนตริฟิวส์ และถังตกตะกอนนั้น โดยทั่วไปแล้วโรงงานผลิตน้ำยางชั้นต่างๆ จะกำจัดทิ้งโดยใช้วิธีการนำกากขี้แ่งไปถมที่ ถมถนน รวมทั้งการเผาทิ้ง(สมทิพย์ ด้านธีรวนิชย์และคณะ, 2545) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของกากขี้แ่ง จะเห็นได้ว่าการนำไปถมที่ถือเป็นวิธีที่ประหยัด ทำให้ได้ที่ดินไปทำประโยชน์อื่น ๆ ง่ายต่อการดำเนินงาน สามารถใช้ได้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว แต่จะมีข้อเสียคือ หาสถานที่ยากเพราะไม่มีชุมชนใดต้องการให้อยู่ใกล้ และก่อนที่จะนำไปถมที่ ต้องมีการตรวจสอบกากขี้แ่งว่ามีความปลอดภัยจากสารเคมีที่อาจเป็นอันตรายต่อดินและสิ่งมีชีวิตบริเวณนั้น ซึ่งอาจเป็นวิธีการกำจัดที่ไม่เหมาะสม เพราะอาจก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ และยังคงเป็นปัญหาที่รอการแก้ไขอย่างจริงจัง

## 2.5 ถ้ำปาล์ม

ถ้ำปาล์มเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มที่ได้จากกากเส้นใยของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 800 - 1000 °C ถ้ำปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดตามมาและเป็นการสูญเสียพื้นที่ในการทิ้งโดยสูญเปล่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของถ้ำปาล์มน้ำมันอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1990 เริ่มมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ถ้ำปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตได้ศึกษาการใช้ถ้ำปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ผสมถ้ำปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่มีถ้ำปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจากถ้ำปาล์มน้ำมันที่ใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมถ้ำปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมีมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีถ้ำปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม (Tay and Show, 1995)

ในปี ค.ศ.1996 Hussin and Awal (1996) นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำถ้ำปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดถ้ำให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์และแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมถ้ำปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด อายุ 28 วัน โดยกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำแต่หลังจากนั้นกำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีถ้ำปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมถ้ำปาล์มน้ำมันยังมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

สำหรับในประเทศไทย สุรพันธ์ และคณะ (2545) พบว่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของ แก้วปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีค่าสูงกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้วปาล์มน้ำมันบดละเอียดในอัตราร้อยละ 30 ยังมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วันขึ้นไป

#### องค์ประกอบทางเคมีของแก้วปาล์ม

دنุพลและธนภัทร (2551) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วปาล์มพบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 33.99 มีปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 2.24 และร้อยละ 1.65 ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2-3(ก)

ชัยและไกรวุฒิ (2549) กล่าวว่า องค์ประกอบทางเคมีของแก้วปาล์ม มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 65.30 มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 2.56 และร้อยละ 1.98 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2-3(ข) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานศึกษาที่ผ่านมาของ Tay (1990) ที่พบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีค่าร้อยละ 34.3, ร้อยละ 24.6 และร้อยละ 14.9 ตามลำดับ และยังแตกต่างจากงานศึกษาของ Hussin and Awal (1996) ที่มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 43.6 ร้อยละ 11.4 และร้อยละ 4.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแก้วปาล์มน้ำมันแต่ละแห่งมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผาต่างกัน

#### ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วปาล์มและแก้วปาล์ม

องค์ประกอบ (ร้อยละ)	(ก)แก้วปาล์ม	(ข)แก้วปาล์ม
MgO	7.50	3.08
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2.24	2.56
$\text{SiO}_2$	33.99	65.30
$\text{P}_2\text{O}_5$	3.88	-
$\text{SO}_3$	1.23	0.47
$\text{K}_2\text{O}$	11.30	5.72
CaO	16.43	6.42
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.65	1.98
$\text{Na}_2\text{O}$	-	0.36
LOI	1.02	10.05

ที่มา : ก) دنุพลและธนภัทร, 2551 ; ข) ชัยและไกรวุฒิ, 2549



## 2.6 ดินขาว

ดินขาว (Kaolin) ซึ่งมีรากศัพท์มาจากภาษาจีนว่า เกาเลียง (Kao Liang) เป็นชื่อของภูเขาที่มียอดแหลม (High Ridge) บางทีนิยมเรียกว่า China-Clay เพื่อเป็นเกียรติแก่ประเทศจีน ซึ่งเป็นผู้นำดินขาวมาใช้เป็นประเทศแรก (กรมทรัพยากรธรณี, 2526) ดินขาวเป็นดินที่เกิดจากแร่อลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ที่เป็นโครงสร้างของหินชนิดต่างๆ เช่น หินฟันม้า (Feldspar) ไมกา (Mica) หินควอร์ตซ์ (Quartz) หินปูน (Lime stone) ฯลฯ ดินขาวมักจะเกิดบนที่ราบสูงทั่วไป บางแห่งอาจพบใกล้แหล่งน้ำในที่ราบลุ่ม เนื่องจากการพัดพาของกระแสน้ำ ทำให้มีสีขาวหม่น ค่อนข้างเป็นสีเทาบ้าง สีเหลืองอ่อนบ้าง เนื่องจากมีสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ได้แก่ แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) โซเดียม (Sodium) และโพแทสเซียม (Potassium) ซึ่งทำให้ความบริสุทธิ์ของดินขาวน้อยลง การใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง หรือเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ จะพบว่าเม็ดดินขาวมีลักษณะเป็นผลึกแผ่นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือแท่งหกเหลี่ยม

ดินขาวเผาหรือ Metakaolin ได้จากการนำดินขาวดิบหรือ kaolin ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาเผาในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม โดยทั่วไปมีโครงสร้างลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี โดยทั่วไปมีซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก ดินขาวเผาที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มากโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ดินขาวเผาจัดเป็นสารปอซโซลาน Class N Raw or Calcined Pozzolans ตามมาตรฐาน ASTM C 618 เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; CAH) ที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีตนอกจากปฏิกิริยาเคมี (Pozzolanic Reaction) ที่เกิดขึ้นแล้ว ดินขาวเขายังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตทางกายภาพอีกด้วย โดยอนุภาคของดินขาวช่วยลดความพรุน (Porosity) ในเนื้อคอนกรีตโดยอนุภาคของดินขาวเผาที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น ดังนั้นการใช้ดินขาวเผาผสมในคอนกรีตมีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลัง (Strength) และความทนทาน (Durability)

### การปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อน

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวดิบ ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3 (\text{OH})_4$ ) จะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ การนำดินขาวดิบมาผสมกับคอนกรีตโดยตรงอาจทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติไม่แน่นอน จากผลวิจัยของ Sayamipuk (2543) พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศไทยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม ในขณะที่มอร์ต้าผสมดินขาวดิบที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนโดยการนำดินขาวดิบมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี ทำให้โครงสร้างภายในมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นดินขาว ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ;  $\text{AS}_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ผสมคอนกรีต ดังสมการที่ 2-2 (Salvador, 1995)



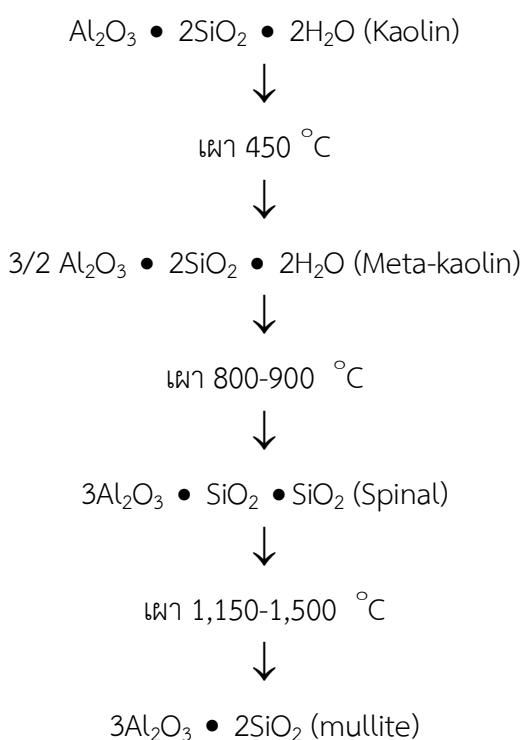
จากการศึกษาของ Neville ในปี 1996 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวดิบมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 650 ถึง 850 องศาเซลเซียส และจากการวิจัยของ Murat and Comel (1983) ที่ทำการศึกษาวิธีการและอุณหภูมิในการเผาดินขาวโดยทำการทดลองเผาดินขาวดิบด้วยวิธีการเผาแบบถังนิ่ง (Fixed-Bed) และแบบถังกวน (Stirred-Bed) หรือการเผาแบบหม้อหมุน (Rotary Klin) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 700-800 องศาเซลเซียส สำหรับวิธีการเผาแบบถังนิ่งเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้กำลังต้านทานแรงอัดของดินขาวผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่อายุการบ่มระหว่าง 7-90 วัน สูงกว่ากำลังอัดของดินขาวจากวิธีการเผาแบบถังกวนซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการเผา คือ 3 ชั่วโมง

สำหรับในประเทศไทยมีการรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบโดย อนุพงษ์ (2543) ศึกษาศึกษาคุณภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และลำปาง โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส และแปรผันเวลาในการเผา คือ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผา พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่ง คือเผาด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยมอร์ต้าที่ผสมดินขาวเผาจากแหล่งปราจีนบุรีให้ค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดร้อยละ 131 เมื่อเทียบ

กับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ

นอกจากนี้ Hengsadeekul (1995) ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาคือ 800 องศาเซลเซียส

ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์สูง เผาแล้วได้สีขาวบริสุทธิ์ นิยมนำมาทำ ผลิตภัณฑ์ พอร์ซเลน โบนีไชน่า และผลิตภัณฑ์เซรามิก ที่มีเนื้อสีขาวทุกชนิด ดังนั้น สีดินภายหลังการเผาเป็นสิ่งสำคัญมาก ขณะที่โรงงาน ผลิตกระเบื้องปูพื้น สนใจดิน ที่มีราคาถูกหุดตัวน้อย และมีปริมาณคาร์บอนต่ำ สามารถอัด เป็นแผ่นได้ง่ายโดยไม่บิ่นหรือแตกร้าว สีดินจะเป็นสีเหลืองนวล หรือออกแดงเล็กน้อยไม่เป็นปัญหา ส่วนโรงงานสุกภัณฑ์ ที่ขึ้นรูป ด้วยการหล่อน้ำดิน จะเลือกใช้ดินคุณภาพดี เพื่อผสมน้ำดินหล่อ สำหรับผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ๆ ให้ถอดพิมพ์ได้ง่าย มีออกไซด์ของเหล็ก และไทเทเนียมอยู่ในปริมาณน้อย โดยสมบัติทางเคมีดินขาวมีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผาดังนี้



แหล่งดินขาวในประเทศไทยพบได้ที่จังหวัดเชียงราย ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง และนราธิวาส แต่ที่พบเป็นแหล่งใหญ่ ได้แก่ ลำปาง ระนอง และอุตรดิตถ์ (อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543) ในที่นี้ดินขาวที่ใช้นำมาจากจังหวัดนราธิวาส

ดินขาวนราธิวาสเป็นดินขาวที่เกิดจากหินแกรนิตผุ มีลักษณะเด่นเช่นเดียวกับดินขาวจังหวัดระนอง สามารถพบแหล่งดินในบริเวณที่ราบ หินแกรนิตผุที่พบในดินขาวนราธิวาสมีอายุในยุคครีเทเชียส (65.5-146 ล้านปีก่อน) มีลักษณะเป็นหินแกรนิตเนื้อหยาบปานกลาง ลักษณะการผุกร่อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการของน้ำร้อนและแก๊สร้อน ซึ่งเนื้อหินแกรนิตผุประกอบด้วยแร่ควอตซ์สีขาวใสประมาณร้อยละ 40 แร่ดินประมาณร้อยละ 60 และมีแร่มีสโคไวท์ (muscovite) น้อยกว่าร้อยละ 1 บริเวณที่มีแหล่งแร่มีชั้นเปลือกดินหนา 1 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นหินแกรนิตที่ถูกพัดพามาที่บถมมีความหนาประมาณ 3 เมตร และชั้นล่างสุดเป็นหินแกรนิตผุอยู่ที่มีความหนา 6 เมตร (กรมทรัพยากรธรณี, 2545) แหล่งดินขาวที่สำคัญคือแหล่งบ้านบาตู ตำบลจวบ อำเภोजะเอย์ จังหวัดนราธิวาส บริเวณริมทางหลวงสายนราธิวาส-สุโขทัย โดยอยู่ห่างจากจังหวัดนราธิวาสไปทางทิศใต้ 24 กิโลเมตร มีปริมาณทรัพยากรแร่ดินขาว 15 ล้านเมตริกตัน ดินขาวนราธิวาสมีคุณสมบัติเด่นคือก่อนเผาและหลังเผาอุณหภูมิสูงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ สี ไฟเบอร์กลาส (fiber glass) และใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินปั้นในอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผาที่ต้องการความขาว

จรรยา วงศ์วิวัฒนา และคณะ (2545) ศึกษาการสังเคราะห์และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite Na-A) ดินขาวจากสามแหล่ง คือ ลำปาง ระนอง และนราธิวาส พบว่าองค์ประกอบดินขาวมีผลกระทบต่อ การสังเคราะห์ นั่นคือดินขาวนราธิวาสให้มากกว่าดินขาวจากแหล่งอื่น สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิก (สุทธิชัย ทิปประสาน, 2538) ได้นำดินขาวนราธิวาสสัดส่วนร้อยละ 11.1 - 12.4 เป็นส่วนผสมเคลือบเซรามิกทำเคลือบลายคล้ายผลึก (อิติมา คุณยศยิ่ง, 2551) นำดินขาวนราธิวาสในอัตราส่วนผสมของเนื้อดินเพื่อทำเครื่องประดับเซรามิกพบว่าดินขาวนราธิวาสมีปริมาณอลูมินาไม่สูงมากแต่ดินขาวนราธิวาสจะให้ความขาวมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณเหล็กเจือปนอยู่น้อย ในอุตสาหกรรมสี (อนันต์ เขมพานิชย์กุล, 2548) ได้นำซิลิกาจากกลบผสมกับดินขาวนราธิวาสในสัดส่วน 75:25 และ 50:50 โดยมีพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ตัวยึดสำหรับเป็นสารเคลือบกระดาษพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยวิธีส่วนผสมเชิงสถิติที่สัดส่วน 50:50 ให้ความขาวของกระดาษลดลง

ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวมาตรฐานอังกฤษกับแหล่งดินขาวในประเทศไทย

องค์ประกอบทางเคมี	น้ำหนัก (ร้อยละ)				
	ดินขาว บริสุทธิ์	ดินขาว อังกฤษ	ดินขาว ลำปาง	ดินขาว ระนอง	ดินขาว นราธิวาส
SiO <sub>2</sub>	46	46-47	59.7	48.75	47.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39	37-39	27.6	34.58	35.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.4-1.0	0.84	0.71	0.38
TiO <sub>2</sub>	-	1	0.07	0.02	0.2
CaO	-	-	0.13	0.07	0.11
MgO	-	-	0.25	0.34	1.01
K <sub>2</sub> O	-	1.0-2.0	5.58	2.52	1.76
Na <sub>2</sub> O	-	-	0.15	0.4	0.39
น้ำหนักที่หายไปหลังการเผา สารอินทรีย์, น้ำและก๊าซ (Loss on ignition; LOI)	14	12.5	5.39	10.66	12.99

ที่มา : พลยุทธ์ สุขสมิติ, 2539

## 2.7 เครื่องมือและวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุประสานและจีโอพอลิเมอร์

### 2.7.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, Gs) จะใช้หลักการของ Archimedes คือ วัตถุที่จมน้ำจะแทนที่น้ำเท่ากับปริมาตรของวัตถุนั้น ดังนั้นปริมาตรของดินสามารถหาได้โดยใช้วิธีแทนที่น้ำเพื่อหาปริมาตรและน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่เมื่อเทียบกับน้ำหนักของวัตถุ (สราวุธ จริตงาม, 2548)

### 2.7.2 การหาขนาดคละของวัสดุ

การหาขนาดคละของวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ซึ่งประกอบไปด้วย ดินขาวเผา ถ้ำ ปาล์ม และกากอลูมินา ซึ่งเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก วิเคราะห์โดยใช้วิธี Laser Particle Size Analyzer (LPSA) ด้วยเครื่อง Beckman Coulter LS 230 ดังรูปที่ 2-15 ซึ่งเป็นเครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่เป็นผงแห้งและสารแขวนลอย โดยวิเคราะห์ในตัวกลางทั้งที่เป็นของเหลวและอากาศ สามารถวัดขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.04 ถึง 2000 ไมโครเมตร (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)



รูปที่ 2-15 Beckman Coulter LS 230

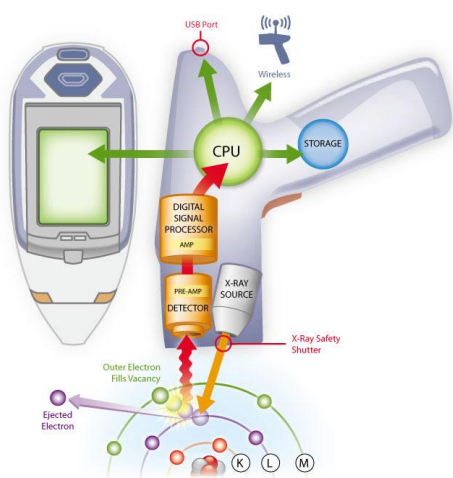
ที่มา: <http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php>

### 2.7.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence (XRF) เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ชนิดของธาตุ (Qualitative) และปริมาณธาตุ (Quantitative) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งของแข็งและของเหลวเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องมีการเตรียมผิวมาก่อนก็ได้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีความเข้มข้นน้อยๆ ประมาณ 5-500 ppm ได้ โดยชิ้นงานต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10-50 mm และสูงไม่เกิน 50 mm ผิวหน้าชิ้นงานของแข็งต้องเรียบและผ่านการขัดเงา ถ้าเป็นชนิดผงต้องหนักอย่างน้อย 1 gram ใช้เวลาวิเคราะห์แต่ละครั้งประมาณ 15 นาที

หลักการการทำงานของเครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 2-16 รังสีจากแหล่งกำเนิดภายในตัวเครื่องมือ (Primary X-ray source) จะปล่อยรังสีออกมาพุ่งเข้าชนวัตถุต่างๆ จะส่งผลให้อิเล็กตรอน

วงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในวัตถุนั้นหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร และอะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงาน ของอิเล็กตรอน โดยจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาซึ่งพลังงานนั้นจะสะท้อนกลับมายังชุด Detector ที่อยู่ภายในตัวเครื่องมือซึ่งจะตรวจวัดพลังงานที่สะท้อนกลับมา จากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังชุด Digital Signal Processor ซึ่งจะมีการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้กับ CPU ทำการประมวลผลออกมา และแสดงผ่านทางหน้าจอแสดงผล และเก็บข้อมูลดังกล่าวไว้ในหน่วยความจำภายในเครื่องมือ



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ X-Ray Fluorescence

ที่มา : [http://cleverich.com/xrf\\_work.html](http://cleverich.com/xrf_work.html)

รูปที่ 2.17 Philips PW2400

ที่มา : <http://www.sec.psu.ac.th>

สำหรับเครื่องทดสอบ XRF รุ่น Philips PW2400 ดังรูปที่ 2-17 เป็นเครื่องวิเคราะห์ธาตุตั้งแต่ Be ถึง U สามารถบอกปริมาณโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งสามารถวัดได้ตั้งแต่ระดับ ppm ถึงเปอร์เซ็นต์ โดยสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างประเภท แร่ ดิน (Clay) ทราาย โลหะ และ น้ำมัน เป็นต้น (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)

#### 2.7.4 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction : XRD) เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงคุณภาพ ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น อยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร จึงเป็นคลื่นที่มีพลังงานมาก มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่างเพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างหรือเฟสของผลึก ดังนั้น สารตัวอย่างต้องมีโครงสร้างที่มีรูปผลึกหรือโครงสร้างแบบสัณฐาน (crystalline) เช่น ดิน หิน แร่ ปูนซีเมนต์ เซรามิก โลหะ และโพลีเมอร์บางชนิด มีข้อดีคือเป็นเทคนิคที่ใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยและไม่ยุ่งยากในการเตรียม สามารถวิเคราะห์ได้รวดเร็ว สามารถ

บ่งชี้องค์ประกอบของธาตุในตัวอย่างวิเคราะห์ได้ถึงแม้จะมีสูตรเคมีเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน (polymorphs) เทคนิค XRD มีประโยชน์มากในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ โดยจำเป็นต้องควบคุมกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนให้ผลิตภัณฑ์มีสัดส่วนโครงสร้างของผลึกตามต้องการ เนื่องจากหากสารเปลี่ยนโครงสร้างจะมีผลต่อสมบัติการนำไปใช้งาน เช่น ปูนซีเมนต์ที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเผา หากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง อาจทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงของปูนเปลี่ยนไป การวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD จึงมีประโยชน์มากในการระบุโครงสร้างต่างๆ ของสารได้ (ศันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ, 2557)

ในการวิเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบ XRD รุ่น Philips X'Pert MPD ดังแสดงในรูปที่ 2-18 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์หาสารประกอบในตัวอย่าง Unit Cell Size สามารถวิเคราะห์ได้หลายประเภท เช่น หิน ดิน (Clay) ทราาย โลหะ แร่ประกอบหิน วัสดุอุตสาหกรรม เช่น ผง  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{CaCO}_3$  วัสดุสังเคราะห์ เซรามิกส์ เป็นต้น (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)



รูปที่ 2-18 Philips X'Pert MPD

ที่มา: <http://www.panalytical.com/XPert3-MRD-XL.htm>

### 2.7.5 วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี Wide-angle X-ray scattering (WAXS)

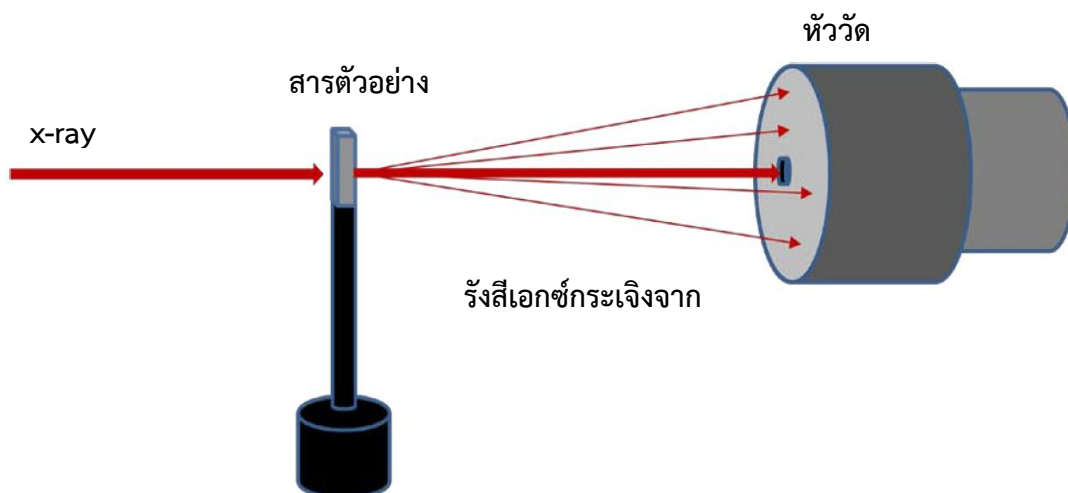
การวัด Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) สามารถศึกษาโครงสร้างผลึกได้ เช่นเดียวกับเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) โดยที่สถานีทดลอง SAXS/WAXS สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สามารถวัดได้ถึงค่ามุม  $2\theta$  ประมาณ 60 องศา หรือเทียบเท่ากับ  $d$ -spacing ประมาณ 1.6 อังสตรอม ซึ่งครอบคลุมโครงสร้างผลึกของสารกึ่งผลึก เช่น สารโพลิเมอร์ หรือสารชีวภาพ รวมทั้งผลึกสารอนินทรีย์บางส่วน ผลการวัด WAXS ที่ได้จะแสดง Bragg peak ของโครงสร้างผลึก (ซึ่งสามารถใช้ระบุโครงสร้างผลึก) และยังสามารถแสดงผลการกระเจิง x-ray จากโครงสร้างส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) จึงสามารถใช้ในการคำนวณค่าความเป็นผลึก (crystallinity) ได้ โดยการหาสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟการกระเจิงของส่วน Bragg peak ต่อพื้นที่ใต้กราฟรวม



นอกจากนั้น ที่สถานีทดลองยังมีระบบการให้ความร้อนกับสารตัวอย่างสำหรับการศึกษา crystallinity เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และมีระบบดึงตัวอย่างเพื่อศึกษา crystallinity ที่ค่า stress-strain ต่างๆ สำหรับตัวอย่างเส้นใยหรือโพลิเมอร์ได้

เทคนิค SAXS/WAXS ยังสามารถใช้ศึกษาคุณสมบัติอื่นๆ ของวัสดุประเภทต่างๆ อีกทั้งความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนระบบติดตั้งสารตัวอย่าง และความสามารถในการการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อมของสารตัวอย่างในขณะที่ทำการวัด ทำให้สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุแบบ real time ได้

สำหรับหลักการวัด SAXS และ WAXS ดังรูปที่ 2-19 ทำได้โดยการให้รังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นเดี่ยวทะลุผ่านชิ้นตัวอย่างและวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงไปที่มุมต่างๆ โดยหัววัดที่ใช้เป็นหัววัด 2 มิติ เช่น กล้อง CCD หรือ Image Plate รังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากตัวอย่าง จะทำให้เกิดภาพแผนผังการกระเจิง (scattering pattern) ซึ่งสามารถนำมาแปลความหมายเป็นลักษณะโครงสร้างโมเลกุลได้ (ศุภกร รักใหม่, 2556)



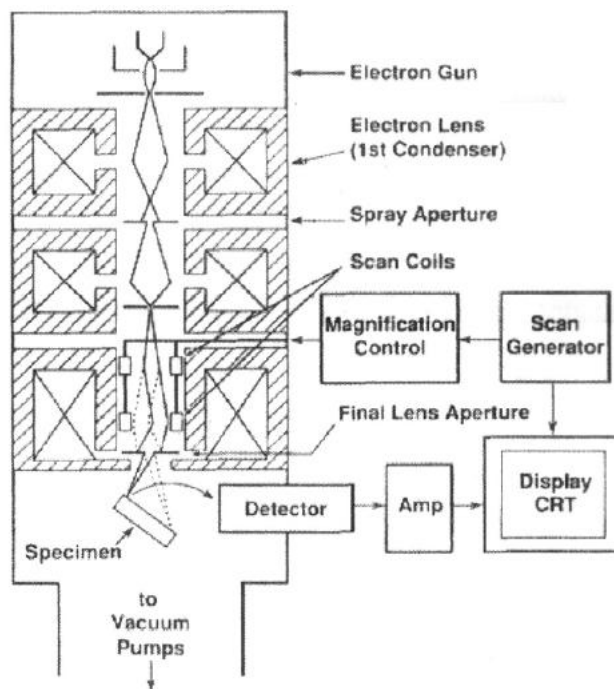
รูปที่ 2-19 หลักการวัด SAXS/WAXS  
ที่มา: ศุภกร รักใหม่, 2556

### 2.7.6 การถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

หลักการทำงานของ SEM ส่วนประกอบและหลักการทำงานของ SEM แสดงในรูปที่ 2-20 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์ที่มีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง

(Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงสุดถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ตามลักษณะการใช้งาน (แมน อมรสิทธิ์, 2534)



รูปที่ 2-20 แสดงหลักการทำงานของ SEM  
ที่มา : แมน อมรสิทธิ์, 2534

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่มีหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอต่อไป

สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี SEM นั้น ใช้เครื่องรุ่น FEI Quanta 400 (SEM-Quanta) ดังแสดงในรูปที่ 2-21 เป็นเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่าง โดยมีกำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า เหมาะสำหรับทั้งตัวอย่างทางวัสดุและชีววิทยา สามารถถ่ายภาพตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า (Non-conductive materials) มีความชื้น (Moist) และมีลักษณะเปียก (Wet) ตัวอย่างที่มีไอระเหย ตัวอย่างสดหรือ

ไม่ผ่านการเตรียมเบื้องต้นมาก่อน เช่น ใบ ดอกของพืช แมลง เป็นต้น โดยสามารถเลือกสภาวะการทดสอบได้ทั้งสภาวะสุญญากาศสูง (High vacuum, น้อยกว่า  $1.3 \times 10^{-2}$  Pa) สภาวะสุญญากาศต่ำ (Low vacuum, 10 ถึง 30 Pa) และสภาวะใกล้เคียงความดันบรรยากาศ (Environmental SEM, 130 ถึง 2600 Pa) นอกจากนี้ยังสามารถถ่ายวิดีโอบันทึกการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้าง การเคลื่อนที่ของตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่งได้ (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)



รูปที่ 2-21 FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)  
ที่มา: <http://share.psu.ac.th/blog/utai1/27722>

### 2.7.7 การวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนัก

การสกัดโลหะหนักจากจีโอพอลิเมอร์ใช้วิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 มีขั้นตอนดังนี้

(1) นำตัวอย่าง 50 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใช้ในการสกัด ควรผ่านการล้าง (rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลาย nitric acid ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำเอา nitric acid solution มาผสมกับ deionized water ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

(2) เติมน้ำสกัดลงในตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไป และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้ table shaker หรือ overhead stirrer หรือ rotary extractor ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (vigorously agitated suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

(3) นำส่วนผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบ สามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดเล็ก อาจต้อง centrifuged ที่ความเร็วรอบถึง 10,000 × G ก่อนนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

(4) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES ดังรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

ที่มา: <http://www.sec.psu.ac.th/facilities.php>

## 2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์

Davidovits (1984) ได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ โดยพบว่าจะมีการประสานกันของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่าง โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เท่ากับ 0.20-0.28, ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ต่ออลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ต่อโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) เท่ากับ 15-17.5 และโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ต่ออลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 0.80-1.20

ในเวลาต่อมา Davidovits (1994) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน หรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอไลติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ยังสามารถเติมสารต่างๆเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอพอลิเมอร์ สามารถพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในโครงสร้างยานยนต์และอากาศยาน อุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอพอลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังรับแรงอัด 70-100 เมกะพาสคาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลต์ นอกจากมีความแข็ง หดตัวน้อย ทนความเย็นและต้านทานการสึกกร่อน ทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบที่จะใช้กับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน ในด้านการคำนวณต้นทุนโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในด้านการผลิตจีโอพอลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียมส่วนประกอบและไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Palomo และคณะ (1999) ได้เสนอว่าวัสดุที่ถูกเผา (calcined) มาก่อน เช่น ถ้ำลอย ผงตะกรัน และดินขาวเผา ส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่ผ่านการเผา (non-calcined materials) ซึ่งอาจเป็นเพราะการกระตุ้นวัสดุด้วยความร้อนหรือเผา จะทำให้โครงสร้างของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพที่เป็นผลึก (crystalline) เป็นสภาพอสัณฐานซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า

Alonso และ Palomo (2001) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและสัดส่วนผสมที่มีผลต่อจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายซีเมนต์ เมื่อใช้ดินขาวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  และเมื่อทำปฏิกิริยากันอย่างเข้มข้นจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลาผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารที่ใช้กระตุ้นสูงขึ้นการก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น สัดส่วนของ Metakaolin/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ แต่พบว่าปริมาณการเกาะตัวกันจะสูงขึ้นเมื่อมี  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  สูง และการเติม  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ลงในผง Metakaolin เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10M จะได้ อลูมิโนซิลิเกตเช่นกันและก่อให้เกิด CSH gel และที่น่าสนใจมากก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 10M จะหน่วงการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ซึ่งเป็นเพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นทำให้ไอออนของสารแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากอนุหภูมิจะเป็นตัวเร่งให้ทำปฏิกิริยามากขึ้น, การใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะทำให้ปริมาณอลูมิโนซิลิเกตเพิ่มสูงขึ้น

Van Jaarsveld และคณะ (2002) ทำการวิจัยผลขององค์ประกอบและอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผา จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาการเผาดินขาวมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยได้เสนออุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวว่าควรอยู่ในช่วง 500 - 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้เถ้าลอยผสมดินขาวเผาในอัตราส่วน 86:14 จะให้จีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ridtirud และ Chindaprasirt ที่กล่าวว่า การเผาดินขาวที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสจะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น ทำให้ดินขาวเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 3 ชั่วโมง หากใช้เวลาในการเผามากขึ้นจะไม่เกิดประโยชน์ด้านการพัฒนากำลังมากนัก แต่หากเวลาการเผาต่ำกว่า 3 ชั่วโมง พบว่า เวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดสารประกอบของซิลิกาและอลูมินาอยู่ในรูปอสัณฐานทำให้เกิดปฏิกิริยากับต่างได้น้อย ซึ่งส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง

Hardjito และคณะ (2004) ยังศึกษาพบว่า จีโอพอลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโนซิลิเกตโพลีเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียม ในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว จากผลการศึกษาพบว่า จีโอพอลิเมอร์ เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะ จีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแล้วยังมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย แต่ยังมีเรื่องต้องศึกษาเพิ่มเติม เพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์อีกมาก

ในปี 2006 Chindaprasirt และคณะ ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ได้ทำการควบคุมการไหลแม่ (Flow) ร้อยละ  $110 \pm 5$  ถึง  $135 \pm 5$  ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลแม่จะดีไม่ดีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำการศึกษายู่ระหว่าง 10-65 เมกะพาสคาล โดยสัดส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 0.67-1 และศึกษาพบว่าแม่ใช้โซเดียม

ไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นจาก 10M ไปเป็น 20M ก็ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์และพบว่าหลังผสมจีโอพอลิเมอร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้องก่อนให้ความร้อนด้วยการอบซึ่งอุณหภูมิที่ใช้บ่มที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส และควรบ่มไม่เกิน 2 วัน จะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงมาก และจากการศึกษาด้วยกล้องขยายอนุภาคของเถ้านหินพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้านหินเป็นทรงกลมถึงแม้ว่าขณะผสมจีโอพอลิเมอร์จะเหนียวข้นจนต้องอาศัยการเติมน้ำเข้าไปร้อยละ 2-8 จะช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นได้ และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) ช่วยให้เทแบบได้ดีก็จริงแต่จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดต่ำกว่าการใช้น้ำ จากการศึกษาครั้งนี้สรุปว่าค่าการไหลแผ่ ให้ผลดีถ้าใช้อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  อยู่ที่ 0.67-1 การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10M ถึง 20M ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม ที่ 60-75 องศาเซลเซียส ถ้ามักกว่า 75 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายในเพราะโครงสร้างทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์ มีโมเลกุลของน้ำ อยู่ภายในถ้าโดนความร้อนมาก โครงสร้างจะเปลี่ยนไป แม้ว่าจะรักษาอุณหภูมิการบ่มคงที่ ที่ 60 องศาเซลเซียส ให้นาน โดยหวังว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สุดท้ายการใช้สารลดน้ำ เพื่อช่วยในการผสมและเข้าแบบพบว่าใช้น้ำธรรมดาจะดีกว่า เพราะการใช้สารลดน้ำจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

Chareerat และคณะ (2008) ได้ทดลองใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอยในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาเถ้าแกลบที่มีต่อองค์ประกอบทางแร่และกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าแกลบที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน (450, 600, 700 °C) พบว่า ที่อุณหภูมิของการเผาต่ำ (450 °C) เถ้าแกลบมีองค์ประกอบเป็นเฟสอสัณฐานของซิลิกาพร้อมด้วยคริสโตบาลไลท์ ปริมาณเล็กน้อย ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 600 และ 700 °C โครงสร้างของซิลิกาแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างแบบไม่มีรูปผลึกแน่นอนหรืออสัณฐานมากขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการแตกตัวและสลายตัวของสารอินทรีย์ที่สมบูรณ์มากกว่าเนื่องจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ออกไปมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมของการนำพาสารอินทรีย์ออกไปจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ให้กำลังรับแรงอัด 41.0 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าการใช้เถ้าแกลบที่อุณหภูมิอื่น

Pankhet K. และ Rattanasak U., (2010) ได้ใช้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตและโซเดียมซิลิเกตเพื่อเป็นสารผสม เพิ่มในจีโอพอลิเมอร์เพสต์และมอร์ตาร์จากเถ้านหิน ผลการศึกษาพบว่า สารประกอบซิลิเกตทั้งสองไม่มี ผลชัดเจนต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ในช่วงต้น และสารดังกล่าวมีผลให้เร่งการก่อตัวในระยะปลาย นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ผสมสารละลายซิลิเกต พบว่ามีบางส่วนของผิวหน้าจีโอพอลิเมอร์

เกิดเป็นเจลรูปเข็ม ซึ่งอาจเป็น ลักษณะของเอททริงโกท์ หรือ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) โดยสารดังกล่าวนี้จะมีการ ขยายตัวและส่งผลให้เกิดการแตกร้าวใน มอร์ต้าร์หรือ คอนกรีตได้ ดังนั้นการทำลายเนื่องจากสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟตนอกจากจะมีผล ของแมกนีเซียมซัลเฟต ที่เกิดจากแมกนีเซียมไอออนทำปฏิกิริยากับซิลิกาตั้งที่กล่าวมาแล้ว อาจมีผล ของสารละลายซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยากับ สารประกอบประเภทแคลเซียมในเก้าถ่านหินได้ผลผลิตเป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือเอททริงโกท์ที่ส่งผลให้ กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอีกด้วย

Wichian C. และ Keeratikor C. (2012) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และอัตราส่วน  $\text{Si}/\text{Al}$  ต่อ กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเก้าถ่านหิน ที่ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) เตรียมจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจาก เก้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) กลุ่มแรกใช้ความ เข้มข้น ของสารละลาย  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16, และ 18 โมลาร์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเก้าถ่านหินมีการพัฒนา กำลังอัดตามระยะเวลาโดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 28 วันแรก สูงกว่าอัตราการเพิ่มในช่วง 28 ถึง 180 วัน อย่างชัดเจน กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตจากเก้าถ่านหิน มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ที่มากขึ้นถึง 16 โมลาร์ และกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็น 18 โมลาร์ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย  $\text{NaOH}$  ที่มีความเข้มข้น ต่ำลง สามารถต้านทานการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีขึ้น การใช้ สารละลาย  $\text{NaOH}$  ที่มีความเข้มข้นสูงมาก ส่งผลให้สามารถชะเอาซิลิกาและอลูมินาจากเก้าถ่านหินได้ มาก และส่งผลให้แมกนีเซียมไอออนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกา ได้มากขึ้น ทำให้เกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ( $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ มีความแข็งแรงต่ำ และ ทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเกิด ความพรุนมากขึ้น จึงทำให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้สารละลาย  $\text{NaOH}$  ที่มีเข้มข้นสูง มีกำลังอัดหลังสัมผัสกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำลงอย่างชัดเจน

Peter Duxson and John L. Provis (2008) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการ สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าสารเคมีผสมเพิ่มที่มี  $\text{MgO}$  เป็นองค์ประกอบจะเกิดปฏิกิริยาได้ เร็วกว่า  $\text{CaO}$  เพราะมีโมเลกุลที่เล็กกว่าหาก  $\text{MgO}$  ทำปฏิกิริยาพร้อมกับ  $\text{CaO}$  สามารถต่อโครงสร้างที่ เป็นผลึกได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างมีความยาวขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า  $\text{MgO}$  ที่สามารถทำ ปฏิกิริยาได้ดีเมื่อมีการรวมตัวกับน้ำ จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานซึ่งสามารถใช้เป็นสารผสมเพิ่มใน งานจีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์ได้ โดย  $\text{Mg}^{2+}$  ที่เติมลงไปนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวปรับสมดุลแก่อลูมิเนียม เตตระไฮดรอล และการเติม  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเพิ่มของ ไอออนบวกในการสังเคราะห์สารตั้งต้น ทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับต่างได้ดีขึ้นอีกด้วย



ภาวพันธ์ นิสสกา และ ปิติวัฒน์ วัฒนชัย (2554) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แมกนีเซียมเป็นสารผสมเพิ่มในมอร์ตาร์เพื่อใช้ในการซ่อมแซมแบบปะ โดยมอร์ตาร์ที่ใช้ในการซ่อมแซมแบบปะเป็นมอร์ตาร์ที่สามารถซ่อมแซมได้ในแนวตั้ง และในแนวราบใต้ท้องพื้น เพราะมอร์ตาร์ชนิดนี้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกับคอนกรีตเดิม อีกทั้งยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ที่เหมาะสำหรับใช้ในการซ่อมแซม ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่มีแมกนีเซียมและฟอสเฟตผสมอยู่ด้วยเพื่อนำมาใช้ซ่อมแซมโดยวิธีการปะ ในการศึกษาได้ศึกษาถึงกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์ที่นำมาซ่อมแซมนี้กับคอนกรีตเดิม ศึกษาถึงค่าการหดตัวใน 2 สถานะนั้นคือ สถานะที่ไม่มีมีการบ่มเลยและสถานะที่มีการบ่ม ศึกษาถึงกำลังรับแรงอัด รวมถึงเวลาในการก่อตัวและความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ชนิดนี้ โดยได้เปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนผสมในการผสมแมกนีเซียมออกไซด์เป็น 10%, 20% และ 30% ของการแทนที่น้ำหนักซีเมนต์ และได้เปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนผสมแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต (M/P) เป็น 4, 8, 12 โดยผลการทดลองได้แสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มมากขึ้นของแมกนีเซียมออกไซด์จะทำให้ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยว และกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง กับค่าการหดตัวเมื่อเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นด้วย

สำหรับค่าแตกต่างกันของเปอร์เซ็นต์ในการผสมแมกนีเซียมลงไปและค่าแตกต่างกันของอัตราส่วนผสมแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต ทำให้คุณสมบัติต่างๆ ในแต่ละส่วนผสมมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นในผลการทดลองแล้วนั้น จึงสามารถสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

(1) แมกนีเซียมฟอสเฟตมอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวได้ดีกับคอนกรีตเดิม ทำให้แมกนีเซียมฟอสเฟตมอร์ตาร์มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นมอร์ตาร์สำหรับการซ่อมแซมแบบปะได้ดีเพราะแรงยึดเหนี่ยวที่ดีจะไม่มีการหลุดลอกของมอร์ตาร์ที่นำมาซ่อมแซมกับคอนกรีตเดิม ซึ่งค่าที่มีกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดและเหมาะสมที่จะนำมาใช้ ควรเป็นค่าการผสมที่ 10% และที่ M/P เท่ากับ 8 โดยได้ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่าสูง

(2) ค่าการหดตัวของแมกนีเซียมฟอสเฟตมอร์ตาร์ชนิดนี้ แสดงให้เห็นถึงค่าการหดตัวที่น้อยหรือเรียกว่ามีความคงตัวของปริมาตรได้ดี โดยเฉพาะในสถานะที่มีการบ่ม แต่เมื่ออยู่ในสถานะที่ไม่มีมีการบ่มนั้น จึงทำให้มอร์ตาร์ชนิดนี้มีการหดตัว

(3) กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ชนิดนี้ก็ก็เป็นสิ่งที่จำเป็นและควรพิจารณาด้วยเช่นกัน เพราะถ้ามอร์ตาร์ที่นำไปซ่อมชนิดนี้มีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตที่นำไปซ่อมแซมแล้วนั้น จะทำให้การซ่อมแซมนั้นไม่มีประสิทธิภาพที่ดีเพียงพอ และจากการศึกษานี้ทำให้ทราบถึงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ชนิดนี้ ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่จะนำไปซ่อมแซมโดยเลือกที่จะใช้ส่วนผสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดได้สูง โดยค่า M/P เท่ากับ 12 แสดงถึงค่ากำลังอัดที่สูง

ปิยะพงศ์ ต๊ะคำ และ สืบพงศ์ สุจา (2553) ได้ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ สำหรับงานซ่อมแซมแบบปะโดยใช้แมกนีเซียมฟอสเฟต เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของ ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์กับอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ต่อโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ที่จะนำมาทำเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการซ่อมแซมแบบปะ รวมทั้งค่าคุณสมบัติการรับแรงอัด การรับแรงยึดเหนี่ยว ค่าการยึดหดตัวรวมทั้งความสามารถในการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมแมกนีเซียมฟอสเฟต

โดยขั้นตอนในการทำวิจัยมีดังนี้ กำหนดค่า ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ที่ 10, 20 และ 30% กำหนดอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ต่อโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตเท่ากับ 4, 8 และ 12 นำก้อนตัวอย่างมาทดสอบหาค่ากำลังอัด กำลังยึดเหนี่ยว การยึดหดตัว ค่าการไหลแผ่ และระยะเวลาในการก่อตัว ที่ระยะเวลาของการบ่มที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ นำข้อมูลไปพล็อตกราฟค่าต่างๆกับระยะเวลาของการบ่มแล้วเลือกกำหนดค่า ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์กับอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ต่อโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ให้คุณสมบัติต่างๆสมดุลกัน แล้วนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติทั้งหมดอีกครั้ง เพื่อหาจุดที่มีความสมดุลกันมากที่สุดระหว่าง ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์กับอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ต่อโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตผลการทดสอบได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ที่ 10% กับอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ต่อโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตเท่ากับ 8 โดยให้คุณสมบัติดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วันมีค่าเท่ากับ 21.17, 35.49, 39.96, 40.74, 54.55 MPa ตามลำดับ
2. กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวที่ระยะเวลาการบ่มที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วันมีค่าเท่ากับ 0.96, 0.84, 0.80 1.11, 2.01 MPa ตามลำดับ
3. ค่าการยึด-หดตัวแบบแห้งที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วันมีค่าอยู่ที่ 798  $\mu\epsilon$
4. ระยะเวลาการก่อตัวอยู่ในช่วง 30-60 นาที
5. ค่าการไหลแผ่อยู่ที่ 125.39 %

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เป็นการทดลองผสมกากขี้เถ้าและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้กากขี้เถ้า เถ้าปาล์มและดินขาว ที่ผ่านการแยกขนาดคละในสัดส่วนที่ต่างกันในแต่ละชุดการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์
- 2) ทบสอบคุณสมบัติทางกายภาพ การหดตัวแบบแห้ง ค่าความต้านทานกำลังรับแรงอัด
- 3) ทดสอบการชะละลายของธาตุอาหาร ประกอบด้วย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม และแมกนีเซียม
- 4) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการและภาคสนามในพื้นที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์โดยใช้กากขี้เถ้าจากโรงงานในจังหวัดสงขลาและเถ้าปาล์มจากโรงงานน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี

#### 3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) กากขี้เถ้าจากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดสงขลา
- 2) วัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้แก่ เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในจังหวัดสุราษฎร์ธานี และดินขาวจากจังหวัดนครราชสีมาซึ่งผ่านการเผาในเตาเผาควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิในการเผา 750 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ดตาม มอก. 150-2518 ผสมน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์
- 4) สารละลายโซเดียมซิลิเกตซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{Na}_2\text{O} = 15.32\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 32.87\%$  และ น้ำ = 51.81% โดยน้ำหนัก

##### 3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 1) การวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ
- 2) การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ โดยใช้เครื่องมือ Particle Size Analyzer ซึ่งสามารถหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคได้
- 3) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ
- 4) การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

- 5) การศึกษาภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)
- 6) วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี Wide-Angle X-ray Scattering ของวัสดุประสาน

### 3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์

#### 1) การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของก้อนมอร์ตาร์ ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 138/C138M (method of test for unit weight of mortars)

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการสังเกตลักษณะภายนอกของจีโอโพลิเมอร์คือ ลักษณะพื้นผิวภายนอก ขนาด น้ำหนัก และความหนาแน่นแห้งซึ่งใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัมเป็นอุปกรณ์การวิเคราะห์ และเปรียบเทียบระหว่างจีโอโพลิเมอร์ที่มีกากซีเมนต์เป็นส่วนผสมกับจีโอโพลิเมอร์ธรรมดาที่ไม่มีการผสมกากซีเมนต์

#### 2) การทดสอบคุณสมบัติการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของ จีโอโพลิเมอร์ ได้เป็นอย่างดีทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 (method of test for compressive strength of hydraulic cement mortars) ( using 2-in. or [50-mm] cube specimens)

ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุของอเมริกัน (American Society for Testing and Materials) หรือ ASTM C495-07 โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด แบบเกลียวหมุนโยกด้วยมือ (Proving Ring) ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) หาได้จากสมการที่ 3-1

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3-1)$$

โดย  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดประลัย มีหน่วยเป็น  $\text{kg/cm}^2$

$P$  คือ แรงอัด มีหน่วยเป็น  $\text{kg}$

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2$

### 3) การวิเคราะห์ค่าการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านการอบแล้ว นำมาวิเคราะห์ขนาดโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ เป็นอุปกรณ์ในการวัด เพื่อวิเคราะห์หาค่าร้อยละการหดตัวรวมเชิงเส้น (Total Linear Shrinkage; T.L.S) มีวิธีการวิเคราะห์ คือ วัดขนาด กว้าง×ยาว×สูง ของก้อน จีโอพอลิเมอร์หลังขึ้นรูป เป็นค่า  $L_p$  อบแห้งทดสอบและบันทึกค่าเป็น  $L_f$  และสุดท้าย คำนวณหาค่าร้อยละการหดตัวรวมเชิงเส้นรวมถึงค่าร้อยละการหดตัวรวมเชิงปริมาตร (Total Volumetric Shrinkage; T.V.S) ตามสมการ (3-2) และ (3-3)

$$T.L.S = \left[ \frac{(L_p - L_f)}{L_p} \right] \times 100 \quad (3-2)$$

$$T.V.S = \left[ \frac{(V_p - V_f)}{V_p} \right] \times 100 \quad (2-3)$$

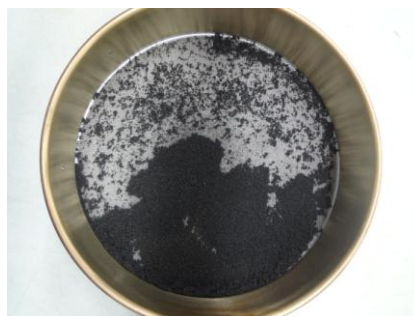
โดย  $V_p$  คือ ปริมาตรของตัวอย่างหลังขึ้นรูป  
 $V_f$  คือ ปริมาตรของตัวอย่างหลังการอบ

#### 3.2.4 วิธีดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

- 1) นำกากซีเมนต์ เถ้าปาล์ม และดินขาวเผาที่ 750 °C มาทำการบดด้วยเครื่องบด ซัดสี (Abrasion Machine) ดังรูปที่ 3-1 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาแยกขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-1 เครื่องบด Abrasion Machine



รูปที่ 3-2 วัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100

- 2) ใช้ น้ำสะอาด เพื่อเป็นตัวทำละลาย สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้ได้ความเข้มข้นที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ ดังรูปที่ 3-3 และใช้อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 0.5 , 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  มีลักษณะดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-3 สารละลาย NaOH

รูปที่ 3-4 สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 

- 3) ทำการผสมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยนำวัสดุพอลิซัลฟอนธรรมชาติ และกากซีเมนต์ใส่ในภาตผสมตามลำดับใช้เวลาผสม 1-3 นาที (ทดลองทำในสัดส่วนที่ต่างกััน) จากนั้นเติม NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ดังรูปที่ 3-5 แล้วกวนผสมให้ส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูป 3-6

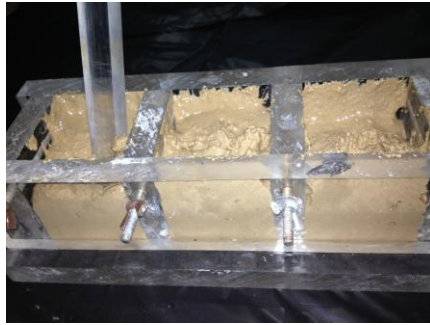


รูปที่ 3-5 ผสมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์



รูปที่ 3-6 การกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

- 4) นำจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันเทใส่ในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  cm ดังรูปที่ 3-7 และห่อแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติกใสห่ออาหาร ดังรูปที่ 3-8 เพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายต่างในขณะบ่มตัวอย่างด้วยความร้อนทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเข้าตู้อบ



รูปที่ 3-7 การเทตัวอย่างใส่แบบหล่อ



รูปที่ 3-8 การหุ้มแบบหล่อด้วยพลาสติกใส

- 5) ใช้การกระตุ้นด้วยความร้อนโดยการนำเข้าตู้อบดังรูปที่ 3-9 เพื่อเร่งปฏิกิริยาการก่อตัว โดยอุณหภูมิในการบ่ม 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนจะนำออกจากตู้อบ



รูปที่ 3-9 การบ่มจีโอพอลิเมอร์ในตู้อบ

- 6) ถอดแบบหล่อ แล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องทดสอบเป็นระยะเวลา 7 วัน จากนั้นวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ดังรูปที่ 3-10 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตาม ASTM C 109



รูปที่ 3-10 การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน

### 3.2.5 การทดสอบโครงสร้างขนาดเล็กของจีโอพอลิเมอร์

- 1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ของจีโอพอลิเมอร์
- 2) การวิเคราะห์ความเป็นผลึกและส่วนประกอบแร่ธาตุต่างๆ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ของจีโอพอลิเมอร์
- 3) การศึกษาภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)
- 4) วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี Wide-Angle X-ray Scattering ของจีโอพอลิเมอร์
- 5) ทดสอบการทนความร้อนของจีโอพอลิเมอร์ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C

### 3.2.6 การทดสอบการชะละลายเบื้องต้น

การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำน้ำชะละลายมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)



### 3.3 ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้มีตัวแปรสำหรับการหาปฏิภาคของส่วนผสมทั้งสิ้น 5 ตัวแปร โดยใช้สัญลักษณ์ คือ

XXMK XXPA XXLW - XXM (XX)

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| ตัวเลข “XX” หน้า MK หมายถึง | อัตราการส่วนของดินขาวเผา 750 °C ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วนร้อยละ 80 และ 100                      |
| ตัวเลข “XX” หน้า PA หมายถึง | อัตราการส่วนการแทนที่ดินขาวเผาที่ 750 °C ด้วยเถ้าปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 |
| ตัวเลข “XX” หน้า LW หมายถึง | อัตราการส่วนการแทนที่ดินขาวเผาที่ 750 °C ด้วยกากขี้เถ้าที่ใช้ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20              |
| ตัวเลข “XX” หน้า M หมายถึง  | ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ 5, 10 และ 15 โมลาร์                      |
| ตัวเลข “XX” ใน ( ) หมายถึง  | อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก                     |

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น “80MK10PA10LW-5M(0.5)” หมายถึง จีโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนดินขาวเผาที่ 750 °C:เถ้าปาล์ม:กากขี้เถ้า เท่ากับ 80:10:10 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก

### 3.4 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตรผสมมีสัดส่วนผสมโดยโมลดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ปริมาณสัดส่วนผสมโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 0.5$ )

ตัวอย่าง	Mass				Mole			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
100MK0PA0LW-5M(0.5)	29.23	17.77	10.40	33.68	0.49	0.17	0.17	1.87
100MK0PA0LW-10M(0.5)	29.23	17.77	14.30	29.79	0.49	0.17	0.23	1.65
100MK0PA0LW-15M(0.5)	29.23	17.77	18.60	25.49	0.49	0.17	0.30	1.41
80MK20PA0LW-5M(0.5)	29.15	14.28	10.40	33.68	0.49	0.14	0.17	1.87
80MK20PA0LW-10M(0.5)	29.15	14.28	14.30	29.79	0.49	0.14	0.23	1.65
80MK20PA0LW-15M(0.5)	29.15	14.28	18.60	25.49	0.49	0.14	0.30	1.41
80MK0PA20LW-5M(0.5)	31.86	14.24	15.94	42.91	0.53	0.14	0.26	2.38
80MK0PA20LW-10M(0.5)	31.86	14.24	19.83	39.02	0.53	0.14	0.32	2.17
80MK0PA20LW-15M(0.5)	31.86	14.24	24.13	34.72	0.53	0.14	0.39	1.93
80MK10PA10LW-5M(0.5)	32.48	14.26	14.68	40.81	0.54	0.14	0.24	2.27
80MK10PA10LW-10M(0.5)	32.48	14.26	18.58	36.92	0.54	0.14	0.30	2.05
80MK10PA10LW-15M(0.5)	32.48	14.26	22.87	32.62	0.54	0.14	0.37	1.81

ตารางที่ 3-1 ปริมาณสัดส่วนผสมโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1.5$ )

ตัวอย่าง	Mass				Mole			
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$
100MK0PA0LW-5M(1.5)	33.17	17.77	11.22	28.92	0.55	0.17	0.18	1.61
100MK0PA0LW-10M(1.5)	33.17	17.77	13.65	26.49	0.55	0.17	0.22	1.47
100MK0PA0LW-15M(1.5)	33.17	17.77	16.34	23.80	0.55	0.17	0.26	1.32
80MK20PA0LW-5M(1.5)	33.10	14.28	11.22	28.92	0.55	0.14	0.18	1.61
80MK20PA0LW-10M(1.5)	33.10	14.28	16.34	23.80	0.55	0.14	0.26	1.32
80MK20PA0LW-15M(1.5)	33.10	14.28	16.34	23.80	0.55	0.14	0.26	1.32
80MK0PA20LW-5M(1.5)	31.86	14.24	13.74	33.12	0.53	0.14	0.22	1.84
80MK0PA20LW-10M(1.5)	31.86	14.24	16.17	30.68	0.53	0.14	0.26	1.70
80MK0PA20LW-15M(1.5)	31.86	14.24	18.86	28.00	0.53	0.14	0.30	1.55
80MK10PA10LW-5M(1.5)	37.41	14.26	16.25	37.31	0.62	0.14	0.26	2.07
80MK10PA10LW-10M(1.5)	37.41	14.26	18.69	34.88	0.62	0.14	0.30	1.94
80MK10PA10LW-15M(1.5)	37.41	14.26	21.37	32.19	0.62	0.14	0.34	1.79

ตารางที่ 3-1 ปริมาณสัดส่วนผสมโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 2.5$ )

ตัวอย่าง	Mass				Mole			
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$
100MK0PA0LW-5M(2.5)	35.06	17.77	11.61	26.64	0.58	0.17	0.19	1.48
100MK0PA0LW-10M(2.5)	35.06	17.77	13.35	24.90	0.58	0.17	0.22	1.38
100MK0PA0LW-15M(2.5)	35.06	17.77	15.26	22.99	0.58	0.17	0.25	1.28
80MK20PA0LW-5M(2.5)	34.99	14.28	11.61	26.64	0.58	0.14	0.19	1.48
80MK20PA0LW-10M(2.5)	34.99	14.28	13.35	24.90	0.58	0.14	0.22	1.38
80MK20PA0LW-15M(2.5)	34.99	14.28	15.26	22.99	0.58	0.14	0.25	1.28
80MK0PA20LW-5M(2.5)	37.61	14.24	17.08	35.77	0.63	0.14	0.28	1.99
80MK0PA20LW-10M(2.5)	37.61	14.24	18.82	34.03	0.63	0.14	0.30	1.89
80MK0PA20LW-15M(2.5)	37.61	14.24	20.73	32.12	0.63	0.14	0.33	1.78
80MK10PA10LW-5M(2.5)	37.57	14.26	15.32	32.83	0.63	0.14	0.25	1.82
80MK10PA10LW-10M(2.5)	37.57	14.26	17.06	31.09	0.63	0.14	0.28	1.73
80MK10PA10LW-15M(2.5)	37.57	14.26	18.97	29.18	0.63	0.14	0.31	1.62

### 3.5 สัดส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์

สัดส่วนทางเคมีที่ทำการศึกษได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), อัตราส่วนโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ), โซเดียมออกไซด์ต่ออลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), โมเลกุลของน้ำต่อโซเดียมออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ) และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์ (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 0.5$ )

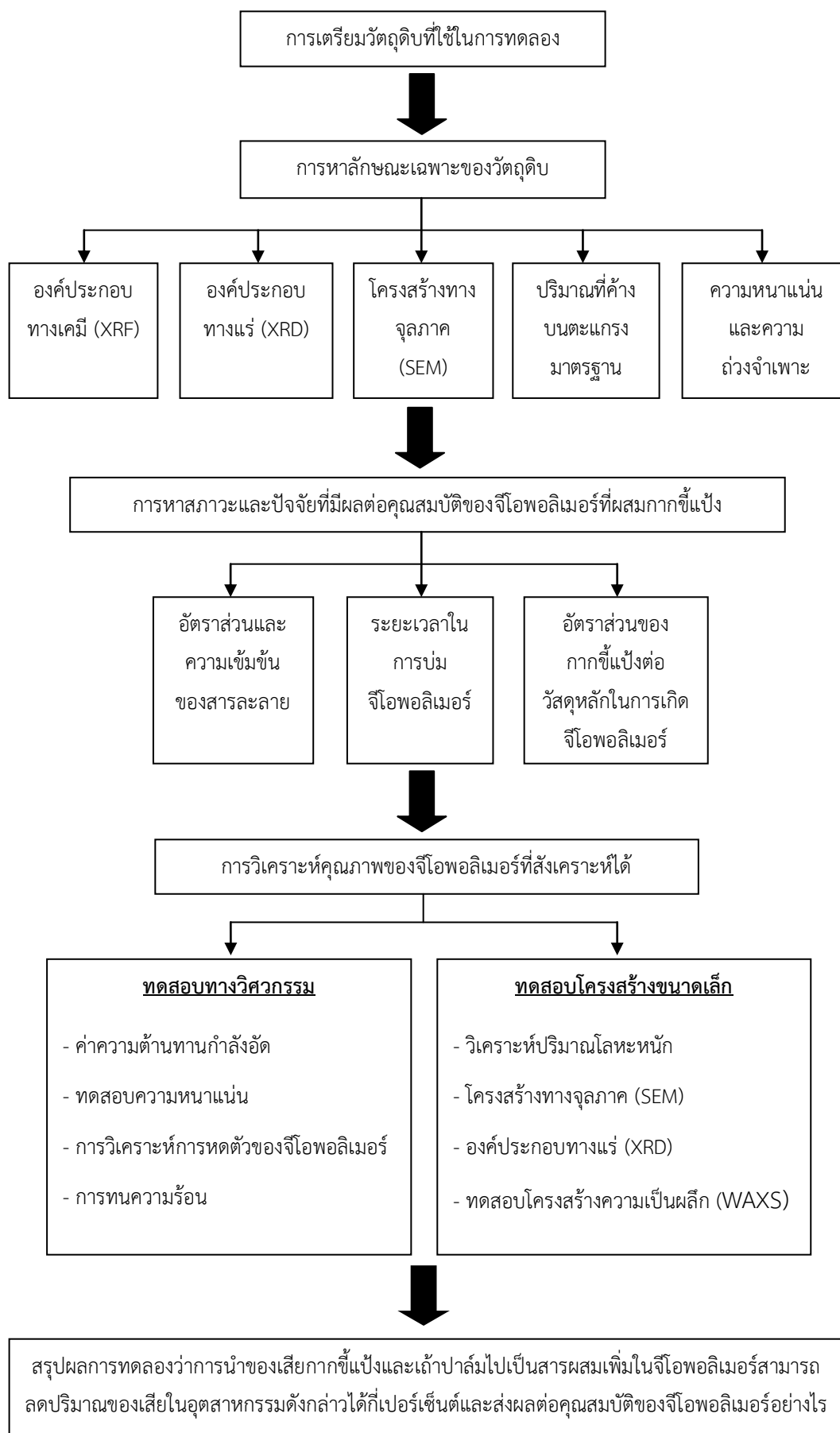
ตัวอย่าง	$W_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$	$W_{\text{NaOH}}$	$\text{SiO}_2$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$ / $\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}$ / $\text{Na}_2\text{O}$	W/B
100MK0PA0LW-5M(0.5)	0.08	0.26	2.79	0.35	0.96	11.14	0.51
100MK0PA0LW-10M(0.5)	0.08	0.26	2.79	0.47	1.32	7.17	0.51
100MK0PA0LW-15M(0.5)	0.08	0.26	2.79	0.62	1.72	4.72	0.51
80MK20PA0LW-5M(0.5)	0.08	0.26	3.46	0.35	1.20	11.14	0.51
80MK20PA0LW-10M(0.5)	0.08	0.26	3.46	0.48	1.65	7.17	0.51
80MK20PA0LW-15M(0.5)	0.08	0.26	3.46	0.62	2.14	4.72	0.51
80MK0PA20LW-5M(0.5)	0.17	0.26	3.80	0.48	1.84	9.26	0.54
80MK0PA20LW-10M(0.5)	0.17	0.26	3.80	0.60	2.29	6.77	0.54
80MK0PA20LW-15M(0.5)	0.17	0.26	3.80	0.73	2.79	4.95	0.54
80MK10PA10LW-5M(0.5)	0.15	0.26	3.86	0.44	1.69	9.56	0.54
80MK10PA10LW-10M(0.5)	0.15	0.26	3.86	0.55	2.14	6.84	0.54
80MK10PA10LW-15M(0.5)	0.15	0.26	3.86	0.68	2.64	4.91	0.54

ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์ (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1.5$ )

ตัวอย่าง	$W_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$	$W_{\text{NaOH}}$	$\text{SiO}_2$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$ / $\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}$ / $\text{Na}_2\text{O}$	W/B
100MK0PA0LW-5M(1.5)	0.13	0.16	3.17	0.33	1.04	8.87	0.41
100MK0PA0LW-10M(1.5)	0.13	0.16	3.17	0.40	1.26	6.67	0.41
100MK0PA0LW-15M(1.5)	0.13	0.16	3.17	0.48	1.51	5.01	0.41
80MK20PA0LW-5M(1.5)	0.13	0.16	3.93	0.33	1.29	8.87	0.41
80MK20PA0LW-10M(1.5)	0.13	0.16	3.93	0.40	1.57	6.67	0.41
80MK20PA0LW-15M(1.5)	0.13	0.16	3.93	0.48	1.88	5.01	0.41
80MK0PA20LW-5M(1.5)	0.17	0.16	3.80	0.42	1.59	8.29	0.43
80MK0PA20LW-10M(1.5)	0.17	0.16	3.80	0.49	1.87	6.53	0.43
80MK0PA20LW-15M(1.5)	0.17	0.16	3.80	0.57	2.18	5.11	0.43
80MK10PA10LW-5M(1.5)	0.21	0.16	4.45	0.42	1.87	7.90	0.45
80MK10PA10LW-10M(1.5)	0.21	0.16	4.45	0.48	2.16	6.42	0.45
80MK10PA10LW-15M(1.5)	0.21	0.16	4.45	0.55	2.47	5.18	0.45

ตารางที่ 3-2 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์ (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 2.5$ )

ตัวอย่าง	$W_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$	$W_{\text{NaOH}}$	$\text{SiO}_2$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$ / $\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$ / $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}$ / $\text{Na}_2\text{O}$	W/B
100MK0PA0LW-5M(2.5)	0.15	0.12	3.35	0.32	1.07	7.89	0.36
100MK0PA0LW-10M(2.5)	0.15	0.12	3.35	0.37	1.24	6.42	0.36
100MK0PA0LW-15M(2.5)	0.15	0.12	3.35	0.42	1.41	5.18	0.36
80MK20PA0LW-5M(2.5)	0.15	0.12	4.16	0.32	1.34	7.89	0.36
80MK20PA0LW-10M(2.5)	0.15	0.12	4.16	0.37	1.54	6.42	0.36
80MK20PA0LW-15M(2.5)	0.15	0.12	4.16	0.42	1.76	5.18	0.36
80MK0PA20LW-5M(2.5)	0.24	0.12	4.48	0.44	1.97	7.20	0.42
80MK0PA20LW-10M(2.5)	0.24	0.12	4.48	0.49	2.17	6.22	0.42
80MK0PA20LW-15M(2.5)	0.24	0.12	4.48	0.53	2.40	5.33	0.42
80MK10PA10LW-5M(2.5)	0.21	0.12	4.47	0.40	1.77	7.37	0.40
80MK10PA10LW-10M(2.5)	0.21	0.12	4.47	0.44	1.97	6.27	0.40
80MK10PA10LW-15M(2.5)	0.21	0.12	4.47	0.49	2.19	5.29	0.40



รูปที่ 3-11 แผนผังการทำวิจัย



## บทที่ 4 ผลการวิจัย

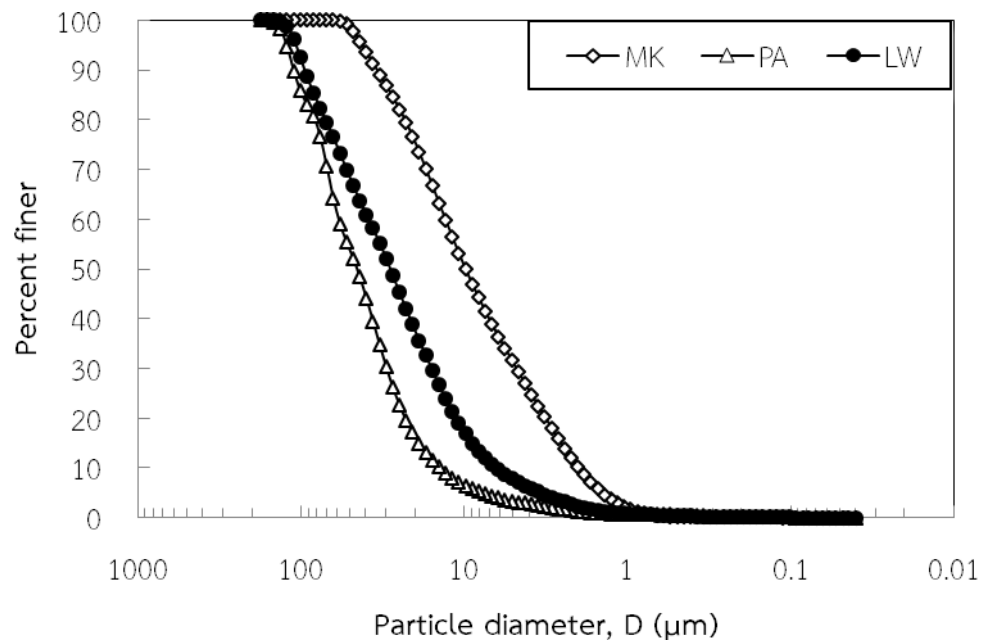
### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาได้ผ่านการบดให้มีความละเอียดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วยกากซีเมนต์บดแห้งซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24-48 ชั่วโมง เถ้าปาล์มซึ่งผ่านการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส และดินขาวนราธิวาสและดินขาวนราธิวาสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยผลการทดสอบขนาดอนุภาคและความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-1

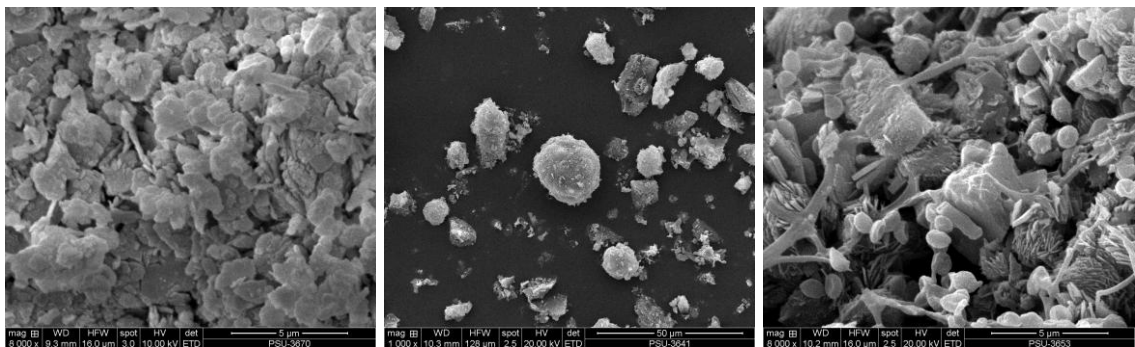
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคและความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุตั้งต้น	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	ความถ่วงจำเพาะ
กากซีเมนต์บดแห้ง	40	1.85
เถ้าปาล์ม	54	2.04
ดินขาวเผาที่ 750 °C	14	2.44

โดยการกระจายตัวของอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 4-1 นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กของวัสดุประสานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงในรูปที่ 4-2 โดยรูปที่ 4-2ก) เป็นโครงสร้างของดินขาวมีลักษณะเป็นแผ่น รูปที่ 4-2ข) เป็นโครงสร้างของเถ้าปาล์มมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และ 4-2ค) เป็นโครงสร้างของกากซีเมนต์มีลักษณะเป็นเส้นใย



รูปที่ 4-1 การกระจายขนาดอนุภาคของดินขาว (MK) เถ้าปาล์ม (PA) และกากซีเมนต์ (LW)



ก)

ข)

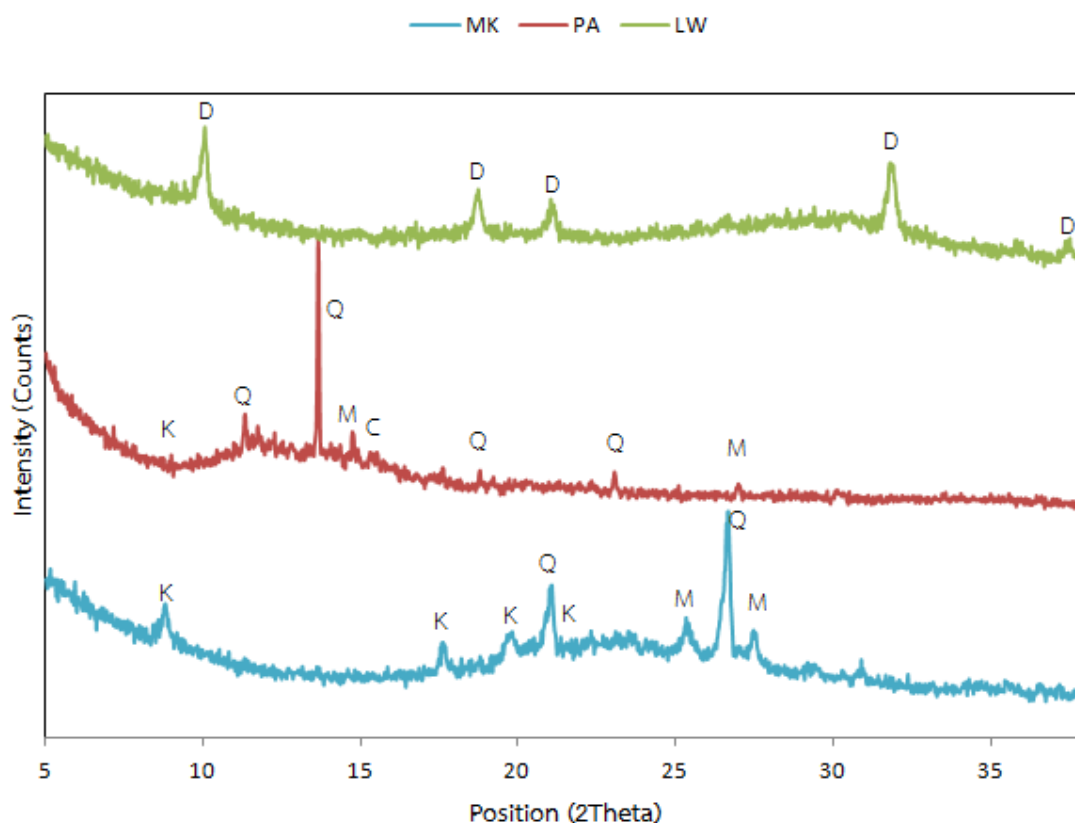
ค)

รูปที่ 4-2 โครงสร้างขนาดเล็กของวัสดุประสาน ก) ดินขาว ข) เถ้าปาล์ม ค) กากซีเมนต์

#### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของเถ้าปาล์ม

จากการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประสานด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction-XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4-3 พบว่าเถ้าปาล์มที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 800 °C และดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของซิลิกาอสัณฐาน ทำให้องค์ประกอบทางแร่เปลี่ยนไป จากเดิมมีแร่

ดินชนิดเคโอลิไนท์ (Kaolinite) หรือแร่ดินเหนียว เปลี่ยนเป็น ควอตซ์ (Quartz ;  $\text{SiO}_2$ ) มียอด (Peak) ฐานกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐาน (amorphous) เป็นส่วนใหญ่ มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา มียอด (Peak) แหลมของผลึกไม่มาก ไม่มีมุมระบุนิตแร่ปรากฏขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่าถ้าปาล์ม น้ำมันนี้มีวิวัฒนาการ (phase) ที่จะทำจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี ในส่วนของกากซีแพ่งพบผลึกของ  $\text{NH}_4\text{MgPO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ , Dittmarite รวมอยู่ด้วย



รูปที่ 4-3 X-ray diffraction pattern ดินขาวเผา ถ้ำปาล์ม และกากซีแพ่ง

นอกจากนี้ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีวัสดุประสานด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer ดังตารางที่ 4-1

#### 4.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของกากซีแพ่ง

ผลการศึกษาร่องรอยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นโดยใช้วิธี X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 46.62 และ 35.55 ถ้ำปาล์มมีองค์ประกอบหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 45.88 และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 0.64 ตามลำดับ

ในส่วนของกากซีเมนต์นั้นนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24-48 ชั่วโมง เพื่อเอาน้ำ เซรั่ม และแอมโมเนียที่เหลืออยู่ในกากซีเมนต์ออก บดกากซีเมนต์อบแห้งให้เป็นผงละเอียด จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีที่มีอยู่ในกากซีเมนต์อบแห้ง พบว่ากากซีเมนต์อบแห้งมีปริมาณธาตุอาหารดังแสดงในตารางที่ 4-2 ซึ่งมี MgO มากถึงร้อยละ 14.86 จากการศึกษาพบว่าสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและลดค่าการหดตัวให้กับจีโอพอลิเมอร์ได้

ตารางที่ 4-2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินขาว เถ้าปาล์ม และกากซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี	ความเข้มข้นของดินขาว (ร้อยละ)	ความเข้มข้นของเถ้าปาล์ม (ร้อยละ)	ความเข้มข้นของกากซีเมนต์ (ร้อยละ)
MgO	-	2.93	14.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.55	0.64	0.22
SiO <sub>2</sub>	46.62	45.88	0.65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	6.13	39.88
K <sub>2</sub> O	2.23	10.35	2.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.19	1.90	0.28
TiO <sub>2</sub>	1.55	-	-
ZrO <sub>2</sub>	0.06	-	-
ZnO	-	-	1.05
Rb <sub>2</sub> O	0.09	0.17	0.07
SO <sub>3</sub>	-	2.74	0.44
CaO	-	14.78	0.61
MnO	-	0.27	-
CuO	-	0.08	-
SrO	-	0.16	-
Cl	-	2.46	-
LOI	12.72	11.52	-

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มพบว่ามืองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 45.88 มีผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 48.42 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 50 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ร้อยละ ( $\text{SO}_3$ ) 2.74 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 5 และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 11.52 เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีแล้วจึงพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพ C เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618

ส่วนดินขาวมืองค์ประกอบหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 46.62 มีผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 83.40 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) มากที่สุด ร้อยละ 9.79 เมื่อทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีแล้วจึงพบว่าดินขาวเป็นวัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 4-3

**ตารางที่ 4-3** แสดงคุณสมบัติของดินขาวและเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับมาตรฐานสารปอซโซลาน

คุณสมบัติทางเคมี (ร้อยละ)	สารปอซโซลาน			เถ้าปาล์ม	ดินขาว
	N	F	C		
ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ น้อยที่สุด	70	70	50	48.42	83.40
$\text{SO}_3$ มากที่สุด	4	5	5	2.74	-
MgO	5	5	5	2.93	-
$\text{Na}_2\text{O}$ มากที่สุด	1.5	1.5	1.5	-	-
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) มากที่สุด	10	6	6	11.52	9.79

เมื่อ Class F คือ เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิค  
 Class C คือ เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิค และวัสดุประสานในซีเมนต์  
 Class N คือ ปอซโซลานธรรมชาติที่ถูกเผาหรือมีลักษณะหยาบ ประกอบด้วย : Diatomaceous Earths (diatomite) Opaline Cherts และดินดาน Tuffs และเถ้าภูเขาไฟ หรือพิมิไซท์ ดินเผา รวมทั้งดินขาวและดินดาน (ASTM C 618, 1991)

#### 4.1.4 องค์ประกอบทางกายภาพ-เคมีของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การวิจัยครั้งนี้ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด โดยผสมเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 18 โมลาร์ องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์

NaOH (Molarity)	Volume 1000 ml.		Percent by Weight	
	NaOH (gram)	H <sub>2</sub> O (gram)	NaOH	H <sub>2</sub> O
5M	200	890	18.35	81.65
10M	400	916	30.40	69.60
15M	600	765	43.96	56.04

#### 4.1.5 องค์ประกอบทางกายภาพ-เคมีของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>OSiO<sub>2</sub>)

ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4-5

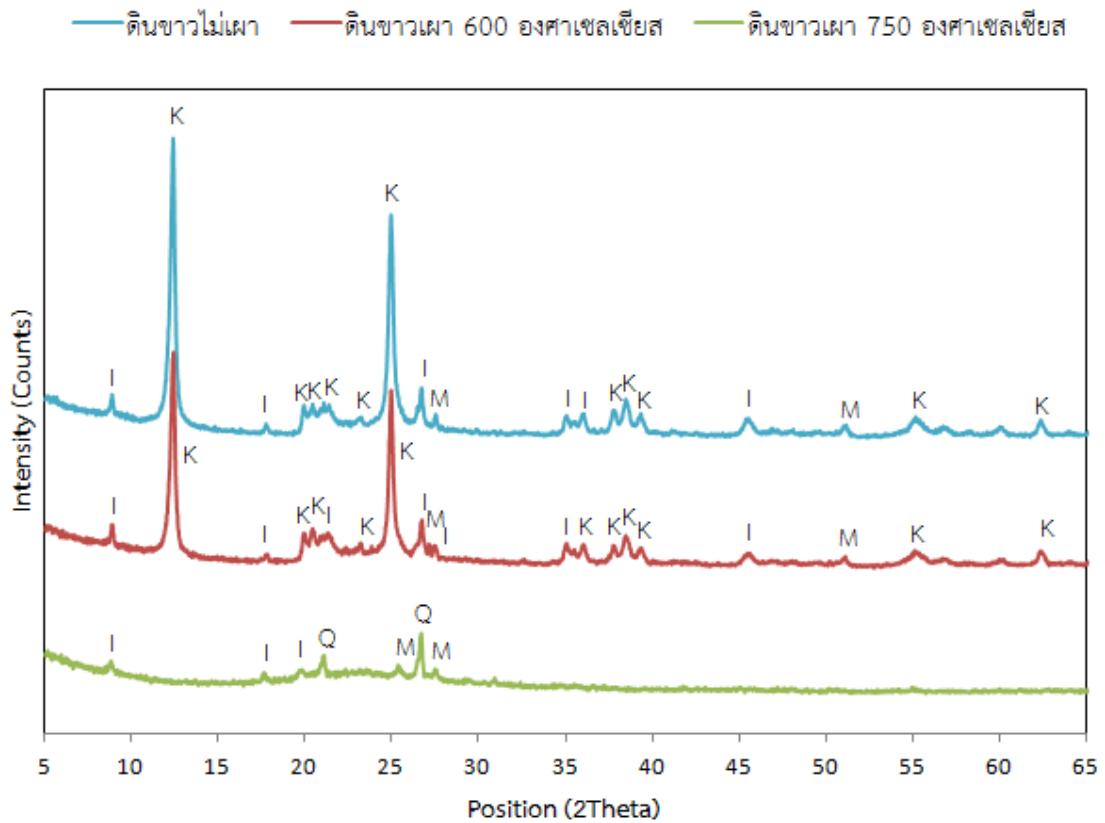
ตารางที่ 4-5 องค์ประกอบทางเคมีของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

องค์ประกอบทางเคมี	ความเข้มข้นของ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ร้อยละ)
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	25.16
Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	32.87
H <sub>2</sub> O	41.97

## 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

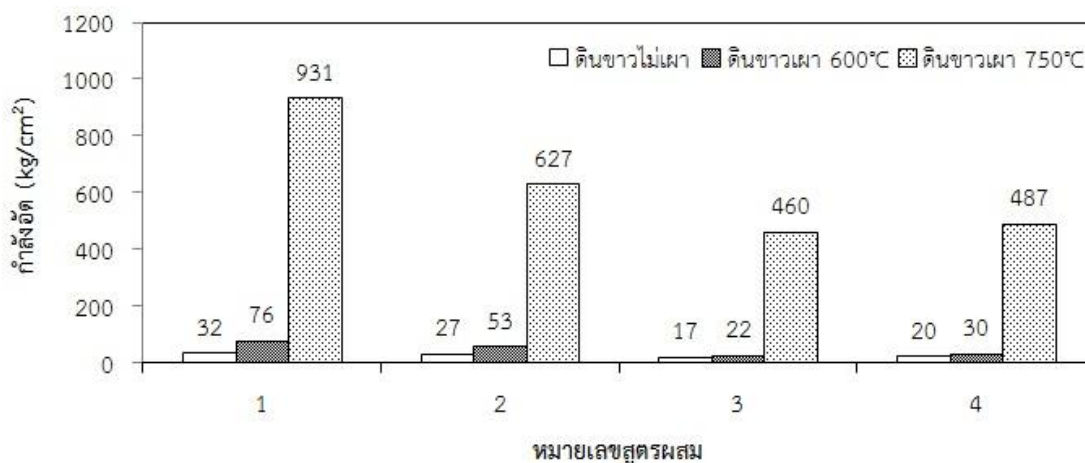
### 4.2.1 ผลกระทบจากการเผาดินขาวในการเตรียมสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

วัตถุดิบที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอตโซลานมีซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไร้เซชันคือ ดินขาวจากจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffraction โดยผลการทดสอบดินขาวที่ไม่ผ่านการเผาเปรียบเทียบกับดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C และ 750 °C ดังแสดงในรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ของดินขาวที่ไม่ผ่านการเผาเปรียบเทียบกับดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C และ 750°C  
(Q = Quartz, I = Illite, M = Microcline, K = Kaolinite)

จากการศึกษาพบว่า การเผาดินขาวที่ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของซิลิกาออสัญฐาน ทำให้องค์ประกอบทางแร่เปลี่ยนไป จากเดิมมีแร่ดินชนิดเคโอลิไนท์ (Kaolinite) หรือแร่ดินเหนียว เปลี่ยนเป็น ควอตซ์ (Quartz ;  $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งมีความเป็นอสัญฐานมากกว่าดินขาวที่ไม่ผ่านการเผา ทำให้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินขาวดังกล่าวผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4-5



\* รูปที่ 4-5 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตรผสม ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยสังเคราะห์จากการใช้ดินขาวไม่เผาเปรียบเทียบกับการใช้ดินขาวเผาที่ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

\* หมายเลขตัวอย่าง: (1) 100MK0PA0LW-15M(2.5), (2) 80MK20PA0LW-15M(2.5), (3) 80MK20PA0LW-15M(2.5) และ (4) 80MK10PA10LW-15M(2.5)

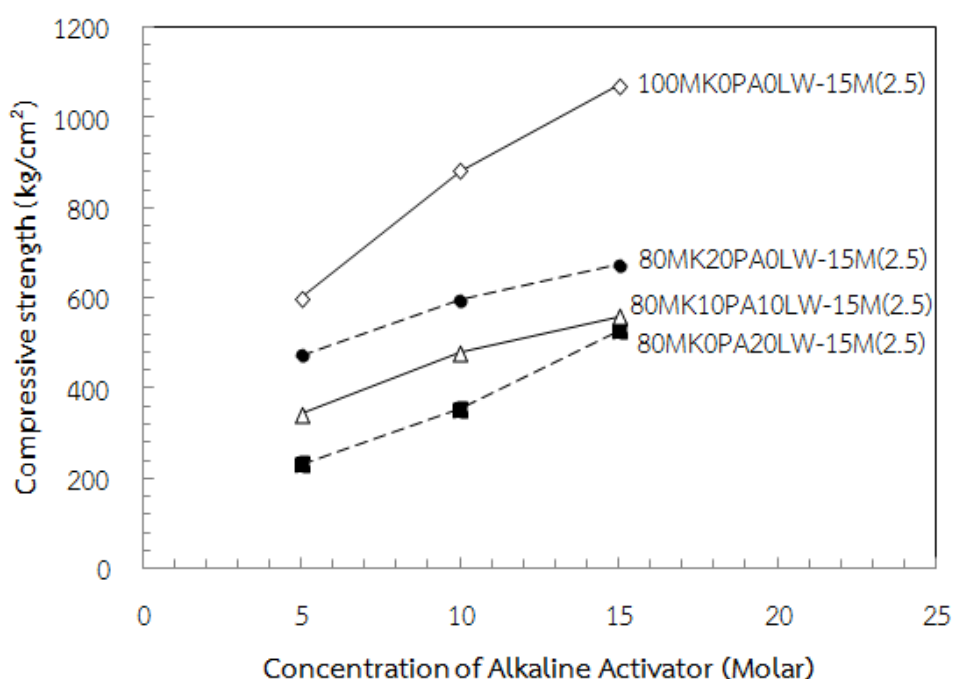
จากผลการทดลองในรูปที่ 4-5 พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าการใช้ดินขาวไม่เผาและสูงกว่าการใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เนื่องจากดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 650 ถึง 850 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดสารอินทรีย์และไล่ความชื้นที่อยู่ในดินขาว และทำให้  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซึ่งมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น เหมาะแก่การนำมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Neville ในปี ค.ศ. 1996 และ Murat et al. ในปี ค.ศ. 1983 พบว่าดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 650 ถึง 850 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอสโซลานซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิในช่วงอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 3 ชั่วโมง หากใช้เวลานานในการเผามากขึ้นจะไม่เกิดประโยชน์ด้านการพัฒนากำลังมากนัก และทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน แต่หากเวลาการเผาต่ำกว่า 3 ชั่วโมง พบว่าเวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินาในรูปอสัณฐาน ทำให้เกิดปฏิกิริยากับด่างได้น้อย (Van Jaarsveld และคณะ, 2002) ซึ่งส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง จากผลการทดลองดังกล่าวจึงเลือกใช้ดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ในทุกชุดการทดลองต่อไป

#### 4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ



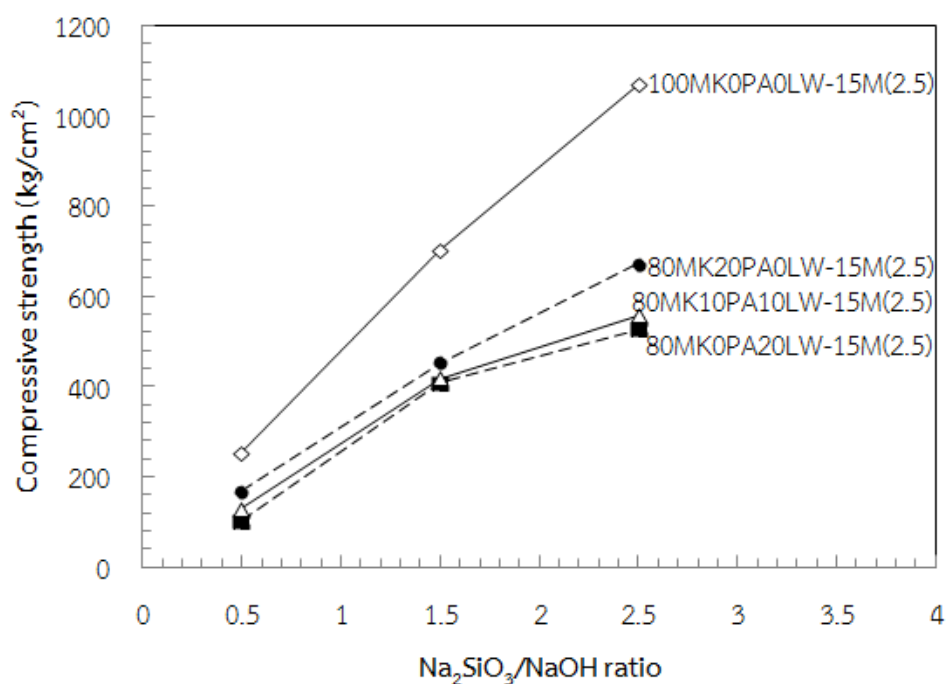
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่มีความเข้มข้นสูงสามารถละลายซิลิกาและอลูมินาได้มากขึ้น ทำให้ต่างสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุประสานได้ดีขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงตามไปด้วย การทดลองได้ทำการศึกษาสูตรผสมโดยใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ ตามลำดับ และไม่ได้ศึกษาต่อที่ความเข้มข้นมากกว่า 15 โมลาร์ เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงมาก ทำให้มีความชื้นเหนียวมาก และเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็วเกินไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์เพลสจับตัวเป็นก้อนไม่สามารถหล่อจีโอพอลิเมอร์ตามแบบหล่อได้ อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ มีผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4-6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wichian C. และ Keeratikorn C. ในปี ค.ศ. 2012 ที่พบว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 16 โมลาร์ มีผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งเป็นผลจากปริมาณของ NaOH ที่มีความเข้มข้นมากเกินไป และเหลือจากการทำปฏิกิริยา เมื่อ NaOH สัมผัสกับความชื้นจะมีลักษณะลื่น ทำให้การยึดเกาะของจีโอพอลิเมอร์เจอกับวัสดุประสานลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน

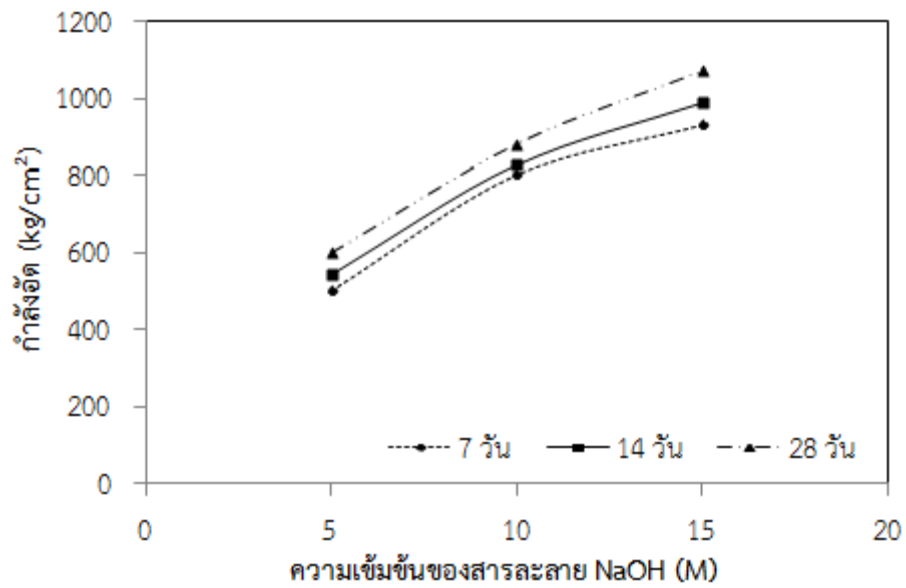
นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2.5 ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงที่สุดในทุกสัดส่วนผสม อย่างไรก็ตามในกรณีที่ใช้อัตราส่วนของ

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.5 พบว่ามีกำลังรับแรงอัดต่ำ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวใช้ปริมาณ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ในปริมาณน้อย ทำให้มีความชื้นเหลวมาก ส่งผลให้ปริมาณอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมากทำให้จีโอพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยาได้ไม่ดี แข็งตัวช้า ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าสัดส่วนผสมอื่น



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน

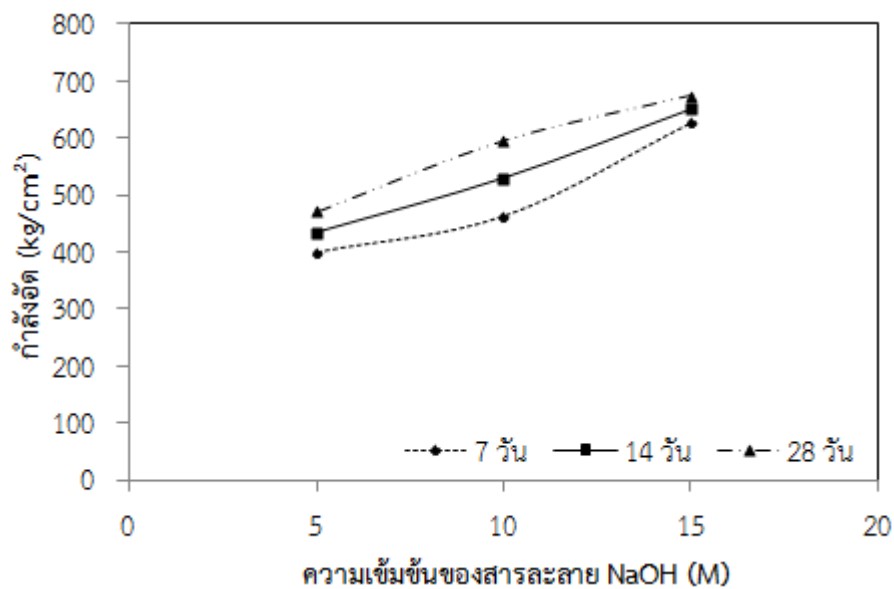
การศึกษาในครั้งนี้พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลา โดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดในช่วง 28 วันในทุกสัดส่วนผสม ดังรูปที่ 4-8 โดยอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Chindaprasit et al. ในปี ค.ศ. 2009 ที่พบว่ามีกำลังรับแรงอัดตามระยะเวลา โดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดในช่วง 28 วัน และหลังจาก 28 วัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของ  $\text{NaOH}$  ที่เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในช่วง 28 วัน และในสัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวกับของเสียกากชีปะังที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  1.5 และ 2.5 นั้นมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาการบ่มระหว่างวันที่ 14-28 วัน ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-8 ก) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

สูตรดินขาวอย่างเดียว 100MKOPA0LW-XM(2.5)

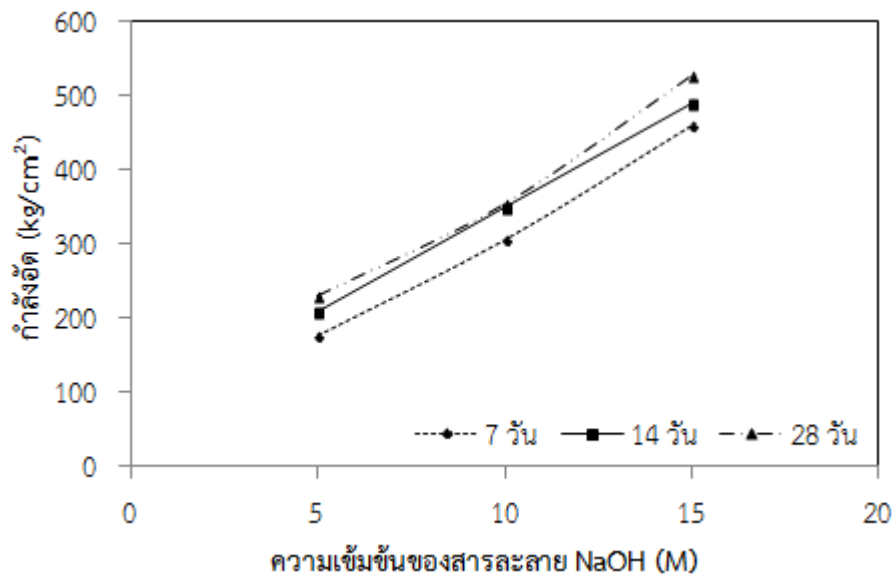
\* หมายเหตุ X แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์  
ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4-8 ข) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

สูตรดินขาว: เถ้าปาล์ม 80MK20PA0LW-XM(2.5)

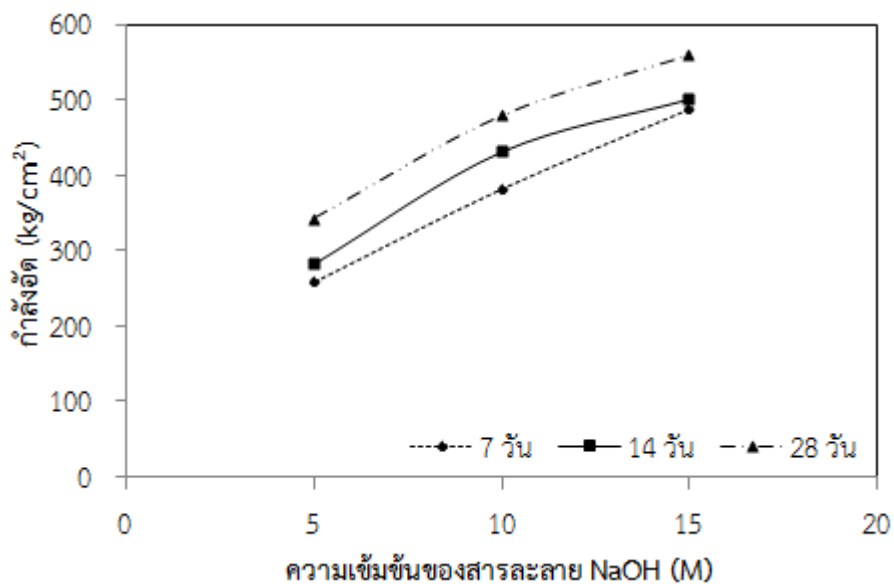
\* หมายเหตุ X แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์  
ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4-8 ค) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

สูตรดินขาว: กากซีเมนต์ 80MK0PA20LW- $\chi$ M(2.5)

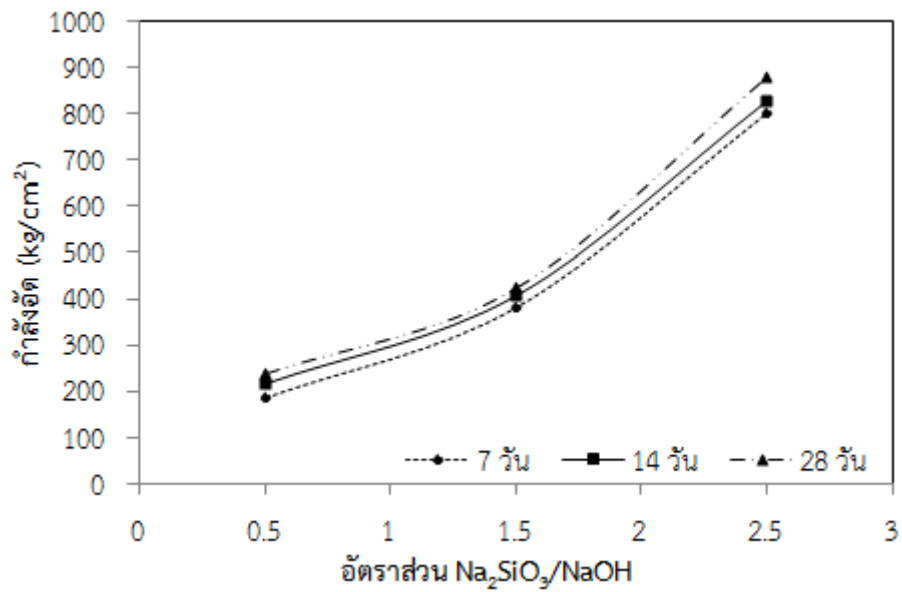
\* หมายเหตุ  $\chi$  แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์  
ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4-8 ง) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

สูตรดินขาว: เถ้าปลาล์ม: กากซีเมนต์ 80MK10PA10LW- $\chi$ M(2.5)

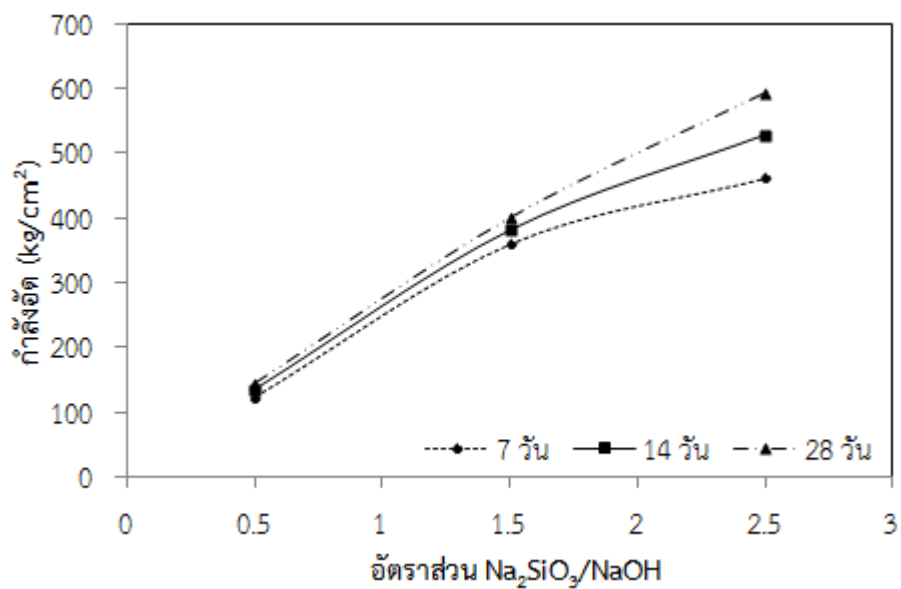
\* หมายเหตุ  $\chi$  แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์  
ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4-9 ก) ผลการทดสอบก้ำลิ่งรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

สูตรดินขาวอย่างเดียวน 100MKOPA0LW-15M(X)

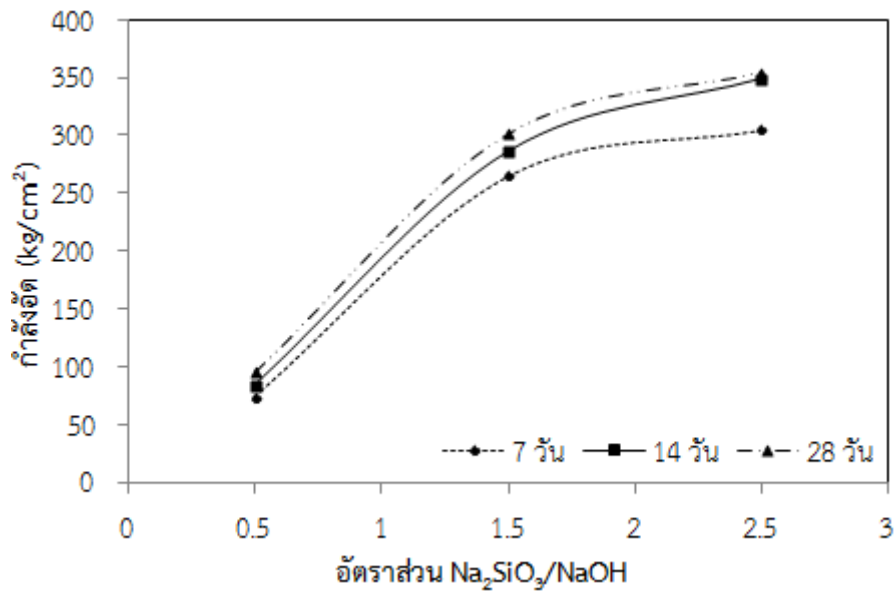
\* หมายเหตุ X แปรผันตามอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่ 0.5, 1.5 และ 2.5  
ทดสอบก้ำลิ่งอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4-9 ข) ผลการทดสอบก้ำลิ่งรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

สูตรดินขาว: เถ้าปาล์ม 80MK20PA0LW-15M(X)

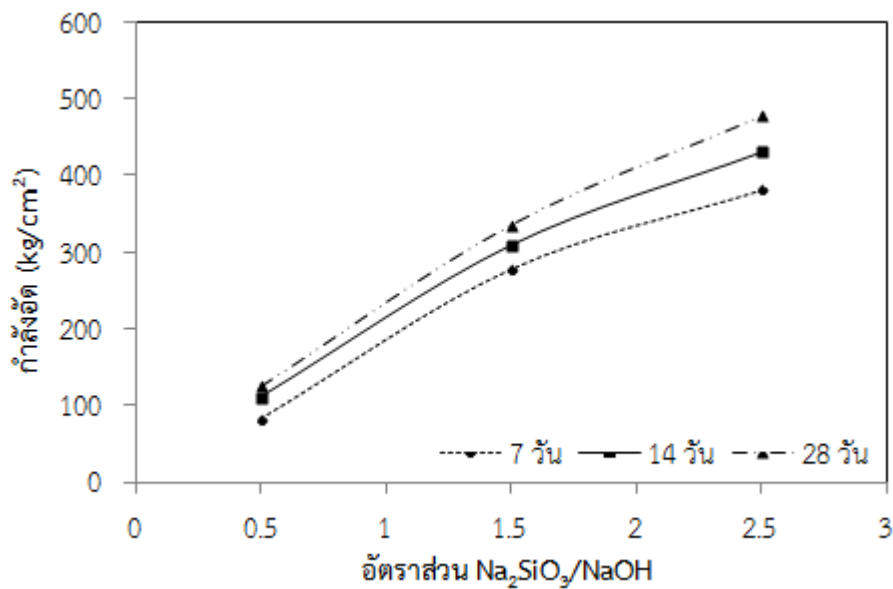
\* หมายเหตุ X แปรผันตามอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่ 0.5, 1.5 และ 2.5  
ทดสอบก้ำลิ่งอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 4-9 ค) ผลการทดสอบก้ำลิ่งรับแรงอัดของอีโพอลิเมอร์

สูตรดินขาว: กากซีแพ็ง 80MK0PA20LW-15M(X)

\* หมายเหตุ X แปรผันตามอัตราส่วนของ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ที่ 0.5, 1.5 และ 2.5  
ทดสอบก้ำลิ่งอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน

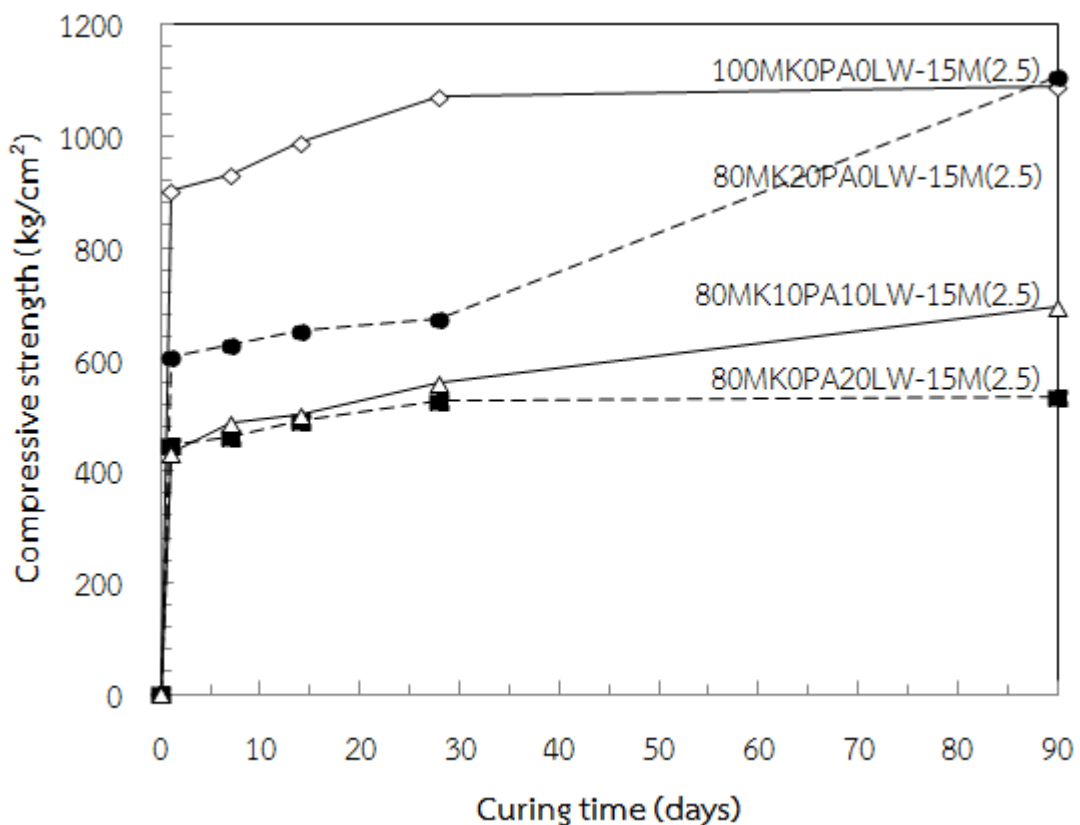


รูปที่ 4-9 ง) ผลการทดสอบก้ำลิ่งรับแรงอัดของอีโพอลิเมอร์

สูตรดินขาว: เถ้าปาล์ม: กากซีแพ็ง 80MK20PA0LW-15M(X)

\* หมายเหตุ X แปรผันตามอัตราส่วนของ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ที่ 0.5, 1.5 และ 2.5  
ทดสอบก้ำลิ่งอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน

การศึกษาในครั้งนี้พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังอัดตามระยะเวลาโดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 28 วันในทุกสัดส่วนผสม ดังรูปที่ 4-10 โดยอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงอายุ 1 ถึง 90 วัน ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Chindaprasirt et al. ในปี ค.ศ. 2009 และ Hardjito et al. ในปี ค.ศ. 2003 ที่พบว่ามีกำลังอัดตามระยะเวลาโดยมีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในช่วง 28 วันในทุกสัดส่วนผสม นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ 90 วัน การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมดินขาวและเถ้าปาล์มมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่สัดส่วนผสมอื่นเริ่มมีค่ากำลังอัดคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มต้องใช้ระยะเวลานานพอสมควร จึงจะทำให้กำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่นานขึ้น (دنุพล ตันโยภาส และคณะ, 2551)



รูปที่ 4-10 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7, 14, 28 และ 90 วัน

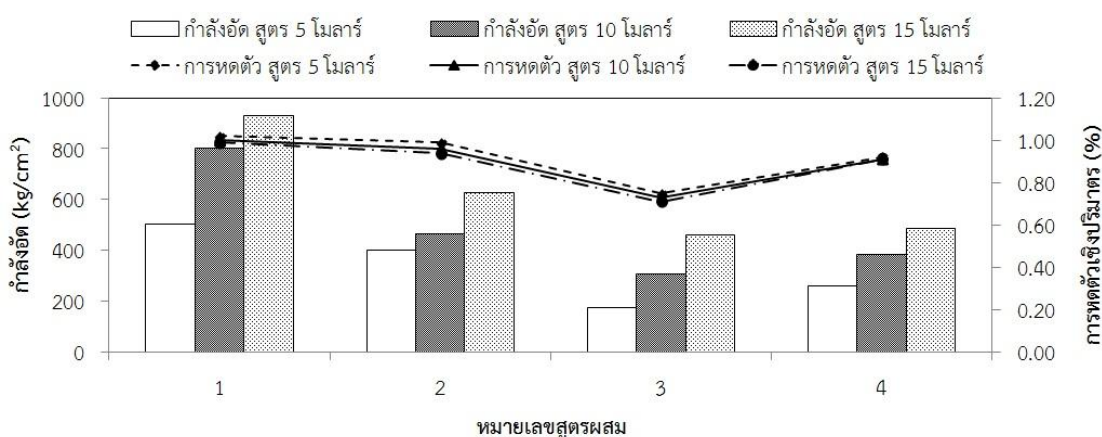
หมายเหตุ 15M = ความเข้มข้นของ NaOH, (2.5) = อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

MK = ดินขาวเผา, PA = เถ้าปาล์ม, LW = กากชีแป้ง

และตัวเลขหน้าตัวแปรคือ %ของแต่ละสัดส่วนผสม

### 4.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของ จีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสี้ยกากชี้แบ่ง

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร และความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสี้ยกากชี้แบ่ง ผลการทดสอบในทุกสัดส่วนผสมมีค่าดังแสดงในรูปที่ 4-11 และ 4-12

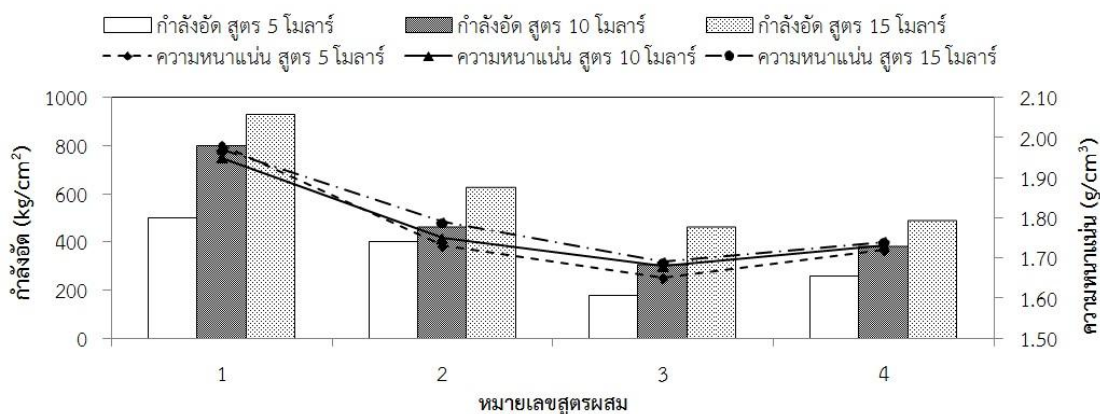


รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน

\* หมายเลขตัวอย่าง: (1) 100MKOPA0LW- $\underline{X}$ M(2.5), (2) 80MK20PA0LW- $\underline{X}$ M(2.5), (3) 80MK20PA0LW- $\underline{X}$ M(2.5) และ (4) 80MK10PA10LW- $\underline{X}$ M(2.5)

หมายเหตุ  $\underline{X}$  แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน





**รูปที่ 4-12** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ป่มในอากาศ 7 วัน

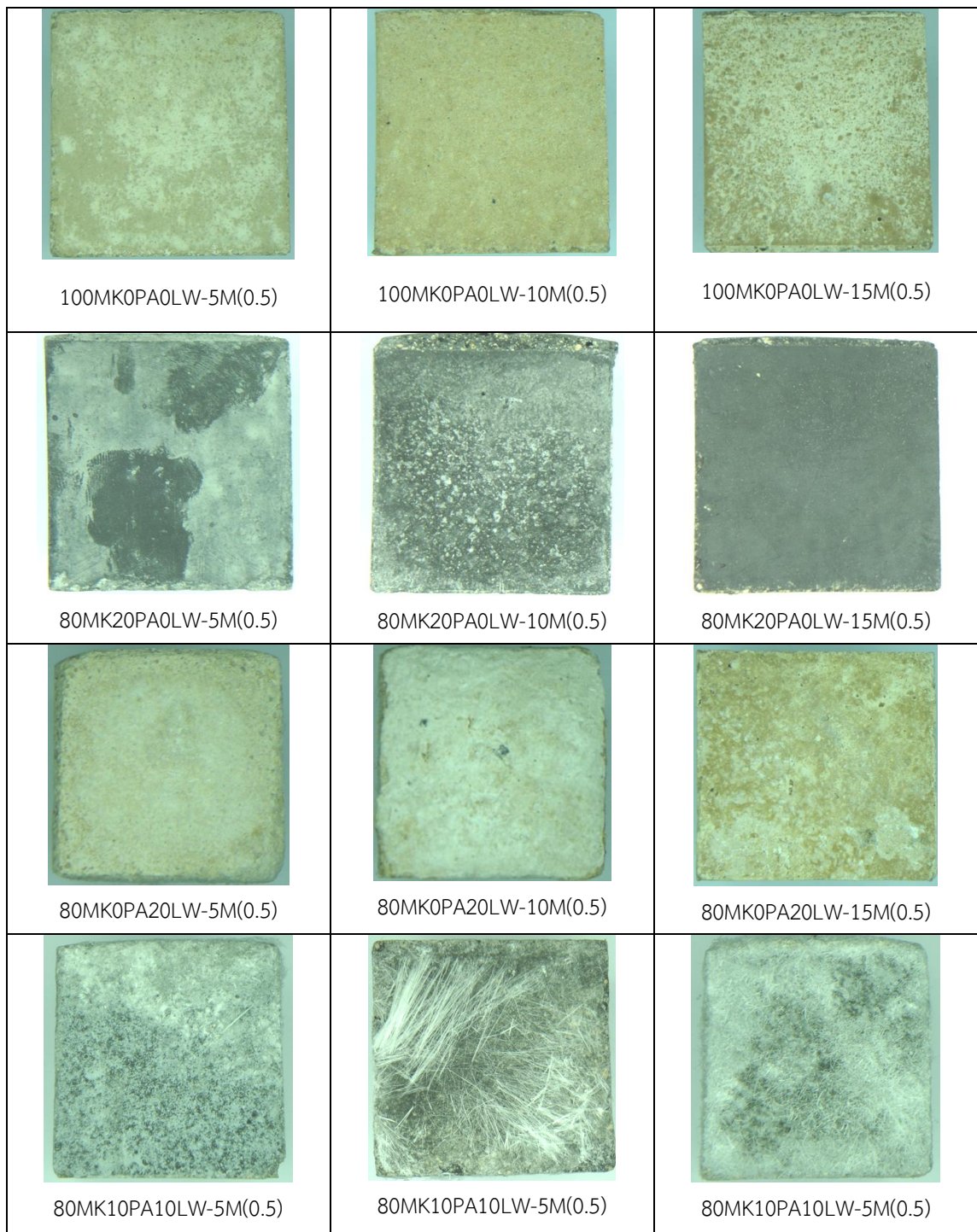
\* หมายเลขตัวอย่าง: (1) 100MK0PA0LW- $\underline{X}$ M(2.5), (2) 80MK20PA0LW- $\underline{X}$ M(2.5), (3) 80MK20PA0LW- $\underline{X}$ M(2.5) และ (4) 80MK10PA10LW- $\underline{X}$ M(2.5)

หมายเหตุ  $\underline{X}$  แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14 และ 28 วัน


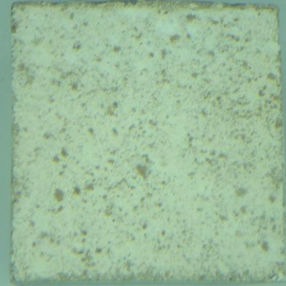
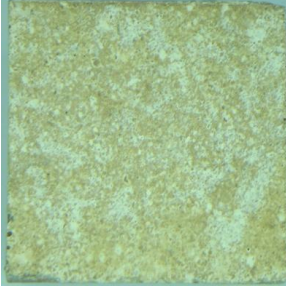
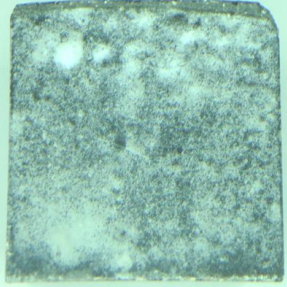
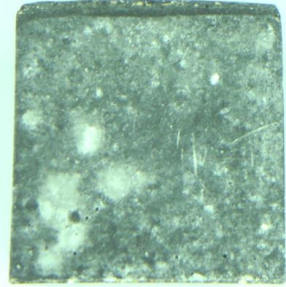

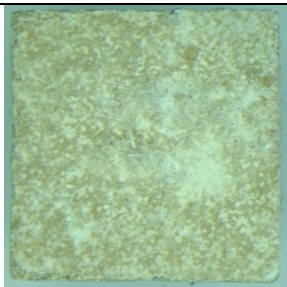

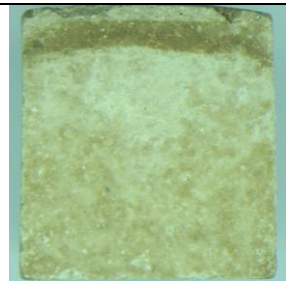
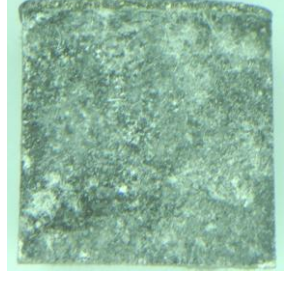
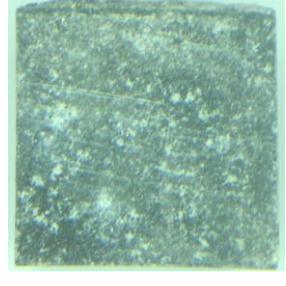
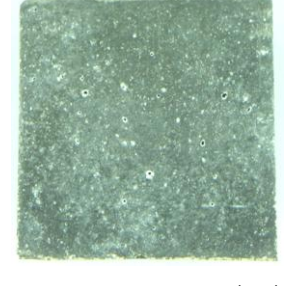
พิจารณาผลกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียดกซี้แบ่งพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะละลายซิลิกาและอลูมินาออกมาได้มาก ส่งผลให้แมกนีเซียมไอออน ( $Mg^{2+}$ ) จากกซี้แบ่งสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Peter Duxson และ John L. Provis ในปี ค.ศ. 2008 ที่พบว่าการเติม  $Mg^{2+}$  เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเพิ่มของไอออนบวกในการสังเคราะห์สารตั้งต้น ทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับต่างได้ดีขึ้น และเกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ( $MgO \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$ ) ทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่ผสมกซี้แบ่งมีความพรุนและช่องว่างจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wichian C. และ Keeratikorn C. ในปี ค.ศ. 2012 ที่พบว่าแมกนีเซียมซิลิเกตทำให้เกิดความพรุนและช่องว่างในจีโอพอลิเมอร์ซึ่งส่งผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง และเมื่อจีโอพอลิเมอร์มีความพรุนสูงก็จะส่งผลให้น้ำหนักเบาและส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีค่าความหนาแน่นลดลงด้วย

จากการทดลองพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นหากใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าปาล์มและกซี้แบ่งในการแทนที่ดินขาวเผา ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีการหดตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การศึกษาการหดตัวแบบแห้งจากการทดลองข้างต้นมีค่าการหดตัวไม่สูงมากนัก

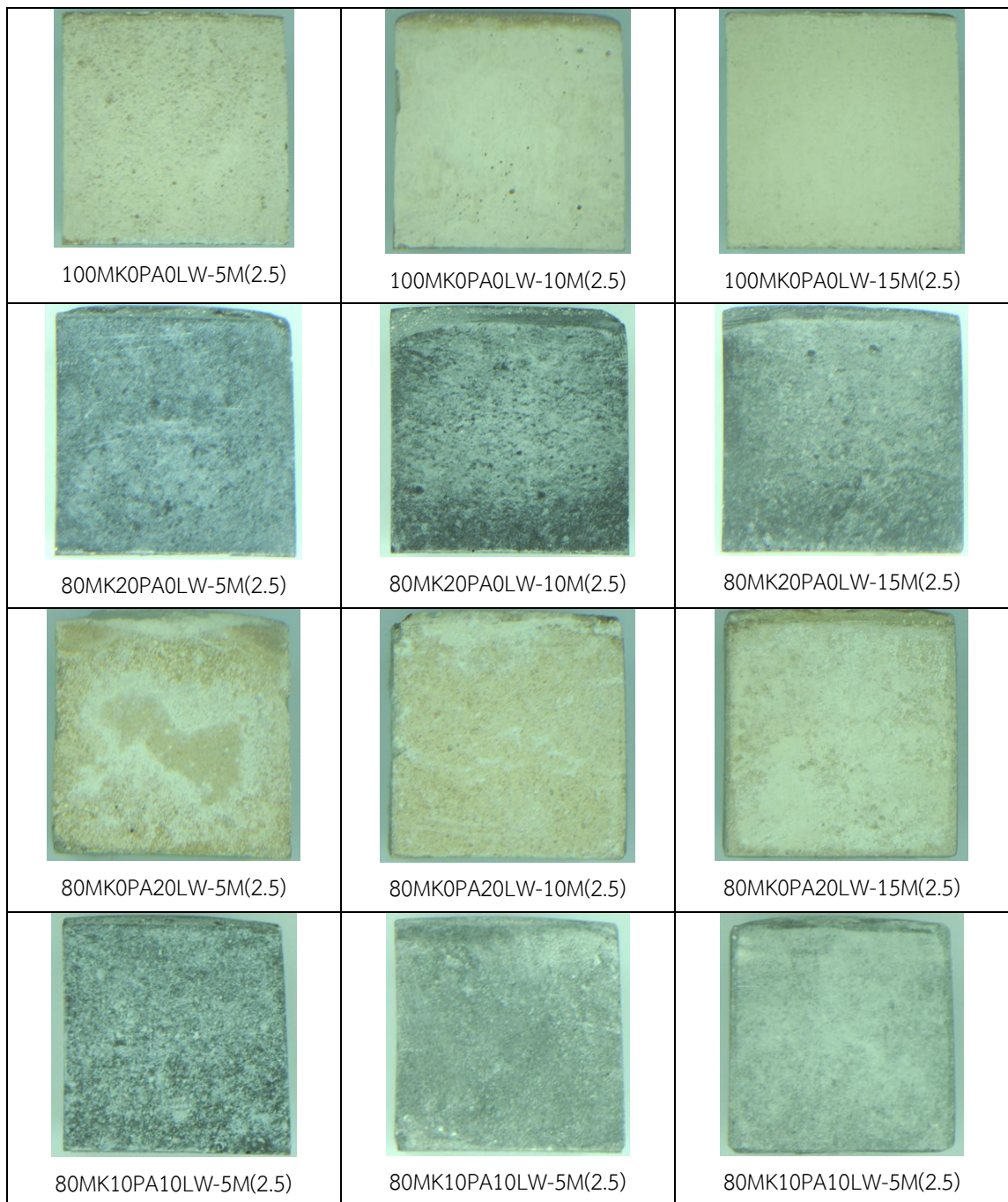
จีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวอย่างเดียวมีสีน้ำตาลอ่อนเนื้อเนียนละเอียดภายนอกเป็นมันวาวลักษณะคล้ายหินอ่อน สูตรดินขาว:ถ้ำปาล์ม มีลักษณะเป็นสีเทาเข้มถึงสีดำภายนอกมีลักษณะมันวาวเช่นเดียวกัน สูตรดินขาว:กากขี้แป้ง มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน พื้นผิวมีความขรุขระ และสูตรดินขาว:ถ้ำปาล์ม:กากขี้แป้ง มีลักษณะเป็นสีเทาเข้ม มีผลึกเป็นเจลรูปเข็มบริเวณผิวหน้าของจีโอพอลิเมอร์ และจะเกิดขึ้นหนาแน่นมากในสูตรที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง ทั้งนี้ผลึกจะค่อยๆหายไปตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น ลักษณะทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 ก) ลักษณะพื้นผิวและสีของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5$

		
100MK0PA0LW-5M(1.5)	100MK0PA0LW-10M(1.5)	100MK0PA0LW-15M(1.5)
		
80MK20PA0LW-5M(1.5)	80MK20PA0LW-10M(1.5)	80MK20PA0LW-15M(1.5)
		
80MK0PA20LW-5M(1.5)	80MK0PA20LW-10M(1.5)	80MK0PA20LW-15M(1.5)
		
80MK10PA10LW-5M(1.5)	80MK10PA10LW-5M(1.5)	80MK10PA10LW-5M(1.5)

รูปที่ 4-13 ข) ลักษณะพื้นผิวและสีของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$



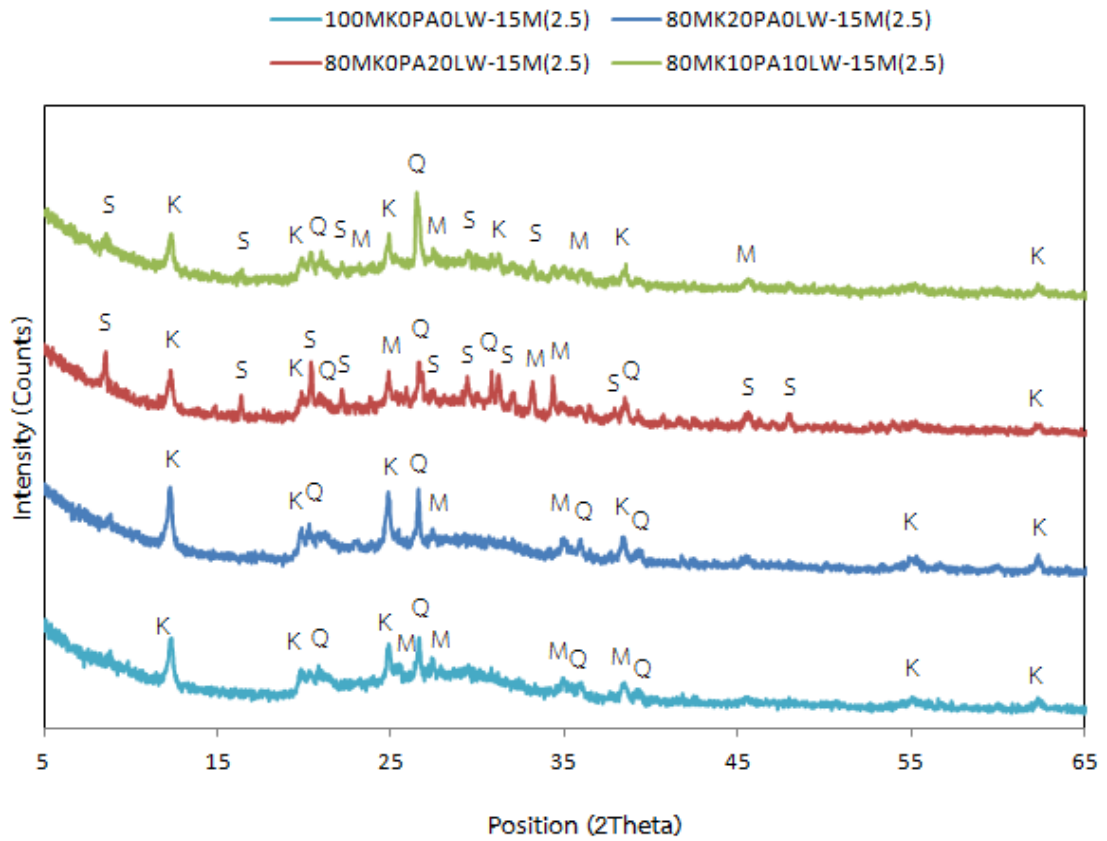
รูปที่ 4-13 ค) ลักษณะพื้นผิวและสีของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$

### 4.3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียมกษีแป้ง

#### 4.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction-XRD)

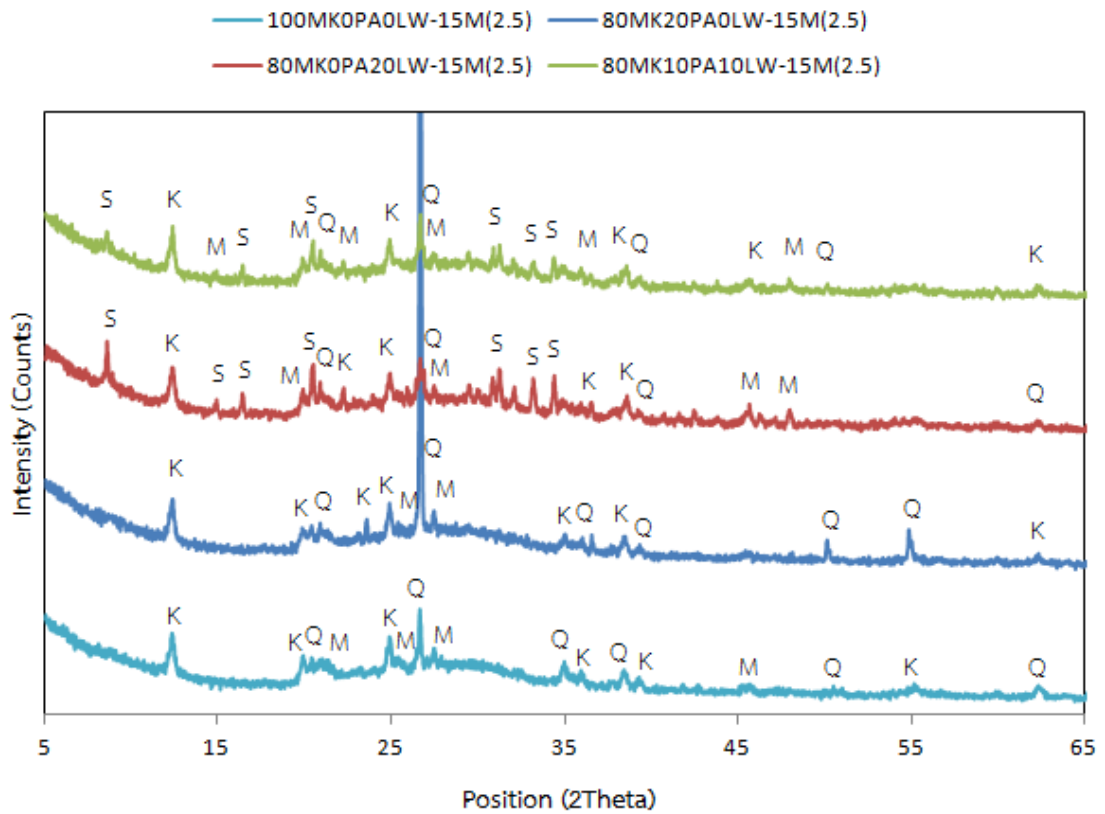
ผลการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction-XRD) ดังรูปที่ 4-14 พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างทั้งที่เป็นผลึกและอสัณฐาน โดยจีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวอย่างเดียวซึ่งเป็นชุดควบคุมพบยอด (Peak) ของควอร์ตซ (Quartz) มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{SiO}_2$  และ Microcline มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  นอกจากนี้ยังพบยอด (Peak) ฐานกว้างที่ตำแหน่งประมาณ  $20-35^\circ$  ซึ่งแสดงส่วนที่เป็นอสัณฐานของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ควบคุมกับจีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวผสมกับเถ้าปาล์ม พบว่ายอด (Peak) ของ Quartz ลดลง ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียมกษีแป้ง พบว่ายอด (Peak) ของ Quartz และ Microcline ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ปรากฏยอด (Peak) ของ Sodium Phosphate Hydrate มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งอาจทำให้เกิดเป็นลักษณะการก่อตัวเป็นเจลรูปเข็มบริเวณผิวหน้าของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมกษีแป้ง ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองของ Pankhet K. และ Rattanasak U. ในปี ค.ศ. 2010 ที่พบว่าเกิดการก่อตัวเป็นเจลรูปเข็มบริเวณผิวหน้าของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำลง

จากการศึกษาที่ระยะเวลาการบ่มจีโอพอลิเมอร์ในอากาศที่ 90 วัน ดังแสดงในรูป 4-14 ค) พบว่าโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาเปลี่ยนไปและมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น จึงส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าในสูตรที่ผสมกษีแป้งมีของ Sodium Phosphate Hydrate ลดลง และพบผลึก Illite ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดในสูตรดินขาวอย่างเดียวมีค่าน้อยกว่าสูตรผสมดินขาวและเถ้าปาล์ม



รูปที่ 4-14 ก) โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 7 วัน

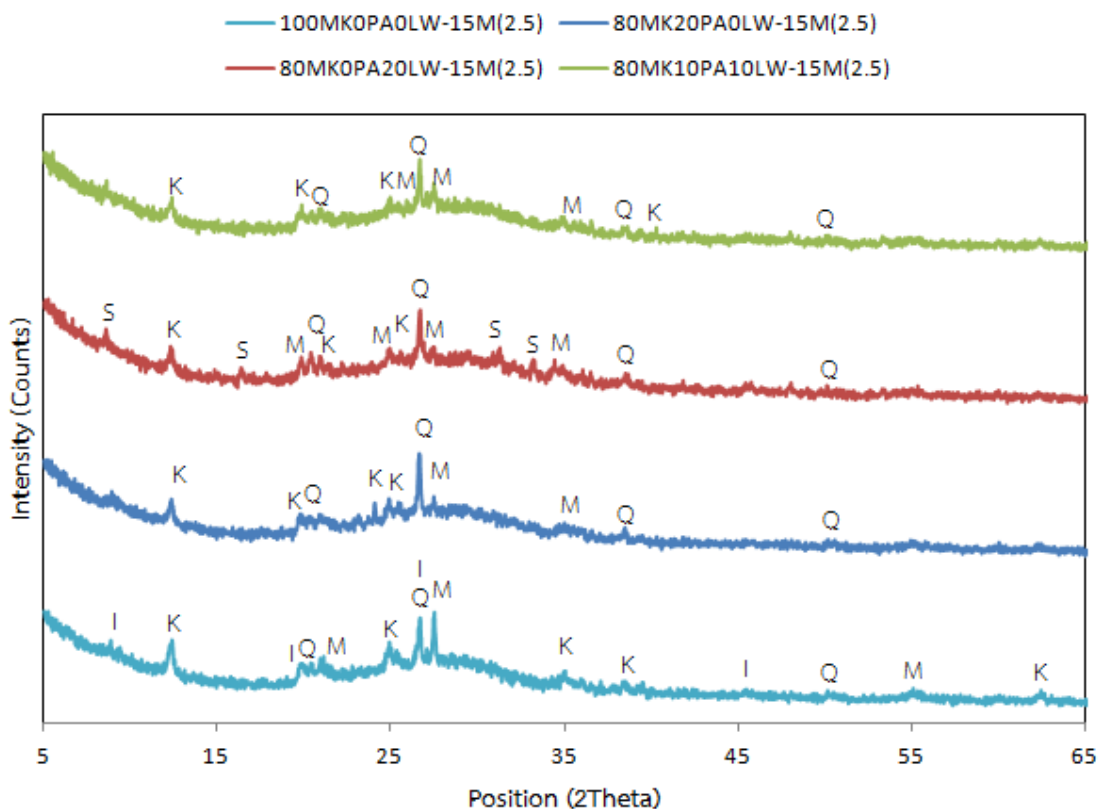
(Q = Quartz, M = Microcline, K = Kaolinite และ S = Sodium Phosphate Hydrate)



รูปที่ 4-14 ข) โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของจีโอฟอสเฟอไรต์ที่บ่มในอากาศ 28 วัน

(Q = Quartz, M = Microcline, K = Kaolinite และ S = Sodium Phosphate Hydrate)

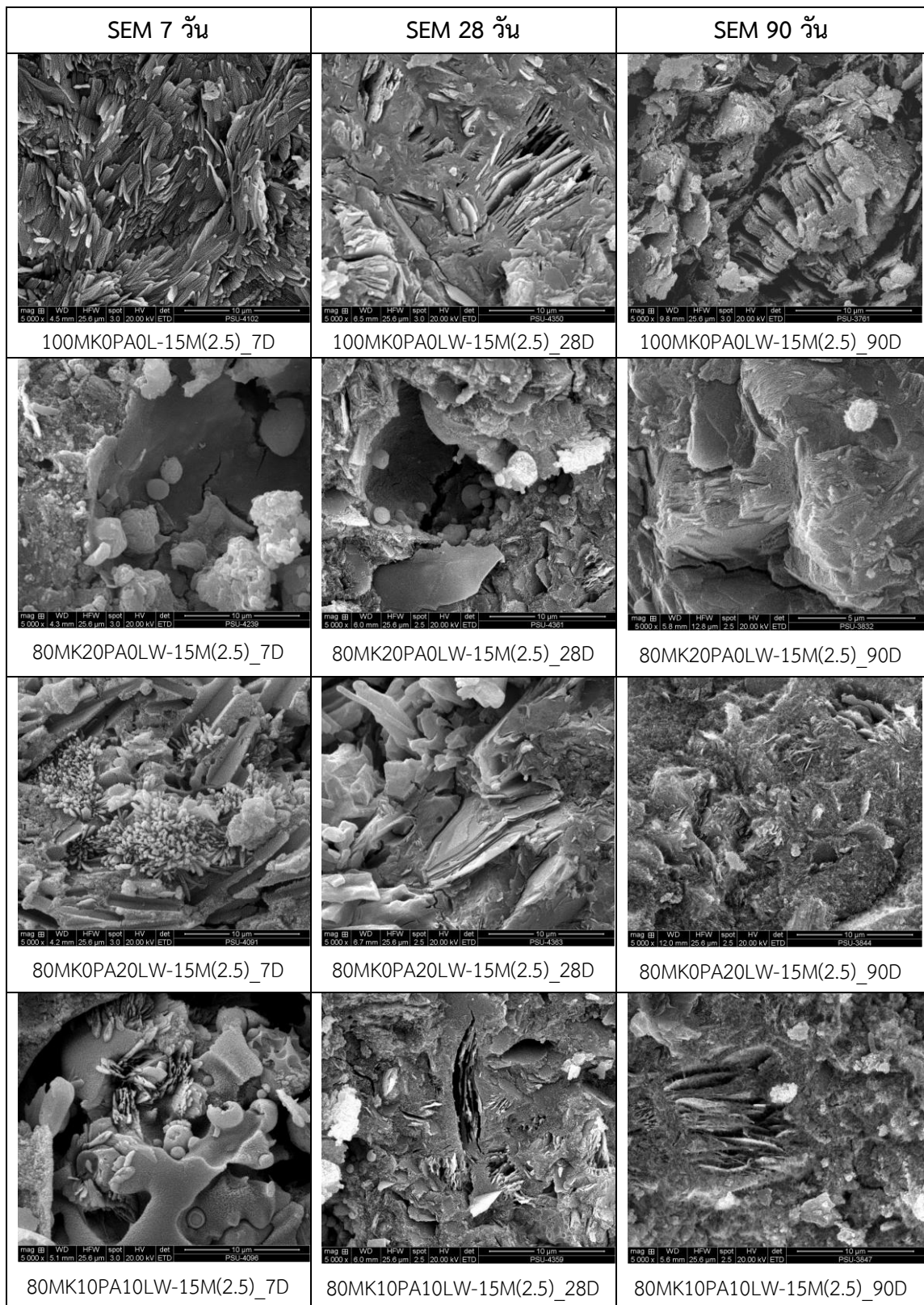




รูปที่ 4-14 ค) โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศ 90 วัน

(Q = Quartz, M = Microcline, K = Kaolinite, I = Illite  
และ S = Sodium Phosphate Hydrate)

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4-15 โดยศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวอย่างเดียวมีโครงสร้างเป็นแผ่นกระจายตัวกันหนาแน่นขึ้น ส่วนจีโอพอลิเมอร์สูตรผสมดินขาว+เถ้าปาล์ม มีการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้อนุภาคของเถ้าปาล์มเกิดการชะละลายได้ดีและมีการรวมตัวกับอนุภาคของดินขาวเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงที่ 90 วัน และในสูตรที่ผสมกากขี้เป้งที่ 7 วันพบผลึกที่มีลักษณะเป็นเจลรูปเข็ม แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น และจีโอพอลิเมอร์มีการทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศจึงทำให้ผลึกดังกล่าวหายไปและไม่พบอยู่ในโครงสร้างที่ทำการบ่ม 90 วัน



รูปที่ 4-15 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ป่ม 7, 28 และ 90 วัน

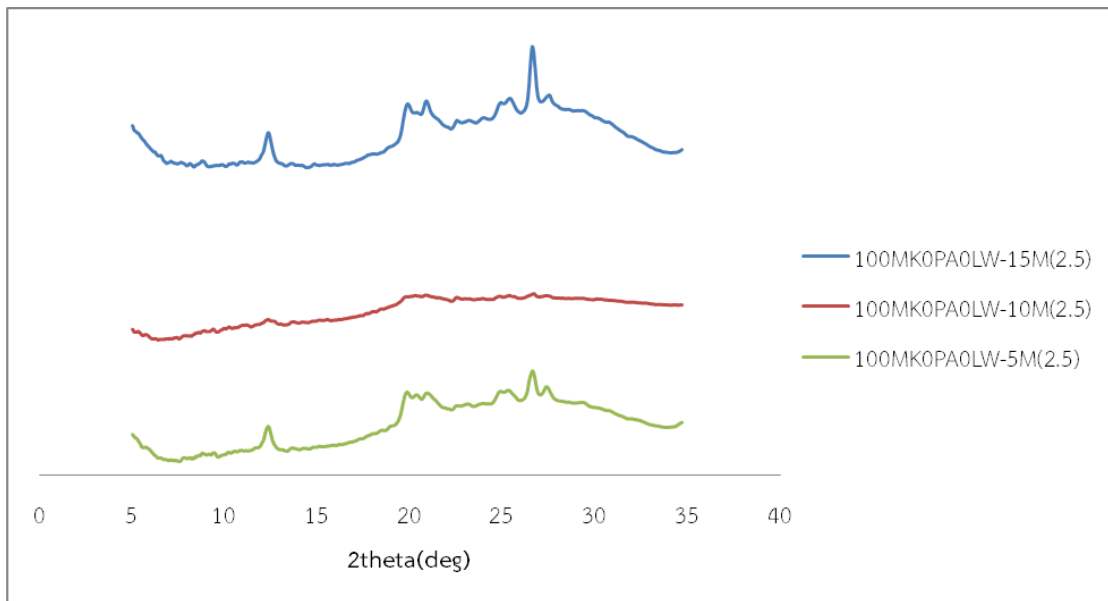
### 4.3.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ด้วยวิธี Wide-Angle X-ray Scattering (WAXS)

ในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ด้วยวิธี Wide-Angle X-ray Scattering ประกอบด้วยผลการทดลอง 4 ส่วนคือ (1) การศึกษาความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตรผสมที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่แตกต่างกัน (2) การศึกษาความเป็นผลึกระหว่างส่วนผิวและส่วนเนื้อภายในของจีโอพอลิเมอร์ (3) การศึกษาความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 °C เปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

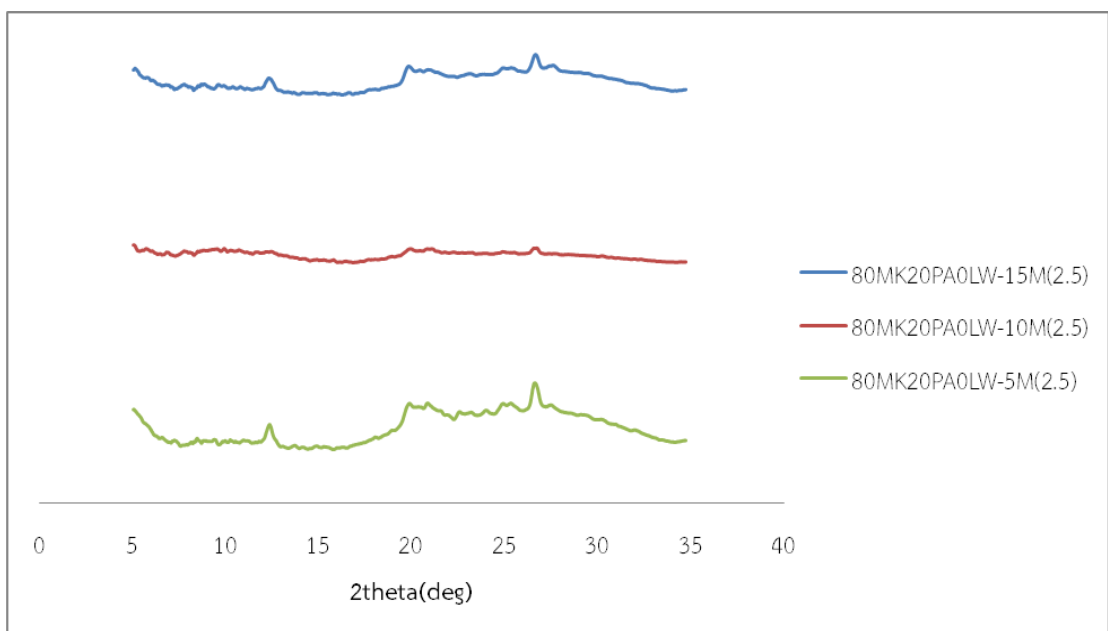
(1) การศึกษาความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตรผสมที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่แตกต่างกันซึ่งประกอบไปด้วย

- สูตรผสมที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว
- สูตรผสมจากการใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20
- สูตรผสมจากการใช้กากซีแพ่งแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20
- สูตรผสมจากการใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากซีแพ่งแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20

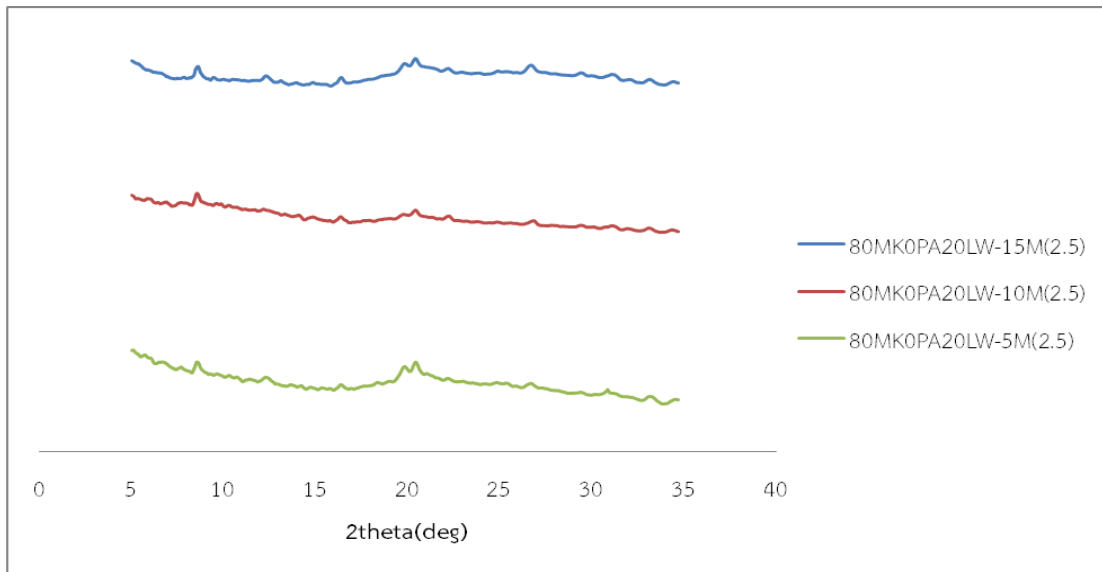
จากการศึกษาพบว่าความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 โมลาร์ มีความเป็นผลึกค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ในทุกสูตรผสม เนื่องจากการใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถชะละลายซิลิกาและอลูมินาได้มากขึ้น ทำให้สารละลาย NaOH สามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุประสานได้ดีขึ้น ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่แข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าในสูตรผสมที่ใช้ดินขาวเพียงอย่างเดียวที่ใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 15 โมลาร์ มีลักษณะของยอด (Peak) ที่แสดงความเป็นอสัณฐานอย่างชัดเจนกว่าสูตรผสมอื่นผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-16



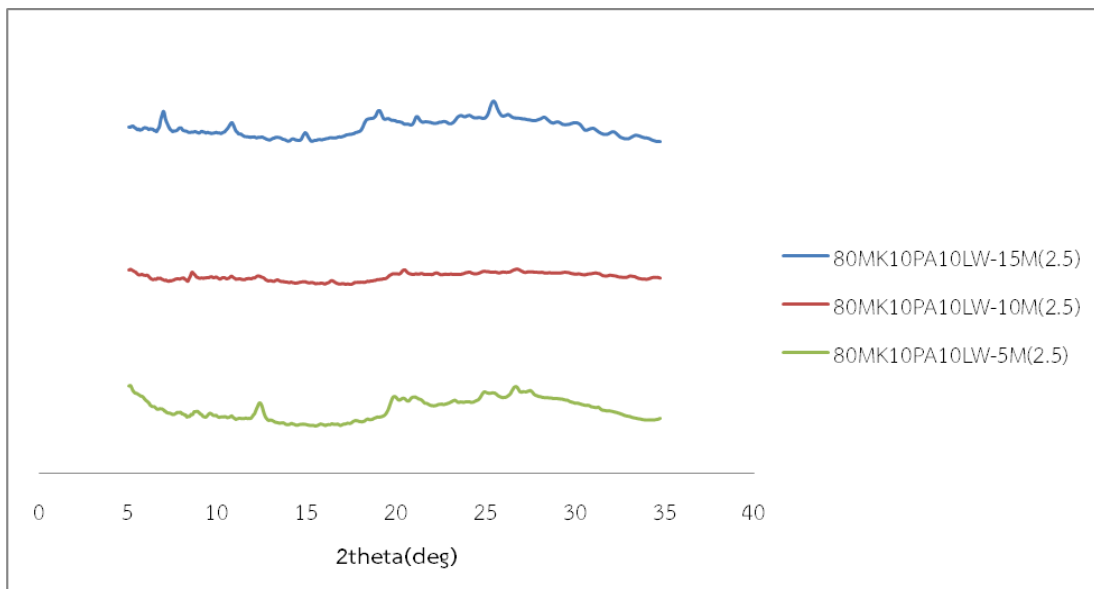
รูปที่ 4-16 ก) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว  
ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์



รูปที่ 4-16 ข) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาว:แก้วปาล์ม  
ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์



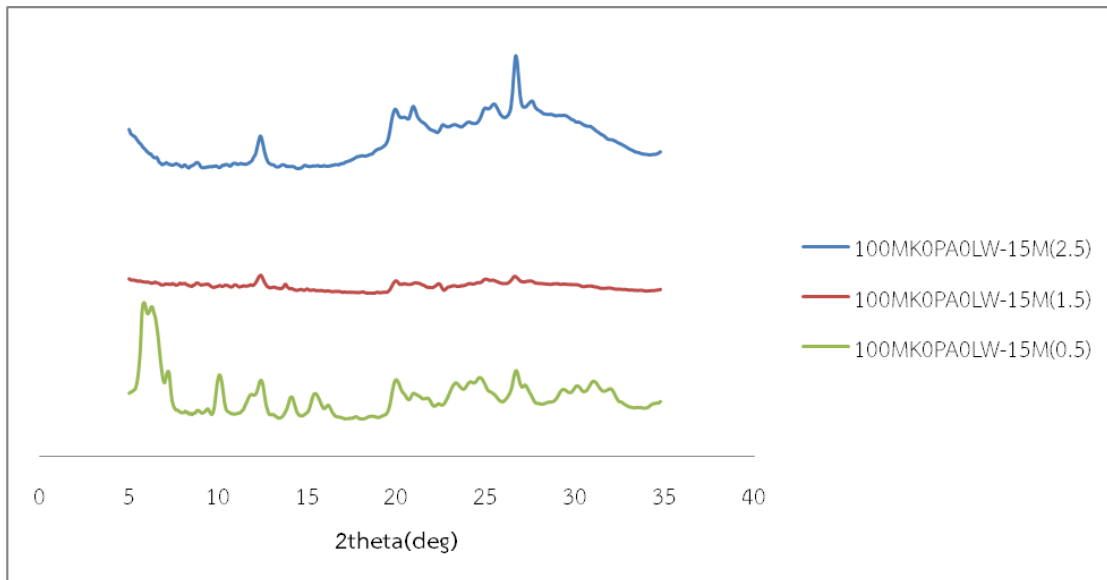
รูปที่ 4-16 ค) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร ดินขาว:กากซีเมนต์  
ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์



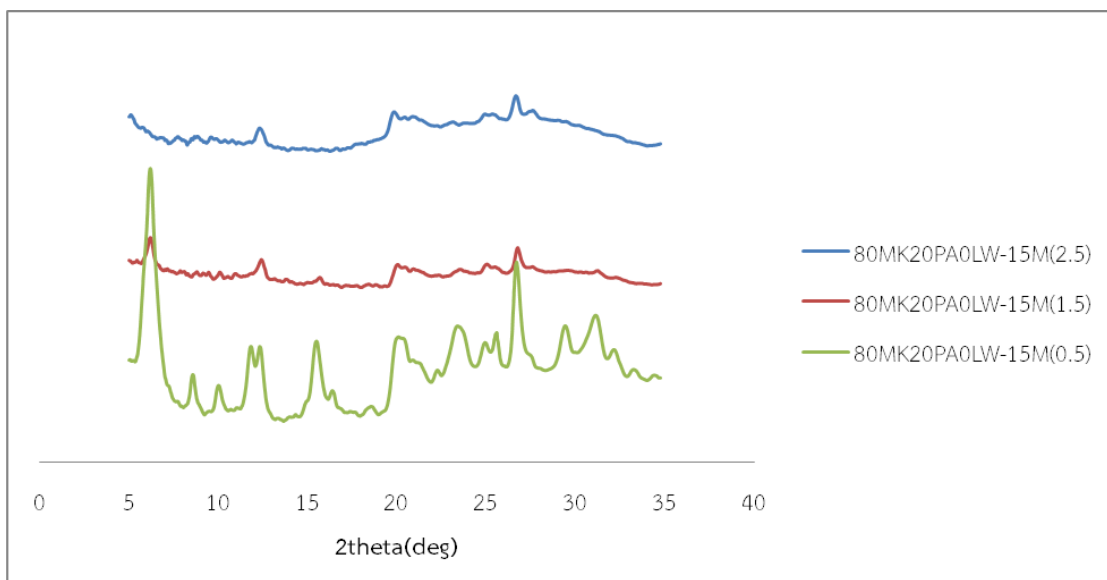
รูปที่ 4-16 ง) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร ดินขาว:เถ้าปาล์ม:กากซีเมนต์  
ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์

นอกจากนี้ยังพบว่าความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากการใช้อัตราส่วน  
ของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2.5 มีลักษณะของยอด (Peak) ที่มีความเป็นอสัณฐาน  
มากกว่า อัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.5 และ 1.5 เนื่องจากอัตราส่วน

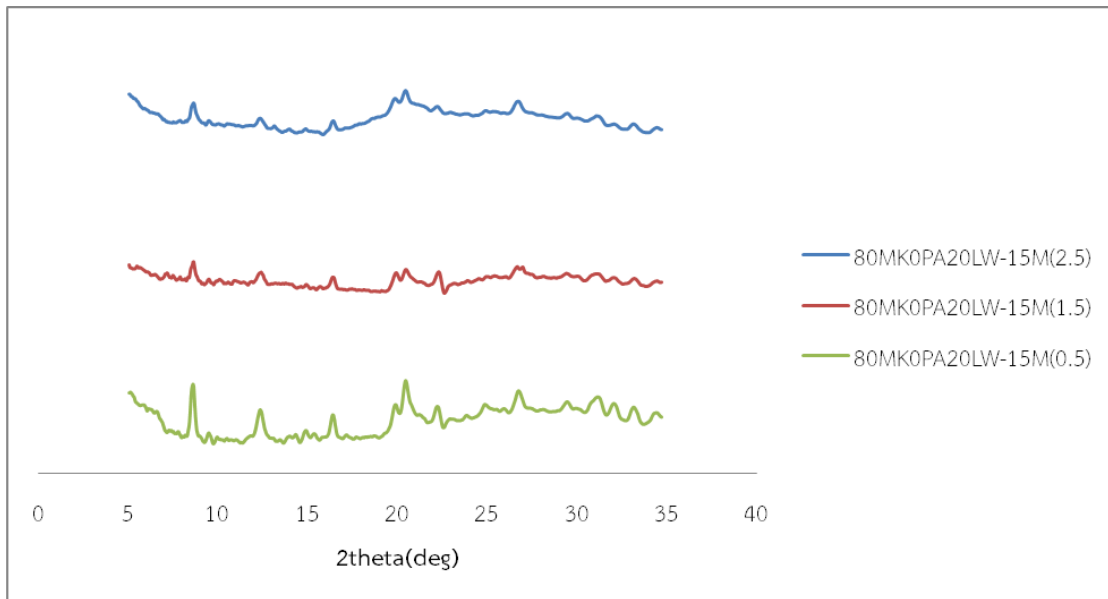
ดังกล่าวใช้ปริมาณสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ในปริมาณน้อย ทำให้มีความชื้นเหลวมมาก ส่งผลให้ปริมาณอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมากทำให้จีโอพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยาได้ไม่ดี แข็งตัวช้า ส่งผลให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงต่ำ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-17



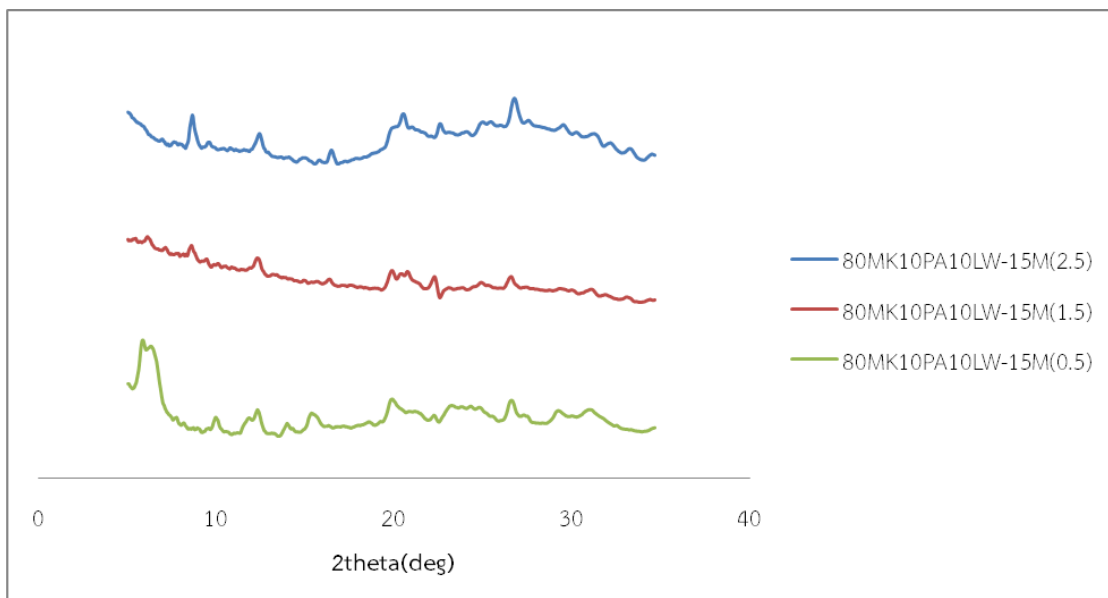
**รูปที่ 4-17 ก)** ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว ที่การใช้สารละลาย NaOH ที่อัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5, 1.5$  และ  $2.5$



**รูปที่ 4-17 ข)** ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาว:แก้วปาล์ม ที่การใช้สารละลาย NaOH ที่อัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5, 1.5$  และ  $2.5$



รูปที่ 4-17 ค) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร ดินขาว:เถ้าปาล์ม:กากชี้แบ่ง  
ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่อัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5, 1.5$  และ 2.5

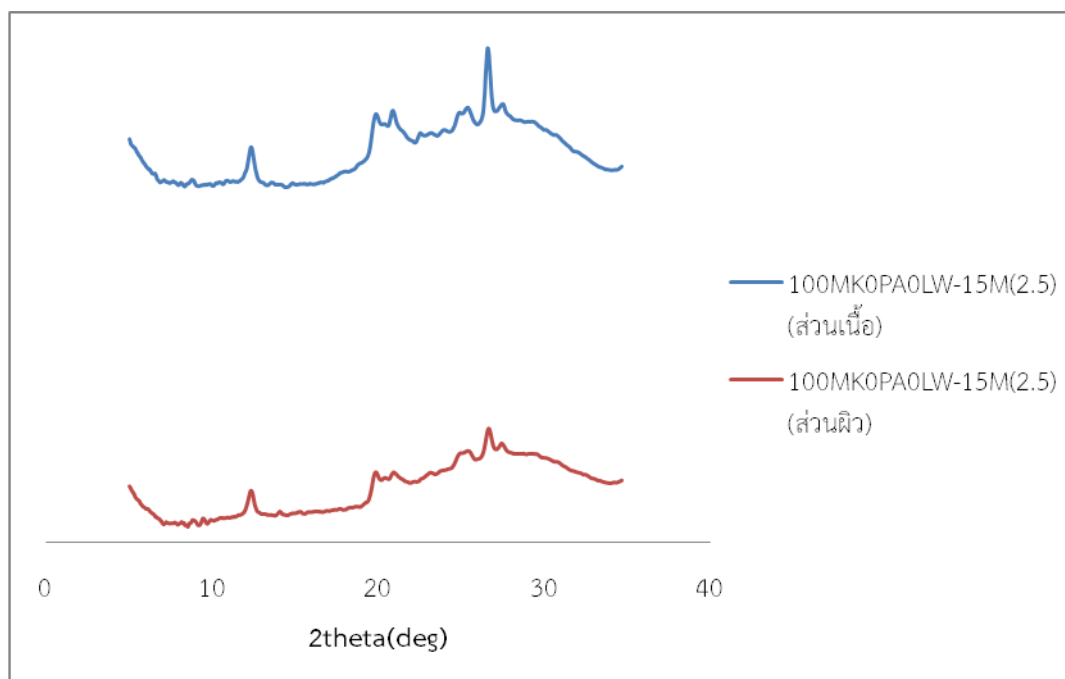


รูปที่ 4-17 ง) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร ดินขาว:เถ้าปาล์ม:เถ้าปาล์ม:กากชี้แบ่ง  
ที่ใช้สารละลาย NaOH ที่อัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5, 1.5$  และ 2.5

## (2) การศึกษาความเป็นผลึกระหว่างส่วนผิวและส่วนเนื้อภายในของจีโอพอลิเมอร์

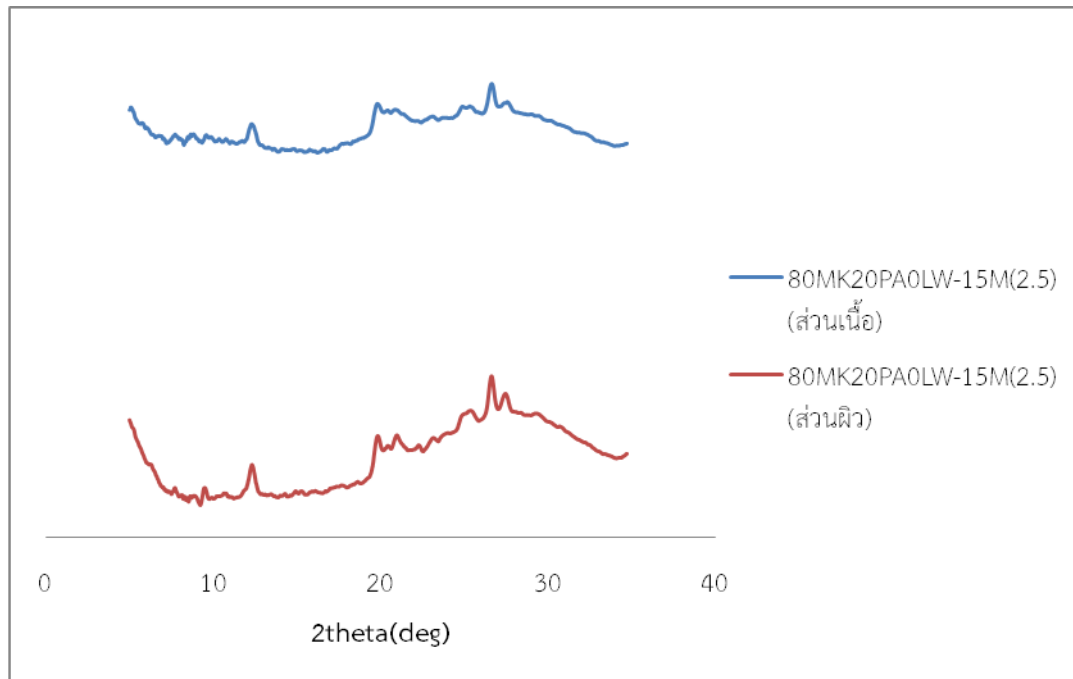
หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะพื้นผิวด้านในมีความขรุขระ และด้านนอกมีลักษณะเรียบลื่นคล้ายหินอ่อน จึงได้ทำการศึกษาความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค WAXS ทั้งส่วนผิวและส่วนเนื้อของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ทุกสัดส่วนผสม

จากการทดลองพบว่าความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตรที่สังเคราะห์จากการใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว และสูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผา มีความเป็นผลึกระหว่างส่วนผิวและส่วนเนื้อไม่แตกต่างกันมากนักและแสดงลักษณะที่มีความเป็นอสัณฐานอย่างชัดเจน และในสูตรผสมที่มีการใช้กากชี้แ่งแทนที่ในดินขาวนั้นพบว่าส่วนผิวปรากฏยอด (Peak) สูงดังแสดงดังในรูปที่ 4-18 ทั้งนี้อาจเกิดจากผลของ Sodium Phosphate Hydrate ซึ่งมีลักษณะเป็นเจลรูปเข็มบริเวณผิวของจีโอพอลิเมอร์ ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความเป็นผลึก (crystalline solid) มากกว่าเนื้อด้านในซึ่งมีความเป็นอสัณฐานหรือของแข็งที่ไม่อยู่ในรูปผลึกซึ่งมีความแข็งแรงและทนทานสามารถรับแรงอัดได้ดี

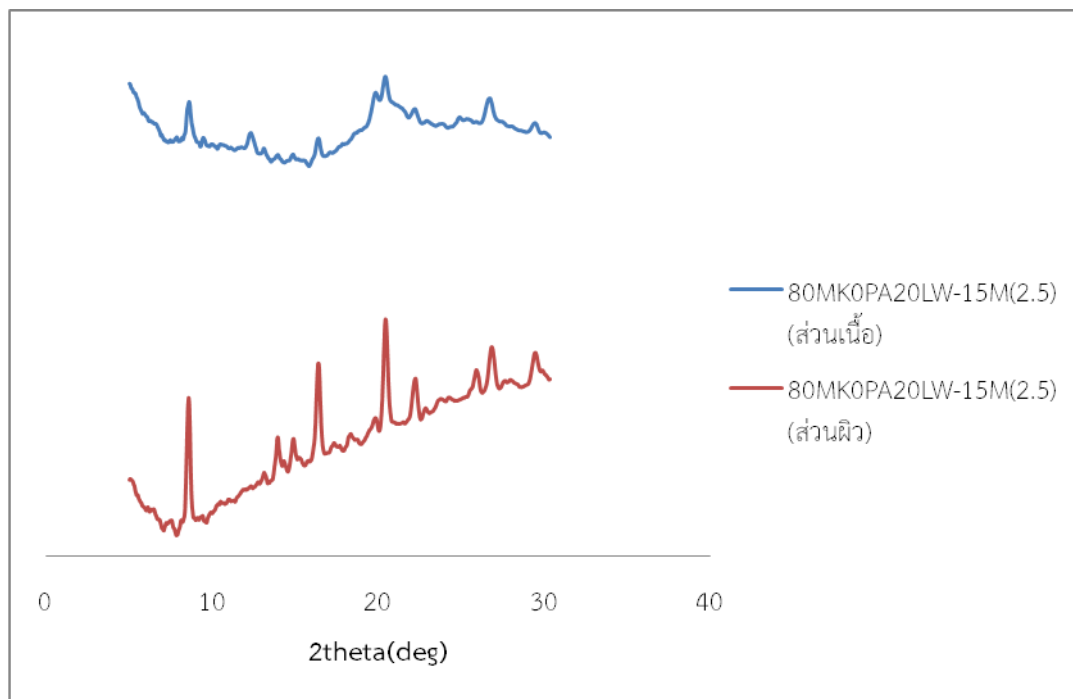


รูปที่ 4-18 ก) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว

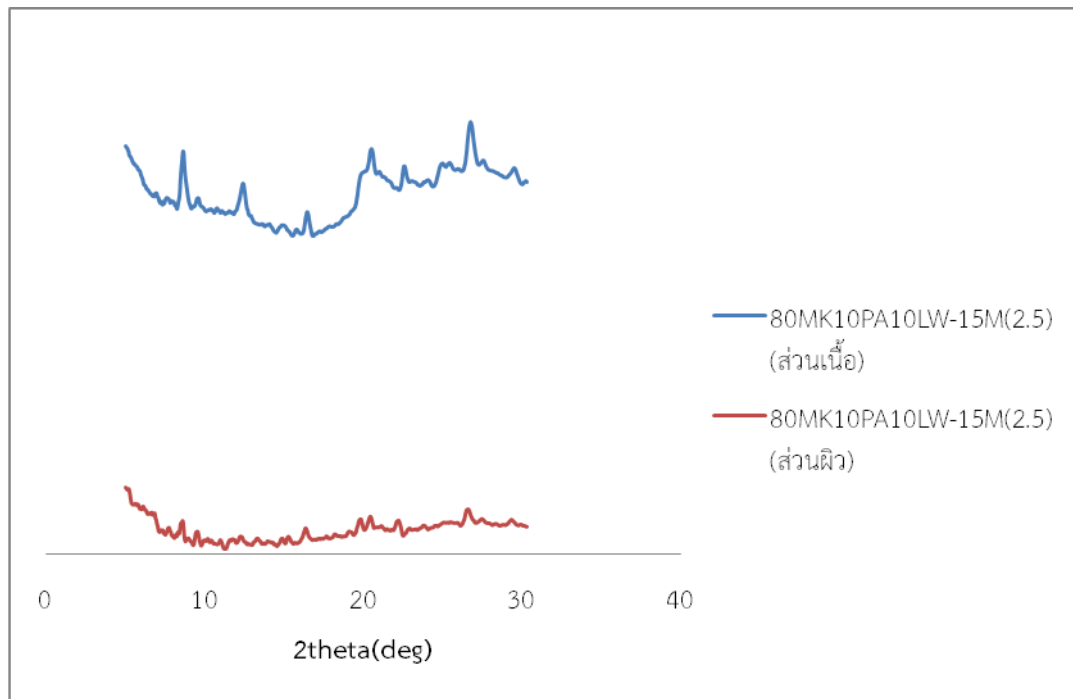




รูปที่ 4-18 ข) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:เก่าปาล์ม



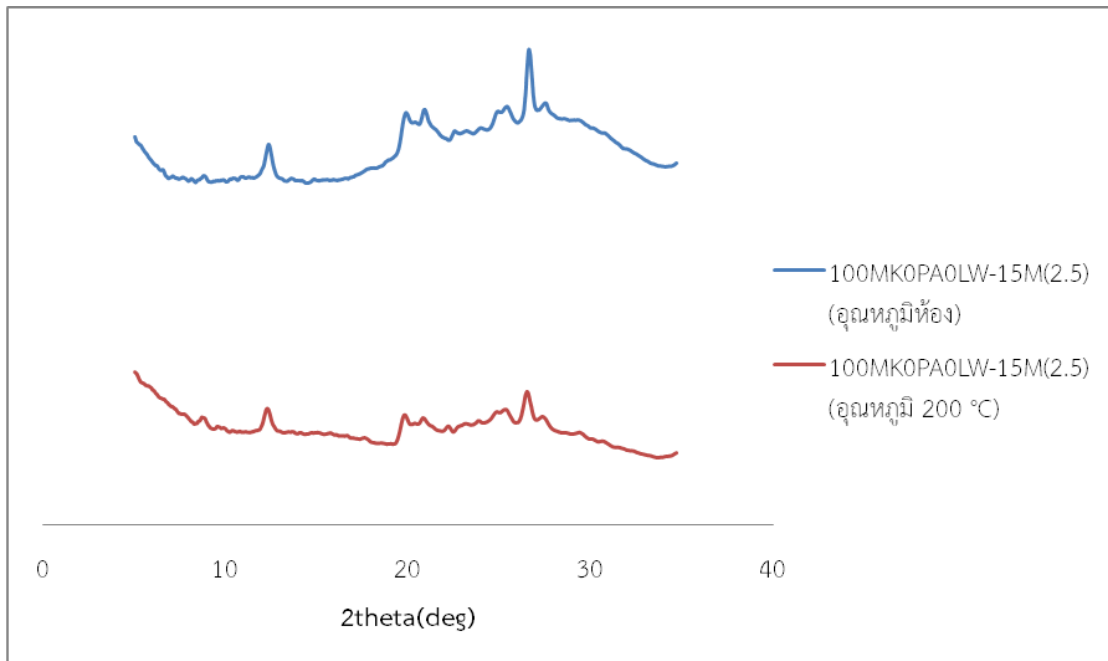
รูปที่ 4-18 ค) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:กากขี้แป้ง



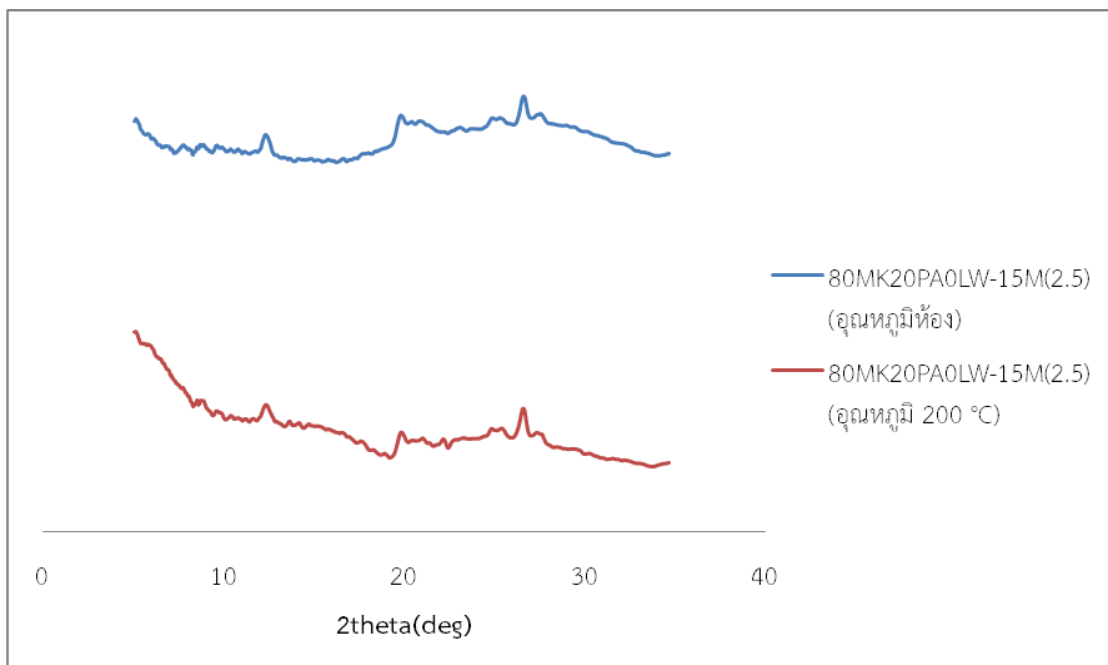
รูปที่ 4-18 ง) ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา: ฝ้าปา ล์ม: กากซีแพ็ง

(3) การศึกษาความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 °C

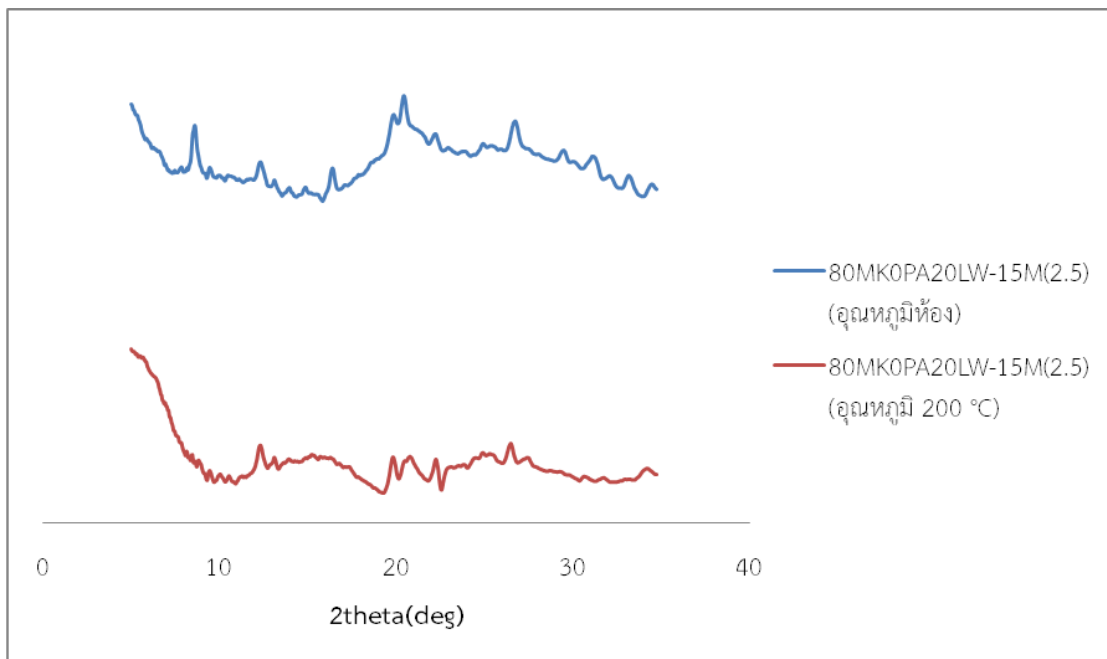
เปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องด้วยเทคนิค WAXS ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวอย่างที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้ โดยไม่ต้องเปลี่ยนตัวอย่างใหม่ในขณะที่ทำการทดลอง ทำให้ทราบผลการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างชนิดเดียวกัน โดยในขั้นตอนแรกจะทำการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องก่อน จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวอย่าง โดยเพิ่มอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 200 °C จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อทำการเผาตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จึงคาดว่าไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4-19



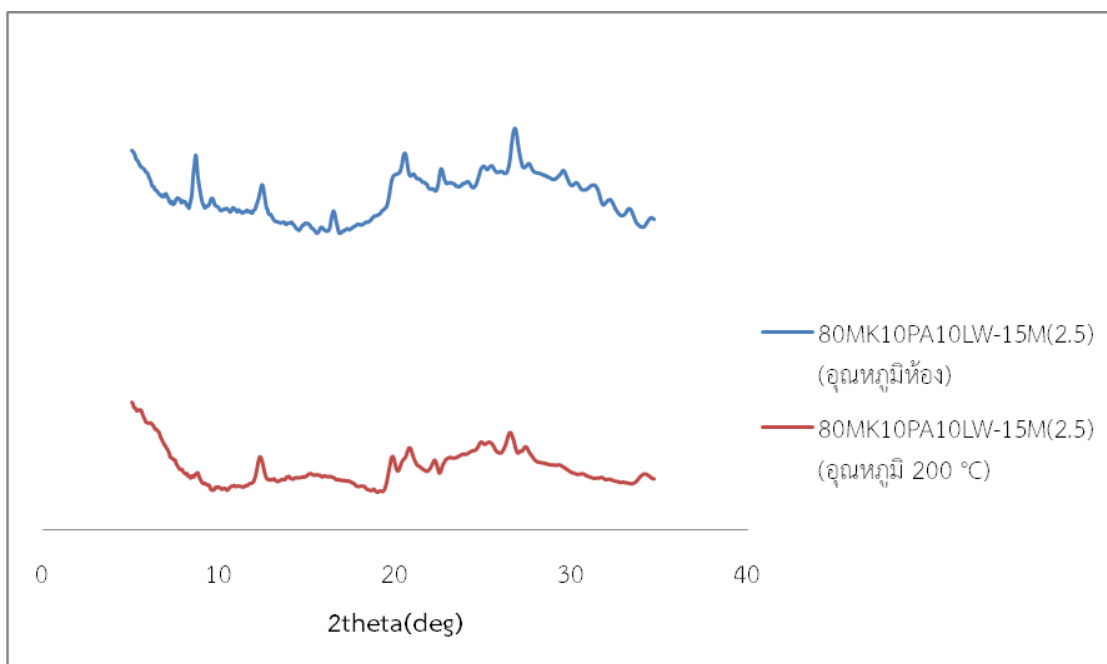
รูปที่ 4-19 ก) เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C



รูปที่ 4-19 ข) เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา: ไล่ป่าลัม ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C



รูปที่ 4-19 ค) เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:กากซีไต้  
ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C



รูปที่ 4-19 ง) เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:เถ้าปาล์ม:กากซีไต้  
ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C

#### 4.4 การทดสอบการทนความร้อนของจีโอพอลิเมอร์ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C

การทดลองนี้ได้ทำการทดสอบการทนความร้อนของจีโอพอลิเมอร์โดยศึกษาในช่วงความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 15 โมลาร์ และ อัตราส่วนของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วย

- สูตรผสมที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว
- สูตรผสมจากการใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20
- สูตรผสมจากการใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากชี้แปงแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20

ทำการทดลองโดยการเผาตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่มีระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน ด้วยอุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำการเปรียบเทียบการทนความร้อนของจีโอพอลิเมอร์ในแต่ละสูตรผสมระหว่างก่อนและหลังทำการเผา

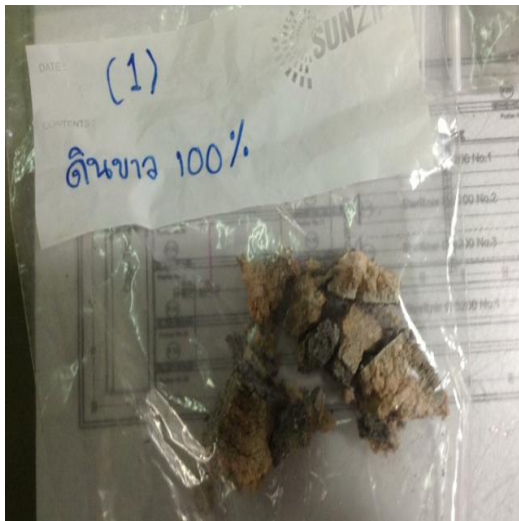


(ก)

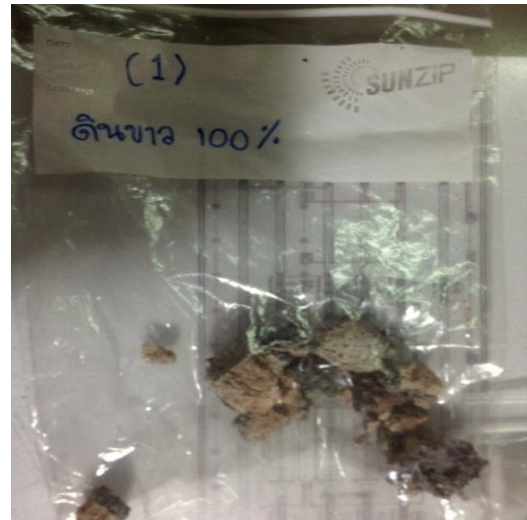


(ข)

รูปที่ 4-20 ก) จีโอพอลิเมอร์สูตร 100MKOPA0LW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-20 ข) จีโอพอลิเมอร์สูตร 100MK0PA0LW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง

จากรูปที่ 4-20 พบว่าจีโอพอลิเมอร์สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวสามารถทนความร้อนได้ในระดับสูงได้ โดยหลังจากเผาด้วยความร้อน 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ตัวอย่างเพสต์แตกกระจายเป็นก้อนขนาดเล็ก และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดังกล่าวกับสูตรอื่นๆ พบว่ามีประสิทธิภาพในการทนความร้อนต่ำกว่าทุกสูตรผสม



(ก)

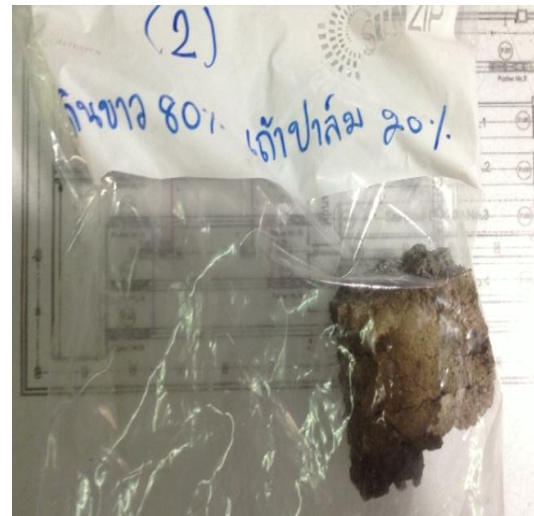


(ข)

รูปที่ 4-21 ก) จีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-21 ข) จีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PAOLW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง

หลังจากทำการเผาจีโอพอลิเมอร์ผสมจากการใช้เถ้าป่าลัมแทนที่ในดินขาวเผา ร้อยละ 20 สังกะต ด้วยความร้อนที่ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า จีโอพอลิเมอร์ยังมีการยึดเกาะ กันเป็นก้อนและทนความร้อนได้ดีกว่าสูตรที่ใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-22 ก) จีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา  
ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-22 ข) จีโอฟอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง

จากการทดลองหลังจากทำการเผาจีโอฟอลิเมอร์สูตรผสมจากการใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากซีเมนต์แทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าจีโอฟอลิเมอร์สูตรดังกล่าวเกิดการบิดเบี้ยวเล็กน้อย มีรอยไหม้บางส่วน แต่มีการยึดเหนี่ยวของโครงสร้าง ไม่เกิดการกระจายตัว และทนความร้อนได้ดีกว่าสูตรผสมอื่น เนื่องจาก พบสาร Sodium Phosphate ในเนื้อจีโอฟอลิเมอร์ที่ผสมของเสียกากซีเมนต์ ดังนั้นจึงทำให้จีโอฟอลิเมอร์ที่ส่วนผสมของเสียกากซีเมนต์มีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูง ตามบัญชีท้ายประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2550 ซึ่งระบุว่า Sodium phosphate มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้เป็นสารผสมในวัสดุทนไฟได้



#### 4.5 ผลการทดสอบการชะละลายของธาตุอาหารและโลหะหนัก

ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำน้ำชะละลายมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP) ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4-6 (โดย MK หมายถึง ดินขาวเผา PA หมายถึง ถ้ำปาล์ม และ LW หมายถึง กากซีเมนต์)

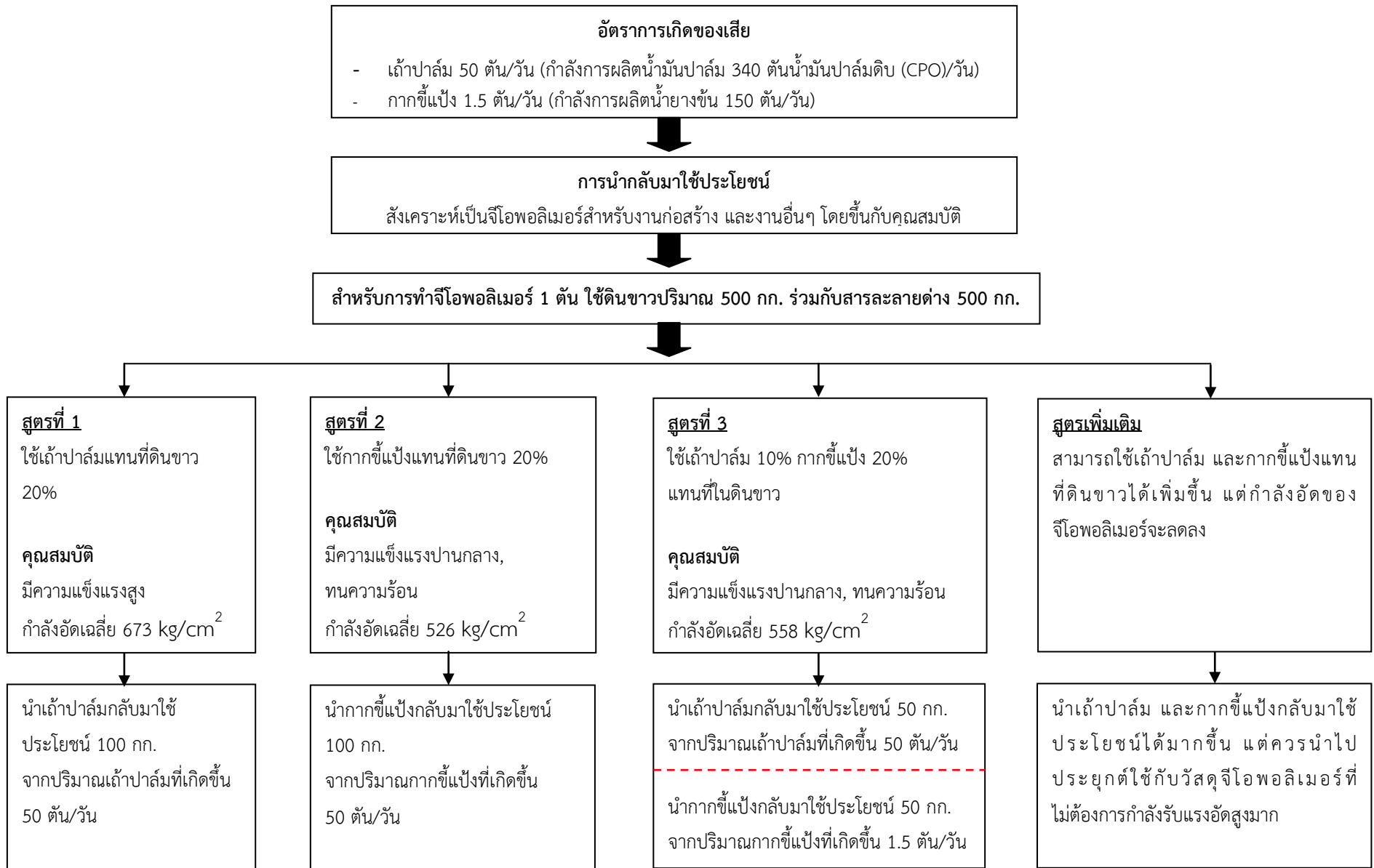
ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบการชะละลายธาตุอาหารและโลหะหนักของจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณ (mg/L)									
		N	P	K	Mg	Ca	Zn	Cr	Cu	Cd	Pb
MK	12.35	11	14.92	10.63	11.46	9.63	0.04	0.13	0.04	ไม่พบ	ไม่พบ
MK+PA	12.81	32	67.7	53.79	14.46	10.23	0.02	0.12	0.04	ไม่พบ	ไม่พบ
MK+LW	12.72	57	2,600	32.83	18.42	8.31	0.12	0.16	0.33	ไม่พบ	ไม่พบ
MK+PA+LW	12.84	68	962.4	39.67	11.43	7.86	0.04	0.24	0.43	ไม่พบ	ไม่พบ
มาตรฐาน STLC		-	-	-	-	-	≥ 250	≥ 5	≥ 25	≥ 5	≥ 5

จากการศึกษาพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียกากซีเมนต์มีปริมาณธาตุอาหารหลัก (N, P, K) และธาตุอาหารรอง (Mg, Ca) อยู่สูงกว่าธาตุอื่นๆ โดยพบธาตุอาหาร P มากที่สุดในสูตรผสมดินขาว:กากซีเมนต์ (80:20) ซึ่งมีปริมาณมากถึง 2,600 mg/L และจากสัดส่วนผสม ดินขาว:ถ้ำปาล์ม:กากซีเมนต์ (80:10:10) พบว่ามีค่า P เท่ากับ 962.4 mg/L ซึ่งธาตุอาหารดังกล่าวเป็นธาตุอาหารหลักในการผลิตปุ๋ยซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้ ส่วนค่าปริมาณโลหะหนักพบว่าในสูตรที่ผสมดินขาวกับกากซีเมนต์นั้นมีปริมาณทองแดง (Cu) เท่ากับ 0.33 mg/L, สังกะสี (Zn) เท่ากับ 0.12 mg/L, โครเมียม (Cr) เท่ากับ 0.16 mg/L และไม่พบโลหะหนักในตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) นั้น ซึ่งค่าทั้งหมดนี้มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

#### 4.6 แนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

จากการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุอีโพลีเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและของเสียกากซีเมนต์ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรม โดยการแทนที่ดินขาวเผาซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีมูลค่าด้วยเถ้าปาล์ม และกากซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนคงที่ในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ได้อีโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน การนำอีโพลีเมอร์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในวงการค้าก่อสร้างหรือใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดยต้องเลือกสูตรผสมที่รับกำลังอัดได้สูง ส่วนสูตรผสมอื่นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ เช่น การทำอิฐมวลเบา อิฐทนไฟ หรือเป็นวัสดุเพื่อใช้ในงานตกแต่งสวน กระจกต้นไม้ เป็นต้น



**รูปที่ 4-23** คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตั้งต้นที่นำมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ จากเถ้าปาล์มและของเสียกากซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า เถ้าปาล์มมีองค์ประกอบหลักของ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ และของเสียกากซีเมนต์สามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ในส่วนของผาดินขาวนราธิวาส พบว่าดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $750^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะทำให้ดินขาวมีสภาพเป็นอสัณฐานและมีความเหมาะสมในการนำมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์มากที่สุด

จากการศึกษาผลของกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ) ที่มากขึ้น จากการทดลองนี้พบว่าการใช้ความเข้มข้นของ  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 15 โมลาร์ และ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ที่ 2.5 โดยน้ำหนัก จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด และการผสมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{NaOH}$  มากกว่า 15 โมลาร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร็วเกินไปทำให้ไม่สามารถหล่อแบบจีโอพอลิเมอร์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ จากสถานะควบคุมในการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มค่า W/B สูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และผลจากการทดลองพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าจะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงด้วยเช่นกัน

ในช่วงระยะเวลา 90 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มโดยจีโอพอลิเมอร์สูตร 100MKOLA0LW-15M(2.5) มีการพัฒนากำลังอัดมากที่สุดที่  $1,070 \text{ kg/cm}^2$  ในขณะที่สูตร 80MKOPA20LW-5M(0.5) มีการพัฒนากำลังอัดต่ำ ที่สุดที่  $83 \text{ kg/cm}^2$

จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียกากซีเมนต์ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้กากซีเมนต์เพื่อทดแทนดินขาวที่ร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียกากซีเมนต์ร้อยละ 20 แมกนีเซียมจะไปช่วยเพิ่มความพรุนให้กับจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง ส่งผลให้น้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมอื่น

โดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 100-400 kg/cm<sup>2</sup> เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาซึ่งมีกำลังรับแรงอัดที่ 30-50 kg/cm<sup>2</sup> พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสี้ยกากซีแบ็งมีแนวโน้มสามารถนำไปพัฒนาเป็นอิฐจีโอพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบาได้ นอกจากนี้ยังพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสี้ยกากซีแบ็งสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าสูตรผสมอื่นเนื่องจากพบ Sodium Phosphate ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุทนไฟในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ จึงมีแนวโน้มสามารถนำไปพัฒนาเป็นอิฐทนความร้อนได้อีกด้วย

การศึกษาการชะละลายธาตุอาหารพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีปริมาณธาตุอาหาร N, P, K สูงโดยพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสี้ยกากซีแบ็งในสูตร 80MK0PA20LW-15M(2.5) และ 80MK10PA10LW-15M(2.5) มีธาตุอาหารฟอสฟอรัส (P) ในปริมาณมาก ในส่วนของการชะละลายของโลหะหนักจากชุดการทดลองที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดในทุกสัดส่วนผสมพบว่า มีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่ามาตรฐานมาก ไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาในด้านการนำของเสี้ยเก่าปาล์มและกากซีแบ็งมาใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งในอนาคตควรศึกษาเกี่ยวกับการนำประยุกต์ใช้งานได้จริง เช่น การนำไปประยุกต์เป็นอิฐทนความร้อน ใช้ในวงการก่อสร้างเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ หรืออิฐประดับตกแต่งสวน ซึ่งจากการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่กากซีแบ็งร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าปริมาณการชะละลายธาตุอาหารสูงที่สุด และมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 100-400 kg/cm<sup>2</sup> นั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐที่ใช้ในการประดับตกแต่งสวนทั่วไปซึ่งมีกำลังรับแรงอัดที่ประมาณ 70 kg/cm<sup>2</sup> พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมกากซีแบ็งสามารถพัฒนาต่อได้โดยการเพิ่มปริมาณกากซีแบ็งเพื่อทดแทนในแต่ละสัดส่วนผสมในปริมาณที่มากขึ้น ก็จะส่งผลให้จะสามารถชะละลายธาตุอาหารออกมาได้มากขึ้นด้วย

นอกจากนี้ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่อง วัสดุประสานที่มีอนุภาคขนาดเล็กทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นหากทำการย่อยขนาดของวัสดุประสานให้มีขนาดเล็กกว่า 44 ไมครอน หรือ 325 เมชได้ จะทำให้วัสดุประสานสามารถทำปฏิกิริyajีโอพอลิเมโรเซชันได้ดีขึ้นเพื่อประโยชน์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต

### บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. (2545). *แผนที่และแหล่งแร่ในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. ค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2555 เข้าถึงได้จาก <http://www.dss.go.th>
- จรรยา วังศ์วัฒนา. (2545). *การสังเคราะห์และการศึกษาจลนศาสตร์ของซีโอไลท์โซเดียมเอจากดินขาวของไทย*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา.
- ชัย จาตุรพิทักษกุลและไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2549). *การศึกษาเอแคลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต*. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร.
- ชรินทร์ นมรักษ์, สุรพันธ์ สุคันปรี และ ชัย จาตุรพิทักษกุล. (2545). *การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต*. การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545. 20-23 มิถุนายน. กรุงเทพฯ. หน้า 191-199.
- دنۇفل تىننىو ڤاس ۋە ئىنڭىز ڤۇدبۇرى. (2551). *مورتار پۇنسىمەنت پورتلەند تېمىن ھېمىونىن ھىمىن ۋە ئېلېمېنتلارنىڭ پالەم نۇمىن بىر تەرىپىدە ئىشلىتىش*. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 28-29 มกราคม 2551.
- دنۇفل تىننىو ڤاس ۋە سۇرەخ ۋۇتۇرۇل. (2551). *ئىتتىپاقىيەت ۋە ئېلېمېنتلارنىڭ پالەم نۇمىن بىر تەرىپىدە ئىشلىتىش*. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธิตีมา คุณยศยิ่ง. (2551). *การทดลองส่วนผสมเนื้อดินสำหรับการประดิษฐ์เครื่องประดับเซรามิก*. รายงานวิจัย:มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). *เถ้าลอยในงานคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย. กรุงเทพฯ.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). *สารซีโอพอลิเมอร์: วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์*. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2549.

- พลยุทธ์ สุขสมิติ. (2539). *ดินขาวและดินเหนียวดำ*. สำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 3 เชียงใหม่. ค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2555 เข้าถึงได้จาก <http://www.mne.eng.psu.ac.th>
- แมน อมรสิทธิ์. (2534). *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. พิมพ์ครั้งที่ 1 ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ กรุงเทพฯ
- วราศรี เอกประสิทธิ์. (2543). *การนำกากซีเมนต์จากอุตสาหกรรมน้ำยางข้นมาใช้ประโยชน์เพื่อการทำเป็นวัสดุบำรุงดิน*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วัชรพร ป้องก่าน. (2551). *โครงการนำของเสียกากซีเมนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้นไปเป็นส่วนประกอบในวัสดุก่อสร้าง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วันชัย แก้วยอด. (2540). *การตรวจสอบการจัดการน้ำเสียโรงงานยาง: กรณีศึกษาในจังหวัดสงขลา*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วิภาพรรณ อุบล. (2550). *การใช้ประโยชน์กากอินทรีย์จากอุตสาหกรรมน้ำยางข้น แปรรูปสัตน้ำและน้ำมันปาล์ม ในการเตรียมวัสดุปลูกหญ้าสนาม*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- คันศนีย รักไทยเจริญชีพ. (2557). *สรรสาระ การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction*. ;วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 62 ฉบับที่ 194, มกราคม 2557
- ศุภกร รักใหม่. (2556). *คู่มือสถานีทดลองการกระเจิงรังสีเอ็กซ์*. สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน).
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2518). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมไฮดรอกไซด์ มอก.150-2518*. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2539). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซิลิเกตเหลว มอก.433-2539*. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555). *สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปี 2555*. ค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2557. เข้าถึงได้จาก <http://www.moac.go.th>

- สรารุช จริตงาม. (2548). *คู่มือทฤษฎีและปฏิบัติการทดสอบดิน*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมทิพย์ ด้านธีรวิชัยและคณะ. (2545). *การตรวจสอบการจัดการของเสียของโรงงานน้ำยางข้น*. โครงการวิจัย 05011505 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุทธิชัย ประทีปประสาน. (2538). *เทคนิคการทำเคลือบปลายคล้ายผลึก*. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 137, 3-4.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี และคณะ. (2547). *การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการเตรียมปุ๋ยเหลวจากกากซีเมนต์น้ำยางข้น*. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. (2543). *ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ*. ภาควิชายางและเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2539). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซิลิเกตเหลว มอก. 433-2539*. กรุงเทพฯ.
- อนันต์ เขมพานิชย์กุล. (2548). *การหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซิลิกาตินขาวนราธิวาสและพอลิไวนิลอัลกอฮอล์สำหรับสารเคลือบกระดาษพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยใช้วิธีออกแบบส่วนผสมเชิงสถิติ*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- APHA, AWWA and WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater. 21<sup>st</sup> edition*. Published jointly by the American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation.
- ASTM C495 – 07. *Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete*. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C67 – 97. *Standard Test Method of Sampling and Testing Brick and Structural Clay*. American Society for Testing and Materials. PA. USA.
- ASTM C192/C 192M-06. *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*. Annual Book of ASTM Standards. V. 04.01 2013.



- ASTM C39/C 39M-05. *Standard test method for compressive strength of cylindrical Concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standards. V. 04.01 2013.
- ASTM C618 - 12. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Annual Book of ASTM Standards. V. 30.09 2012.
- Blackley. D.C. (1997). *Polymer Latices. Vol. 2. Types of Latices*. Chapman & Hall. London.
- Chareerat, T., Pimraksa, K., Chindaprasirt, P., Maegawa, A. and Hatanaka, S. (2008). *Composition and microstructure of fly ash geopolymer containing rice husk ash*. Technology and Innovation for Sustainable Development Conference. Khon Kaen. 168-171.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., (2006). *Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer*. Cement and Concrete Composites. Vol. 29. No. 3. pp. 224-229.
- Chindaprasirt P., Chalee W., Jaturapitakkul C., and Rattanasak U., (2009). *Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers*. Waste Management. Vol. 29. No. 2. pp. 539-543.
- Damer, S.A. (1976). *Rice husk ash a pozzolanic material*. Bangkok Asian Institute of Technology.
- Davidovits, J., (1984), *Mineral Polymers and Methods of Making Them*. USA. US Patent No. 4349386.
- Davidovits J., (1994). *Properties of Geopolymer Cements*. Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Kiev State Technical University. Vol. 1, pp. 131-149.
- Davidovits, J., (1999), *Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology*. Proceedings: 2<sup>nd</sup> International conference on geopolymer, France : Paris, pp. 9-40.

- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M. (2004). *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model*. Cement and Concrete Research. 35. 1204-1209.
- Geopolymer Institute. (2549). *Geopolymer*. available online at <http://www.geopolymer.org> (2 March 2012).
- Geopolymer. (1999). *International Conference and Publisher in the Proceeding of Geopolymer 99*. <http://www.geopolymer.org> , (2011 October 30).
- Gazeley K.F., Gorton A.D.T. and Pendle T.D. (1988). In: E.D. Roberts, Editor. *Natural Rubber Science and Technology*. Oxford Univ. Press, New York.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., (2003). *The Effect of Mixture Composition and Curing Temperature on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Indonesia : Bali. CMT 14-CMT 18.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V. (2004). *Brief Review of Development of Geopolymer Concrete*. American Concrete Institute. USA : Los Vegas. 25 May 2004. pp. 1-10.
- Hench, L. (1998). *SOL-GEL SILICA. Properties, Processing and Technology Transfer*. Noyes Publication.
- Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A. (1996). *Palm Oil Fuel Ash A Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction*. Proceedings of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21<sup>st</sup> Century. 20-23 November 1996. Bangkok. Thailand. pp. D361-D366.
- Klabprasit T., Jaturapitakkul C., Chalee W., Chindaprasirt P., and Songpiriyakij S., (2008). *Influence of Si/Al ratio on Compressive Strength of Rice Husk-Bark Ashes and Fly Ash-based Geopolymer Paste*. The 3<sup>rd</sup> ACF international conference ACF/VCA. Rex Hotel. Ho Chi Minh City. Vietnam. pp. 151-157.

- Murat, M., Comel, C. (1983). *Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals III. Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite*. Cement and Concrete Research, 13(5): 631.
- Neville A.M. (1996). *Properties of Concrete*. 4th ed. England. Addison Wesley.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999). *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*. Cement and Concrete Research. 29. 1323-1329.
- Pankhet K. and Rattanasak U. (2010) *Effect of Admixture on the Properties of Fly Ash Geopolymer*. KMUTT Research and Development Journal. 33 (2), pp. 121-132.
- Peter Duxson and John L. Provis. (2008). *Designing Precursors for Geopolymer Cements*. J. Am. Ceram. Soc. 91 [12] 3864–3869.
- Sathyseelan S. (2006). *Latex Sludge-An Alternate Cheap Phosphorus Source in Crop Production*. World congress of soil science 18<sup>th</sup> Philadelphia Pennsylvania. USA. July. 9-15: 154-158
- Tay, J.H. (1990). *Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material*. Journal of Material in Civil Engineering. ASCE. Vol. 2. pp. 94-105.
- Tay, J.H. and Show, K.Y. (1995). *Use of ash Derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material*. Resources. Conservation and recycling. Vol. 13. pp. 27-36.
- Van, J., Van, D. and Lukey, G.C. (2002). *The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers*. Chemical Engineering Journal. 89. 63-73.
- Varasri Tekjprasit. (2000). *The Utilization of The Centrifuged Residue from Concentrated Latex Industry as a Soil Conditioner*. Master of Science Thesis in Environmental Management. Prince of Songkla University.

- Weerachart Tangchirapat, Jatupol Tangpakasit, Saksin Waew-kum, and Chai Jaturapitakkul, (2003). *A New Pozzolanic Material from Palm Oil Fuel Ash*. *KMUTT Research and Development Journal*. Vol 26. No 4. pp. 459-473.
- Wichian C. and Keeratikorn C. (2012). *Evaluation of Sulfate Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. *KMUTT Research & Development Journal*, Vol 35. No 2. pp.15.
- Warintorn Banchapattanasakda, Wirach Taweepreda, Tunwadee Tachapattaworakul Suksaroj and Chaisri Suksaroj. (2009). *Shrinkage and Compressive Strength Behaviors of Clay Brick Blended with Concentrated Latex Industry's Waste Residue*. *KKU Engineering Journal* Volume 36 Number 4 October-December, 283-292.
- White J.R. and De S.K., (2001). *Rubber Technologist's Handbook*. Rapra Technology Limited: UK.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5$ )

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ความหนาแน่น เฉลี่ย ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
100MK0PA0LW-5M(0.5)	1	230.19	4.88	4.92	5.27	4.87	4.90	5.26	1.82	1.82	0.80	0.82
	2	231.37	4.84	4.94	5.31	4.83	4.93	5.29	1.82		0.78	
	3	233.03	4.86	4.95	5.29	4.84	4.95	5.27	1.83		0.88	
100MK0PA0LW-10M(0.5)	1	239.05	4.86	4.83	5.37	4.84	4.83	5.35	1.90	1.98	0.78	1.02
	2	240.78	4.84	4.84	5.20	4.83	4.82	5.18	1.98		1.05	
	3	241.82	4.82	4.87	5.01	4.80	4.85	4.99	2.06		1.22	
100MK0PA0LW-15M(0.5)	1	241.20	4.84	4.92	5.31	4.82	4.91	5.30	1.91	1.94	0.76	0.85
	2	241.90	4.84	4.84	5.33	4.83	4.82	5.32	1.94		0.81	
	3	243.70	4.82	4.88	5.27	4.80	4.87	5.25	1.97		1.00	
80MK20PA0LW-5M(0.5)	1	222.02	4.92	4.84	5.21	4.90	4.83	5.20	1.79	1.78	0.91	0.83
	2	223.02	4.85	4.84	5.29	4.83	4.83	5.27	1.80		1.10	
	3	223.18	4.82	4.82	5.43	4.81	4.81	5.43	1.77		0.50	

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5$  (ต่อ))

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ความหนาแน่น เฉลี่ย ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
80MK20PA0LW-10M(0.5)	1	224.08	4.90	4.84	5.42	4.88	4.83	5.41	1.74	1.73	0.89	0.99
	2	225.21	4.84	4.94	5.37	4.83	4.92	5.35	1.75		0.93	
	3	227.15	4.93	4.86	5.56	4.91	4.85	5.53	1.71		1.15	
80MK20PA0LW-15M(0.5)	1	237.63	4.84	4.81	5.47	4.82	4.80	5.45	1.87	1.84	0.92	0.84
	2	233.57	4.85	4.85	5.47	4.84	4.83	5.46	1.82		0.80	
	3	235.47	4.86	4.92	5.33	4.85	4.90	5.32	1.85		0.80	
80MK0PA20LW-5M(0.5)	1	217.09	4.84	4.82	5.41	4.84	4.81	5.40	1.68	1.68	0.39	0.54
	2	216.03	4.83	4.82	5.50	4.82	4.81	5.49	1.67		0.70	
	3	216.14	4.84	4.82	5.45	4.82	4.82	5.44	1.69		0.54	
80MK0PA20LW-10M(0.5)	1	219.21	4.86	4.95	5.39	4.85	4.93	5.39	1.68	1.65	0.70	0.75
	2	218.06	4.85	4.87	5.44	4.84	4.86	5.42	1.65		0.75	
	3	220.21	4.89	4.64	5.45	4.87	4.63	5.44	1.61		0.81	

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 0.5$  (ต่อ))

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ความหนาแน่น เฉลี่ย ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
80MK0PA20LW-15M(0.5)	1	217.44	4.89	4.88	5.32	4.88	4.88	5.30	1.72	1.73	0.58	0.63
	2	216.17	4.88	4.85	5.31	4.87	4.84	5.30	1.73		0.70	
	3	217.04	4.84	4.89	5.27	4.83	4.88	5.26	1.74		0.60	
80MK10PA10LW-5M(0.5)	1	213.36	4.86	4.86	5.37	4.85	4.84	5.35	1.72	1.70	0.99	0.75
	2	213.26	4.86	4.87	5.39	4.86	4.86	5.37	1.69		0.66	
	3	214.49	4.84	4.88	5.36	4.82	4.87	5.36	1.70		0.62	
80MK10PA10LW-10M(0.5)	1	211.54	4.84	4.89	5.31	4.82	4.88	5.30	1.69	1.72	0.75	0.92
	2	212.72	4.85	4.90	5.41	4.85	4.88	5.39	1.70		0.70	
	3	212.93	4.86	4.88	5.56	4.83	4.86	5.55	1.78		1.30	
80MK10PA10LW-15M(0.5)	1	226.86	4.88	4.89	5.53	4.86	4.88	5.52	1.71	1.72	0.79	0.75
	2	227.89	4.85	4.94	5.49	4.83	4.93	5.48	1.72		0.79	
	3	226.54	4.85	4.89	5.50	4.85	4.88	5.48	1.74		0.67	



ตารางที่ ก-2 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$ )

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น เฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
100MK0PA0LW-5M(1.5)	1	232.18	4.89	4.90	5.29	4.88	4.89	5.27	1.83	1.84	0.78	0.80
	2	233.68	4.90	4.87	5.30	4.89	4.85	5.29	1.85		0.80	
	3	231.67	4.84	4.93	5.27	4.82	4.91	5.27	1.84		0.82	
100MK0PA0LW-10M(1.5)	1	241.55	4.88	4.84	5.36	4.85	4.83	5.34	1.91	1.95	1.10	1.00
	2	242.47	4.86	4.83	5.25	4.84	4.83	5.23	1.97		0.89	
	3	240.46	4.83	4.85	5.23	4.80	4.85	5.21	1.96		1.00	
100MK0PA0LW-15M(1.5)	1	246.27	4.90	4.89	5.30	4.88	4.87	5.29	1.94	1.96	0.90	0.83
	2	245.56	4.85	4.81	5.30	4.83	4.80	5.28	1.99		0.80	
	3	245.46	4.85	4.90	5.31	4.85	4.87	5.29	1.95		0.79	
80MK20PA0LW-5M(1.5)	1	225.58	4.89	4.85	5.32	4.88	4.83	5.30	1.79	1.79	0.99	0.81
	2	224.80	4.83	4.82	5.31	4.83	4.80	5.29	1.82		0.79	
	3	224.78	4.81	4.86	5.42	4.80	4.85	5.41	1.77		0.65	

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$ ) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	การหดตัว (%)	การหดตัวเฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
80MK20PA0LW-10M(1.5)	1	225.26	4.92	4.83	5.42	4.90	4.81	5.41	1.75	1.75	0.91	0.96
	2	226.24	4.85	4.94	5.43	4.84	4.92	5.40	1.74		1.07	
	3	227.21	4.91	4.86	5.41	4.89	4.84	5.39	1.77		0.89	
80MK20PA0LW-15M(1.5)	1	238.35	4.82	4.83	5.40	4.81	4.82	5.39	1.90	1.87	0.70	0.82
	2	235.17	4.83	4.86	5.41	4.82	4.85	5.39	1.85		0.99	
	3	236.52	4.85	4.90	5.37	4.83	4.89	5.36	1.85		0.78	
80MK0PA20LW-5M(1.5)	1	219.25	4.81	4.85	5.43	4.80	4.84	5.43	1.70	1.69	0.55	0.51
	2	218.36	4.84	4.84	5.45	4.84	4.84	5.44	1.68		0.48	
	3	217.52	4.79	4.84	5.43	4.79	4.83	5.43	1.71		0.51	
80MK0PA20LW-10M(1.5)	1	220.43	4.84	4.90	5.40	4.83	4.90	5.39	1.69	1.68	0.48	0.73
	2	219.90	4.83	4.85	5.42	4.81	4.84	5.41	1.69		0.80	
	3	221.30	4.87	4.79	5.44	4.85	4.77	5.44	1.67		0.92	

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$ ) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	ความหนาแน่น เฉลี่ย ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
80MKOPA20LW-15M(1.5)	1	220.25	4.86	4.89	5.35	4.85	4.89	5.34	1.74	1.75	0.63	0.61
	2	220.04	4.84	4.86	5.37	4.84	4.85	5.36	1.75		0.42	
	3	222.15	4.87	4.81	5.35	4.86	4.80	5.33	1.75		0.79	
80MK10PA10LW-5M(1.5)	1	212.30	4.83	4.84	5.35	4.82	4.83	5.34	1.73	1.72	0.60	0.73
	2	212.68	4.87	4.83	5.39	4.86	4.81	5.38	1.71		0.80	
	3	214.25	4.82	4.87	5.34	4.80	4.86	5.33	1.73		0.79	
80MK10PA10LW-10M(1.5)	1	213.59	4.81	4.87	5.40	4.80	4.85	5.39	1.72	1.73	0.80	0.91
	2	214.68	4.81	4.88	5.41	4.79	4.86	5.39	1.73		1.09	
	3	214.18	4.88	4.87	5.39	4.86	4.86	5.38	1.74		0.84	
80MK10PA10LW-15M(1.5)	1	226.39	4.87	4.89	5.45	4.86	4.88	5.44	1.73	1.75	0.69	0.74
	2	225.32	4.84	4.87	5.47	4.82	4.87	5.45	1.74		0.78	
	3	226.03	4.86	4.89	5.43	4.85	4.87	5.42	1.77		0.74	

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ )

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น เฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
100MK0PA0LW-5M(2.5)	1	234.85	4.87	4.89	5.30	4.86	4.88	5.29	1.86	1.86	0.60	0.79
	2	235.69	4.88	4.89	5.31	4.86	4.87	5.29	1.86		1.11	
	3	233.60	4.87	4.91	5.30	4.86	4.91	5.27	1.85		0.67	
100MK0PA0LW-10M(2.5)	1	245.98	4.85	4.86	5.34	4.84	4.84	5.33	1.95	1.97	0.80	0.99
	2	245.58	4.81	4.85	5.36	4.80	4.83	5.34	1.96		0.97	
	3	246.47	4.82	4.84	5.33	4.80	4.82	5.31	1.98		1.20	
100MK0PA0LW-15M(2.5)	1	249.39	4.84	4.88	5.33	4.83	4.86	5.32	1.99	1.99	0.75	0.81
	2	249.23	4.83	4.87	5.32	4.81	4.86	5.30	1.99		0.89	
	3	248.23	4.83	4.88	5.32	4.82	4.87	5.30	1.98		0.79	
80MK20PA0LW-5M(2.5)	1	227.34	4.84	4.83	5.33	4.83	4.81	5.32	1.82	1.81	0.81	0.80
	2	226.25	4.83	4.84	5.35	4.82	4.82	5.34	1.81		0.81	
	3	226.24	4.85	4.86	5.38	4.84	4.85	5.36	1.78		0.78	

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ ) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น เฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
80MK20PA0LW-10M(2.5)	1	227.34	4.88	4.85	5.40	4.86	4.83	5.39	1.78	1.79	1.00	0.94
	2	228.55	4.87	4.83	5.41	4.85	4.82	5.40	1.80		0.80	
	3	228.61	4.91	4.82	5.42	4.89	4.80	5.41	1.78		1.01	
80MK20PA0LW-15M(2.5)	1	240.28	4.80	4.80	5.39	4.78	4.80	5.37	1.93	1.89	0.79	0.81
	2	237.30	4.83	4.85	5.40	4.81	4.84	5.39	1.88		0.86	
	3	238.55	4.87	4.89	5.41	4.85	4.89	5.39	1.85		0.78	
80MK0PA20LW-5M(2.5)	1	217.45	4.80	4.83	5.41	4.78	4.83	5.39	1.74	1.74	0.59	0.49
	2	217.59	4.81	4.82	5.42	4.81	4.81	5.41	1.74		0.39	
	3	218.46	4.77	4.84	5.39	4.75	4.84	5.39	1.76		0.50	
80MK0PA20LW-10M(2.5)	1	221.59	4.82	4.89	5.39	4.80	4.87	5.39	1.74	1.74	0.78	0.71
	2	221.50	4.80	4.87	5.41	4.79	4.86	5.40	1.75		0.74	
	3	221.69	4.85	4.86	5.42	4.84	4.85	5.41	1.74		0.60	

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลและผลการทดสอบความหนาแน่นและการหดตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ ) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ขนาดก่อน (cm)			ขนาดหลัง (cm)			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น เฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	การหดตัว (%)	การหดตัว เฉลี่ย (%)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง				
80MKOPA20LW-15M(2.5)	1	223.98	4.85	4.87	5.37	4.83	4.87	5.35	1.77	1.77	0.69	0.61
	2	222.60	4.82	4.83	5.36	4.82	4.82	5.34	1.79		0.59	
	3	222.46	4.85	4.85	5.34	4.83	4.84	5.34	1.77		0.54	
80MK10PA10LW-5M(2.5)	1	212.67	4.85	4.83	5.38	4.83	4.83	5.37	1.69	1.70	0.60	0.71
	2	212.78	4.84	4.85	5.36	4.84	4.80	5.35	1.69		1.02	
	3	213.56	4.80	4.82	5.36	4.79	4.81	5.35	1.72		0.50	
80MK10PA10LW-10M(2.5)	1	213.60	4.79	4.89	5.38	4.78	4.87	5.37	1.70	1.69	0.80	0.91
	2	215.28	4.80	4.87	5.45	4.78	4.85	5.43	1.69		1.13	
	3	215.30	4.78	4.90	5.42	4.76	4.89	5.41	1.70		0.80	
80MK10PA10LW-15M(2.5)	1	226.95	4.85	4.86	5.48	4.83	4.85	5.47	1.76	1.77	0.80	0.72
	2	224.69	4.80	4.85	5.41	4.79	4.83	5.40	1.78		0.76	
	3	224.60	4.84	4.84	5.46	4.83	4.83	5.45	1.76		0.60	

ตารางที่ ก-4 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5 ; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5, 10, 15 โมลาร์)

ตัวอย่าง	ดินขาว (kg)	เถ้าใยปาล์ม (kg)	กากขี้แป้ง (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	NaOH (kg)	W/B	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )		
							7 วัน	14 วัน	28 วัน
100MK0PA0LW-5M(0.5)	0.50	0.00	0.00	0.18	0.32	0.51	173	198	219
100MK0PA0LW-10M(0.5)	0.50	0.00	0.00	0.18	0.32	0.51	187	216	237
100MK0PA0LW-15M(0.5)	0.50	0.00	0.00	0.18	0.32	0.51	199	225	254
80MK20PA0LW-5M(0.5)	0.40	0.10	0.00	0.18	0.32	0.51	107	122	132
80MK20PA0LW-10M(0.5)	0.40	0.10	0.00	0.18	0.32	0.51	124	135	146
80MK20PA0LW-15M(0.5)	0.40	0.10	0.00	0.18	0.32	0.51	132	149	168
80MK0PA20LW-5M(0.5)	0.40	0.00	0.10	0.40	0.32	0.54	56	69	83
80MK0PA20LW-10M(0.5)	0.40	0.00	0.10	0.40	0.32	0.54	73	84	95
80MK0PA20LW-15M(0.5)	0.40	0.00	0.10	0.40	0.32	0.54	85	91	102
80MK10PA10LW-5M(0.5)	0.40	0.05	0.05	0.35	0.32	0.54	67	80	113
80MK10PA10LW-10M(0.5)	0.40	0.05	0.05	0.35	0.32	0.54	82	110	125
80MK10PA10LW-15M(0.5)	0.40	0.05	0.05	0.35	0.32	0.54	106	117	130

ตารางที่ ก-5 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 1.5 ; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5, 10, 15 โมลาร์)

ตัวอย่าง	ดินขาว (kg)	เถ้าใยปาล์ม (kg)	กากซีเมนต์ (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	NaOH (kg)	W/B	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )		
							7 วัน	14 วัน	28 วัน
100MK0PA0LW-5M(1.5)	0.50	0.00	0.00	0.30	0.20	0.41	364	389	401
100MK0PA0LW-10M(1.5)	0.50	0.00	0.00	0.30	0.20	0.41	382	408	423
100MK0PA0LW-15M(1.5)	0.50	0.00	0.00	0.30	0.20	0.41	447	462	702
80MK20PA0LW-5M(1.5)	0.40	0.10	0.00	0.30	0.20	0.41	324	365	392
80MK20PA0LW-10M(1.5)	0.40	0.10	0.00	0.30	0.20	0.41	361	382	402
80MK20PA0LW-15M(1.5)	0.40	0.10	0.00	0.30	0.20	0.41	409	428	453
80MK0PA20LW-5M(1.5)	0.40	0.00	0.10	0.40	0.20	0.43	124	159	182
80MK0PA20LW-10M(1.5)	0.40	0.00	0.10	0.40	0.20	0.43	265	286	301
80MK0PA20LW-15M(1.5)	0.40	0.00	0.10	0.40	0.20	0.43	352	379	408
80MK10PA10LW-5M(1.5)	0.40	0.05	0.05	0.50	0.20	0.45	245	297	305
80MK10PA10LW-10M(1.5)	0.40	0.05	0.05	0.50	0.20	0.45	278	309	336
80MK10PA10LW-15M(1.5)	0.40	0.05	0.05	0.50	0.20	0.45	381	399	418



ตารางที่ ก-6 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 2.5 ; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5, 10, 15 โมลาร์)

ตัวอย่าง	ดินขาว (kg)	เถ้าใยปาล์ม (kg)	กากซีเมนต์ (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	NaOH (kg)	W/B	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )				
							1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	90 วัน
100MK0PA0LW-5M(2.5)	0.50	0.00	0.00	0.36	0.14	0.36	476	501	540	598	601
100MK0PA0LW-10M(2.5)	0.50	0.00	0.00	0.36	0.14	0.36	772	801	827	881	893
100MK0PA0LW-15M(2.5)	0.50	0.00	0.00	0.36	0.14	0.36	901	931	989	1070	1088
80MK20PA0LW-5M(2.5)	0.40	0.10	0.00	0.36	0.14	0.36	370	399	434	472	617
80MK20PA0LW-10M(2.5)	0.40	0.10	0.00	0.36	0.14	0.36	443	463	530	595	910
80MK20PA0LW-15M(2.5)	0.40	0.10	0.00	0.36	0.14	0.36	604	627	651	673	1107
80MK0PA20LW-5M(2.5)	0.40	0.00	0.10	0.58	0.14	0.42	152	175	208	231	241
80MK0PA20LW-10M(2.5)	0.40	0.00	0.10	0.58	0.14	0.42	236	305	349	354	378
80MK0PA20LW-15M(2.5)	0.40	0.00	0.10	0.58	0.14	0.42	447	460	489	526	532
80MK10PA10LW-5M(2.5)	0.40	0.05	0.05	0.51	0.14	0.40	229	259	282	342	417
80MK10PA10LW-10M(2.5)	0.40	0.05	0.05	0.51	0.14	0.40	355	382	431	478	520
80MK10PA10LW-15M(2.5)	0.40	0.05	0.05	0.51	0.14	0.40	432	487	501	558	693

ตารางที่ ก-7 แสดงรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่างข้อมูลจีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 100%

Mixed ID : 100MK0PA0LW-15M(2.5)

ข้อมูลพื้นฐาน	
Total Weight	1,000 g
Solid/Total Weight	0.76
[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ] / [NaOH]	2.50
ความเข้มข้น [NaOH]	15 M
ปริมาณน้ำใน [Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	41.97%
ปริมาณน้ำใน [NaOH]	56.00%
Total [H <sub>2</sub> O]	238 g
[H <sub>2</sub> O] + [NaSi] + [NaOH]	517 g
*[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ] + [NaOH]	279 g

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	latex waste	[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	[NaOH]	Vol. (kg)	Total	
								mass	mole
		0.50	-	-	0.36	0.14	1		
[SiO <sub>2</sub> ]	60.08	46.62	-	-	32.87	-	-	35.06	0.58
[Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	101.96	35.55	-	-	-	-	-	17.77	0.17
[Na <sub>2</sub> O]	61.98	-	-	-	25.16	43.96	-	15.26	0.25
[H <sub>2</sub> O]	18.02	-	-	-	41.97	56.04	-	22.99	1.28

Metakaolin = 500 กรัม  
 Palm ash = 0 กรัม  
 Concentrated latex waste = 0 กรัม  
 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (aq) = 358 กรัม  
 NaOH (aq) = 143 กรัม

Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na <sub>2</sub> O / SiO <sub>2</sub>	0.42	0.20-0.48
SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.35	3.30-4.50
H <sub>2</sub> O / Na <sub>2</sub> O	5.18	10-25
Na <sub>2</sub> O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.41	0.80-1.20
W/B	0.36	0.30-0.40

\* หมายเหตุ [Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>] + [NaOH] คือส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ตารางที่ ก-7 แสดงรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ (ต่อ)

ตัวอย่างข้อมูลจีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 80% : เถ้าปาล์ม 20%

Mixed ID : 80MK20PA0LW-15M(2.5)

ข้อมูลพื้นฐาน	
Total Weight	1,000 g
Solid/Total Weight	0.76
[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]/ [NaOH]	2.50
ความเข้มข้น [NaOH]	15 M
ปริมาณน้ำใน [Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	41.97%
ปริมาณน้ำใน [NaOH]	56.00%
Total [H <sub>2</sub> O]	238 g
[H <sub>2</sub> O]+ [NaSi]+ [NaOH]	517 g
*[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]+ [NaOH]	279 g

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	latex waste	[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	[NaOH]	Vol. (kg)	Total	
								mass	mole
		0.40	0.10	-	0.36	0.14	1		
[SiO <sub>2</sub> ]	60.08	46.62	45.88	-	32.87	-	-	34.99	0.58
[Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	101.96	35.55	0.64	-	-	-	-	14.28	0.14
[Na <sub>2</sub> O]	61.98	-	-	-	25.16	43.96	-	15.26	0.25
[H <sub>2</sub> O]	18.02	-	-	-	41.97	56.04	-	22.99	1.28

Metakaolin = 400 กรัม  
 Palm ash = 0 กรัม  
 Concentrated latex waste = 100 กรัม  
 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (aq) = 358 กรัม  
 NaOH (aq) = 143 กรัม

Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na <sub>2</sub> O / SiO <sub>2</sub>	0.42	0.20-0.48
SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.16	3.30-4.50
H <sub>2</sub> O / Na <sub>2</sub> O	5.18	10-25
Na <sub>2</sub> O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.76	0.80-1.20
W/B	0.36	0.30-0.40

\* หมายเหตุ [Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>]+[NaOH] คือส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ตารางที่ ก-7 แสดงรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ (ต่อ)

อย่างข้อมูลจีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 80% : กากขี้เถ้า 20%

Mixed ID : 80MK0PA20LW-15M(2.5)

ข้อมูลพื้นฐาน	
Total Weight	1,000 g
Solid/Total Weight	0.76
[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]/ [NaOH]	2.50
ความเข้มข้น [NaOH]	15 M
ปริมาณน้ำใน [Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	41.97%
ปริมาณน้ำใน [NaOH]	56.00%
Total [H <sub>2</sub> O]	238 g
[H <sub>2</sub> O]+ [NaSi]+ [NaOH]	517 g
*[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]+ [NaOH]	279 g

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	latex waste	[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	[NaOH]	Vol. (kg)	Total	
								mass	mole
		0.40	-	0.10	0.58	0.14	1		
[SiO <sub>2</sub> ]	60.08	46.62	-	0.65	32.87	-	-	37.61	0.63
[Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	101.96	35.55	-	0.22	-	-	-	14.24	0.14
[Na <sub>2</sub> O]	61.98	-	-	-	25.16	43.96	-	20.73	0.33
[H <sub>2</sub> O]	18.02	-	-	-	41.97	56.04	-	32.12	1.78

Metakaolin = 400 กรัม  
 Palm ash = 0 กรัม  
 Concentrated latex waste = 100 กรัม  
 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (aq) = 575 กรัม  
 NaOH (aq) = 143 กรัม

Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na <sub>2</sub> O / SiO <sub>2</sub>	0.53	0.20-0.48
SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.48	3.30-4.50
H <sub>2</sub> O / Na <sub>2</sub> O	5.33	10-25
Na <sub>2</sub> O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.40	0.80-1.20
W/B	0.42	0.30-0.40

\* หมายเหตุ [Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>]+[NaOH] คือส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ตารางที่ ก-7 แสดงรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอพอลิเมอร์ (ต่อ)

ตัวอย่างข้อมูลจีโอพอลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 80% : เถ้าปาล์ม 10% : กากขี้แป้ง 10%

Mixed ID : 80MK10PA10LW-15M(2.5)

ข้อมูลพื้นฐาน	
Total Weight	1,000 g
Solid/Total Weight	0.76
[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]/ [NaOH]	2.50
ความเข้มข้น [NaOH]	15 M
ปริมาณน้ำใน [Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	41.97%
ปริมาณน้ำใน [NaOH]	56.00%
Total [H <sub>2</sub> O]	238 g
[H <sub>2</sub> O]+ [NaSi]+ [NaOH]	517 g
*[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]+ [NaOH]	279 g

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	latex waste	[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	[NaOH]	Vol. (kg)	Total	
								mass	mole
[SiO <sub>2</sub> ]	60.08	46.62	45.88	0.65	32.87	-	-	37.57	0.63
[Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	101.96	35.55	0.64	0.22	-	-	-	14.26	0.14
[Na <sub>2</sub> O]	61.98	-	-	-	25.16	43.96	-	18.97	0.31
[H <sub>2</sub> O]	18.02	-	-	-	41.97	56.04	-	29.18	1.62

Metakaolin = 400 กรัม  
 Palm ash = 50 กรัม  
 Concentrated latex waste = 50 กรัม  
 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (aq) = 505 กรัม  
 NaOH (aq) = 143 กรัม

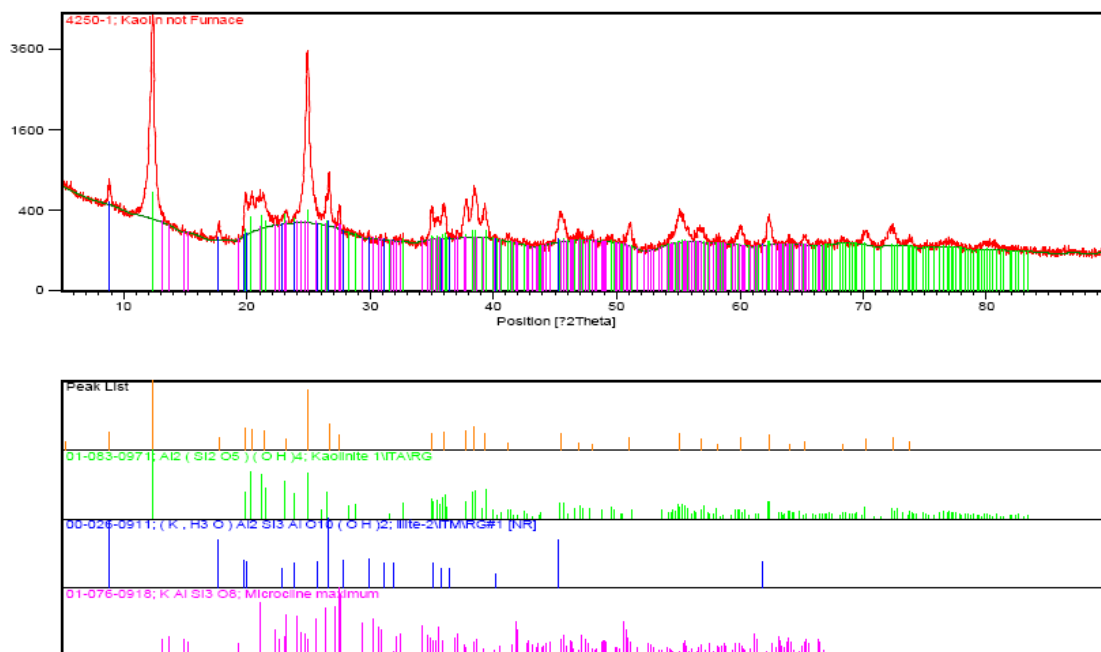
Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na <sub>2</sub> O / SiO <sub>2</sub>	0.49	0.20-0.48
SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.47	3.30-4.50
H <sub>2</sub> O / Na <sub>2</sub> O	5.29	10-25
Na <sub>2</sub> O / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.29	0.80-1.20
W/B	0.40	0.30-0.40

\* หมายเหตุ [Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>]+[NaOH] คือส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

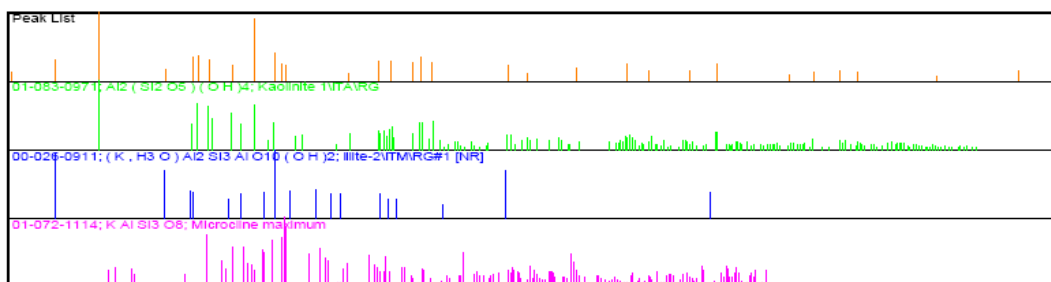
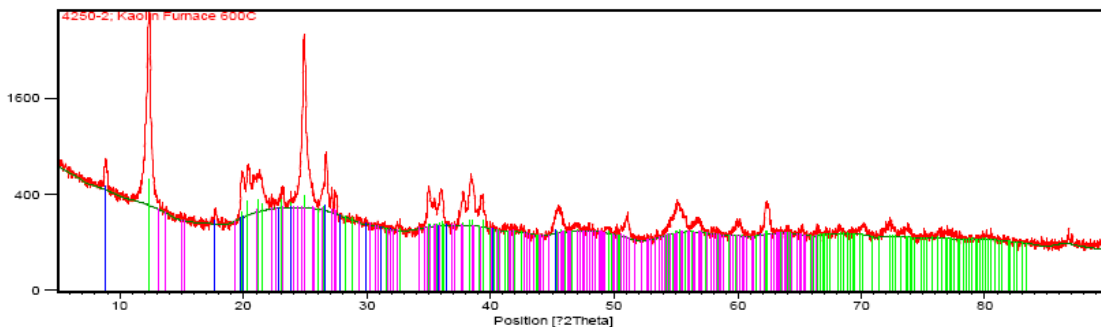
## ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD

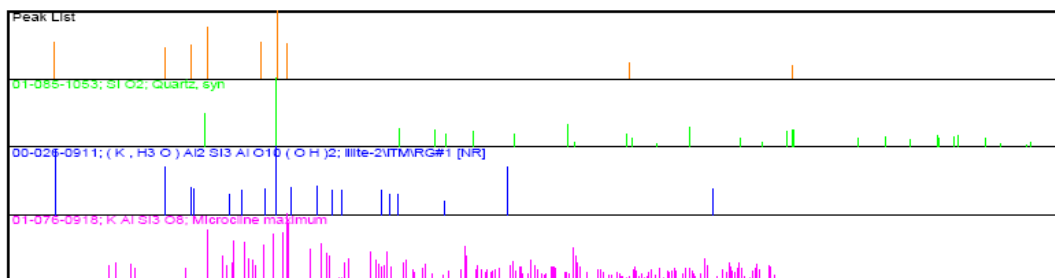
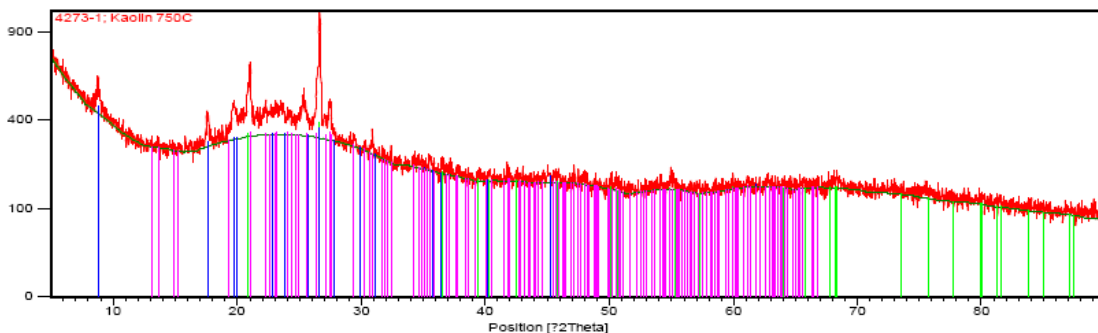
1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองโดยใช้เทคนิค XRD



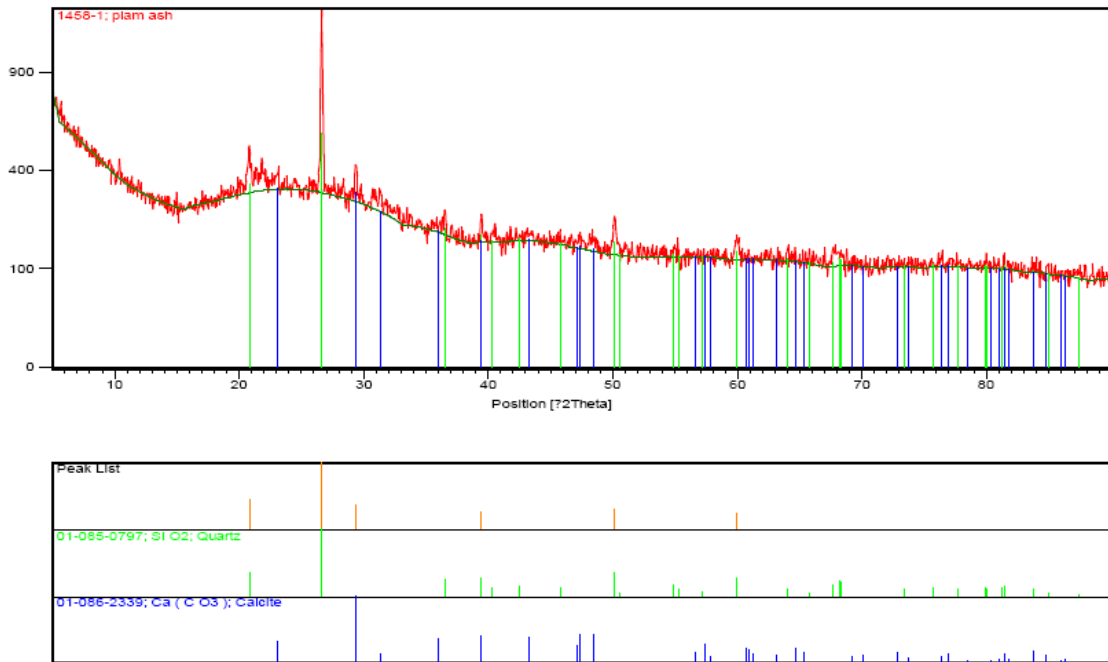
รูปที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวที่ไม่ผ่านการเผา



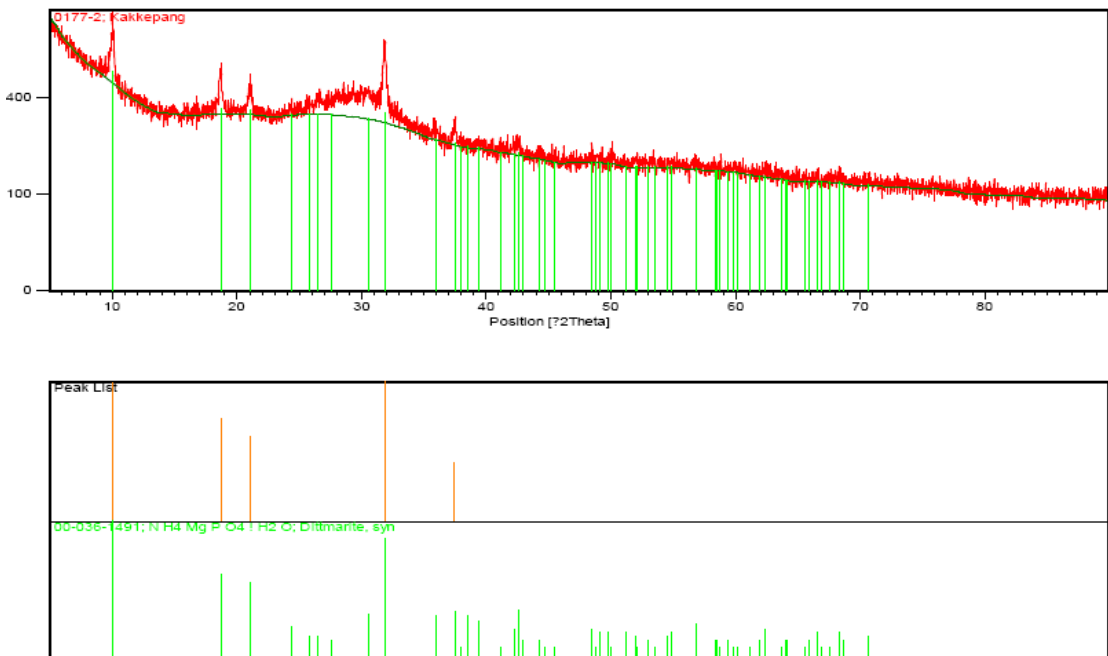
รูปที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 750 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



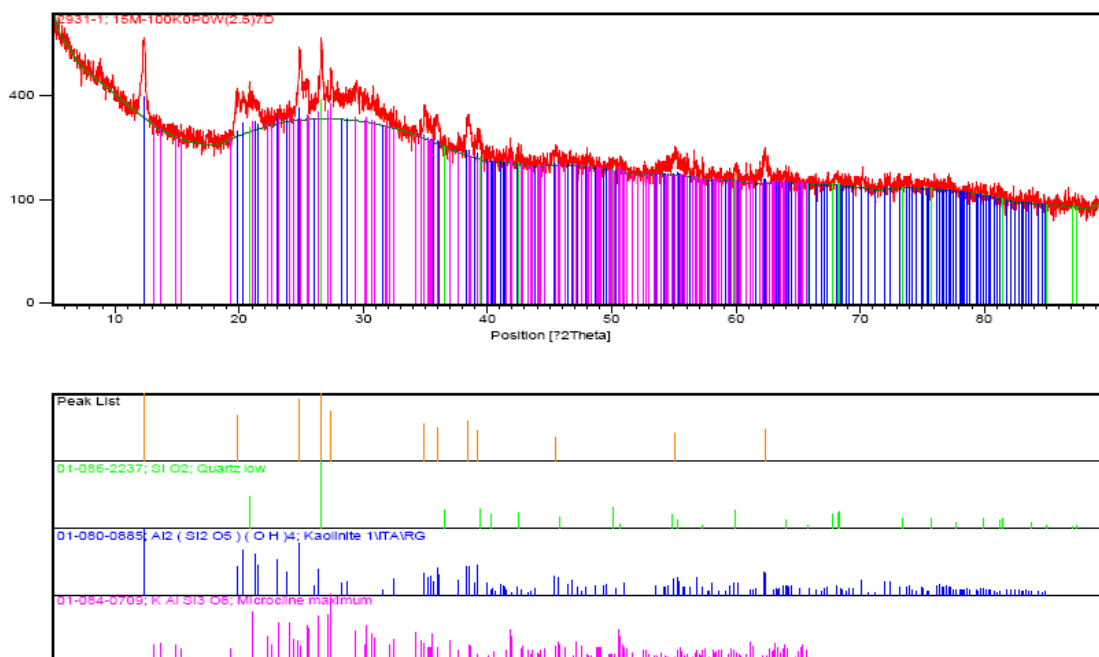
รูปที่ ข-4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของเถ้าปาล์ม



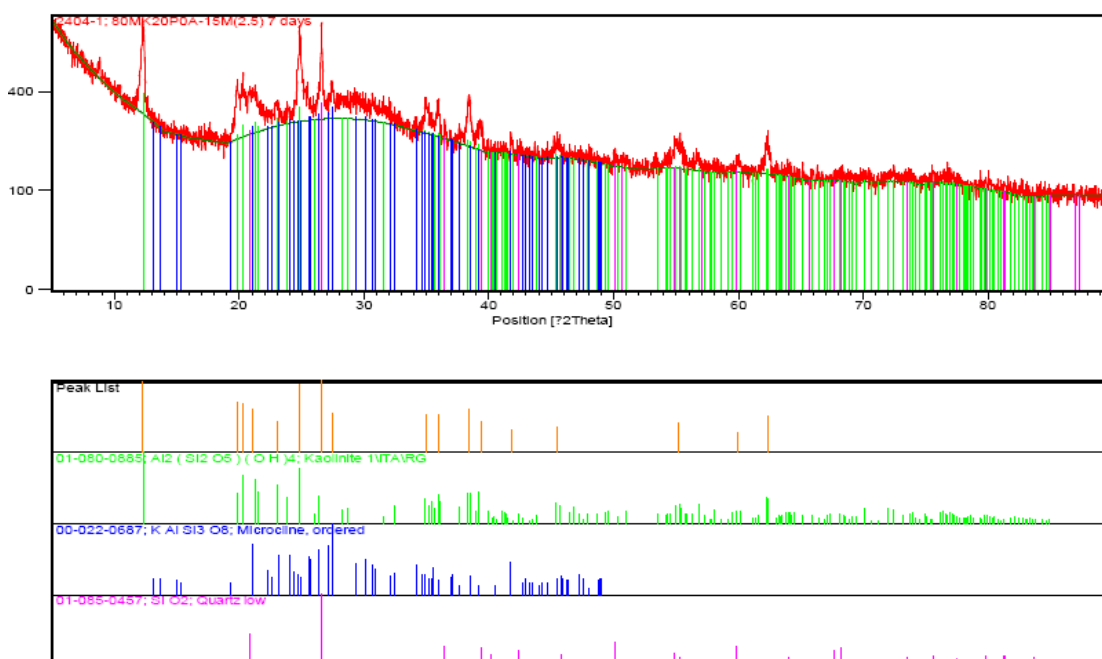
รูปที่ ข-5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของกากขี้แบ่ง



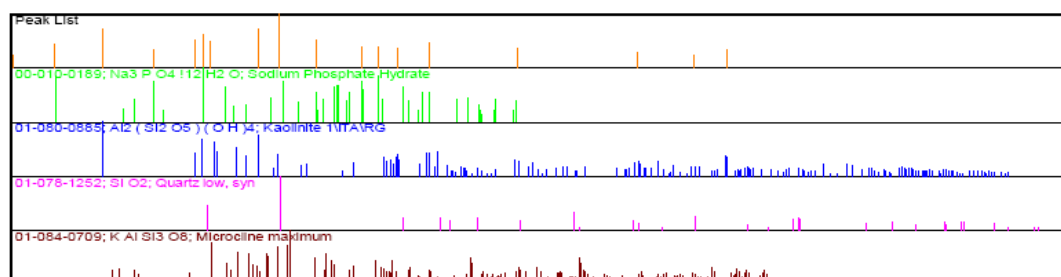
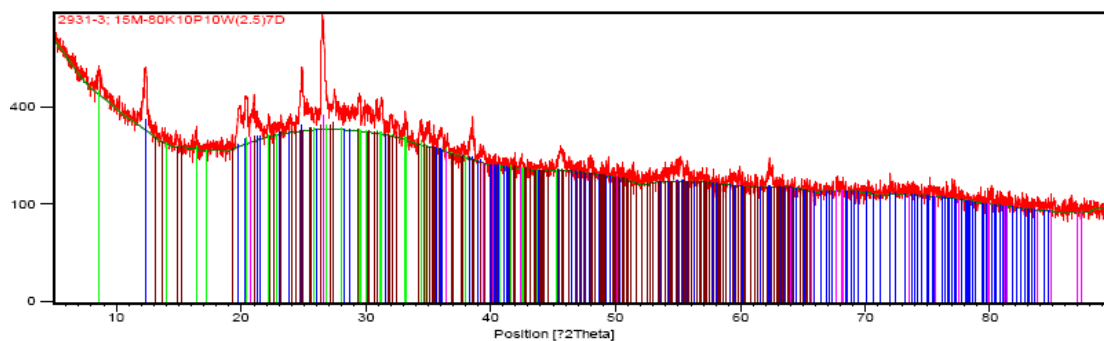
## 2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของจีโอพอลิเมอร์เพสต์โดยใช้เทคนิค XRD



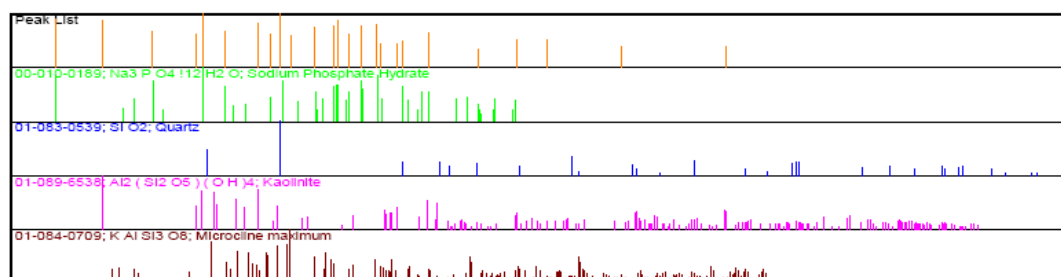
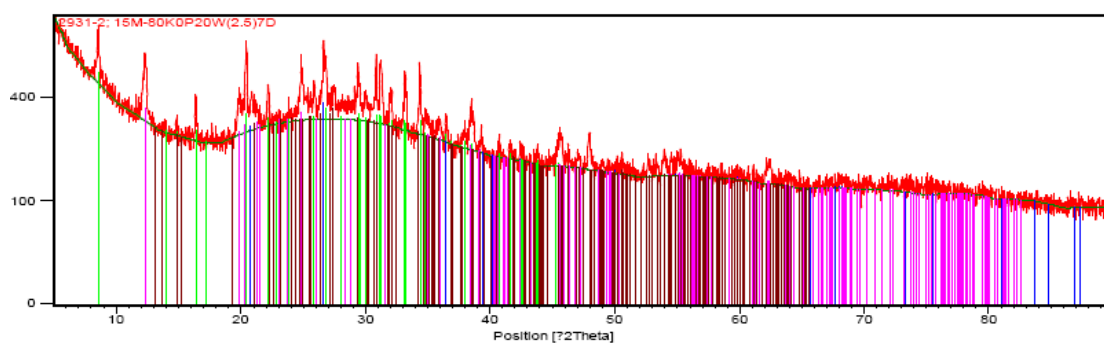
รูปที่ ข-6 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 100MK0PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน



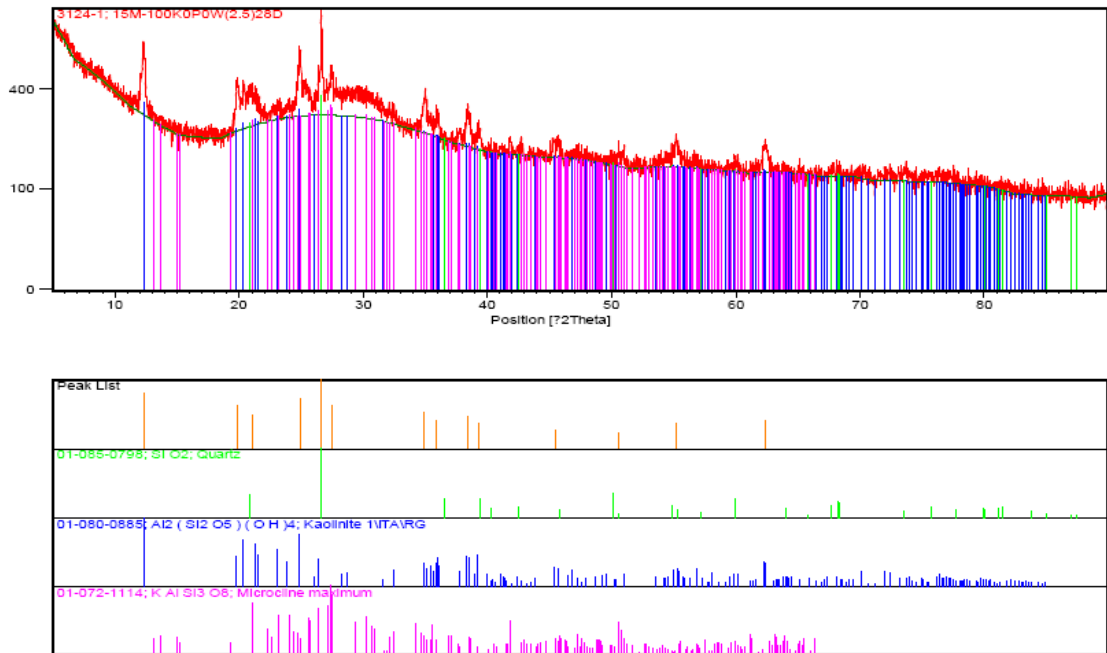
รูปที่ ข-7 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน



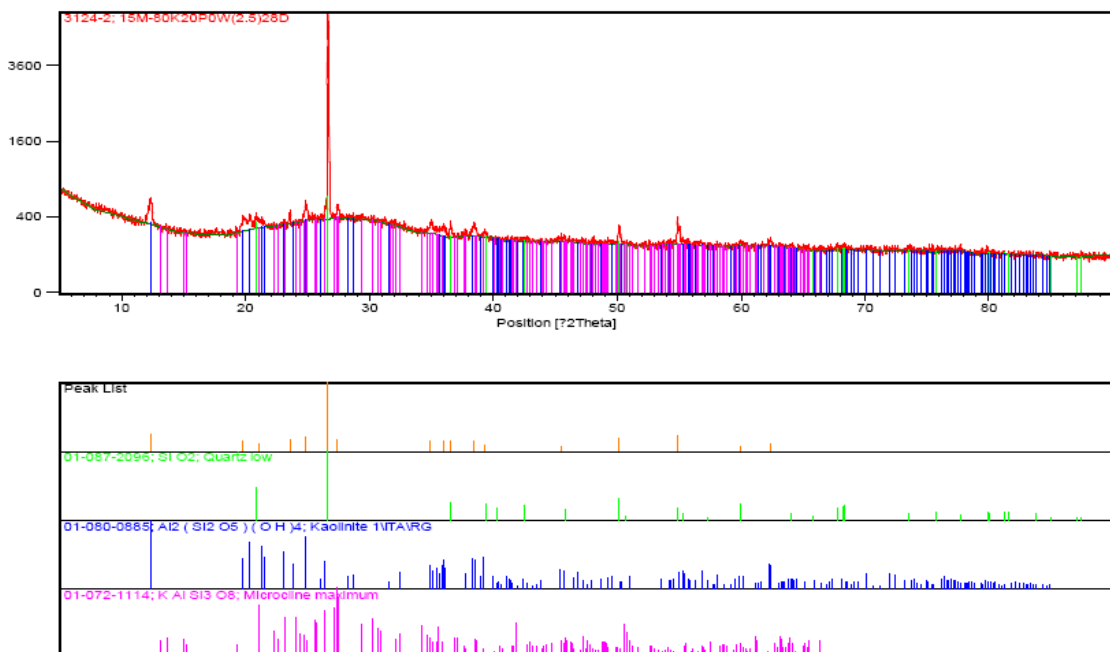
รูปที่ ข-8 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน



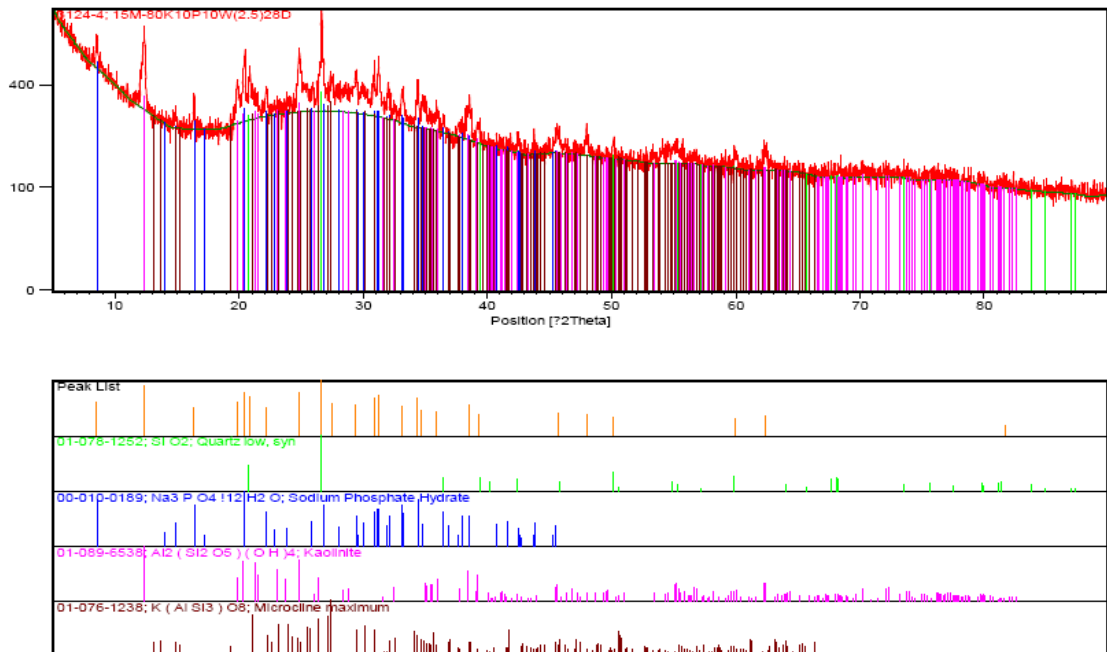
รูปที่ ข-9 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK0PA20LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน



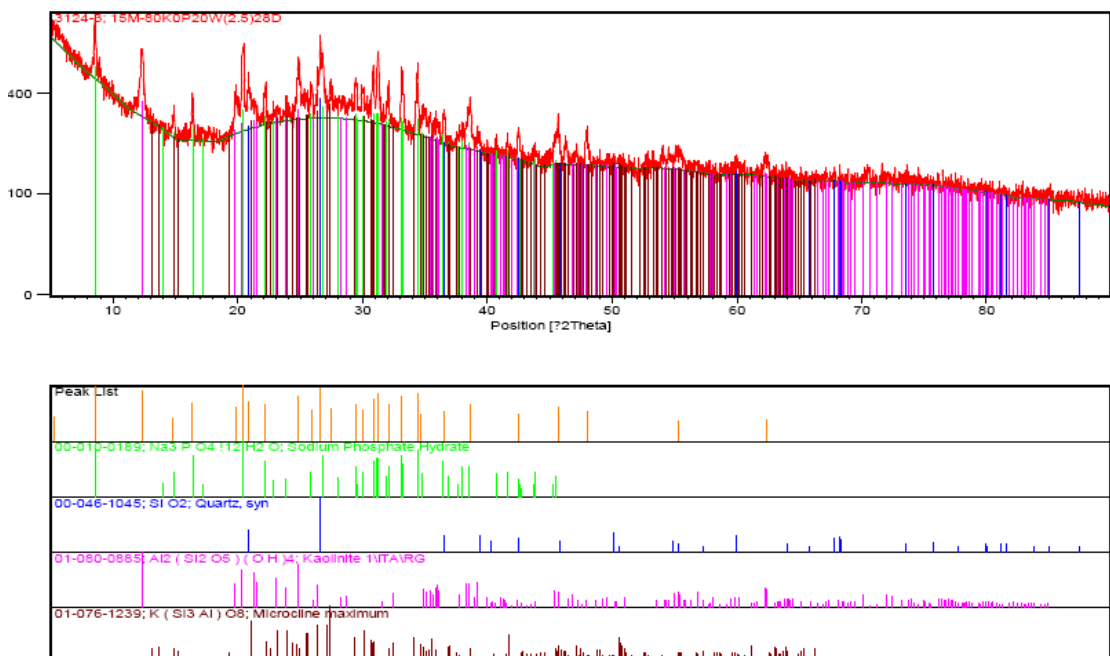
รูปที่ ข-10 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 100MK0PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน



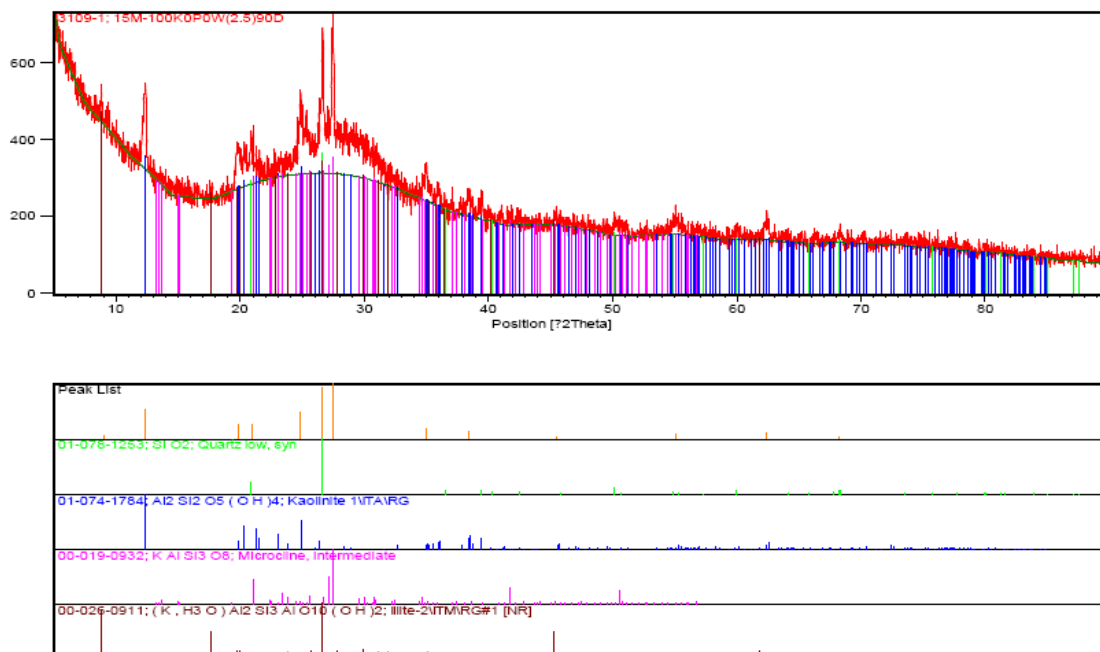
รูปที่ ข-11 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน



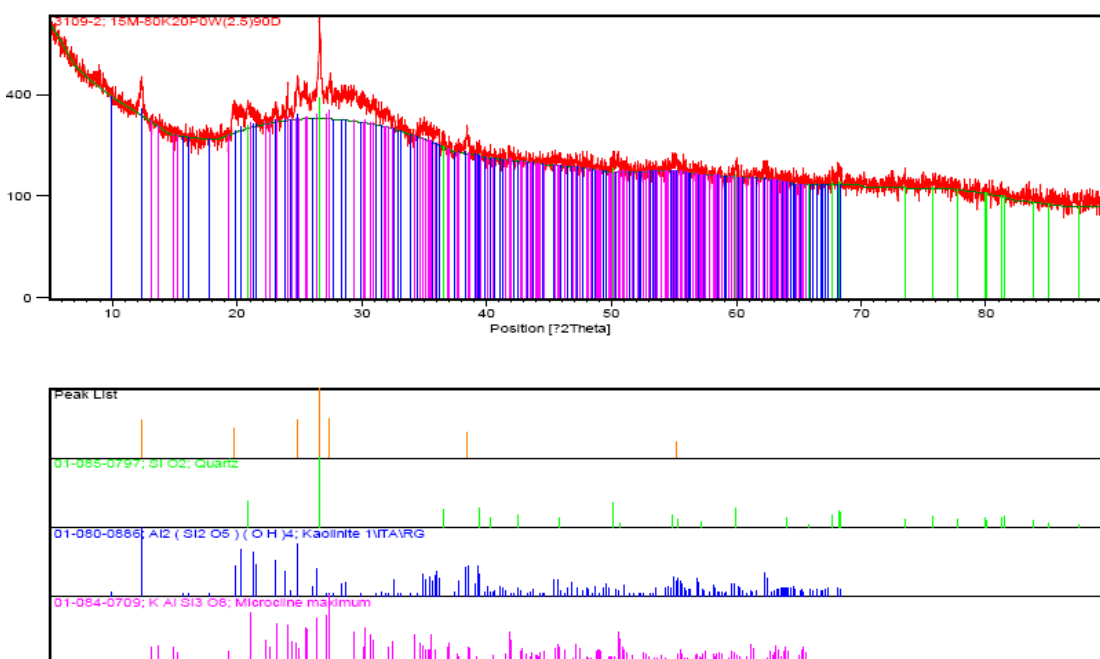
รูปที่ ข-12 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน



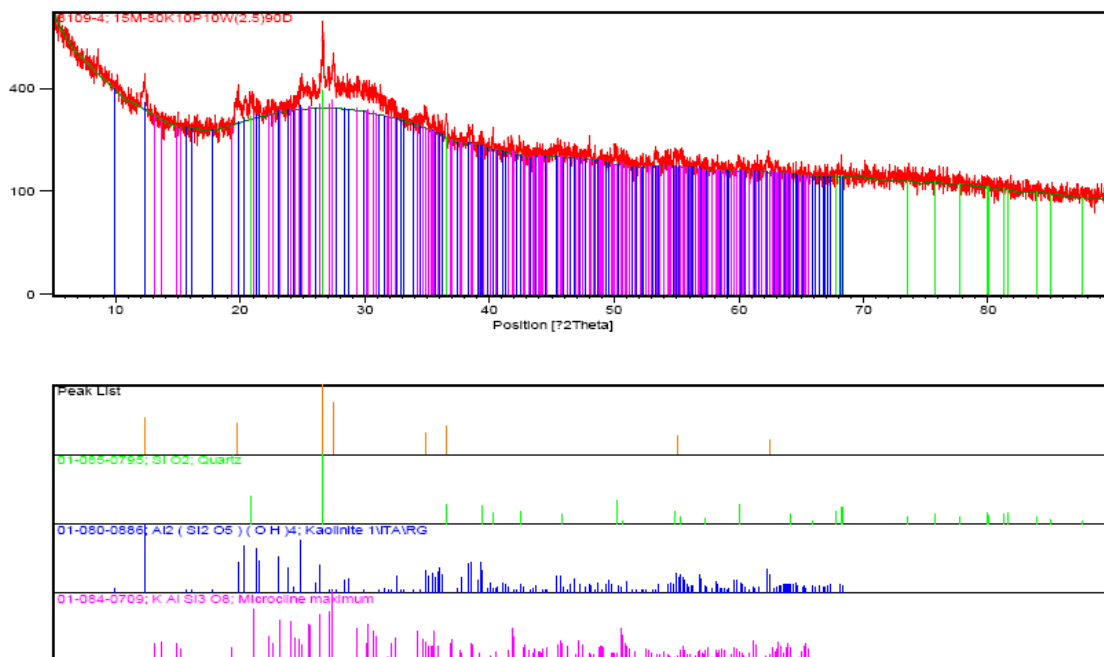
รูปที่ ข-13 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK0PA20LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน



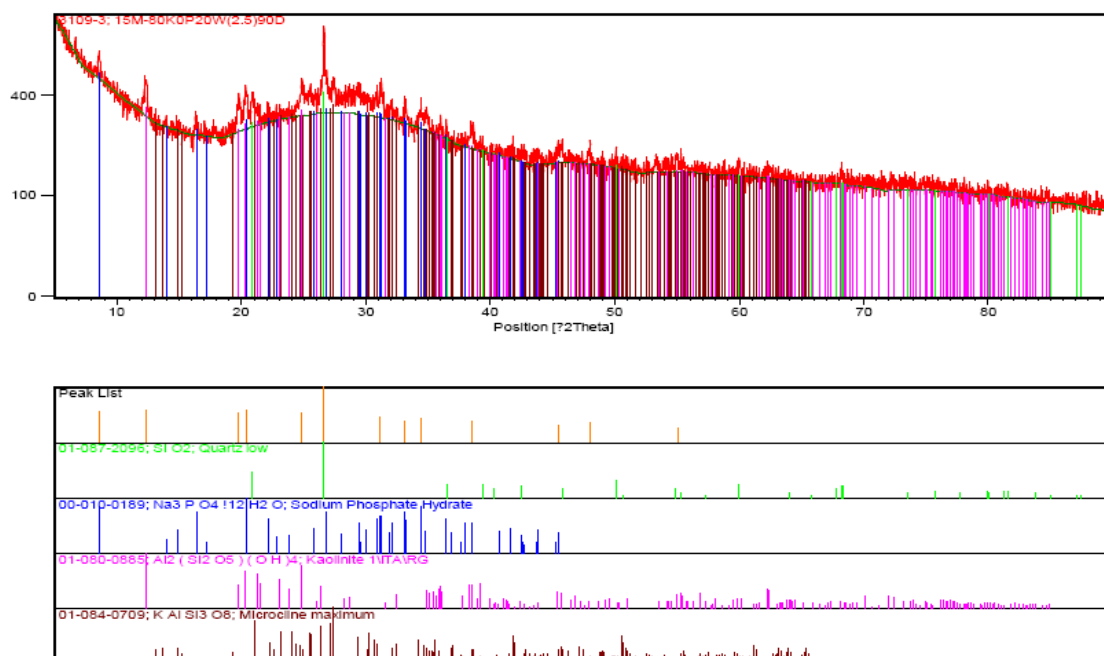
รูปที่ ข-14 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 100MKOPA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน



รูปที่ ข-15 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK20PA0LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน



รูปที่ ข-16 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK10PA10LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน



รูปที่ ข-17 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอพอลิเมอร์สูตร 80MK0PA20LW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 90 วัน

