



การสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและกากของเสีย
จากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
**Synthesis of Geopolymer Material using Palm Ash and Solid Waste
from Hydrogen Peroxide Production Process**

อาภากร พรหมเพชร
Arpakon Promptet

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**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์วัสดุอีโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและกากของเสียจาก
กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผู้เขียน นายอาภากร พรหมเพชร
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

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

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสวี)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูอุปการ)

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นายอาภากร พรหมเพชร)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอาภากร พรหมเพชร)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและกากของเสียจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผู้เขียน นายอาภากร พรหมเพชร

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเถ้าปาล์มและกากอลูมินาซึ่งเป็นของเสียจากการเผาเชื้อเพลิงชีวมวลและการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ โดยใช้แทนที่ดินขาวเผาทีสัดส่วนต่าง ๆ กันเพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ จากการวิเคราะห์วัสดุดังกล่าวด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก สอดคล้องกับองค์ประกอบหลักของดินขาวที่เป็นวัสดุในกลุ่มปอซโซลาน และจัดเป็นองค์ประกอบสำคัญของการเกิดจีโอโพลิเมอร์ แต่เนื่องจากดินขาวเป็นวัสดุที่มีมูลค่า จึงทำการทดลองโดยใช้เถ้าปาล์มและกากอลูมินาแทนที่ดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และทำการปรับส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) ที่อัตราส่วน 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก ร่วมกับการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ เพื่อศึกษาผลที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์พสต์ ผลการทดลองพบว่าส่วนผสมดังกล่าวสามารถสังเคราะห์เกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยสภาวะการใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่อัตราส่วน 2.5 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้น NaOH 15 โมลาร์ สามารถช่วยให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นรับกำลังอัดได้ดี นอกจากนี้การใช้กากอลูมินาและเถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมร่วมกับดินขาวเผาสามารถช่วยให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าการใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว

Thesis Title Synthesis of Geopolymer Material using Palm Ash and Solid Waste from
Hydrogen Peroxide Production Process

Author Mr.Arpakon Prompet

Major Program Environmental Engineering

ปีการศึกษา 2013

ABSTRACT

This research aims to study the reuse of palm ash and alumina waste which came from biomass combustion and hydrogen peroxide production process, in synthesis of geopolymer. Their chemical characteristics were analyzed by X-Ray Fluorescence (XRF). It was found that the major composition in palm ash and alumina waste were Aluminum oxide (Al_2O_3) and Silicon dioxide (SiO_2) that was the main element of metakaolin as well. The kaolin is a pozzolanic material that use as a raw material in the production of geopolymer. According to the kaolin value, the replacement of palm ash and alumina waste instead of kaolin with 0, 20 and 40 percent by weight and the effect on the compressive strength of geopolymer were conducted. The ratio of sodium silicate to sodium hydroxide was varied at 0.5, 1.5 and 2.5 by weight while the concentration molarity of sodium hydroxide was varied at 5, 10 and 15. Results of the study were found that the mixture could synthesize the geopolymer. Conditions by using the ratio at 2.5 by weight of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ at 15 molar NaOH could help to produce geopolymer that have good compressive strength. In addition, that geopolymer synthesized from palm ash-alumina waste and metakaolin mixtures can fire resistance better than geopolymer synthesized from metakaolin only.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยความกรุณาให้โอกาสในการศึกษา ให้คำปรึกษา เสนอแนวทางในการวิจัยและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้แนะแนวทางแก้ปัญหา ในการวิจัยจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูอุปการ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล ประยงค์พันธ์ คณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาในการสอบ เสนอแนะและแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับ นี้มีความสมบูรณ์ ถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ทนุอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญา เลขที่ ENV550381S รวมถึงบัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ทำางสวนปาล์มน้ำมันอุตสาหกรรม จำกัด และบริษัท ไทยเปอร์อ็อกไซด์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านวัสดุสำหรับการวิจัย รวมถึงอาจารย์ ชัยเจริญ ม่างัดสาระ ที่ช่วยเหลือในการขนส่งดินขาวจากจังหวัดนราธิวาส อาจารย์ประเสริฐ พฤตคณิน ที่เอื้ออำนวยเตาเผาสำหรับการเผาดินขาว และพี่อาบีเต็ง ฮาวา นักศึกษาปริญญาเอก ที่ให้ความรู้ในช่วงแรกของการทำวิจัย ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณบุคลากรในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และ บุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ครั้งนี้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่น้อง และเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจใน การทำงานเป็นอย่างดี

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ส่งเสริมและสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา จนกระทั่งข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

อาภากร พรหมเพชร

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	6
2.1 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	41
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	41
3.2 วิธีดำเนินการ	43
บทที่ 4 ผลการวิจัย	57
4.1 บทนำ	57
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	57
4.3 คุณสมบัติการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	61
4.4 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	88

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.5 แนวทางการใช้ประโยชน์จากจีโอโพลีเมอร์ที่ได้จากการทดลอง	104
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	106
5.1 สรุปผลการวิจัย	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารอ้างอิง	108
ภาคผนวก	115
ภาคผนวก ก	116
ภาคผนวก ข	133
ประวัติผู้เขียน	139

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของถ้ำลอย และปอซโซลานธรรมชาติ	12
2.2 เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 ชั้น	13
2.3 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ	14
2.4 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย	14
2.5 การเปลี่ยนแปลงของดินขาวที่อุณหภูมิต่างๆ	16
2.6 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำไยปาล์มน้ำมัน	17
2.7 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมินา-ซิลิกา	19
3.1 การทดลองเพื่อศึกษาจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัย	43
3.2 แสดงตัวอย่างการคำนวณในรูปของอัตราส่วน โดยโมล (Mole ratio) ที่น้ำหนัก 1 กก.	45
3.3 แสดงค่า Oxide-Mole Ratios ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับช่วงของ (Davidovits, 1984)	45
3.4 แสดงส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่น้ำหนัก 1,000 กรัม ความเข้มข้น NaOH ที่ 5 โมลาร์	53
3.5 แสดงส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่น้ำหนัก 1,000 กรัม ความเข้มข้น NaOH ที่ 10 โมลาร์	54
3.6 แสดงส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่น้ำหนัก 1,000 กรัม ความเข้มข้น NaOH ที่ 15 โมลาร์	55
4.1 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคและความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	58
4.2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง	59
4.3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น	67
4.4 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง	70
4.5 อัตราส่วนโดยโมลและความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วันแต่ละสูตรผสม	71
4.6 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้น	79
4.7 ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้จากการทดสอบ	103
ก.1 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์)	116
ก.2 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์) (ต่อ)	117
ก.3 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์) (ต่อ)	118

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.4 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์)	119
ก.5 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์) (ต่อ)	120
ก.6 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์) (ต่อ)	121
ก.7 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์)	122
ก.8 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์) (ต่อ)	123
ก.9 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์) (ต่อ)	124
ก.10 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5, 1.5 และ 2.5; ที่ความเข้มข้น NaOH 5 โมลาร์)	125
ก.11 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5, 1.5 และ 2.5; ที่ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์)	126
ก.12 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5, 1.5 และ 2.5; ที่ความเข้มข้น NaOH 15 โมลาร์)	127

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์	7
2.2 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์	8
2.3 โครงสร้างแบบ Poly(sialate-siloxo) ซิลิกาต่ออลูมินา 2:1	8
2.4 การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์	9
2.5 แสดงการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์	11
2.6 กองกาศของผลปาล์ม	17
2.7 กองเต้าปาล์มน้ำมัน	17
2.8 SEM เต้าปาล์มกำลังขยาย 100 เท่า	18
2.9 SEM เต้าปาล์มกำลังขยาย 1,000 เท่า	18
2.10 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกา-อลูมินา	19
2.11 ฟังแสดงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และจุดที่เกิดของเสี้ยวอลูมินา	22
2.12 Beckman Coulter LS 230	23
2.13 Philips PW2400	25
2.14 Philips X'Pert MPD	25
2.15 แสดงวัฏภาค (phase) ของการเลี้ยวเบนในแต่ละรูปแบบ	26
2.16 แสดงลักษณะ Amorphous จาก XRD pattern	26
2.17 หลักการวัด SAXS/WAXS	27
2.18 แสดงหลักการการทำงานของเครื่อง SEM	28
2.19 FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)	29
2.20 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)	30
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เผาดินขาวต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเผา	35
2.22 ก. อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	38
ข. ความเข้มข้น NaOH ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	
2.23 ภาพถ่าย SEM จีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน	40
3.1 ดินขาวเผาที่ผ่านการบดละเอียด	42
3.2 เต้าปาล์มที่ผ่านการบดละเอียด	42
3.3 กากอลูมินาที่ผ่านการบดละเอียด	42

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3.4 อบวัสดุตั้งต้นก่อนนำไปทำการบด	46
3.5 เครื่องบดแบบขัดสี (Abrasion Machine)	46
3.6 เก็บวัสดุตั้งต้นที่เตรียมเสร็จแล้วไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้	46
3.7 ดินขาวผาก่อนทำการบด	47
3.8 ดินขาวเผาหลังทำการบด	47
3.9 เถ้าปาล์มก่อนทำการบด	47
3.10 เถ้าปาล์มก่อนทำการบด	47
3.11 กากอลูมิน่าก่อนทำการบด	47
3.12 กากอลูมิน่าหลังทำการบด	47
3.13 ผสมวัสดุตั้งต้นในภาชนะที่สะอาด	48
3.14 ทำการคลุกแก้ววัสดุตั้งต้นให้เข้ากัน	48
3.15 วัสดุตั้งต้นผสมเข้ากัน	48
3.16 เทสารตั้งต้นลงในภาชนะสำหรับทำการผสม	49
3.17 เตรียมสารละลาย Na_2SiO_3 และ NaOH ตามกำหนดของแต่ละสูตรผสม	49
3.18 เทสารละลายลงไปผสมกับสารตั้งต้น	49
3.19 กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน	49
3.20 นำส่วนผสมเทใส่โม่ และกระทุ้ง 2 ชั้น ชั้นละ 32 ครั้ง	50
3.21 เทส่วนผสมจนเต็มแบบหล่อแล้วทำการเขย่าเพื่อไล่ฟองอากาศ	50
3.22 หุ้มแบบหล่อโดยใช้แผ่นพลาสติกห่ออาหารและตั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนนำเข้าตู้อบ	50
3.23 นำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	51
3.24 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์	51
3.25 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	51
3.26 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	56
4.1 การกระจายตัวของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมิน่า	58
4.2 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมิน่า	60
4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุตั้งต้น ก. ดินขาวเผา ข. เถ้าปาล์ม และ ค. กากอลูมิน่า	61

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.4 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ของดินขาวที่ทำการทดลอง	62
4.5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสม ที่อายุการบ่ม 7 วัน	63
4.6 แสดงการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้ดินขาวที่ไม่ทำการเผา	65
4.7 แสดงการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผา	65
ก. แสดงผิวด้านข้าง ข. แสดงแกนกลาง	
4.8 แสดงการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผา	66
โดยวิบัติในลักษณะแตกกระจาย	
4.9 แสดงการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้เถ้าปาล์มเป็นส่วนผสม	66
ร่วมในดินขาวเผา ก. แสดงผิวด้านข้าง ข. แสดงแกนกลาง	
4.10 กำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่	68
ดินขาวเผาด้วยวัสดุทดแทน ที่ความเข้มข้น NaOH 15 โมลาร์	
4.11 กำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่	69
ดินขาวเผาด้วยวัสดุทดแทน ที่ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์	
4.12 กำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่	69
ด้วยวัสดุทดแทน ที่ความเข้มข้น NaOH 5 โมลาร์	
4.13 SEM images ก. 100MK0PA0AW-15M(2.5), ข. 80MK20PA0AW-15M(2.5)	72
และ ค. 80MK10PA10AW-15M(2.5)	
4.14 SEM images of the 60MK40PA0AW-15M(2.5)	72
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH กับกำลังรับแรงอัด	73
ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (อัตราส่วน Na ₂ SiO ₃ /NaOH เท่ากับ 2.5)	
4.16 SEM images of the (100MK geopolymer) at 5 and 15 NaOH	75
4.17 SEM images of the (80MK:20PA geopolymer) at 5 and 15 NaOH	75
4.18 SEM images of the (80MK:10PA:10AW geopolymer) at 5 and 15 NaOH	75
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Na ₂ SiO ₃ /NaOH (15 NaOH)	76
กับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน	
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Na ₂ SiO ₃ /NaOH (10 NaOH)	77
กับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน	

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (5 NaOH) กับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน	78
4.22 การพัฒนากำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ใช้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้น NaOH 15 โมลาร์	79
4.23 SEM images of the (100MK geopolymer) at 7 and 28 days	81
4.24 SEM images of the (80MK:20PA geopolymer) at 7 and 28 days	81
4.25 SEM images of the (80MK:10PA:10AW geopolymer) at 7 and 28 days	81
4.26 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ความเข้มข้น NaOH 15 โมลาร์)	82
4.27 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์)	83
4.28 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ความเข้มข้น NaOH 5 โมลาร์)	84
4.29 ค่าการหดตัวแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ความเข้มข้น NaOH 15 โมลาร์)	85
4.30 ค่าการหดตัวแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์)	86
4.31 ค่าการหดตัวแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ความเข้มข้น NaOH 5 โมลาร์)	87
4.32 แสดงตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ก. 100MK0PA0AW-15M(2.5) ข. 80MK20PA0AW-15M(2.5) และ ค. 80MK10PA10AW-15M(2.5)	87
4.33 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) จีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรผสมต่างๆ ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน	88
4.34 เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C	90
4.35 เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:เถ้าปาล์ม ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C	90
4.36 เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:เถ้าปาล์ม:กากอลูมิน่า ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200 °C	91
4.37 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียว	92
4.38 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:เถ้าปาล์ม	92
4.39 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:เถ้าปาล์ม:กากอลูมิน่า	93

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.40 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดี่ยว ที่ความเข้มข้น NaOH 5, 10 และ 15 โมลาร์	94
4.41 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาว:ถ้ำปาล์ม ที่ความเข้มข้น NaOH 5, 10 และ 15 โมลาร์	94
4.42 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร ดินขาว:ถ้ำปาล์ม:กากอลูมิน่า ที่ความเข้มข้น NaOH 5, 10 และ 15 โมลาร์	95
4.43 จีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0PA0AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	97
4.44 จีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0PA0AW-15M(2.5) หลังทำการเผา	98
4.45 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	98
4.46 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) หลังทำการเผา	99
4.47 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK40PA0AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	99
4.48 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK40PA0AW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	100
4.49 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	100
4.50 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	101
4.51 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK20PA20AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	101
4.52 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK20PA20AW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง	102
4.53 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งาน	105

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
ข.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวที่ไม่ทำการเผา	133
ข.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	133
ข.3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	134
ข.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของถ้ำป่าลัม	134
ข.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของกากอลูมิน่า	135
ข.6 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0PA0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	135
ข.7 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	136
ข.8 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	136
ข.9 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0PA0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	137
ข.10 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	137
ข.11 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	138

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำกากของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ใหม่ โดยมีหลายงานวิจัยได้นำวัสดุที่เป็นกากของเสียมาเป็นส่วนผสมเพื่อทำเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานด้านคอนกรีต ซึ่งวัสดุที่ใช้นั้น ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าลอย เถ้าฟางข้าว และเถ้าถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งเป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นในปริมาณมากที่มีอยู่ในประเทศไทย (บุรฉัตร ฉัตรวิระ, 2544; ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2549; ประมวล โสมละคร, 2550; ชรินทร์ เสนาวงษ์ และคณะ, 2553) และเป็นวัสดุที่จัดอยู่ในกลุ่มสารปอซโซลาน เนื่องจากมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โดยอาศัยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ช่วยในการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ที่อยู่ในวัสดุตั้งต้น เกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ (Polymer) ทำให้วัสดุผสมมีการก่อตัวประสานกันเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง มีคุณสมบัติสามารถรับแรงอัดได้ ซึ่งเรียกวัดผสมนี้ว่าจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) (Davidovits, 1999) โดยในปัจจุบันประเทศในแถบยุโรปได้มีการนำเทคโนโลยีจีโอโพลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น งานด้านก่อสร้าง งานพื้นทางถนน งานเซรามิกส์ ตลอดจนงานตกแต่ง เป็นต้น (ศตคุณ เดชพันธ์ และปริญา จินดาประเสริฐ, 2551)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มและกากอลูมินา พบว่าวัสดุดังกล่าวมีส่วนผสมของซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณที่สูง ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมกับดินขาวซึ่งเป็นสารปอซโซลานที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ โดยการใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง สามารถช่วยในการชะละลายซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ในวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้น ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) สูงด้วย ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์มีกำลังรับแรงอัดที่ดี (Sanawong และคณะ, 2010; Posi และ Chindaprasit, 2010) ทั้งนี้เถ้าปาล์มและกากอลูมินาเป็นของเสียที่ทางโรงงานมีปัญหาในการกำจัดทิ้ง โดยเถ้าปาล์มเป็น

วัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ได้จากการเผาทำลายปาล์มและเส้นใยของผลปาล์มเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส (Chusilp และคณะ, 2009) โดยในปี พ.ศ.2554 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์ม 4.51 ล้านไร่ เป็นเนื้อที่ให้ผลผลิตประมาณ 3.84 ล้านไร่ และมีเถ่าปาล์มเกิดขึ้นประมาณ 350,000 ตัน (สถานการณ์การผลิต การตลาดยางพาราและปาล์มน้ำมัน, 2554) เถ่าปาล์มที่เกิดขึ้นมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยมาก ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งเข้าสู่หลุมฝังกลบทำให้สูญเสียพื้นที่ในการกำจัดทิ้งและส่งผลให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของเถ่าปาล์มอีกด้วย ส่วนกากอลูมินานั้นเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจากข้อมูลของทางโรงงานที่เอื้ออำนวยวัสดุในงานวิจัยนี้มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ที่ 57 ตัน/วัน และเกิดกากอลูมินาประมาณ 100 ตัน/ปี โดยทางโรงงานเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียอลูมินา 800 บาท/ตัน

จุดมุ่งหมายในงานวิจัยนี้เพื่อนำเถ่าปาล์มและกากของเสียอลูมินากลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อช่วยแบ่งเบาการนำกากของเสียทิ้งเข้าสู่หลุมฝังกลบ โดยนำมาผสมร่วมกับดินขาวเผาและปรับเปลี่ยนสถานะในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์เป็นจีโอโพลิเมอร์สูตรผสมต่างๆ โดยคาดหวังว่าจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลากหลายประเภท เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีคุณสมบัติพิเศษในการทนต่อความร้อน และสามารถรับแรงอัดได้ดี (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551) นอกจากนี้ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM), X-Ray Diffraction (XRD) และ Wide-Angle X-ray Scattering (WAXS) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นของแต่ละสูตรผสม ซึ่งจะเป็ประโยชน์สำหรับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าปาล์มและกากอลูมิน่าเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในการทำเป็นจีโอโพลิเมอร์
- 1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างดินขาว เถ้าปาล์ม กากอลูมิน่า ร่วมกับสารละลายต่าง เพื่อให้ได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดที่สูงและกำลังอัดที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติของดินขาว เถ้าปาล์ม และกากอลูมิน่า ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ใช้ทำการทดลอง ส่วนที่สองเป็นการศึกษาคุณสมบัติการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมที่สังเคราะห์ขึ้นในการทดลอง โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบไปด้วย

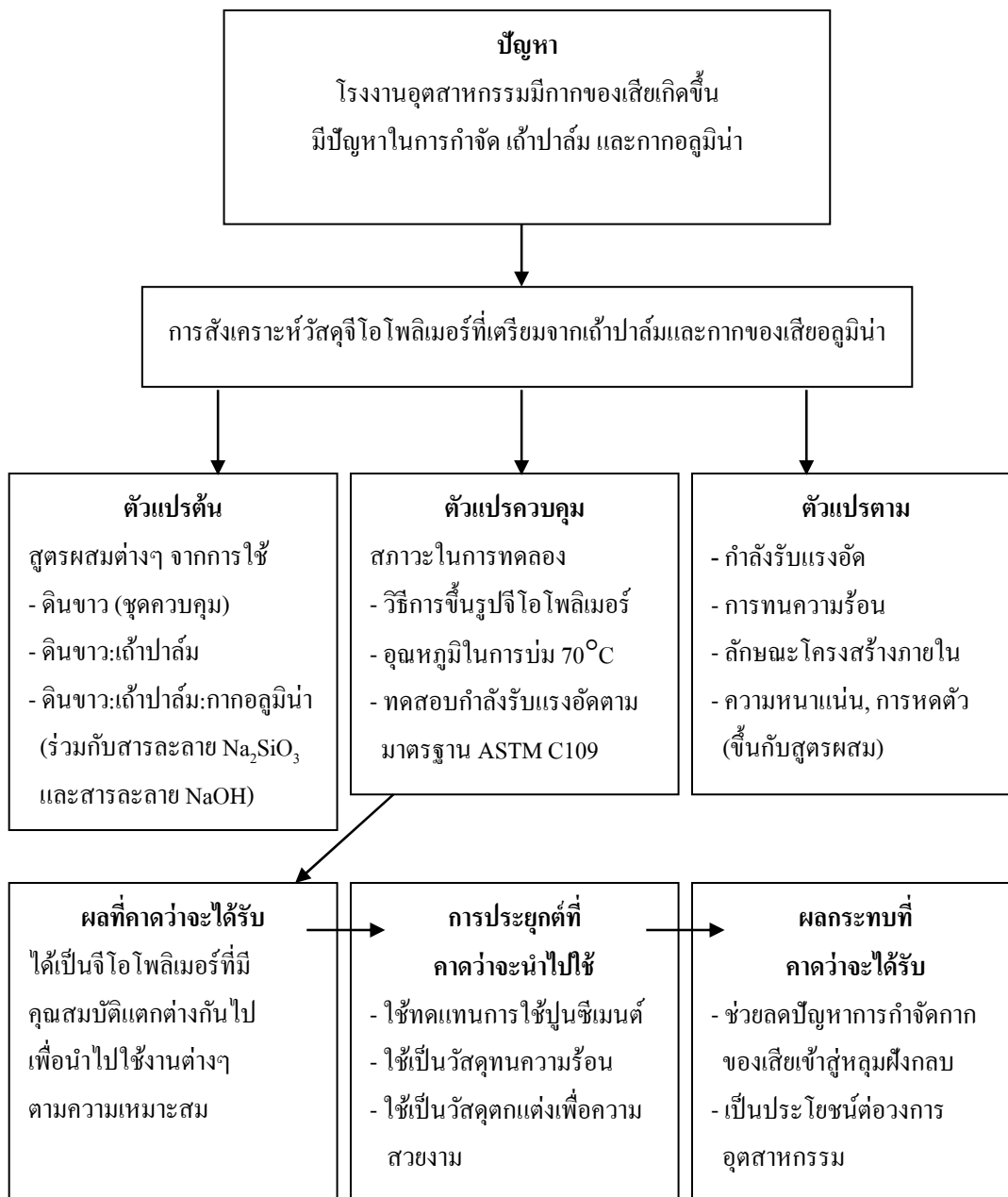
- ผลของการใช้ดินขาวเผาเทียบกับการใช้ดินขาวไม่เผาในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ เพื่อศึกษาผลของกำลังรับแรงอัดที่เกิดขึ้น
- ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น
- ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์
- ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก
- ผลเมื่ออายุการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

ส่วนที่สามเป็นการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็ก (Microstructure) ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสม ซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) และ Wide-Angle X-ray Scattering (WAXS) รวมถึงการทดสอบการทนความร้อนและการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จากเทคนิคที่ใช้ในการศึกษานี้ทำให้สามารถช่วยในการอธิบายถึงเหตุผลของคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 14.1 ส่งเสริมการประหยัดพลังงานในรูปของการใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต ซึ่งสามารถช่วยในการลดพลังงานจากการเผาวัสดุเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ลง และช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่บรรยากาศให้น้อยลง
- 14.2 สามารถประยุกต์ใช้วัสดุที่เป็นของเสียจากโรงงาน เพื่อนำมาเป็นส่วนผสมในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์และใช้ให้เกิดคุณค่ามากที่สุด
- 14.3 เพื่อพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้งานได้ และเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของจีโอโพลิเมอร์ เพื่อประโยชน์ต่อวงการก่อสร้างและการพัฒนาไปเป็นวัสดุใช้งานอื่นๆ เช่น วัสดุตกแต่งสวน เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงดังในกรอบแนวคิดสำคัญของงานวิจัย

กรอบแนวคิดสำคัญของงานวิจัย



บทที่ 2

ตรวจสอบเอกสาร

2.1 ทฤษฎีและหลักการ

2.1.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

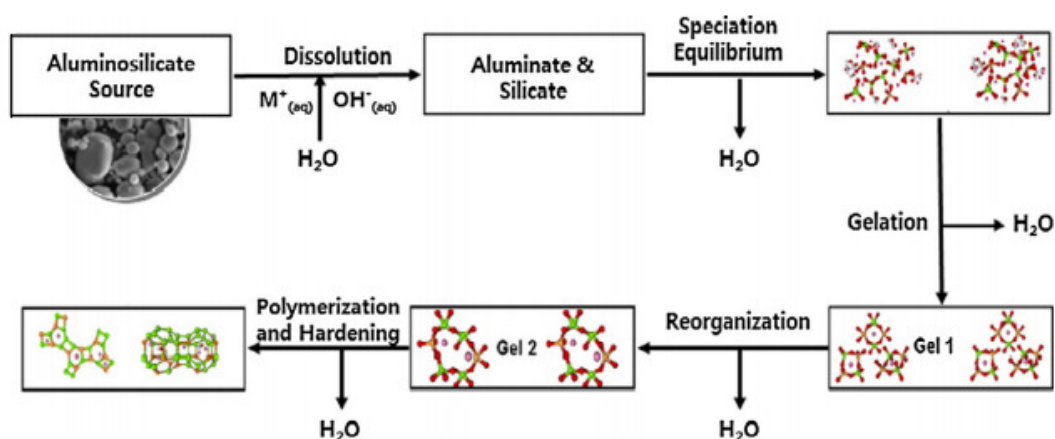
จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุผสมอลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ ดังนี้

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุที่มีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายต่าง ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการก่อตัว แข็งตัว และสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้

2.1.1.1 กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์

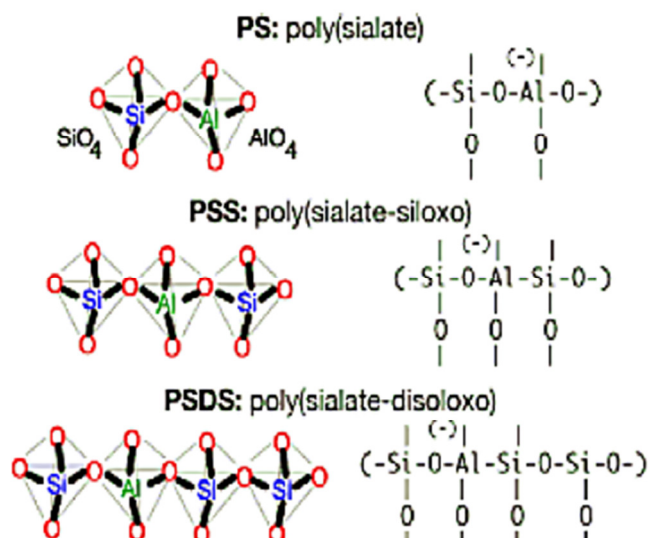
จีโอโพลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาของวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์นั้น ขั้นตอนแรกเป็นการชะละลายวัสดุที่มีสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตไปเป็นสารสังเคราะห์อัลคาไลน์อลูมิเนียมซิลิเกต โดยใช้สารละลายด่างที่มีไฮดรอกไซด์จะเกิดเป็นสารอลูมินेटและซิลิเกต ซึ่งเป็นการชะละลายที่ผิวของอนุภาคของแข็ง ทำให้อลูมินेटและซิลิเกตถูกปลดปล่อยเป็นอิสระและอยู่ในรูปของสารโมโนเมอร์รวมอยู่ในสารละลาย ทำให้ส่วนผสมมีสารซิลิเกต สารอลูมินेटและสารอลูมิเนียมซิลิเกต เกิดขึ้น

รวมกันอยู่ในสารละลาย เรียกว่าสภาวะสมดุล (Speciation Equilibrium) จากนั้นจะเกิดเป็นสารละลายอลูมิโนซิลิเกตอิมิตัวสูงอยู่ในรูปของเจล (Gelation) แล้วควบแน่นเป็นโครงข่ายใหญ่ มีการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ขึ้น (Reorganization) มีการเชื่อมโยงโครงข่ายมากขึ้นและแข็งตัว (Polymerization and Hardening) เกิดเป็นโครงข่ายอลูมิโนซิลิเกต 3 มิติ ซึ่งเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ โดยในกระบวนการนี้จะมีน้ำเกิดขึ้นและถูกปลดปล่อยออกมาขณะเกิดการทำปฏิกิริยาจนกระทั่งจีโอโพลิเมอร์แข็งตัว (Duxson และคณะ, 2007) ทั้งนี้ การรวมตัวกันในลักษณะของโครงข่ายแบบสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเกิดซิลิกาต่ออลูมินา 1 ต่อ 1 จะเรียกโครงสร้างเป็น Poly(sialate) และหากเกิดซิลิกาต่ออลูมินา 2 ต่อ 1 เรียกโครงสร้างเป็น Poly(sialate-siloxo) ซึ่งในการจะให้ได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังที่ดีต้องให้อยู่ในอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา 2 ต่อ 1 (Davidovits, 1999) ดังรูปที่ 2.3



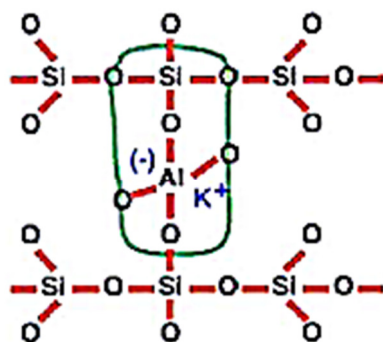
รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

ที่มา: Gum Sung Ryu และคณะ 2013



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์

ที่มา: Davidovits, 1999

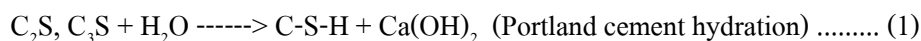


รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบ Poly(sialate-siloxo) ซิลิกาต่ออลูมิน่า 2:1

ที่มา: Davidovits, 1999

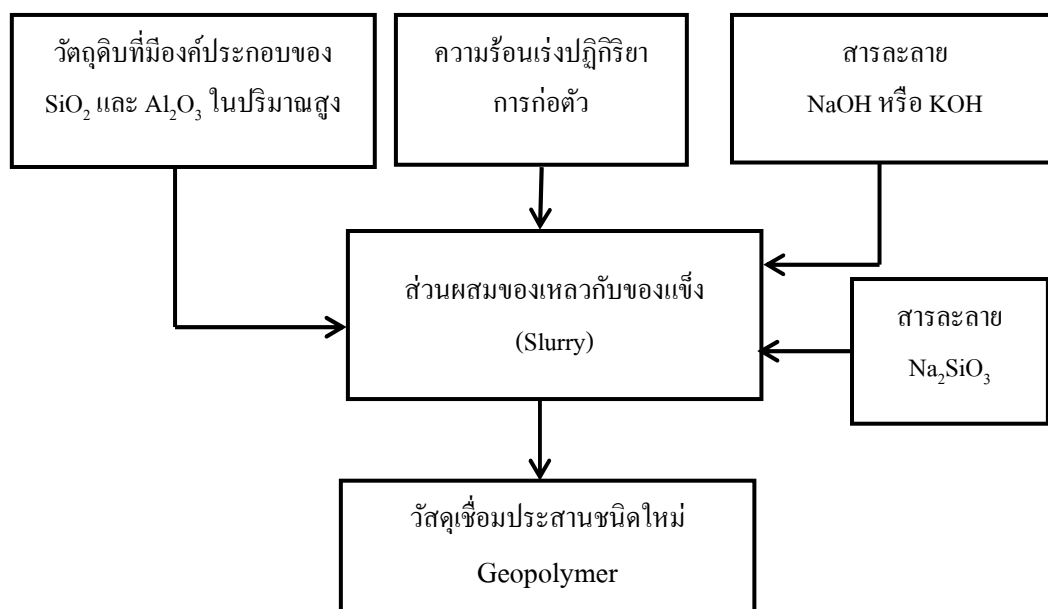
2.1.1.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์

ลักษณะโครงสร้างจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับจีโอโพลิเมอร์นั้นจะมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ โครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน ดังแสดงในสมการที่ 2 และให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว



โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่สองเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (C-S-H) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์พิเศษมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิกอน (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยอาศัยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการชะละลายสารเหล่านี้ออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไป



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

โดยจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่แตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ในสารตั้งต้น โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์แสดงได้ดังสมการที่ 3



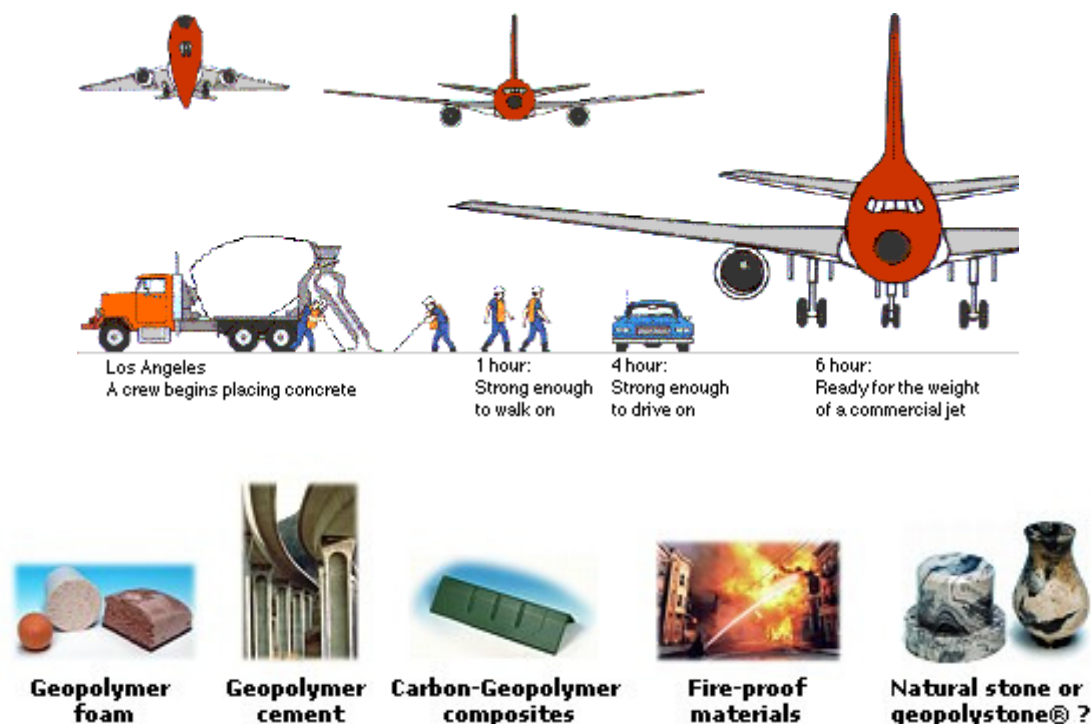
- เมื่อ M = ธาตุอัลคาไลน์
 - = คือ การยึดเกาะพันธะ
 z = คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO₂ เป็นตัวเลข 1, 2 หรือ 3
 n = คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่หรือ Degree of Polycondensation
 w = คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สังเกตเห็นได้ว่าวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ได้แก่ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลัก คือ SiO₂ และ Al₂O₃ ซึ่งวัสดุดังกล่าวพบได้ในวัสดุปอซโซลาน อาทิเช่น เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) หรือตลอดจนดินขาวเผา (Metakaolin) ดังนั้น เมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ จะได้วัสดุประสานชนิดใหม่ที่สามารถใช้ทดแทนการใช้ซีเมนต์ในงานด้านคอนกรีต

2.1.1.3 การประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์ในงานด้านต่างๆ

เทคโนโลยีจีโอโพลิเมอร์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น งานด้านก่อสร้าง งานเซรามิกส์ วัสดุทนความร้อน งานด้านตกแต่ง ตลอดจนอุตสาหกรรมไฟฟ้า เครื่องบิน เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันประเทศในแถบยุโรปได้มีการนำจีโอโพลิเมอร์มาใช้งานบ้างแล้ว ได้แก่ การนำไปใช้งานพื้นทางถนน จีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ วัสดุทนไฟ หินจีโอโพลิเมอร์ วัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม วัสดุคาร์บอนจีโอโพลิเมอร์ และจีโอโพลิเมอร์โฟม เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5

สำหรับวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทยนั้น ยังไม่ได้นำเข้าเอาเทคโนโลยีจีโอโพลิเมอร์มาใช้ประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรม หากมีการเผยแพร่องค์ความรู้และการประยุกต์ใช้อย่างจริงจังจากนักวิชาการที่มีประสบการณ์การวิจัย และการใช้งานจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติและประชาคมโลก เนื่องมาจากการพยายามช่วยลดผลกระทบของสภาวะเรือนกระจก อันก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน เนื่องจากการผลิตจีโอโพลิเมอร์นั้นใช้พลังงานในการเผาไหม้น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ (ศตคุณ เศษพันธ์ และปริชญ์ จินดาประเสริฐ, 2551)



รูปที่ 2.5 แสดงการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์

ที่มา: <http://www.geopolymer.org/applications/introduction-developments-and-applications-in-geopolymer-2> (Geopolymer Institute, 1996-2012)

2.1.2 ปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

วัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้หลายร้อยปีที่แล้ว คำว่า “ปอซโซลาน” มาจากถ้ำภูเขาไฟของหมู่บ้านปอซซูลิ (Pozzuoli) ใกล้กับเมืองเนเปิล ประเทศอิตาลี โดยในปี คริสตศักราช 79 เกิดการระเบิดของภูเขาไฟวิซุเวียส (Viesuvius) แต่อย่างไรก็ตามก่อนคริสตศักราช 2,000 ได้มีการนำถ้ำภูเขาไฟและดินเผา (Calcined clay) มาใช้ในงานก่อสร้างมากมายในประเทศ อิตาลี กรีก อินเดีย และอียิปต์ โดยโครงสร้างคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานยังคงสามารถยืนหยัด ให้เห็นได้จนถึงยุคปัจจุบัน ซึ่งเป็นหลักฐานด้านความทนทานของการใช้วัสดุปอซโซลาน นอกจากนี้ ในช่วงตอนต้นศตวรรษที่ 20 มีการนำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมาใช้ในอเมริกาเหนือ ในโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภค เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตขนาดใหญ่ และเป็นการเพิ่มปริมาณวัสดุซีเมนต์ นอกจาก การใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อควบคุมความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว วัสดุปอซโซลานยังช่วยเพิ่มความ

ต้านทานต่อซัลเฟตอีกด้วย และวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุชนิดแรกที่พบว่าช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในคอนกรีต (ประมวล โสมละคร, 2550)

วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มา 2 แหล่งด้วยกัน ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานจากกระบวนการผลิต (Artificial pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ (Diatomaceous earth) แก้วภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อจะนำไปประยุกต์ใช้งานต้องนำไปผ่านขบวนการต่างๆ ก่อน จึงสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย กระบวนการให้ความร้อนโดยใช้เตาเผาและการบดให้เป็นผงละเอียด ตลอดจนการทำแห้ง ซึ่งอาจเป็นดินเผา (Calcined clay) ดินดานเผา (Calcined shale) และดินขาวเผา (Metakaolin) วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติถูกจำแนกโดยมาตรฐาน ASTM C618 โดยจำแนกเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ และตารางที่ 2.2 ได้แสดงเกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของถ้ำลอย และปอซโซลานธรรมชาติ

ชั้นคุณภาพ C

เป็นถ้ำลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิก และยังมีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ คือสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้

ชั้นคุณภาพ F

เป็นถ้ำลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) ถ้ำลอยในชั้นคุณภาพนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน

ชั้นคุณภาพ N

ปอซโซลานธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ หรือมีลักษณะหายาประกอบด้วย : Diatomaceous Earths (diatomite) Opaline Cherts และ ดินดาน Tuffs แก้วภูเขาไฟ หรือพิมิไซท์ ดินเผา รวมทั้งดินขาวและดินดาน

ที่มา: ASTM C618, 1991

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของปอซโซลานทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ

คุณสมบัติ	ชั้นคุณภาพ		
	C	F	N
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (Si_2O_3) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอร์รอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละไม่น้อยกว่า	50.0	70.0	70.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละ ไม่เกิน	5.0	5.0	4.0
ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผา ร้อยละ ไม่เกิน	6.0	6.0	6.0

ที่มา: อนนท ป้อมประสิทธิ์, 2550

วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งในการนำไปใช้งานจึงควรทำการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุปอซโซลานก่อน เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ (อนนท ป้อมประสิทธิ์, 2550)

2.1.3 ดินขาว (Kaolin, China-Clay)

ดินเกาลิน หรือใช้เรียกกันในประเทศไทยว่า ดินขาว มีภาษาสากลว่า เกาลิน หรือ China-Clay โดยมีรากศัพท์มาจากภาษาจีนว่า เกาเลียง (Kao Liang) เพื่อเป็นเกียรติแก่ประเทศจีน ซึ่งเป็นผู้นำดินขาว (China-Clay) มาใช้เป็นประเทศแรก ดินขาวเป็นดินที่เกิดจากแร่อลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicates) ซึ่งเป็นโครงสร้างของหินชนิดต่างๆ เช่น หินฟันม้า (Feldspar) ไมกา (Mica) หินควอตซ์ (Quartz) หินปูน (Lime Stone) เป็นต้น ที่เกิดการผุพังโดยบรรยากาศ (Weathering) และน้ำ (Hydrolysis) ดินขาวมักจะเกิดบนที่ราบสูงทั่วไป (อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ, 2549) ทั้งนี้ ดินขาวแต่ละแหล่งทั่วโลกส่วนใหญ่มีซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ

ผลวิเคราะห์ ทางเคมี	บราซิล	อียิปต์	อิตาลี	อินเดีย	จีน	ไทย นราธิวาส
SiO ₂	46.39	49.97	50.64	45.81	55.3	47.30
Al ₂ O ₃	38.23	33.83	20.24	37.72	42.5	35.72
CaO	0.03	0.09	10.54	0.06	-	0.11
Na ₂ O	0.07	0.42	2.94	0.29	0.07	0.39
Fe ₂ O ₃	0.93	0.79	1.12	0.86	0.70	0.38
K ₂ O	0.15	0.01	1.27	0.03	0.42	1.76
ที่มา:	Dos Santos et al., 2012	Bakr, 2011	Paola Mameli, 2012	Ramas wamy, 2006	Shengli Wang et al., 2007	อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543

ในส่วนของแหล่งดินขาวในประเทศไทย พบได้ที่จังหวัดเชียงราย ลำปาง อุดรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง และนราธิวาส ดินขาวได้ถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมทนไฟ อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และส่วนผสมของยารักษาโรค โดยผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทย แสดงดังในตารางที่ 2.4 (อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543)

ตารางที่ 2.4 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย โดยวิเคราะห์ในด้าน ปริมาณคิดเป็นร้อยละของสาร

องค์ประกอบ ทางเคมี	ดินขาว ระนอง	ดินขาว นราธิวาส	โคกไม้ลาย ปราจีนบุรี	บ้านวังยาง อุดรดิตถ์	เวียงป่าเป้า เชียงราย	ปางค่า ลำปาง
SiO ₂	48.75	47.30	48.10	68.56	44.50	59.70
Al ₂ O ₃	34.58	35.72	36.10	19.32	38.20	27.60
Fe ₂ O ₃	0.71	0.38	1.47	2.21	0.80	0.85
TiO ₂	0.02	0.20	0.79	0.21	0.20	0.07
CaO	0.07	0.11	0.20	0.05	0.10	0.13

องค์ประกอบ ทางเคมี	ดินขาว ระนอง	ดินขาว นราธิวาส	โคกไม้ลาย ปราจีนบุรี	บ้านวังยาง อุตรดิตถ์	เวียงป่าเป้า เชียงราย	ปางค่า ลำปาง
MgO	0.34	1.01	0.14	0.53	-	0.25
K ₂ O	2.52	1.76	0.16	4.99	0.80	5.85
Na ₂ O	0.48	0.39	0.13	0.22	-	0.15

ที่มา: อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543

2.1.3.1 การผลิตดินขาวเผา

เมื่อนำดินขาวไปเผาจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี สรุปได้ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งเห็นได้ว่าจะมีการสูญเสียของน้ำใน 2 ช่วง คือ 100-150°C น้ำที่อยู่ในรูพรุนและน้ำที่ซึมเข้ามาจะระเหยไป และช่วง 400-600°C จะมีการสูญเสียกลุ่มของ OH (OH group) ที่ยึดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ด้วยกัน จากนั้นในช่วง 600-900°C ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์จะเปลี่ยนสภาพเป็นอสังฐาน หลังจากนั้น มัลไลต์ (Mullite) และคริสตอบาไลต์ (Cristobalite) จะเกิดขึ้นในอุณหภูมิที่สูงกว่า 900°C (Harben, 1984)

ดินขาวเผา (Metakaolin) นั้นเกิดขึ้นหลังจากที่สูญเสียน้ำออกไปหมด และเนื่องจากมีซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก และเป็นอสังฐานจึงจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซซิ-ลาน ส่วนอุณหภูมิเผาเพื่อผลิตดินขาวเผานั้นพบว่าในช่วงอุณหภูมิในการผลิตที่เหมาะสมต่างกันไป โดยในงานส่วนใหญ่พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 700-800°C เมื่อนำดินขาว (Kaolin) มาผ่านการเผากลายเป็นดินขาวเผา (Metakaolin) สีของดินจะเปลี่ยนไปจากขาวเป็นสีขาวอมชมพู หรือสีขาวขึ้นอยู่กับแหล่งดิน (อนุชาติ ลือนันต์ศักดิ์ศิริ, 2549)

ตารางที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของดินขาวที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature, °C	Compositional and Mineral Changes
100-150	เกิดการระเหยของน้ำในช่องว่างรูพรุน, เกิดการหดตัว
200-300	เกิดการออกซิเดชันของสารอินทรีย์
400-500	เกิดการออกซิเดชันของซัลไฟด์ในตัวอย่างที่ออกซิเจนทำงานได้
400-600	มีการสูญเสียกลุ่มของ OH (OH group)
600-900	ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃) จะเปลี่ยนสภาพเป็นอสัณฐาน
500-920	คาร์บอเนตไม่บริสุทธิ์ (calcite, dolomite, siderite) สลายตัวให้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)
From 950	เริ่มก่อตัวเป็นมัลไลต์ (mullite) (approximate 3Al ₂ O ₃ SiO ₂)
1200	มัลไลต์ (mullite) และคริสตอบาไลต์ (cristobalite) จะเกิดขึ้น
1650-1775	เกิดการก่อตัวในรูปของแก้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมาก

ที่มา: Harben, 1984

2.1.4 เถ้าปาล์ม (Palm ash)

เถ้าปาล์มเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ได้จากทลายปาล์มและเส้นใยของผลปาล์ม ดังรูปที่ 2.6 โดยนำมาเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 800-900°C (Chusilp และคณะ 2009) เถ้าปาล์ม น้ำมันที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.7 มีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมาและเป็นการสูญเสียพื้นที่ในการทิ้งโดยสูญเปล่า นอกจากนั้นยังทำให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของเถ้าปาล์มน้ำมันอีกด้วย ซึ่งข้อมูลจากทางโรงงานที่เอื้อเพื่อเถ้าปาล์มสำหรับนำมาทำการวิจัย มีอัตราการเกิดเถ้าปาล์มประมาณ 50 ตัน/วัน จากกำลังผลิตน้ำมันปาล์ม 340 ตันน้ำมันปาล์มดิบ (CPO)/วัน

วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และคณะ (2546) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์ม พบว่ามีปริมาณ SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 65.3% มีปริมาณ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับ 2.5% และ 1.9% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์ม

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)							
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
เถ้าปาล์ม	3.00	2.50	65.30	0.30	0.40	5.70	6.40	1.90

ที่มา: วิรัชชาติ ตั้งจิรภัทร และคณะ, 2546



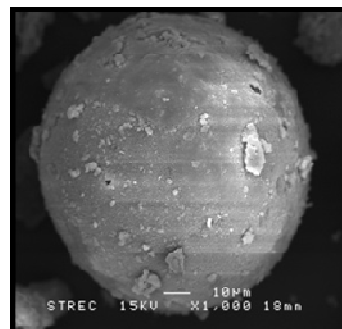
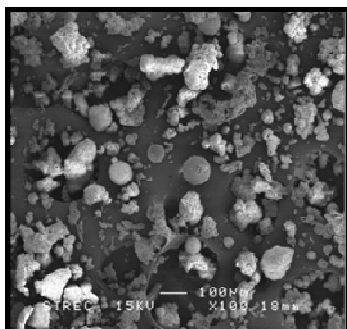
รูปที่ 2.6 กองกากของผลปาล์ม



รูปที่ 2.7 กองเถ้าปาล์มน้ำมัน

ที่มา: วิรัชชาติ ตั้งจิรภัทร และคณะ, 2546

สำหรับภาพถ่ายขยายทางกายภาพของเถ้าปาล์มที่ได้จากการถ่ายภาพแบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยมีกำลังขยายที่ 100 เท่า และ 1,000 เท่า ดังในรูปที่ 2.8 และ 2.9 สังเกตได้ว่าที่กำลังขยาย 100 เท่า อนุภาคของเถ้าปาล์มมีลักษณะเป็นก้อนมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นก้อนมนๆ บางก้อนเป็นเหลี่ยม และมีรูพรุน เมื่อทำการขยายที่ 1,000 เท่า พบว่าอนุภาคของเถ้าปาล์มมีลักษณะทรงกลม ผิวขรุขระ และมีรูพรุน เป็นผลึกค่อนข้างหยาบ (จิรัชฐิติ บรรจงศิริ, 2555)



รูปที่ 2.8 SEM เถ้าปาล์มกำลังขยาย 100 เท่า รูปที่ 2.9 SEM เถ้าปาล์มกำลังขยาย 1,000 เท่า
ที่มา: จิรัชิต์ บรรจงศิริ, 2555

2.1.5 กากของเสียจากการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

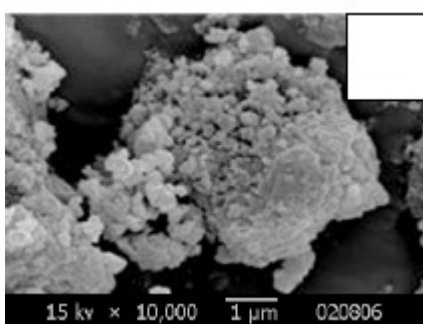
การผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีกากของเสียที่เกิดขึ้น ได้แก่ กากอลูมินา ซึ่งมีองค์ประกอบหลักของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โดยใช้เป็นหน่วยคักตัวทำลายในการผลิต อัตราการเกิดกากของเสียประเภทนี้มีประมาณ 100 ตัน/ปี (บริษัทไทยเปอร์ออกไซด์ จำกัด อัตราการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 57 ตัน/วัน) วิธีกำจัดกากของเสียอลูมินาที่ปนเปื้อนนี้จะถูกรวบรวมบรรจุลงภาชนะที่ใช้ในการเก็บกักของเสีย แล้วนำไปส่งโรงงานปูนซีเมนต์เข้าเตาเผา ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดประมาณ 800 บาท/ตัน แต่องค์ประกอบดังกล่าวเป็นที่ต้องการในขั้นตอนการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นแทนที่จะจัดการกับกากของเสียอลูมินาด้วยวิธีการส่งไปโรงงานปูนซีเมนต์เข้าเตาเผาหรือวิธีการฝังกลบซึ่งปัจจุบันมีข้อจำกัดในการหาพื้นที่ จึงควรรหาแนวทางในการจัดการของเสียชนิดนี้ที่มีความเหมาะสมมากกว่า ทั้งในเชิงวิศวกรรมศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

โดยองค์ประกอบหลักทางเคมีของกากของเสียที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 2.7 และลักษณะของซิลิกา-อลูมินาที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงดังรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมินา-ซิลิกา

องค์ประกอบ ทางเคมี	Al ₂ O ₃ (%wt)	SiO ₂ (%wt)	SO ₃ (%wt)	Na ₂ O (%wt)	CaO (%wt)	Fe ₂ O ₃ (%wt)	K ₂ O (%wt)	Organic (%wt)
ดิบ	54.02	11.70	4.41	3.17	0.42	0.05	0.08	26.15
เผาที่ 700 °C	74.68	14.74	5.71	4.13	0.52	0.09	0.03	0.09

ที่มา: พิมลพันธ์ และคณะ, 2554



รูปที่ 2.10 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกา-อลูมินา

ที่มา: พิมลพันธ์ และคณะ, 2554

2.1.5.1 ขั้นตอนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

(1) ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจน โดยการป้อนสารละลายเข้าไปใน Hydrogenator พร้อมกับก๊าซไฮโดรเจน โดยสารละลายมีองค์ประกอบ ดังนี้

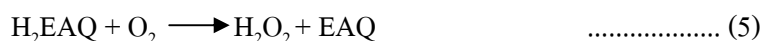
- Aromatic solvent (ตัวทำละลายประเภทอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน) เป็นตัวทำละลายควิโนน (Ethylanthraquinone)
- Ethylanthraquinone (EAQ) หรือควิโนนละลายอยู่ในตัวทำละลายประเภทอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน
- Trioctylphosphate (TOF) เป็นตัวทำละลายควิโนนที่อยู่ในรูปของการทำปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนแล้ว
- Tributyl-n-urea (TBU) มีหน้าที่เช่นเดียวกับ Trioctylphosphate

มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพัลลาเดียมในการทำปฏิกิริยาซึ่งจะเกิดไฮโดรควิโนน (H_2EAQ) ขึ้นในสารละลายดังสมการต่อไปนี้



(2) ขั้นตอนการกรองสารละลายหลังการเติมไฮโดรเจน เพื่อกรองเอาผงตัวเร่งปฏิกิริยาพัลลาเดียมออกจากสารละลาย

(3) ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเติมออกซิเจน (Oxidation) สารละลายที่มีไฮโดรควิโนนอยู่จะถูกป้อนเข้าไปใน Oxidizer พร้อมกับป้อนอากาศเข้าไปด้วย ออกซิเจนที่อยู่ในอากาศจะทำปฏิกิริยากับ H_2EAQ เกิดเป็น H_2O_2 อยู่ในสารละลาย ส่วน EAQ ก็จะคืนรูปเป็นอิสระ ดังสมการต่อไปนี้

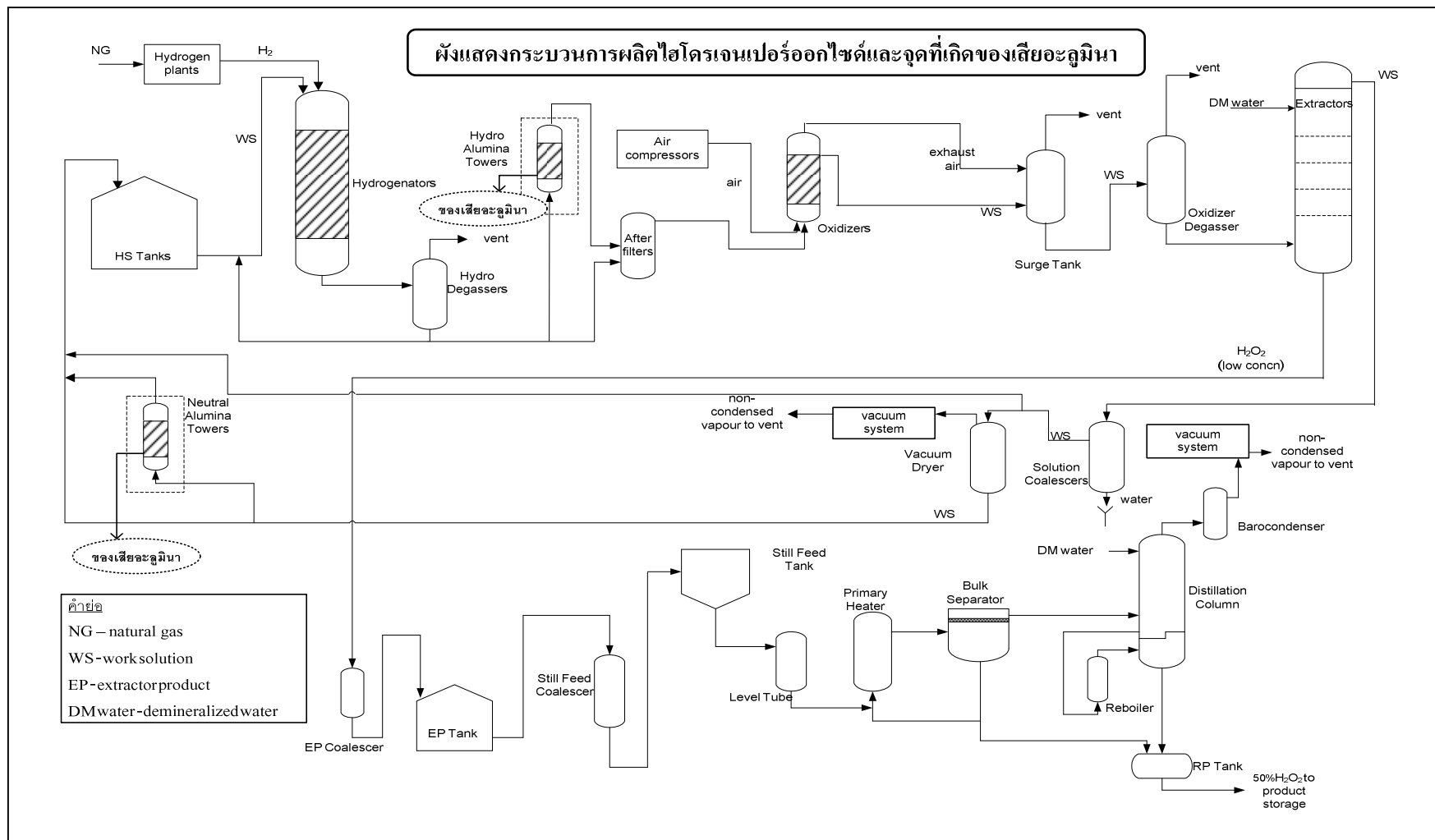


(4) ขั้นตอนการสกัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Extraction) มีการใช้น้ำบริสุทธิ์ (ปราศจากแร่ธาตุ) เข้าไปสกัดเอา H_2O_2 ออกจากสารละลายภายในหอสกัด มีการเติมกรดฟอสฟอริก เข้าไปในน้ำก่อนที่จะเข้าไปในหอสกัดด้วยเพื่อลดค่า pH ของน้ำลงซึ่งจะทำให้ H_2O_2 อยู่ตัวและช่วยให้การแยกชั้นระหว่างสารละลายและน้ำเป็นไปได้ดีขึ้น จะได้ H_2O_2 ออกมาที่ความเข้มข้นประมาณ 30-33% โดยน้ำหนัก

(5) ขั้นตอนการบำบัดผลิตภัณฑ์พลอยได้ในสารละลาย สารละลายที่ผ่านการสกัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกไปแล้วจากหอสกัดจะไหลเข้าไปยังถังแยกสารละลายน้ำ (Solution coalescer) เพื่อแยกน้ำที่ปนอยู่กับสารละลายออกและระบายน้ำทิ้งไป สารละลายส่วนหนึ่งจะไหลต่อไปยังอุปกรณ์กำจัดน้ำแบบสุญญากาศ (Vacuum dryer) เพื่อลดความชื้น (Moisture) ที่อยู่ในสารละลายให้ลดลง นอกจากนี้มีการกำจัดผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นในสารละลายจากการทำปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนและปฏิกิริยาเติมออกซิเจน โดยให้สารละลายไหลผ่านอลูมินาภายในหออลูมินา (Alumina tower) แล้วทำให้ผลิตภัณฑ์พลอยได้เปลี่ยนกลับไปเป็น EAQ ที่ใช้งานได้อีก สารละลายที่ผ่านการบำบัดแล้วจะวนกลับไปเริ่มต้นกระบวนการได้อีกในขั้นตอนการทำปฏิกิริยา

เติมไฮโดรเจน ในส่วนนี้จะเกิดการก่อกองเสียจากการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะอยู่ในรูปกากของเสียลิวมิโน่า ดังแสดงในรูปที่ 2.11

(6) ขั้นตอนการกลั่นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Distillation) เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 จากประมาณ 30-33% โดยน้ำหนัก ให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 40-50% โดยน้ำหนัก โดยการให้ความร้อนด้วยไอน้ำใน Primary heater ภายใต้อุณหภูมิความดันบรรยากาศ พร้อมกับควบแน่นไอของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระเหยออกไปให้กลับเป็นของเหลวในหอกลั่นและต้มซ้ำอีกครั้งหนึ่งในถังต้ม (Reboiler) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 40-50% โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงส่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปยังถังรับผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.11 ผังแสดงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และจุดที่เกิดของเสียอะลูมินา

2.1.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของแข็งทางการก่อสร้างและโครงสร้างผลึก

2.1.6.1 การหาขนาดคละของวัสดุ

การหาขนาดคละของวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ซึ่งประกอบไปด้วย ดินขาวเผา ถ้ำ ปาล์ม และกากอลูมิน่า ซึ่งเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก จำเป็นต้องใช้วิธี Laser Particle Size Analyzer (LPSA) โดยอาศัยเครื่อง Beckman Coulter LS 230 ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นเครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างที่เป็นผงแห้งและสารแขวนลอย โดยวิเคราะห์ในตัวกลางทั้งที่เป็นของเหลวและอากาศ สามารถวัดขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.04 ถึง 2000 ไมโครเมตร ตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้ เช่น สารเคมีในอุตสาหกรรมถลุงมีเอียง และสารเคมีในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)



รูปที่ 2.12 Beckman Coulter LS 230

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

2.1.6.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การคำนวณหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, G_s) จะใช้หลักการของ Archimedes คือ วัตถุที่จมน้ำจะแทนที่น้ำเท่ากับปริมาตรของวัตถุนั้น ดังนั้นปริมาตรของดินสามารถหาได้โดยใช้วิธีแทนที่น้ำเพื่อหาปริมาตรและน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่เมื่อเทียบกับน้ำหนักของวัตถุ ค่าความถ่วงจำเพาะของดินคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (สราวุธ จริตงาม, 2548)

$$G_s = \frac{\text{น้ำหนักของเม็ดดิน}}{\text{หน่วยน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับเม็ดดิน}} \times 100$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w(4^\circ\text{C})} = \frac{W_s}{W_w} G_T \quad \dots\dots\dots (6)$$

เมื่อ

G_s = ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำที่ 4°C

W_s = น้ำหนักของดิน

W_w = น้ำหนักของน้ำ (ที่ 4°C) ที่ถูกแทนที่

G_T = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ

2.1.6.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

X-ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้แพร่หลายในการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ สำหรับการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์นั้นจำเป็นต้องทราบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น เนื่องจากต้องใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิค X-ray Fluorescence ในการคัดเลือกวัสดุ นอกจากนี้ เทคนิคดังกล่าวใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อยและให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว

สำหรับเครื่อง X-ray Spectrometer จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray Tube) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray Tube เร่งอิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้ การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทั้งสแตนโรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็ง (Solid-State) เหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิในโตรเจนเหลว (นงภัส โภษะวิฑิตกุล, 2555) สำหรับเครื่องทดสอบ XRF รุ่น Philips PW2400 ดังรูปที่ 2.13 เป็นเครื่องวิเคราะห์หาธาตุตั้งแต่ Be ถึง U สามารถบอกปริมาณโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งวัดได้ตั้งแต่ระดับหนึ่งในล้านส่วน (Part Per Million, ppm) ถึงหนึ่งในร้อยส่วน (%) ทั้งนี้ สามารถวิเคราะห์หาธาตุในตัวอย่างประเภท แร่ ดิน โลหะ และน้ำมันได้ (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)

2.1.6.4 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)

X-ray Diffraction (XRD) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาความเป็นผลึกของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง (นงภัศ โฆษวิทิตกุล, 2555) โดยเครื่องทดสอบ XRD รุ่น Philips X'Pert MPD ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์หาสารประกอบในตัวอย่าง Unit Cell Size สามารถวิเคราะห์ได้หลายประเภท เช่น หิน ดิน (Clay) ทราช โลหะ แร่ประกอบหิน วัสดุชีวอุตสาหกรรม เช่น ผง TiO_2 และ CaCO_3 วัสดุสังเคราะห์ เซรามิกส์ เป็นต้น

สำหรับการเตรียมตัวอย่างนั้น เริ่มจากการทุบก้อนตัวอย่างให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 5-10 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -195°C ประมาณ 5 นาที แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้ง โดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ความดัน 0.5 ปาสกาล เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 แล้วจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบเพื่อทำการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)

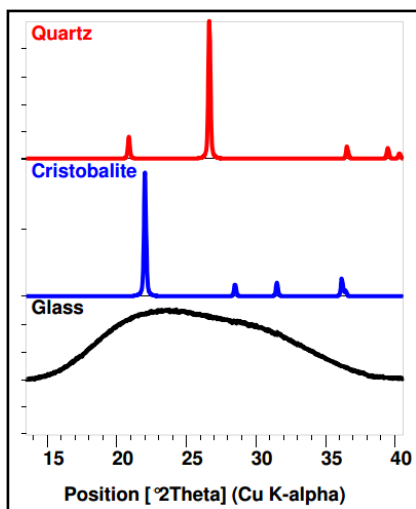


รูปที่ 2.13 Philips PW2400

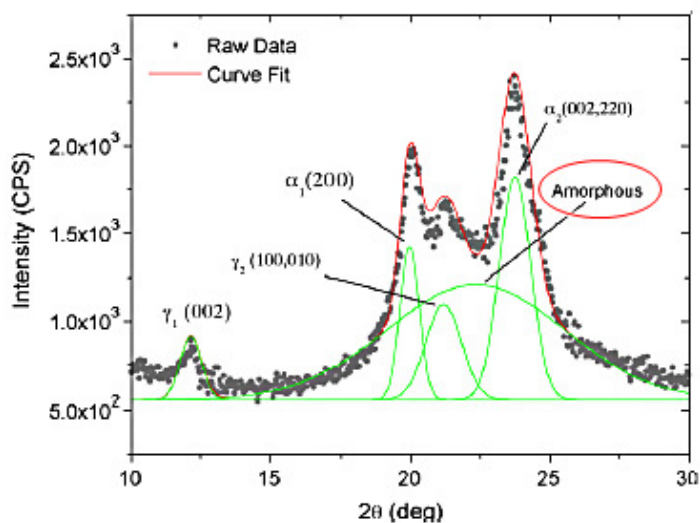


รูปที่ 2.14 Philips X'Pert MPD

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



รูปที่ 2.15 แสดงวัฏภาค (phase) ของการเลี้ยวเบนในแต่ละรูปแบบ
ที่มา: Scott A Speakman, 2012



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ Amorphous จาก XRD pattern
ที่มา: Baochun Guo และคณะ, 2009

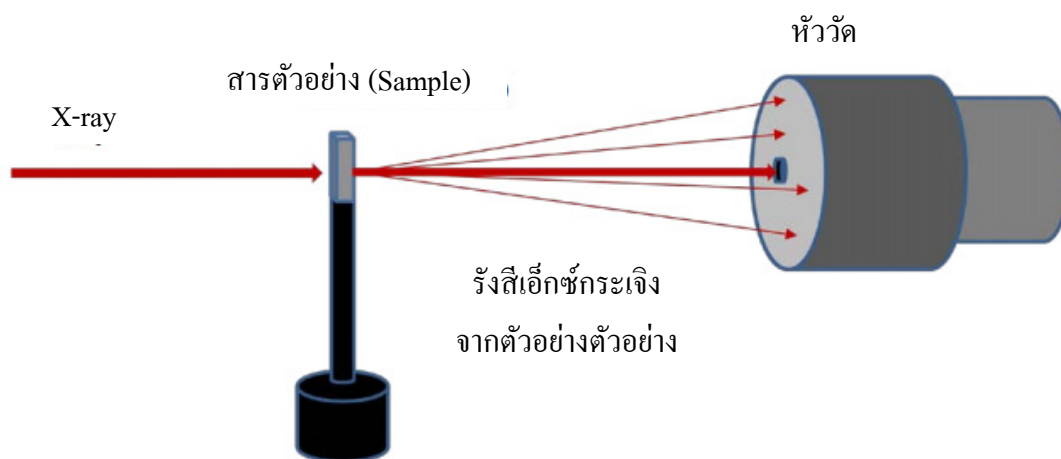
การใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาความเป็นผลึกของตัวอย่างนั้นจะมีลักษณะความเป็นผลึกที่แตกต่างกัน โดยจากตัวอย่างในรูปที่ 2.15 ได้แสดงความเป็นผลึกของ Quartz, Cristobalite, และ Glass ซึ่งมีลักษณะทางเคมีเหมือนกัน แต่การจัดเรียงอะตอมแตกต่างกัน โดยมีวัฏภาค (Phase) ที่แตกต่างกัน สำหรับวัสดุที่มีสภาพความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) จะมีการเลี้ยวเบนโดยจะมีช่วง ยอด (Peak) ฐานกว้างที่มุมประมาณ $15-35^{\circ} 2\theta$ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของ Glass ดังรูปที่ 2.15 และลักษณะ Amorphous แสดงดังรูปที่ 2.16

2.1.6.5 วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี Wide-angle X-ray scattering (WAXS)

การวัด Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) สามารถศึกษาโครงสร้างผลึกได้เช่นเดียวกับเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) โดยที่สถานีทดลอง SAXS/WAXS ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สามารถวัดได้ถึงค่ามุม 2θ ประมาณ 60 องศา หรือเทียบเท่ากับ d-spacing ประมาณ 1.6 อังสตรอม ซึ่งครอบคลุมโครงสร้างผลึกของสารกึ่งผลึก เช่น สารโพลิเมอร์ หรือสารชีวภาพ รวมทั้งผลึกสารอนินทรีย์บางส่วน ผลการวัด WAXS ที่ได้จะแสดง Bragg peak ของโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ที่สถานีทดลองยังมีระบบการให้ความร้อนกับสารตัวอย่างสำหรับการศึกษา Crystallinity เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และมีระบบดึงตัวอย่างเพื่อศึกษา Crystallinity ที่ค่า Stress-Strain ต่างๆ สำหรับตัวอย่างเส้นใยหรือโพลิเมอร์ได้ และเทคนิค SAXS/WAXS ยัง

สามารถใช้ศึกษาคุณสมบัติอื่นๆ ของวัสดุประเภทต่างๆ อีกทั้งความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนระบบติดตั้งสารตัวอย่าง และความสามารถในการการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อมของสารตัวอย่าง ในขณะที่ทำการวัด ทำให้สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุแบบ Real time ได้

หลักการวัด SAXS และ WAXS ทำได้โดยการให้รังสีเอ็กซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นเดี่ยวทะลุผ่านชิ้นตัวอย่างและวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงไปที่มุมต่างๆ ดังรูปที่ 2.17 โดยหัววัดที่ใช้เป็นหัววัด 2 มิติ เช่น กล้อง CCD หรือ Image Plate รังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงจากตัวอย่างจะทำให้เกิดภาพแผนผังการกระเจิง (Scattering Pattern) ซึ่งสามารถนำมาแปลความหมายเป็นลักษณะโครงสร้างโมเลกุลได้ (ศุภกร รักใหม่, 2556)

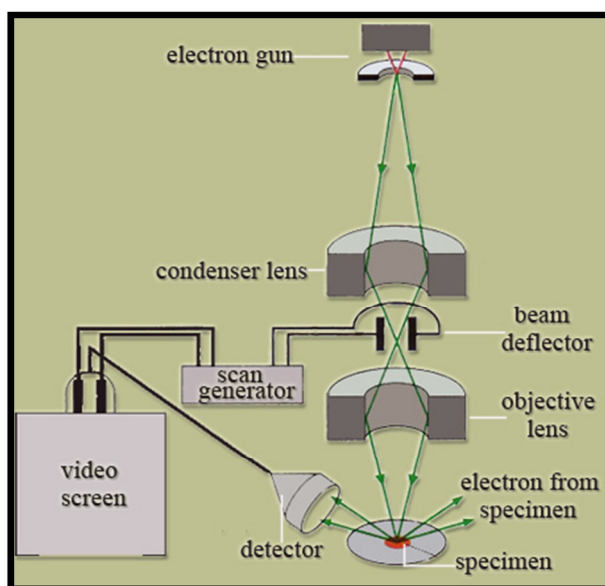


รูปที่ 2.17 หลักการวัด SAXS/WAXS

ที่มา: ศุภกร รักใหม่, 2556

2.1.6.6 การถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของ ตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าที่ของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.18 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM

ที่มา: <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-microscopysem-.html>

หลักการทำงานของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิด

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจะถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอได้ทันที (วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2556)

สำหรับเครื่อง SEM รุ่น FEI Quanta 400 (SEM-Quanta) ดังรูปที่ 2.19 เป็นเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่าง โดยมีกำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า เหมาะสำหรับทั้งตัวอย่างทางวัสดุและชีววิทยา สามารถถ่ายภาพตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า (Non-conductive materials) มีความชื้น (Moist) และมีลักษณะเปียก (Wet) ตัวอย่างที่มีไอรระเหย ตัวอย่างสดหรือไม่ผ่านการเตรียมเบื้องต้นมาก่อน เช่น ใบ ดอกของพืช แมลง เป็นต้น โดยสามารถเลือกสภาวะการทดสอบได้ทั้งสภาวะสุญญากาศสูง (High vacuum, น้อยกว่า 1.3×10^{-2} Pa) สภาวะสุญญากาศต่ำ (Low vacuum, 10 ถึง 30 Pa) และสภาวะใกล้เคียงความดันบรรยากาศ (Environmental SEM, 130 ถึง 2600 Pa) นอกจากนี้ยังสามารถถ่ายวิดีโอขณะที่การเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้าง การเคลื่อนที่ของตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่งได้ (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)

ในการเตรียมตัวอย่างที่เป็นก้อนของแข็งเพื่อศึกษา SEM เริ่มจากนำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังอัด มาทำให้มีขนาดประมาณ 0.25×0.25 มิลลิเมตร² โดยให้ด้านที่ไม่ต้องการศึกษาติดบนสตัป (Stub) ด้วยเทปกาวคาร์บอน แล้วทำการเป่าเพื่อทำความสะอาดฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วยลูกโป่งยาง เมื่อสะอาดดีแล้วทำการฉาบผิวตัวอย่างโดยเครื่อง Sputter coater หรือ Iron sputter จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 2.19 FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)

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

2.1.6.7 การวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนัก

การสกัดสารเพื่อทดสอบหาปริมาณสารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable) ในวัสดุที่เป็นของแข็ง (Dry solids) ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้ (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6, 2540)

- (1) บดตัวอย่างเป็นผง ร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร
- (2) นำตัวอย่างที่ได้จากการบดในข้อ (1) ปริมาณ 100 กรัม มาเติมน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดค่า (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
- (3) เขย่าบนเครื่องเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- (4) กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
- (5) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วมาวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

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

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Davidovits (1984) ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์ โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลีเมอร์ระหว่างโซเดียมออกไซด์ ต่อ ซิลิกอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.20-0.28, ซิลิกอนออกไซด์ ต่อ อลูมิเนียมออกไซด์ เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ ต่อ โซเดียมออกไซด์ เท่ากับ 15-17.5 และโซเดียมออกไซด์ ต่อ อลูมิเนียมออกไซด์ เท่ากับ 0.80-1.20

Davidovits และคณะ (1994) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ซีเมนต์ พบว่า จีโอโพลีเมอร์ซีเมนต์ที่เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์สามารถเติมสารต่างๆ ได้ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลีเมอร์ จีโอโพลีเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะพาสกาล มีคุณสมบัติได้แก่ความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็นและด้านการสึกกร่อน ทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่จะใช้กับโครงสร้างระยะยาว ในด้านการคำนวณต้นทุนโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้จีโอโพลีเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ในการผลิตวัสดุจีโอโพลีเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงมาก และไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากเหมือนกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

Davidovits และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งจะเหมือนกับ Zeolite แต่จีโอโพลีเมอร์นั้นจะมีโครงสร้างเล็กๆ ไม่นั่นนอน และมีการนำเอาสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูงมาใช้ในการชะละลายอะตอมของซิลิกาและอลูมินาในวัสดุเพื่อให้ละลายและรวมตัวเป็นจีโอโพลีเมอร์เพสต์ โดยกระบวนการเกิดของสารโพลีเมอร์ จะเกิดขึ้นจากการให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วตามด้วยการทำให้แห้ง ช่วงระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเร็ว และช่วงระยะเวลาการก่อตัวจะอยู่ภายในช่วง 24-48 ชั่วโมง ทั้งนี้ จากการศึกษาได้รายงานถึงคุณสมบัติในแง่ดีของวัสดุจีโอโพลีเมอร์ คือจะไม่ละลายในสารละลายกรด และไม่เกิดปฏิกิริยา Alkali-aggregate ในสภาวะที่เป็นต่างสูง

Davidovits (2002) ได้ทำการเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO₂) ที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ โดยในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นต้องมีการเตรียมวัสดุตั้งต้น (แคลเซียมคาร์บอเนต) ด้วยการเผาให้มีคุณสมบัติเป็นปูนขาว การเผาดังกล่าวเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ปริมาณ 1 ตัน จะก่อให้เกิดก๊าซ CO₂ เท่ากับ 0.55 ตัน และในกระบวนการเผาไหม้ต้องใช้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงคาร์บอนที่ก่อให้เกิดก๊าซ CO₂ เท่ากับ 0.4 ตัน กล่าวคือ การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะส่งผลให้เกิดก๊าซ CO₂ ประมาณ 1 ตัน ส่วนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ใช้ของเสียที่เป็นตะกอนจากเตาเผาซึ่งเป็นผลพลอยได้มาจากการผลิต (By - product) โดยมาทำการเผา (Calcinations) ที่อุณหภูมิ 800°C ผลผลิตที่ได้ 1 ตัน ก่อให้เกิดก๊าซ CO₂ เท่ากับ 0.184 ตันจากการเผาไหม้ที่ต้องใช้เชื้อเพลิงคาร์บอน ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิต 1 ตันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์นั้นส่งผลให้เกิดก๊าซ CO₂ น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5-6 เท่า

Swanepoel และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตจีโอโพลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอย เป็นสารตั้งต้นร่วมกับดินขาวเผา ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก โดยทำการผสมและกระตุ้นโดยใช้สารละลาย Na₂SiO₃ และ NaOH และน้ำเป็นส่วนประกอบ แล้วทำการอบเพื่อเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70°C ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน (6, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง) จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือที่ 60 °C โดยอบเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 8 MPa ที่อายุหลังการบ่ม 28 วัน

Wang และ Cheng (2003) ได้ทำการศึกษาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติด้านการทนไฟจากตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น ในการทดลองพบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้องในช่วงระยะเวลา 9.5 ชั่วโมง และสามารถแข็งตัวได้เร็วภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากขึ้นรูปเสร็จ เมื่ออบตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ 60-70°C ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน หลังจากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและคุณสมบัติในการทนไฟ ที่อายุตัวอย่าง 2 วัน พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 64 MPa โดยกำลังรับแรงอัดยังคงมีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นไปจนถึงอายุการบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดน้อยมากทำให้การพัฒนาำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยมีนัยสำคัญไม่มากนัก สำหรับการทนไฟที่อุณหภูมิ 1,100°C ที่ด้านหน้าตัวอย่างความหนา 10 มิลลิเมตร ใช้เวลาเท่ากับ 30 นาที ทำการอัดอุณหภูมิที่ด้านหลังตัวอย่างได้เท่ากับ 440-470°C จะ

เห็นได้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงและสามารถทนไฟได้ จึงมีศักยภาพสูงพอที่จะนำไปพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างต่อไปในอนาคต

Hardjito และคณะ (2004) ทำการวิจัยโดยใช้เถาวัลย์ที่มีองค์ประกอบของสารซิลิกาพบว่า จีโอโพลิเมอร์ที่รับแรงได้สูงได้มาจากการผสมเถาวัลย์กับสารเร่งปฏิกิริยา และใช้ความร้อนในช่วง $60 - 90^{\circ}\text{C}$ ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นสารพวกอัลคาไลน์ซิลิเกตและอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามพบว่ากำลังอัดที่ได้ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น กำลังอัดแปรผันกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรืออัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นมีผลต่อกำลังอัดที่ได้ และอุณหภูมิที่ใช้เร่งปฏิกิริยาเวลาในการบ่ม

Hardjito และคณะ (2004) ได้รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถาวัลย์เคลเซียมต่ำ พบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีดังนี้

ก. อุณหภูมิในการบ่มร้อนที่เพิ่มขึ้นในช่วง $30-90^{\circ}\text{C}$ จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้นมากกว่า 60°C จะไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด

ข. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์สูงๆ จะทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้น และอัตราส่วนโดยมวลที่สูงขึ้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็จะส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

ค. ระยะเวลาของการบ่มตัวอย่างที่นานขึ้นในช่วง 6-96 ชั่วโมง (4 วัน) จะทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มของระยะเวลาการบ่มที่มากกว่า 48 ชั่วโมง ก็ไม่ได้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากการศึกษพบว่าระยะเวลาของการบ่มที่นานขึ้นจะช่วยพัฒนาปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ให้เกิดขึ้นได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น

ง. การเติมสารลดน้ำพิเศษ (Naphthalene base) ในปริมาณ 2 % ของน้ำหนักเถ้าลอยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการทำงานของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้ โดยจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต แต่การเพิ่มสารลดน้ำพิเศษที่มากกว่า 2 % ของน้ำหนักเถ้าลอยพบว่าจะลดกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

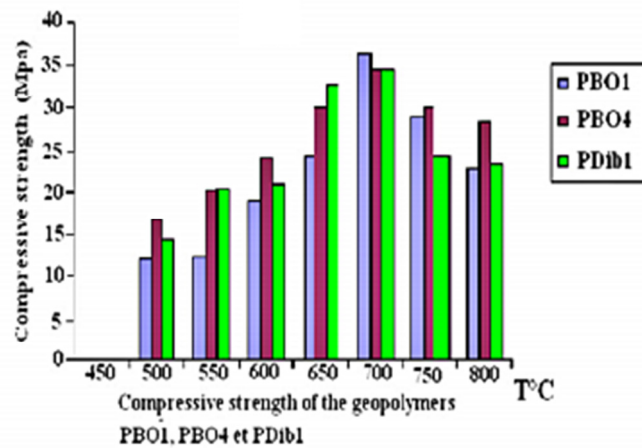
จ. ระยะเวลาก่อนการบ่มร้อนตัวอย่าง (Delay Time) หากเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที จะไม่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และยังสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวได้ถึง 120 นาที ภายหลังจากผสมโดยไม่เกิดการก่อตัวขึ้นและไม่เกิดการทำลายกำลังรับแรงอัดแต่อย่างใด

ฉ. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อของแข็งในจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer solid) ถ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง จากการทำวิจัยโดย Barbosa และคณะ เกี่ยวกับปริมาณน้ำในส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงให้เห็นว่าความสำคัญอยู่ที่คุณสมบัติของตัวยึดเกาะของจีโอโพลิเมอร์ ผลกระทบของปริมาณน้ำ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อส่วนของแข็งในจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer solid) สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต น้ำหนักรวมของน้ำในสารผสมคือน้ำหนักของน้ำในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายซิลิเกต และน้ำหนักน้ำภายนอกที่เติมเพิ่ม ส่วนน้ำหนักรวมของส่วนของแข็งในจีโอโพลิเมอร์ คือน้ำหนักรวมของเถ้าลอย เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ และส่วนของแข็งในสารละลายโซเดียมซิลิเกต การเพิ่มอุณหภูมิการบ่มร้อนจะเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มของอุณหภูมิบ่มตั้งแต่ 75 – 90°C ไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดแต่อย่างใด

ช. กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีการบ่มร้อนที่ 60°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะไม่ขึ้นกับอายุของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

Elimbi และคณะ (2011) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ทำการเผาดินขาวเพื่อนำมาสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ทำการทดลองโดยเผาดินขาวที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 450°C จนถึง 800°C จากนั้นนำดินขาวที่เผามาสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดจากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งพบว่า จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวที่ 450°C มีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ ส่วนการใช้ดินขาวที่เผาในช่วง 500-700°C จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นตามการเพิ่ม

อุณหภูมิในการเผา และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จะลดต่ำลงเมื่อใช้ดินขาวที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เผาดินขาวต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ดินขาวเผา

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2549) ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยควบคุมความชื้นเหลวด้วยวิธีการไหลแห้ง ร้อยละ 110 ± 5 ถึง 135 ± 5 ผลการศึกษาพบว่า ค่าการไหลแห้งขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการศึกษาอยู่ระหว่าง 10 ถึง 65 MPa อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 0.67 – 1 นอกจากนี้ยังพบว่า แม้จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นจาก 10 โมลาร์เพิ่มขึ้นเป็น 20 โมลาร์ ก็ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าหลังจากที่ผสมจีโอโพลิเมอร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องก่อนทำการอบในตู้อบ โดยอุณหภูมิที่ใช้บ่มที่เหมาะสมอยู่ที่อุณหภูมิ 75°C และไม่ควรบ่มเกิน 2 วัน จะให้กำลังอัดรับแรงอัดที่สูง ทั้งนี้หากใช้อุณหภูมิในการบ่มมากกว่า 75°C โครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายใน และจากการศึกษาด้วยกล้องขยายอนุภาคของเถ้าถ่านพบว่า อนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าถ่านเป็นทรงกลม ซึ่งขณะผสมจีโอโพลิเมอร์จะมีความเหนียวขึ้น การเติมน้ำเข้าไปร้อยละ 2-8 สามารถช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นทำให้ง่ายต่อการกวนผสม

อนุชาติ ลือนันต์ศักดิ์ศิริ (2549) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิเจลโพลิเมอร์ โดยทำการใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินขาวเผาที่คี่ที่สุดที่อัตราส่วน 75:25 โดยน้ำหนัก (ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง) ซึ่งได้นำตัวอย่างเจลโพลิเมอร์ไปบ่มร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 30, 45, 60, 75 และ 90°C ใช้ระยะเวลาในการบ่มร้อนเป็นเวลา 3 วัน ผลปรากฏว่าตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 30°C จะให้กำลังที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเจลโพลิเมอร์ต้องการความร้อนในการทำปฏิกิริยาที่พอเหมาะ ซึ่งอุณหภูมิที่ 30°C จะทำให้ตัวอย่างที่ได้มีความชื้นอยู่ข้างในปริมาณสูง เมื่อทำการกดตัวอย่างจะพบว่าเกิดการวิบัติไม่เต็มที่ โดยจะเกิดการวิบัติที่ผิวภายนอก โดยที่ภายในแกนกลางยังมีความชื้นอยู่สูง ทำให้กำลังที่ได้ออกมาต่ำ การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 45 และ 60°C จะให้กำลังที่สูงขึ้นตามลำดับ โดยการวิบัติของเจลโพลิเมอร์จะเริ่มวิบัติเข้าไปในแกนกลางมากขึ้น ทำให้กำลังอัดที่ได้ออกมาดีกว่าที่อุณหภูมิ 30°C ทั้งนี้ อุณหภูมิบ่มตัวอย่างที่ให้กำลังสูงสุดคือ 75°C ในขณะที่อุณหภูมิสูงเกิน 90°C ให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากโครงสร้างภายในจะแห้งมากไม่มีความชื้นอยู่ภายในโครงสร้างทำให้กำลังที่ได้ลดลง และที่ผิวของตัวอย่างเกิดการแตกร้าวจากการแห้ง (Drying crack) อย่างเห็นได้ชัด

ประมวล โสมละคร (2550) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของเจลโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมแร่ดินเบา โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 75°C ผลจากการทดลองพบว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 มีแนวโน้มให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมาคือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 และ 0.5 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาแร่ดินเบา เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเจลโพลิเมอร์ควรอยู่ระหว่าง 400-600°C และทำการเผาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทั้งนี้ การใช้แร่ดินเบาทดแทนในเถ้าลอยไม่เกินร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก สามารถให้กำลังอัดที่สูงพอที่จะนำไปใช้งานได้ ระยะเวลาที่เหมาะสมก่อนการนำเจลโพลิเมอร์มอร์ตาร์เข้าบ่มในเตาอบอยู่ที่ 1 ชั่วโมง หากทิ้งเวลาก่อนทำการบ่มนานกว่านี้จะไม่ทำให้กำลังอัดของเจลโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะส่งผลให้มีกำลังอัดได้ 345 ถึง 575 กก./ชม.² หลังจากการบ่มที่อุณหภูมิสูง สืบเนื่องมาจากผลของความร้อนช่วยในการกระตุ้นปฏิกิริยาเจลโพลิเมอร์ไรเซชันให้เกิดขึ้น และเมื่อนำไปบ่มต่อในห้องควบคุมความชื้นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำการทำปฏิกิริยาเจลโพลิเมอร์ไรเซชันจึงไม่เกิดขึ้นอีก ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดจึงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย หรือสามารถกล่าวได้ว่าภายหลังจาก 7 วัน ไปแล้วนั้นเจลโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยทดแทนด้วยแร่ดินเบาจะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ไม่มากนัก

อนุพันธ์ รุ่งเฝ้าพันธุ์ (2551) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าแกลบผสมดินขาวเผาบ่มด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ แล้วทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

ก. จากการทดสอบอัตราส่วนผสมพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวเผาต่อเถ้าแกลบที่ให้กำลังอัดอยู่ในระดับใช้งานได้ดี คือ 60:40 โดยน้ำหนัก โดยที่บ่มในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

ข. อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 3:3 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด และที่อัตราส่วน 3:2 ให้กำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตมากขึ้นทำให้ส่วนผสมหนืด ส่งผลให้การชะละลายลดลงโดยบ่มในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

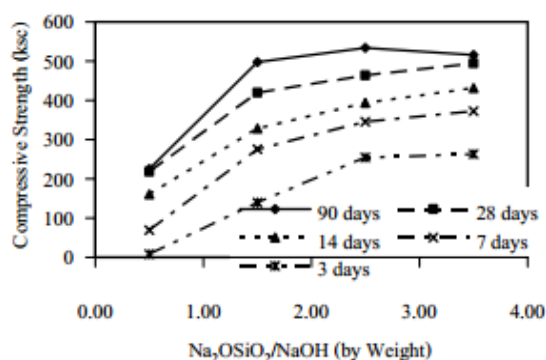
ค. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมจาก 6, 10 และ 14 โมลาร์ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปช่วยเร่งการทำปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้สมบูรณ์ โดยที่บ่มในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าบ่มในอุณหภูมิห้อง

ง. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มร้อนในตู้อบไฟฟ้าของจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผาผสมเถ้าแกลบอยู่ที่อุณหภูมิ 70°C จะทำให้ปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยการบ่มร้อนที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้ตัวอย่างเกิดการพองตัวที่ผิวหน้า ส่งผลให้โครงสร้างของตัวอย่างมีความพรุนมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง

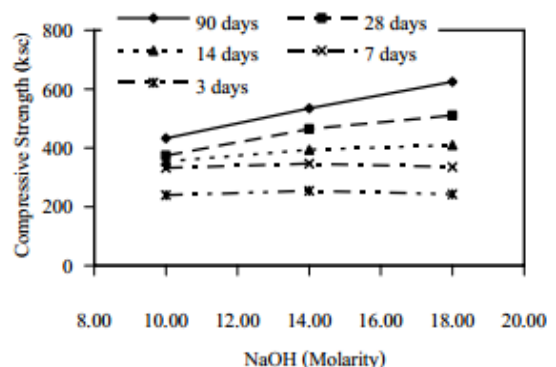
จ. การพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผาผสมเถ้าแกลบที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน บ่มร้อนที่อุณหภูมิห้อง ให้กำลังรับแรงอัดค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ส่วนการบ่มในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ให้กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุการบ่ม 3 และ 7 วัน สูงมาก เนื่องจากอุณหภูมิบ่มร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น และหลังจาก 7 วัน กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นไม่มากนัก

ฉ. ระยะเวลาในการบ่มในตู้พลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมคือ 48 ชั่วโมง ซึ่งจะช่วยให้การทำปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

เชียรศักดิ์ กลัปประสิทธิ์ และคณะ (2551) ได้ศึกษาผลกระทบของสัดส่วนผสมต่อกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล ผลจากการทดลอง พบว่าการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดให้สูงขึ้น คือร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 มีผลทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ และพบว่าการใช้ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ อัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.5 โดยน้ำหนัก จะช่วยให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีกำลังรับแรงอัดที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ก. ส่วนการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่าการใช้ความเข้มข้น NaOH เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดในช่วง 7 วัน แต่เมื่อจีโอโพลิเมอร์มีอายุ 28 วัน การใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 373, 464, และ 510 กก/ชม.² ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ข. และการบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้การพัฒนากำลังของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น



ก.



ข.

รูปที่ 2.22 ก. อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ข. ความเข้มข้นสารละลาย NaOH ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

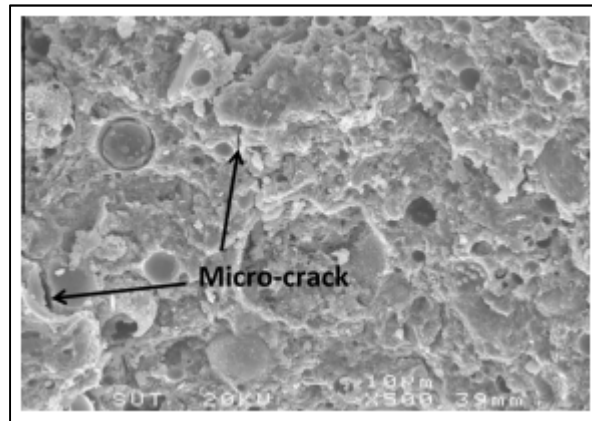
อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2551) ได้ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น ผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่ผสมด้วย 15 M NaOH ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่ผสมด้วย 10 M NaOH ทุกที่อัตราส่วนผสมสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนของจีโอโพลิเมอร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมแบบแยกเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่มากกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมแบบธรรมดา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าถ่าน

หินมีระยะเวลาในการสัมผัสกับสารละลายได้นานกว่าและทั่วถึงกว่า จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ทางอุตสาหกรรม พบว่าในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่สามารถนำมาใช้ได้จริง ให้ค้ำค่าต่อเศรษฐศาสตร์และเวลา จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่ผสมกับสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และมีอัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ คือ 1.0-1.5 มีศักยภาพในด้านกำลังและให้กำลังรับแรงอัดที่สูง วิธีการผสมแบบแยกจะให้ผลที่ดีกว่าแบบธรรมดา อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงเวลาและพลังงานที่ใช้ ดังนั้นอาจไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการผสมนานถึง 10 นาที แต่ควรให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับผิวเถ้าถ่านหินก่อนการผสมโซเดียมซิลิเกต

สมภพ แต่บัวนฮวด และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาผลของพลังงานไมโครเวฟต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เปรียบเทียบกับกรบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว โดยใช้เถ้าลอยแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ซึ่งเถ้าลอยแม่เมาะมีองค์ประกอบหลักของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_3O_4 และ CaO เท่ากับ 39.5%, 21.2%, 15.6% และ 19.7% ตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ได้เมื่อนำมาใช้ร่วมกับการบ่มร้อน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟช่วยให้การชะละลายของซิลิกาและอลูมินาบนผิวเถ้าลอยในสภาวะเบสทำให้เกิดมากขึ้น และเกิดเจลอลูมิโนซิลิเกตที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังอัดได้ดี สำหรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับบ่มจีโอโพลิเมอร์ขนาด 5 ลบ.ซม. คือการให้พลังงานไมโครเวฟที่ 90 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำมาบ่มร้อนต่อที่ 65°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่ 34 MPa สูงกว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ควบคุมซึ่งทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน

สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ ที่ทำจากดินเหนียวปนทรายแป้งร่วมกับเถ้าลอย ผลจากการศึกษาพบว่า สารละลาย NaOH ช่วยในการชะละลายซิลิกาและอลูมินาในเถ้าลอย และสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวประสานในปฏิกิริยาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ โดยอัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากดินเหนียวปนทรายแป้งร่วมกับเถ้าลอย Clay-FA geopolymer อยู่ที่ 0.7 โดยน้ำหนัก และ Activator/FA อยู่ที่ 0.6 ทั้งนี้ พบว่าการใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 75°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จีโอโพลิเมอร์จะมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่วันแรกจนถึงที่ 60 วัน ของการบ่ม หลังจากนั้นความแข็งแรงเริ่มคงที่และลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น ส่วนการใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 85°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์มีการ

พัฒนาในช่วง 7 วันแรกของการบ่ม หลังจากนั้นความแข็งแรงลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการบ่มด้วยความร้อนที่สูงเกินไป ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.23 เนื่องจากเกิดการสูญเสียของของเหลวในช่องว่างขนาดเล็ก ทำให้ส่งผลต่อโครงสร้างขนาดเล็กและความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์



รูปที่ 2.23 ภาพถ่าย SEM จีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน จากสูตรผสม 0.7-0.6 CLAY-FA ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ดินขาว

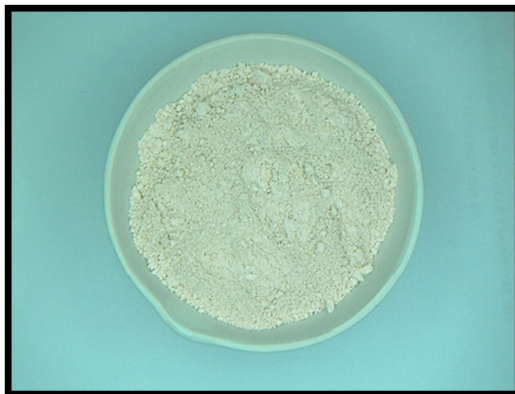
ใช้ดินขาวจากแหล่งดินขาวในจังหวัดนครราชสีมา โดยนำมาเผาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดขัดสี (Abrasion Machine) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.1.2 เถ้าปาล์ม

เถ้าปาล์มเป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชีวมวล จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ท่าอากาศยานปาล์มน้ำมันอุตสาหกรรม จำกัด โดยเถ้าปาล์มนั้นเป็นวัสดุที่ผ่านการเผาแล้ว ซึ่งเตรียมโดยนำมาอบเพื่อไล่ความชื้น และบดด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.1.3 กากอลูมิน่า

กากอลูมิน่าในงานวิจัยนี้เป็นกากของเสียจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ได้รับความอนุเคราะห์วัสดุจากบริษัท ไทยเปอร์ออกไซด์ จำกัด จังหวัดสระบุรี ซึ่งเตรียมโดยนำมาอบเพื่อไล่ความชื้น และบดด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทั้งนี้วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.1 ดินขาวเผาที่ผ่านการบดละเอียด



รูปที่ 3.2 ถ่านปาล์มที่ผ่านการบดละเอียด



รูปที่ 3.3 กากอลูมิน่าที่ผ่านการบดละเอียด

3.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ดตาม มอก. 150-2518 โดยทำการผสมเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำเพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์

3.1.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃)

สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในงานวิจัยมีองค์ประกอบของ Na₂O = 15.32 %, SiO₃ = 32.87% และ น้ำ = 51.81% โดยน้ำหนัก

3.2 วิธีดำเนินการ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การทดลองเพื่อศึกษาจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัย

การทดลองที่ 1 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้

- ทดสอบความถ่วงจำเพาะ
- หาขนาดคละของวัสดุที่ใช้
- วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)
- วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)
- ศึกษาภาพถ่ายขยายกำลังสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

การทดลองที่ 2 การทดสอบการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ขนาด 5x5x5 ซม.³

- ผลกระทบจากการเผาดินขาวในการเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์
 - ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสม โดยสูตรดินขาวอย่างเดียว 9 ตัวอย่าง สูตรดินขาว:เถ้าปาล์ม 18 ตัวอย่าง และสูตรดินขาว:เถ้าปาล์ม:กากอลูมินา 18 ตัวอย่าง
 - ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์
-

การทดลองที่ 2 การทดสอบการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ขนาด 5x5x5 ซม.³ (ต่อ)

- ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก
- ผลเมื่ออายุของตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน
- ศึกษาค่าความหนาแน่นและการหดตัวแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การทดลองที่ 3 การทดสอบโครงสร้างขนาดเล็ก (Microstructure) ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

- วิเคราะห์ภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)
 - วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)
 - วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี Wide-Angle X-ray Scattering (WAXS)
 - ทดสอบการทนความร้อนด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C
 - วิเคราะห์ปริมาณของโลหะหนักจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์
-

3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งมีขนาด 5x5x5 ซม.³ โดยสังเคราะห์จากการใช้ดินขาวเผา ถ้ำปาล์ม และกากอลูมิน่าเป็นส่วนผสม ซึ่งในการทดลองได้ทำการปรับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ตั้งแต่ 0.5, 1.5 จนถึง 2.5 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน ทั้งนี้ วิธีการคำนวณสูตรผสมให้อยู่ในรูปของน้ำหนักเป็น Mole ratio แสดงดังในตารางที่ 3.2 และได้ทำการเปรียบเทียบกับช่วงของ Davidovits ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการคำนวณในรูปของอัตราส่วนโดยโมล (Mole ratio) ที่น้ำหนัก 1 กก.

	MW	Metakaolin	Palm ash	*Na ₂ SiO ₃	*NaOH 15 M	mass	mole
Kilogram	-	0.386	0.097	0.369	0.148	1.000	-
SiO ₂	60.08	48.08	45.88	32.87	-	34.14	0.57
Al ₂ O ₃	101.95	37.20	0.64	-	-	14.44	0.14
Na ₂ O	61.97	-	-	25.16	44.00	15.28	0.25
H ₂ O	18.00	-	-	41.97	56.00	23.80	1.32

* หมายถึง Na₂SiO₃ และ NaOH ที่ใช้ทำการทดลองได้เตรียมในรูปของสารละลาย

ตารางที่ 3.3 แสดงค่า Oxide-Mole Ratios ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับช่วงของ (Davidovits, 1984)

Ratio	Mole ratio	Davidovits
Na ₂ O/SiO ₂	0.44	0.20-0.48
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.07	3.30-4.50
H ₂ O/Na ₂ O	5.28	10-25
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	1.78	0.80-1.20
*w/b	0.31	0.30-0.40

*หมายถึง w/b คือ ของเหลว/ของแข็ง

3.2.2 วิธีการเตรียมวัสดุตั้งต้น ก่อนนำมาใช้ทำจีโอโพลิเมอร์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุตั้งต้นเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการนำมาสังเคราะห์ จีโอ โพลิเมอร์ ซึ่งสามารถช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่ระหว่างสารตั้งต้นและสารละลายต่างที่ใช้ในการทดลอง โดยการเตรียมวัสดุตั้งต้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) ขั้นแรกทำการเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และเปลี่ยนสภาพโครงสร้างของดินขาวให้มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous)

(2) จากนั้นนำดินขาวที่ผ่านการเผาแล้ว รวมทั้งเถ้าปาล์มและกากอลูมินา มาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อขจัดความชื้น ดังรูปที่ 3.4 (หากไม่ทำการอบก่อนเถ้าปาล์มและกากอลูมินาซึ่งมีความชื้นสูงจะมีลักษณะเหลวในขณะที่ทำการบด)

(3) นำวัสดุที่ผ่านการอบแล้วมาทำการบดด้วยเครื่องบดชนิดดี (Abrasion Machine) ดังรูปที่ 3.5 โดยใช้เวลาในการบดประมาณ 4-5 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุตั้งต้นมีความละเอียดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.4 อบวัสดุตั้งต้นก่อนนำไปทำการบด รูปที่ 3.5 เครื่องบดชนิดดี (Abrasion Machine)

(4) นำวัสดุตั้งต้นที่ผ่านการบดแล้ว เก็บรวบรวมไว้ในภาชนะที่สามารถกันความชื้นได้ ดังรูปที่ 3.6

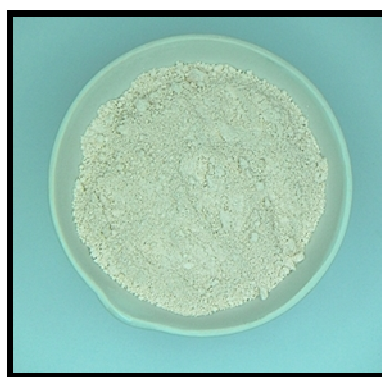


รูปที่ 3.6 เก็บวัสดุตั้งต้นที่เตรียมเสร็จแล้วไว้ในภาชนะที่กันความชื้นได้

(5) จากขั้นตอนการเตรียมวัสดุตั้งต้นที่กล่าวมา ทำให้วัสดุตั้งต้นมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น และมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้สังเคราะห์หี้อิโพลีเมอร์ โดยรูปที่ 3.7-3.12 เป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองก่อนและหลังทำการบด



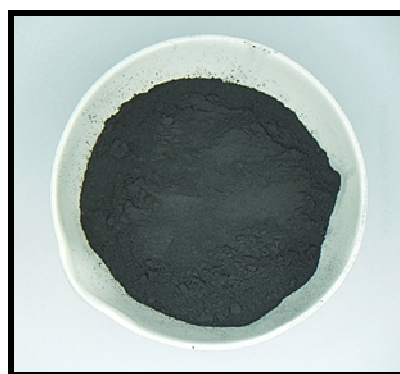
รูปที่ 3.7 ดินขาวผาก่อนทำการบด



รูปที่ 3.8 ดินขาวผาหลังทำการบด



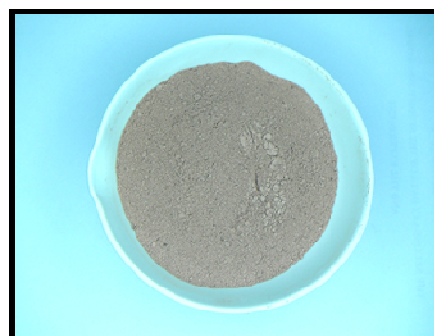
รูปที่ 3.9 ใ้่าปาล์มก่อนทำการบด



รูปที่ 3.10 ใ้่าปาล์มหลังทำการบด



รูปที่ 3.11 กากอลูมิน่าก่อนทำการบด



รูปที่ 3.12 กากอลูมิน่าหลังทำการบด

3.2.3 วิธีการขึ้นรูปจีโอโพลิเมอร์ในห้องปฏิบัติการ

(1) ผสมวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ดินขาว เถ้าปาล์ม และกากอลูมินา ตามอัตราส่วนที่กำหนดของแต่ละสูตรผสม ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผสมวัสดุตั้งต้นในภาชนะที่สะอาด

(2) ทำการคลุกเคล้าจนผสมจนวัสดุตั้งต้นเข้ากันได้ดี ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.14 ทำการคลุกเคล้าวัสดุตั้งต้นให้เข้ากัน



รูปที่ 3.15 วัสดุตั้งต้นผสมเข้ากัน

(3) เทสารตั้งต้นลงในภาชนะสำหรับทำการผสม และเตรียมสารละลาย NaOH ตามความเข้มข้นที่ต้องการ (ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ได้จากการนำ Sodium hydroxide ในรูปของเกล็ดหนัก 400 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้สารละลายปริมาตร 1 ลิตร) โดยจะต้องเตรียมล่วงหน้าอย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายเข้ากันได้ดี ในส่วนของอัตราส่วนระหว่างสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ใช้ตามที่กำหนดของแต่ละสูตรผสม ดังรูปที่ 3.16-3.17



รูปที่ 3.16 เทสารตั้งต้นลงในภาชนะสำหรับการผสม



รูปที่ 3.17 เตรียมสารละลาย Na_2SiO_3 และ NaOH ตามที่กำหนดของแต่ละสูตรผสม

(4) ผสมสารละลาย Na_2SiO_3 และ NaOH ลงในภาชนะที่ได้สารตั้งต้น ทำการกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.18 และ 3.19

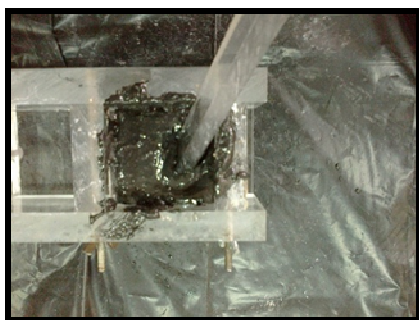


รูปที่ 3.18 เทสารละลายลงไปผสมกับสารตั้งต้น

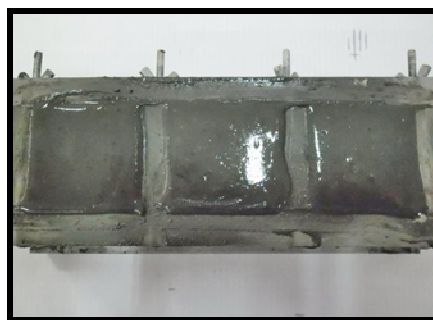


รูปที่ 3.19 กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

(5) นำส่วนผสมเทลงในแบบหล่ออะคริลิก โดยเทลงเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นทำการกระทุ้งชั้นละ 32 ครั้ง จนเต็มแบบหล่อ แล้วทำการเคาะเขย่าเพื่อไล่ฟองอากาศประมาณ 100 ครั้ง ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 นำส่วนผสมเทใส่แบบหล่อ
และกระทุ้ง 2 ชั้น ชั้นละ 32 ครั้ง



รูปที่ 3.21 เทส่วนผสมจนเต็มแบบหล่อ
แล้วทำการเขย่าเพื่อไล่ฟองอากาศ

6) ทำการหุ้มแบบหล่อโดยใช้แผ่นพลาสติกใสสำหรับห่ออาหาร (เพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากส่วนผสมในขณะที่บ่มตัวอย่างด้วยความร้อน) ดังรูปที่ 3.22 ทั้งนี้ ตั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการจัดเรียงตัวก่อนนำเข้าตู้อบ



รูปที่ 3.22 หุ้มแบบหล่อโดยใช้แผ่นพลาสติกห่ออาหาร
และตั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนนำเข้าตู้อบ

(7) จากนั้นทำการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อช่วยในการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 นำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(8) เมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ออกจากแบบหล่อ ดังรูปที่ 3.24 ทำการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดตัวอย่าง เพื่อเก็บข้อมูลรายละเอียดตามที่ต้องการ ทั้งนี้จะเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบกำหนดอายุทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน (ควรเก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่สามารถกันความชื้นได้) และทำการทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์



รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.2.4 ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษามีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

XXMK XXPA XXAW-XXM(XX)

ตัวเลข “ <u>XX</u> ” หน้า MK	หมายถึง อัตราส่วนของดินขาวเผาที่ใช้เป็นสารตั้งต้น
ตัวเลข “ <u>XX</u> ” หน้า PA	หมายถึง อัตราการแทนที่ดินขาวโดยใช้เถ้าปาล์ม
ตัวเลข “ <u>XX</u> ” หน้า AW	หมายถึง อัตราการแทนที่ดินขาวโดยใช้กากอลูมินา
ตัวเลข “ <u>XX</u> ” หน้า M	หมายถึง ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยโมลาร์ที่ใช้ในการศึกษา
ตัวเลข “ <u>XX</u> ” ใน ()	หมายถึง อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ที่อัตราส่วน 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก

ทั้งนี้ สูตรผสมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.4, 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.4 แสดงส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่น้ำหนัก 1,000 กรัม ใช้ความเข้มข้นสารละลาย NaOH ที่ 5 โมลาร์

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น			สารเคมี (ในรูปสารละลาย)	
	ดินขาวเผา	เถ้าปาล์ม	กากอลูมิน่า	Na ₂ SiO ₃	NaOH
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
100MK0PA0AW-5M(0.5)	483	0	0	173	345
100MK0PA0AW-5M(1.5)	483	0	0	311	207
100MK0PA0AW-5M(2.5)	483	0	0	369	148
80MK20PA0AW-5M(0.5)	386	97	0	173	345
60MK40PA0AW-5M(0.5)	290	193	0	173	345
80MK20PA0AW-5M(1.5)	386	97	0	311	207
60MK40PA0AW-5M(1.5)	290	193	0	311	207
80MK20PA0AW-5M(2.5)	386	97	0	369	148
60MK40PA0AW-5M(2.5)	290	193	0	369	148
80MK10PA10AW-5M(0.5)	386	48	48	173	345
60MK20PA20AW-5M(0.5)	290	97	97	173	345
80MK10PA10AW-5M(1.5)	386	48	48	311	207
60MK20PA20AW-5M(1.5)	290	97	97	311	207
80MK10PA10AW-5M(2.5)	386	48	48	369	148
60MK20PA20AW-5M(2.5)	290	97	97	369	148

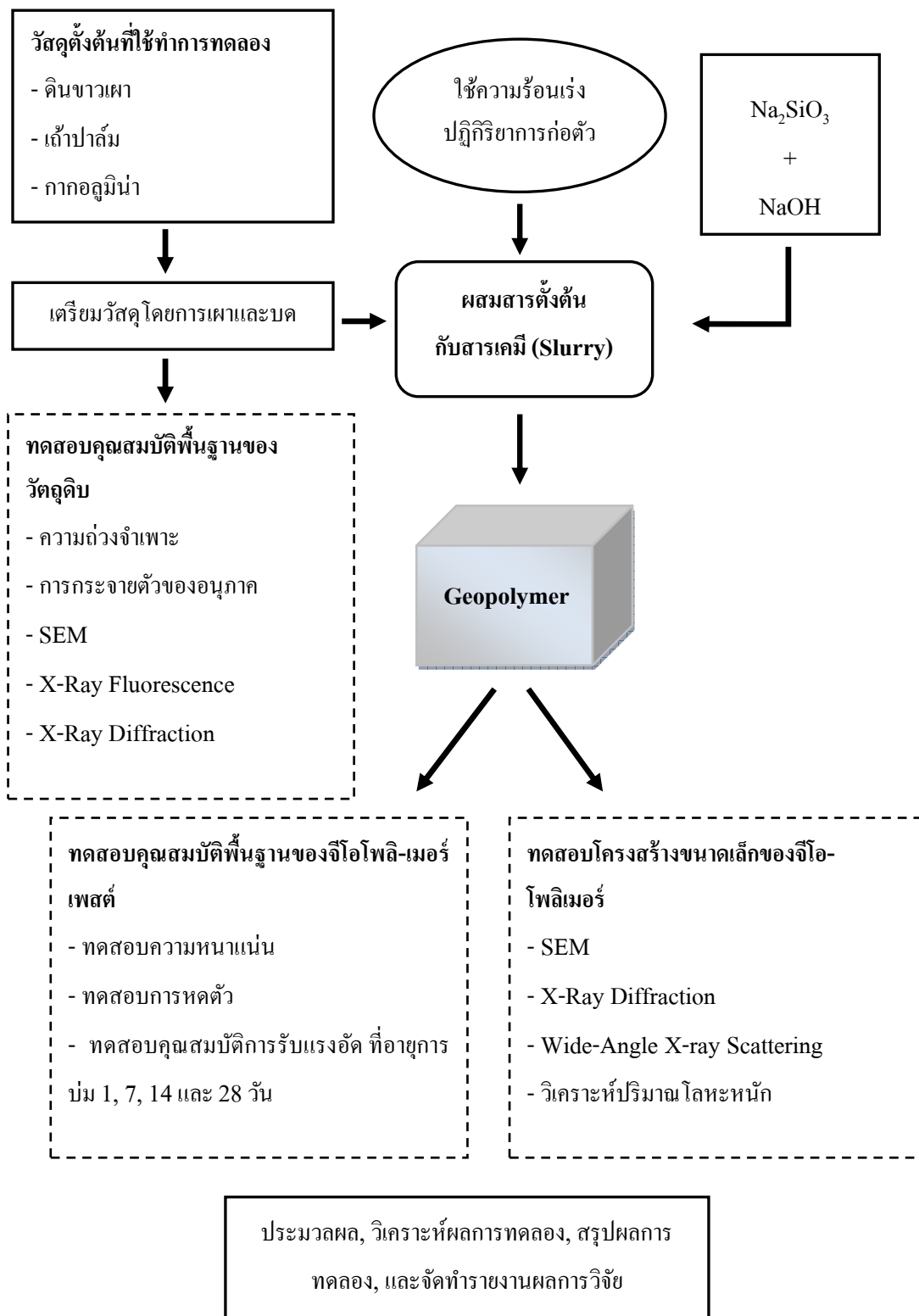
ตารางที่ 3.5 แสดงส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่น้ำหนัก 1,000 กรัม ใช้ความเข้มข้นสารละลาย NaOH ที่ 10 โมลาร์

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น			สารเคมี (ในรูปสารละลาย)	
	ดินขาวเผา	เถ้าปาล์ม	กากอลูมิน่า	Na ₂ SiO ₃	NaOH
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
100MK0PA0AW-10M(0.5)	483	0	0	173	345
100MK0PA0AW-10M(1.5)	483	0	0	311	207
100MK0PA0AW-10M(2.5)	483	0	0	369	148
80MK20PA0AW-10M(0.5)	386	97	0	173	345
60MK40PA0AW-10M(0.5)	290	193	0	173	345
80MK20PA0AW-10M(1.5)	386	97	0	311	207
60MK40PA0AW-10M(1.5)	290	193	0	311	207
80MK20PA0AW-10M(2.5)	386	97	0	369	148
60MK40PA0AW-10M(2.5)	290	193	0	369	148
80MK10PA10AW-10M(0.5)	386	48	48	173	345
60MK20PA20AW-10M(0.5)	290	97	97	173	345
80MK10PA10AW-10M(1.5)	386	48	48	311	207
60MK20PA20AW-10M(1.5)	290	97	97	311	207
80MK10PA10AW-10M(2.5)	386	48	48	369	148
60MK20PA20AW-10M(2.5)	290	97	97	369	148

ตารางที่ 3.6 แสดงส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่น้ำหนัก 1,000 กรัม ใช้ความเข้มข้นสารละลาย NaOH ที่ 15 โมลาร์

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น			สารเคมี (ในรูปสารละลาย)	
	ดินขาวเผา	เถ้าปาล์ม	กากอลูมิน่า	Na ₂ SiO ₃	NaOH
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
100MK0PA0AW-15M(0.5)	483	0	0	173	345
100MK0PA0AW-15M(1.5)	483	0	0	311	207
100MK0PA0AW-15M(2.5)	483	0	0	369	148
80MK20PA0AW-15M(0.5)	386	97	0	173	345
60MK40PA0AW-15M(0.5)	290	193	0	173	345
80MK20PA0AW-15M(1.5)	386	97	0	311	207
60MK40PA0AW-15M(1.5)	290	193	0	311	207
80MK20PA0AW-15M(2.5)	386	97	0	369	148
60MK40PA0AW-15M(2.5)	290	193	0	369	148
80MK10PA10AW-15M(0.5)	386	48	48	173	345
60MK20PA20AW-15M(0.5)	290	97	97	173	345
80MK10PA10AW-15M(1.5)	386	48	48	311	207
60MK20PA20AW-15M(1.5)	290	97	97	311	207
80MK10PA10AW-15M(2.5)	386	48	48	369	148
60MK20PA20AW-15M(2.5)	290	97	97	369	148

แผนผังการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.26 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 บทนำ

ในบทนี้แสดงผลการวิจัยที่ได้ศึกษาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์โดยการนำเอาวัสดุซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยนำมาเป็นส่วนผสมร่วมกับดินขาวเผาและสารละลายต่างเพื่อสังเคราะห์เป็นจีโอโพลิเมอร์ รายละเอียดของการศึกษาประกอบไปด้วย คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง การศึกษาผลกระทบที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งจะประโยชน์อย่างยิ่งในการนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับลักษณะงานที่ต้องการ

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

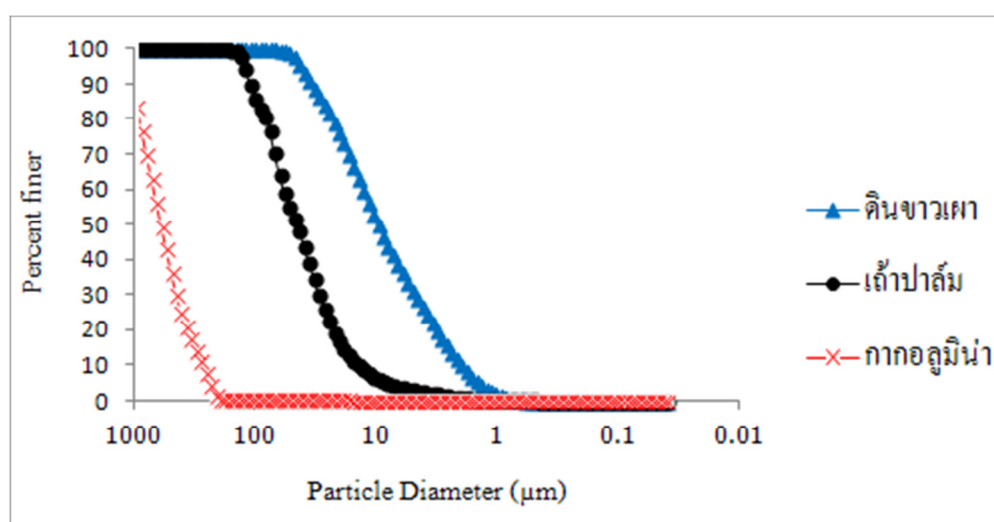
4.2.1 ขนาดอนุภาคของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมิน่า

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการบดให้ขนาดอนุภาคมีความละเอียดมากขึ้น เพื่อช่วยให้จีโอโพลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาที่ดีในขั้นตอนการขึ้นรูป ซึ่งการแตกหักของขอบผลึกทำให้กลุ่มไฮดรอกซิลที่จับตัวอยู่กับอลูมิเนียมหรือซิลิกอนแตกตัวออกมา ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางประจุไฟฟ้าขึ้น ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของผลึกจะสามารถดูดซับประจุบวกไว้เป็นจำนวนและสัดส่วนเท่ากับประจุลบที่มีอยู่ โดยขบวนการที่เกิดมีการแลกเปลี่ยนที่หรือไล่ที่กันของประจุบวกที่พื้นผิวของวัสดุนั้น เรียกว่า การแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange) ส่วนความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแร่ดินนั้น ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของดิน พีเอช (pH) และขนาดของอนุภาค (ประมวล โสมละคร และคณะ, 2551) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการบดวัสดุตั้งต้นด้วยเครื่องบดชนิดสีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลจากการทดสอบขนาดอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แสดงไว้ดัง

ตารางที่ 4.1 โดยดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมินามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14, 54 และ 637 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในส่วนการกระจายตัวของวัสดุตั้งต้นนั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคและความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุตั้งต้น	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ความถ่วงจำเพาะ
ดินขาวเผา	14	2.44
เถ้าปาล์ม	54	2.04
กากอลูมินา	637	2.21



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมินา

4.2.2 ความถ่วงจำเพาะของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมินา

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมินา ได้แสดงไว้ดังในตารางที่ 4.1 โดยค่าความถ่วงจำเพาะของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมินามีค่าเท่ากับ 2.44, 2.04 และ 2.21 ตามลำดับ

4.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมิน่า

ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์นั้นจำเป็นต้องทราบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิกอน (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) โดยเกิดจากการใช้วัสดุที่มีสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นั้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน แต่โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ที่ดีจะต้องมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิน่าเท่ากับ 2 ต่อ 1 โครงสร้างจะเป็นแบบ Poly(sialate-siloxo) ซึ่งจะให้ได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังที่ดี (Davidovits, 1999) ในขณะที่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หากมีในปริมาณที่สูงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาในกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Tailby and Mackenzie, 2010)

โดยผลจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น ซึ่งใช้วิธี X-Ray Fluorescence (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าดินขาวเผามีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 48.08% รองลงมา คือ Al_2O_3 37.20% ซึ่งองค์ประกอบหลักทั้ง 2 ชนิด มีผลต่อการปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ ส่วนเถ้าปาล์มนั้นมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 45.88% รองลงมาคือ CaO 14.78% ซึ่งเถ้าปาล์มยังมีปริมาณของ Al_2O_3 อยู่ด้วย และกากอลูมิน่ามีองค์ประกอบหลัก คือ Al_2O_3 ในปริมาณที่สูงถึง 77.93% ส่วน SiO_2 นั้นมีอยู่ในปริมาณที่น้อย ทั้งนี้ เถ้าปาล์มและกากอลูมิน่ามีองค์ประกอบที่สามารถนำมาเป็นส่วนผสมรวมในดินขาวเผาเพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้

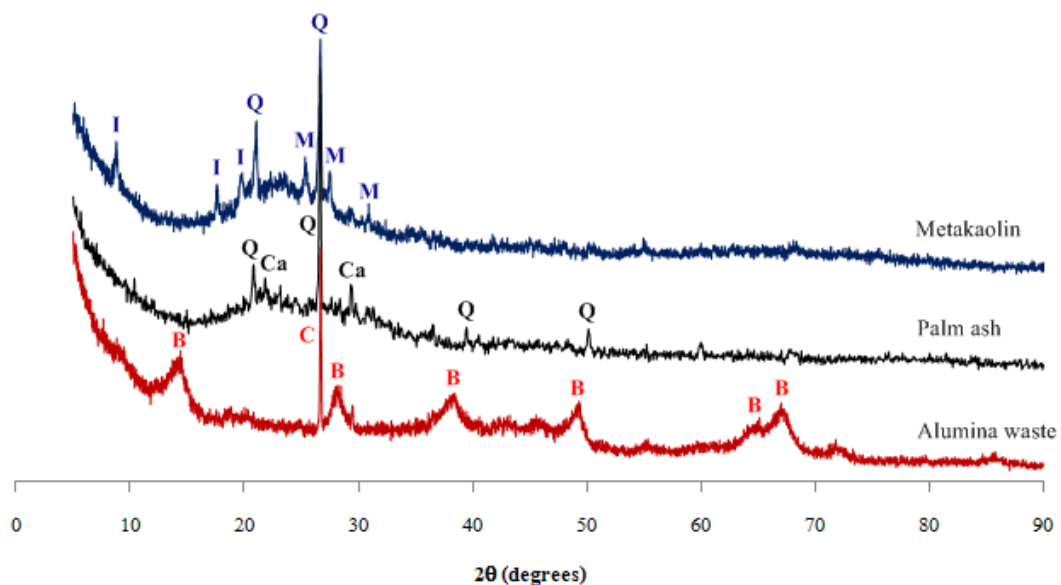
ตารางที่ 4.2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุตั้งต้น	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	K_2O	CaO	Fe_2O_3
ดินขาวเผา	48.08	37.20	-	1.97	-	1.19
เถ้าปาล์ม	45.88	0.64	6.13	10.34	14.78	1.90
กากอลูมิน่า	0.09	77.93	0.34	-	-	-

4.2.4 ความเป็นผลึกของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกโดยใช้วิธี X-Ray Diffraction ดังรูปที่ 4.2 พบว่าดินขาวเผาและเถ้าปาล์มเป็นของแข็งอสัณฐาน (Amorphous) แสดงโดยยอด (Peak) ฐานกว้างที่ตำแหน่ง $15-35^\circ$ โดยดินขาวเผาจะมีความเป็นผลึกของ Quartz (SiO_2), Microcline (KAlSi_3O_8) และ

Illite ($(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$) ส่วนเถ้าปล้จะมีความเป็นผลึกของ Quartz (SiO_2) และ Calcite (CO_3) ในส่วนกากอลูมินามีความเป็นผลึกของ Boehmite $AlO(OH)$ และ Carbon (C) รวมอยู่ด้วย โดยดินขาวเผาและเถ้าปล้มีลักษณะเป็นอสัณฐาน ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ส่วนกากอลูมินายังไม่เป็นสภาพอสัณฐาน แต่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมร่วมในสารตั้งต้นได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักของอลูมิเนียมออกไซด์อยู่สูง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ ดินขาวเผามีคุณสมบัติที่ดีในการนำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์เนื่องจากมี SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก และมีคุณสมบัติเป็นของแข็งอสัณฐาน



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ของดินขาวเผา เถ้าปล้ และกากอลูมินา

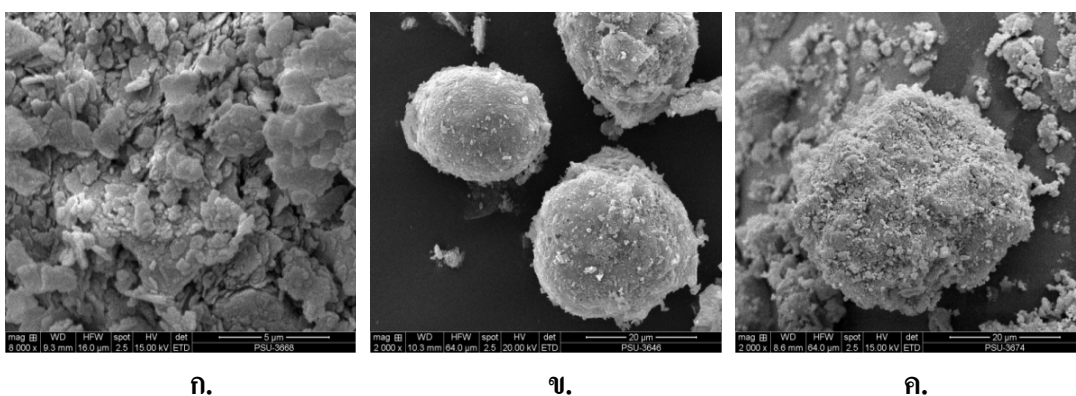
Q = Quartz (SiO_2), I = Illite ($(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$), Mi = Microcline ($KAlSi_3O_8$),

Ca = Calcite (CO_3), B = Boehmite $AlO(OH)$ และ C = Carbon (C)

ซึ่งเกิดจากการเผาดินขาวในช่วงอุณหภูมิ $600-900^{\circ}C$ ทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เปลี่ยนสภาพเป็นอสัณฐาน (Harben, 1984) โดยมีหลายงานวิจัยได้ศึกษาโดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ (Hongling Wang และคณะ, 2005; Zuhua และคณะ, 2009; Pavel Rovnanik, 2010; Vladimir Zivica และคณะ, 2011) ในส่วนงานวิจัยนี้ได้ลดการใช้ดินขาวเผาลง เพื่อนำเถ้าปล้และกากอลูมินามาใช้ประโยชน์ใหม่ ด้วยการนำมาเป็นส่วนผสมร่วมในดินขาวเผาเพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

4.2.5 ภาพถ่ายวัสดุที่ใช้ในการทดลอง โดยถ่ายภาพกำลังขยายสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

การศึกษาวัสดุตั้งต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าอนุภาคดินขาวเผามีลักษณะเป็นแผ่นเกร็ดบางๆ ส่วนเถ้าปาล์มมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ และกากอลูมินามีลักษณะเป็นทรงกลมผิวค่อนข้างขรุขระ ดังรูปที่ 4.3 โดยดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมินามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14, 54 และ 637 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุตั้งต้น ก. ดินขาวเผา ข. เถ้าปาล์ม และ ค. กากอลูมินา

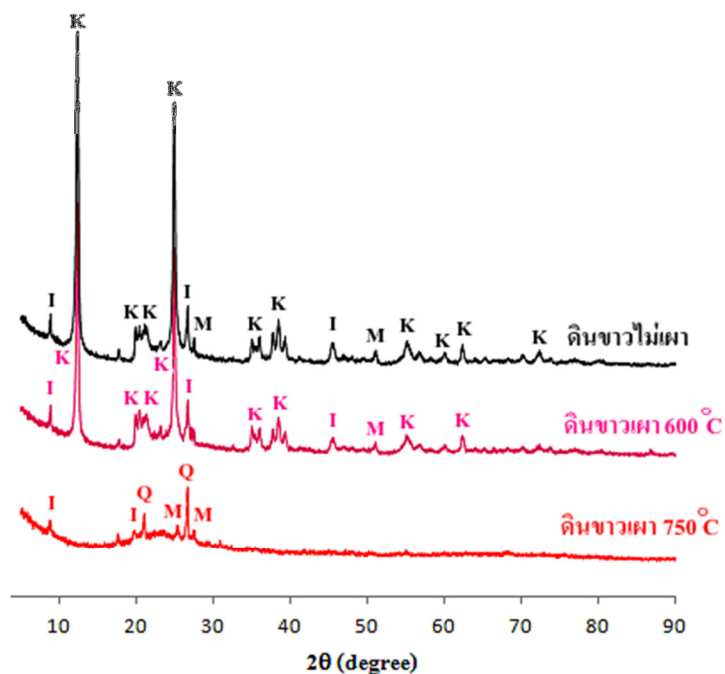
4.3 คุณสมบัติการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การศึกษากำลังรับแรงอัดในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการศึกษาผลกระทบของเถ้าปาล์มและกากอลูมินาจากการนำมาใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับดินขาวเผาในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากการศึกษาโดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวมีค่อนข้างมาก นอกจากนี้ ได้ทำการศึกษาการใช้สารละลายต่างที่สภาวะต่างกันในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดประกอบไปด้วยวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทดลอง อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ สภาวะในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ รวมถึง

ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างซึ่งส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ด้วย โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลกระทบจากการเผาดินขาวในการเตรียมวัสดุดิบตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากการใช้ดินขาว 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ ดินขาวที่ไม่ทำการเผา ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยจากการทดลองการเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 600°C ได้ทำการเผาโดยใช้ดินขาวเข้าไปในเตาเผาตั้งแต่ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นใช้เวลาในการเพิ่มความร้อนจนอุณหภูมิถึง 600°C ประมาณ 3 ชั่วโมง แล้วเผาดินขาวโดยคงอุณหภูมิไว้ที่ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้เวลาในการเผาดินขาวรวม 6 ชั่วโมง ส่วนการทดลองเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 750°C นั้น ทำการทดลองโดยเพิ่มความร้อนจนอุณหภูมิถึง 750°C ก่อน จากนั้นจึงเริ่มใส่ดินขาวเข้าไปในเตาเผาแล้วทำการเผาแบบทันทีทันใด ซึ่งใช้เวลาในการเผาดินขาวรวม 3 ชั่วโมง ทั้งนี้ เมื่อนำดินขาวทั้ง 3 แบบที่ทำการทดลองมาศึกษาความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4

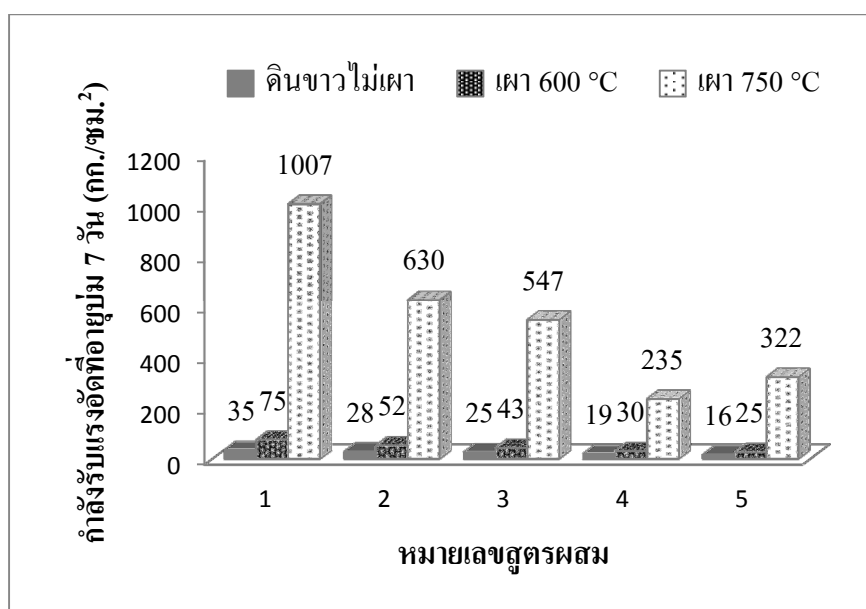


รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ของดินขาวที่ทำการทดลอง

Q = Quartz (SiO_2), I = Illite ($(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), M = Microcline (KAlSi_3O_8),

K = Kaolinite

จากการศึกษาความเป็นผลึกของดินขาวทั้ง 3 แบบ โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) สังเกตได้ว่าการเผาดินขาวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C ความเป็นผลึกของดินขาวจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้น โดยผลึกของ Kaolinite จะหายไป มีผลึกของ Quartz (SiO_2) เพิ่มขึ้นมา และดินขาวเผาจะเปลี่ยนสภาพเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งแสดงโดย ยอด (Peak) ฐานกว้างที่ตำแหน่ง 15-35° ส่วนดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600°C ความเป็นผลึกของ Kaolinite หายไปเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นผลึกของดินขาวที่ไม่ทำการเผา นอกจากนี้ได้นำดินขาวทั้ง 3 แบบ มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



*รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสม ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยสังเคราะห์จากการใช้ดินขาวไม่เผาเปรียบเทียบกับการใช้ดินขาวเผาที่ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

* หมายเลขตัวอย่าง: (1) 100MK0PA0AW-15M(2.5), (2) 80MK20PA0AW-15M(2.5), (3) 80MK10PA10AW-15M(2.5), (4) 60MK40PA0AW-15M(2.5) และ (5) 60MK20PA20AW-15M(2.5)

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทุกสูตรผสมที่สังเคราะห์ขึ้นจากการใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าการใช้ดินขาวไม่เผาและสูงกว่าการใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้ดินขาวไม่เผานั้นรับแรงอัดได้ค่อนข้างน้อย ซึ่งมีค่ากำลังอัดในช่วง 15-35 กก./ซม.² ส่วนจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยดินขาวเผาที่ 600°C มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 26-75 กก./ซม.² สังเกตได้ว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์สังเคราะห์ขึ้นจากการใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 750°C ค่อนข้างมาก ซึ่งจากการศึกษาของ Harben ในปี 1984 พบว่าการเผาดินขาวด้วยความร้อนจะช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์และขับไล่ความชื้นออกจากดินขาว นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 600-900°C ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) จะเปลี่ยนสภาพเป็นอสัณฐานซึ่งส่งผลให้ดินขาวมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ตามหลักการของ Davidovits และจากการทดลองพบว่ามีผลใกล้เคียงกับการศึกษาของ Elimbi และคณะ ในปี 2011 ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำการเผาดินขาวเพื่อนำมาสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ทำการทดลองโดยเผาดินขาวที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 450°C จนถึง 800°C พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 450°C จะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำมาก ส่วนการใช้ดินขาวที่เผาในช่วง 500-700°C จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จะเริ่มลดลงเมื่อใช้ดินขาวที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C

จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค XRD และค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์เพสต์ แสดงให้เห็นว่าดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 750°C มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้ดีกว่าการใช้ดินขาวที่ไม่ทำการเผาและดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600°C นอกจากนี้ในขั้นตอนการกวนผสมเพื่อทำการขึ้นรูปจีโอโพลิเมอร์ การใช้ดินขาวไม่เผาเป็นสารตั้งต้นส่วนผสมจะมีความหนืดสูงซึ่งยากต่อการกวนผสม แต่เมื่อทำการใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นสารตั้งต้นสามารถทำการกวนผสมได้ง่ายกว่าการใช้ดินขาวไม่เผา

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวที่ไม่ทำการเผาและดินขาวที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600°C การวิบัติของเพสต์จะมีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะเกิดเป็นรอยร้าวบริเวณขอบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยโครงสร้างเพสต์รับแรงอัดได้ไม่สูงมาก โครงสร้างก็เกิดการวิบัติขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์โดย

ใช้ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 750°C เป็นส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 สังเกตได้ว่า ลักษณะโครงสร้างของเพสต์หลังจากทำการทดสอบกำลังอัดจะเกิดการแตกกระจาย เนื่องมาจากการวิบัติที่รุนแรงเพราะเพสต์รับแรงอัดได้สูง โดยขณะทดสอบกำลังรับแรงอัด เมื่อกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นจนเกินกว่าโครงสร้างเพสต์จะรับได้ เพสต์จะแตกกระจายออกเป็นชิ้นๆ จนสามารถเห็นแกนกลางของเพสต์ได้ ทั้งนี้ จีโอโพลิเมอร์สูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมรวมในดินขาวเผาที่ 750°C นั้น การวิบัติของเพสต์มีลักษณะเช่นเดียวกับสูตรที่ใช้ดินขาวเผาที่ 750°C เป็นสารตั้งต้น เพียงอย่างเดียวเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9

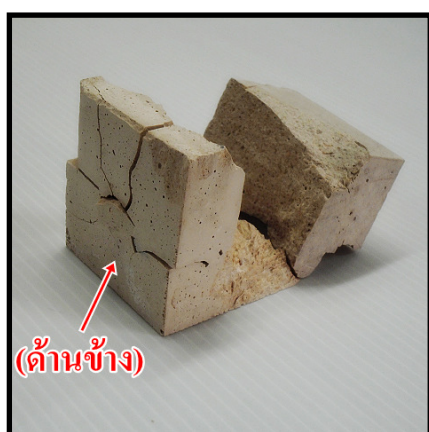


ก.

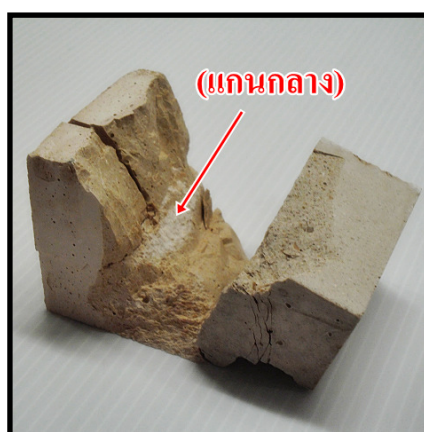


ข.

รูปที่ 4.6 แสดงการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้ดินขาวที่ไม่ทำการเผา



ก.



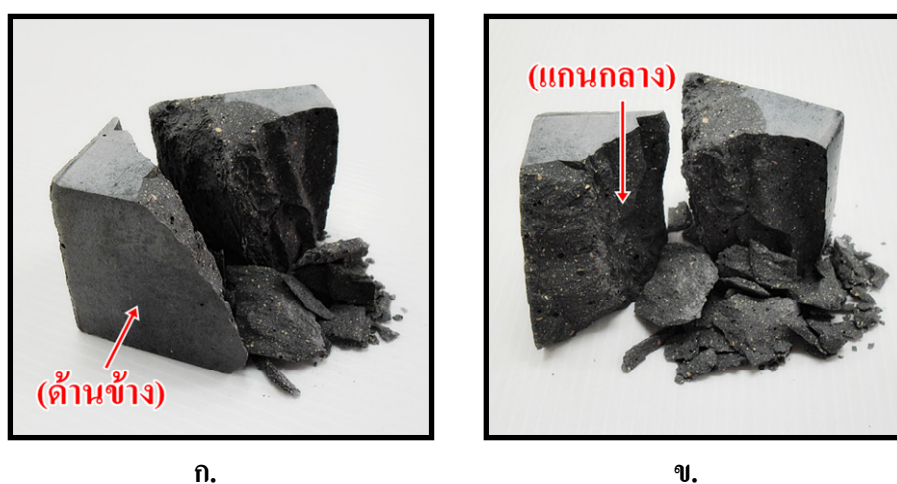
ข.

รูปที่ 4.7 แสดงการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาที่ 750°C

ก. แสดงผิวด้านข้าง ข. แสดงแกนกลาง



รูปที่ 4.8 แสดงการวิบัติของอีโพอลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาที่ 750°C โดยวิบัติในลักษณะแตกกระจาย



รูปที่ 4.9 แสดงการวิบัติของอีโพอลิเมอร์เพสต์ ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้เถ้าปาล์ม เป็นส่วนผสมร่วมในดินขาวเผาที่ 750°C ก. แสดงผิวด้านข้าง ข. แสดงแกนกลาง

4.3.2 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของวัสดุตั้งต้น

การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น ได้ทำการใช้ เถ้าปาล์มและกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับผลการหาองค์ประกอบทางเคมีพบว่า ดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมินามีองค์ประกอบที่สำคัญในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีโพอลิเมอร์ และได้ทำการศึกษาความแข็งแรงที่เกิดขึ้นของอีโ-

โพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมโดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ดังแสดงในตารางที่ 4.3

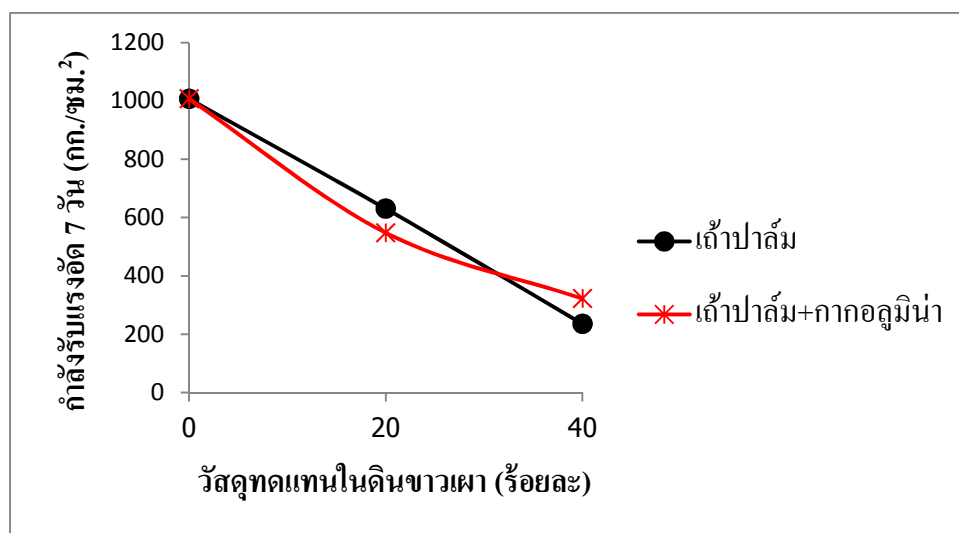
ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสารตั้งต้น

สัญลักษณ์	อุณหภูมิบ่ม 24 ชั่วโมง (°C)	ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ชม. ²)			
		1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
100MK0PA0AW-15M(2.5)	70	933	1,007	1,016	1,045
100MK0PA0AW-10M(2.5)	70	688	785	803	858
100MK0PA0AW-5M(2.5)	70	397	481	508	536
80MK20PA0AW-15M(2.5)	70	526	630	685	752
80MK20PA0AW-10M(2.5)	70	372	457	484	573
80MK20PA0AW-5M(2.5)	70	307	375	392	441
60MK40PA0AW-15M(2.5)	70	183	236	274	332
60MK40PA0AW-10M(2.5)	70	135	184	216	228
60MK40PA0AW-5M(2.5)	70	105	163	171	195
80MK10PA10AW-15M(2.5)	70	502	548	584	616
80MK10PA10AW-10M(2.5)	70	360	447	479	524
80MK10PA10AW-5M(2.5)	70	242	313	338	364
60MK20PA20AW-15M(2.5)	70	268	322	335	350
60MK20PA20AW-10M(2.5)	70	150	198	228	255
60MK20PA20AW-5M(2.5)	70	98	156	168	183

ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของวัสดุตั้งต้นที่พบว่า เมื่อใช้เถ้าปลาล้มแทนที่ในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 15 โมลาร์ ให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 7 วัน เท่ากับ 1,007, 630 และ 236 กก./ชม.² ตามลำดับ และเมื่อใช้เถ้าปลาล้มผสมร่วมกับกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 7 วัน เท่ากับ 1,007, 548 และ 322 กก./ชม.² ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

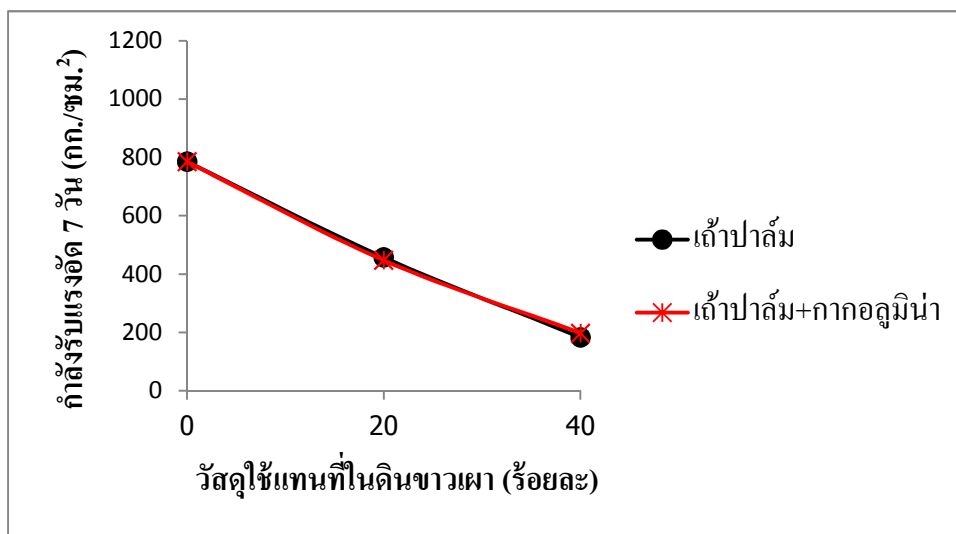
สังเกตได้ว่าการใช้เถ้าปาล์มและกากอลูมิน่าซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานแทนที่ในดินขาวเผาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเถ้าปาล์มเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีคุณภาพต่ำกว่าดินขาวเผา (ASTM C618) ส่วนกากอลูมิน่านั้นไม่จัดเป็นสารกลุ่มพอลิเมอร์ธรรมชาติและมีคุณภาพในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่ต่ำกว่าดินขาว เมื่อพิจารณาถึงขนาดอนุภาคพบว่าเถ้าปาล์มและกากอลูมิน่ามีอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าดินขาว ซึ่งขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันซึ่งกล่าวไว้ในข้อที่ 4.2.1 เมื่อนำเถ้าปาล์มและกากอลูมิน่ามาใช้เป็นส่วนผสมรวมเพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นรับแรงอัดได้น้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ชุดควบคุม ซึ่งสังเคราะห์จากการใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการใช้เถ้าปาล์มผสมร่วมกับกากอลูมิน่าแทนที่ในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 40 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์รับแรงอัดได้มากกว่าตัวอย่างที่ใช้เถ้าปาล์มเพียงอย่างเดียวแทนที่ในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 40 ซึ่งการใช้กากอลูมิน่าในปริมาณที่มากพอส่งผลให้อลูมิเนียม (Al) ทำปฏิกิริยากับซิลิกอน (Si) ที่เหลืออยู่ได้มากขึ้น จึงทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นได้

จากการทดลองยังพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกันกับการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่ำลง ตั้งแต่ที่ความเข้มข้น 15, 10 และ 5 โมลาร์ ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

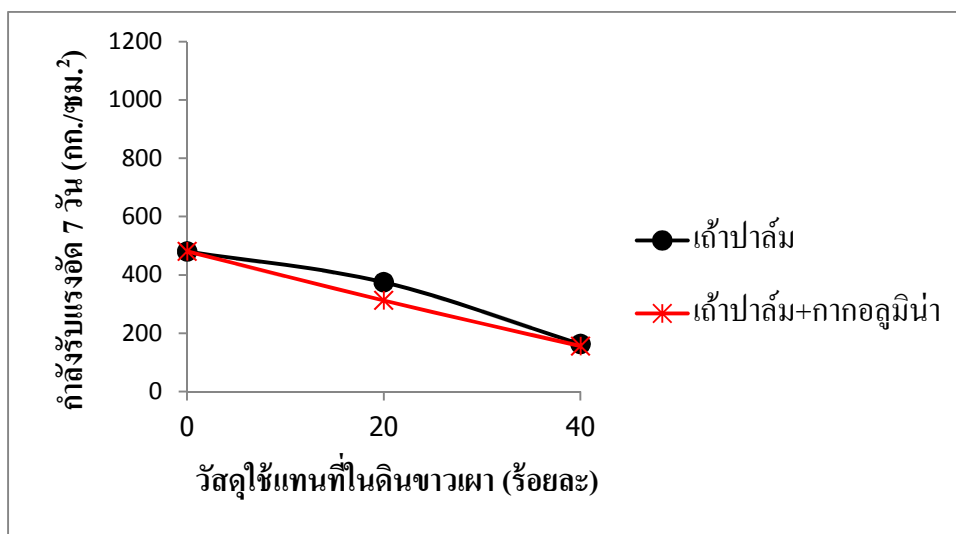


รูปที่ 4.10 กำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน

เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่ดินขาวเผาด้วยวัสดุทดแทน ที่ความเข้มข้น NaOH 15 โมลาร์



รูปที่ 4.11 กำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน
เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่ดินขาวเผาด้วยวัสดุทดแทน ที่ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์



รูปที่ 4.12 กำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน
เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่ดินขาวเผาด้วยวัสดุทดแทน ที่ความเข้มข้น NaOH 5 โมลาร์

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ซึ่งแสดงดังในตารางที่ 4.4 พบว่าถ้าปาล์มมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 14.78 โดยน้ำหนัก ซึ่งแคลเซียมออกไซด์จะเหนี่ยวนำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) ดังที่เกิดในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้ปริมาณซิลิกอน (Si) ลดลง จึงมีผลต่อพันธะโพลิเมอร์ในกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน และส่งผลต่อโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ทำให้มีค่ากำลังอัดลดน้อยลง (Tailby และ Mackenzie, 2010)

ตารางที่ 4.4 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุตั้งต้น	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
ดินขาวเผา	48.08	37.20	-	1.97	-	1.19
ถ้าปาล์ม	45.88	0.64	6.13	10.34	14.78	1.90
กากอลูมิน่า	0.09	77.93	0.34	-	-	-

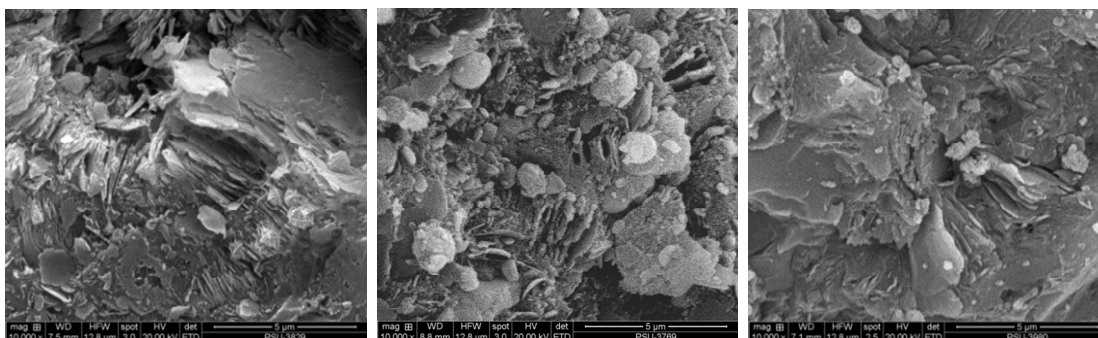
นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวเผา ถ้าปาล์ม และกากอลูมิน่า รวมถึงความเข้มข้นของสารละลายต่างๆที่ใช้มีผลโดยตรงต่อกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เนื่องจากดินขาวเผามีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ ถ้าปาล์มมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ และกากอลูมิน่ามีองค์ประกอบหลัก คือ อลูมิเนียมออกไซด์ ในส่วนของสารละลาย Na₂SiO₃ มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์กับโซเดียมออกไซด์และน้ำ ส่วนสารละลาย NaOH มีองค์ประกอบหลัก คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ดังนั้น เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมย่อมทำให้องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยตารางที่ 4.5 ได้แสดงอัตราส่วนโดยโมลและค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ของตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสม ซึ่งความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์นอกจากขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีแล้ว ชนิดและขนาดอนุภาคของวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นก็มีส่วนต่อความแข็งแรงด้วยเช่นกัน เนื่องจากคุณภาพของสารปอซโซลานมีผลต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ส่วนขนาดอนุภาคของวัสดุมีผลต่อการชะละลายโดยใช้สารละลายต่าง และมีผลต่อความพรุนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ด้วย (ประมวล โสมละคร และคณะ, 2551) ทั้งนี้เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่อัตราส่วน Na₂SiO₃/NaOH เท่ากัน อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (w/b) จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยแต่ไม่มากนัก โดยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ มีค่าของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 0.38, 0.34 และ 0.31 ตามลำดับ แสดงในภาคผนวก ตารางที่ ก.10 – ก.12

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนโดยโมลและความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วันแต่ละสูตรผสม

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	Na ₂ O/ SiO ₂	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	H ₂ O/ Na ₂ O	Na ₂ O/ Al ₂ O ₃	CaO/ SiO ₂	W/B	Strength (ksc)
100MK0PA0AW-15M(0.5)	0.65	2.73	4.68	1.79	0.00	0.36	278
100MK0PA0AW-15M(1.5)	0.49	3.16	5.01	1.55	0.00	0.33	675
100MK0PA0AW-15M(2.5)	0.43	3.34	5.18	1.45	0.00	0.31	1,007
80MK20PA0AW-15M(0.5)	0.66	3.37	4.68	2.22	0.05	0.36	160
80MK10PA10AW-15M(0.5)	0.71	2.47	4.68	1.77	0.03	0.36	235
80MK20PA0AW-15M(1.5)	0.49	3.90	5.01	1.93	0.05	0.33	412
80MK10PA10AW-15M(1.5)	0.53	2.90	5.01	1.53	0.02	0.33	418
80MK20PA0AW-15M(2.5)	0.44	4.13	5.18	1.80	0.04	0.31	630
80MK10PA10AW-15M(2.5)	0.47	3.08	5.18	1.43	0.02	0.31	548
60MK40PA0AW-15M(0.5)	0.66	4.43	4.68	2.94	0.11	0.36	154
60MK20PA20AW-15M(0.5)	0.79	2.22	4.68	1.75	0.06	0.36	147
60MK40PA0AW-15M(1.5)	0.50	5.14	5.01	2.55	0.09	0.33	210
60MK20PA20AW-15M(1.5)	0.57	2.64	5.01	1.52	0.05	0.33	123
60MK40PA0AW-15M(2.5)	0.47	3.08	5.18	1.43	0.02	0.31	548
60MK20PA20AW-15M(2.5)	0.50	2.82	5.18	1.42	0.05	0.31	322
(Davidovits, 1984)	0.20-0.48	3.3-4.5	10-25	0.8-1.2		0.3-0.4	

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว นั้น โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวกันเป็นแผ่นอย่างหนาแน่น ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าปลาลัมเป็นส่วนผสมแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 โครงสร้างภายในจะมีเม็ดกลมซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าปลาลัมแทรกอยู่ด้วย ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าปลาลัมผสมร่วมกับกากอลูมิน่าแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 โครงสร้างภายในจะมีเกล็ดผลึกของกากอลูมิน่าแทรกอยู่ด้วย ดังรูปที่ 4.13 โดยเถ้าปลาลัมและกากอลูมิน่าซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 54 และ 637 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าดินขาวเผา และเมื่อใช้สารละลายต่างผสมรวมในขั้นตอนการขึ้นรูปสารละลายต่างไม่สามารถทำการชะละลายเถ้าปลาลัมและกากอลูมิน่าได้หมด จึงเห็นเป็นอนุภาคขนาดเล็กแทรกอยู่ในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ นอกจากนี้ เมื่อทำการใช้เถ้าปลาลัมแทนที่ในดินขาวเผาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 40 โครงสร้างบางส่วนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีรอยร้าว

ขนาดเล็กเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.14 ส่งผลให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์รับแรงอัดได้น้อยลง นอกจากการแทนที่โดยใช้กากของเสียในปริมาณที่สูงแล้ว รอยร้าวขนาดเล็กสามารถเกิดได้จากการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปในการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ โดยจากการศึกษาของ (สุขสันต์ หอพิบุรณ์สุข และคณะ, 2556) พบว่าการอบด้วยความร้อนมีผลต่อโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยและดินเหนียวปนทรายแป้ง ซึ่งหากใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปหรือทำการอบในระยะเวลาที่นานเกินไปในการกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันจะส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์เกิดรอยร้าวขนาดเล็กได้ เนื่องมาจากการสูญเสียของเหลวในช่องว่างขนาดเล็กและส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดรอยร้าวขนาดเล็กภายในโครงสร้างมีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 50-100 กก./ซม.² อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันอยู่ที่ 60 ถึง 80°C (Chaipanich และ Nochaiya, 2010; Wongkeo และ Chaipanich, 2010)

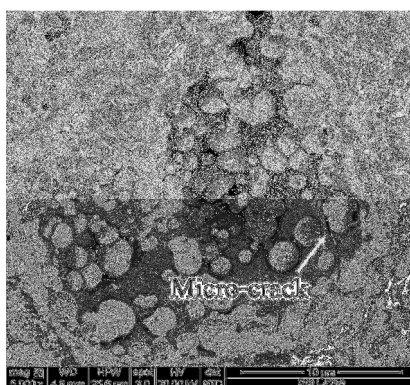


ก.

ข.

ค.

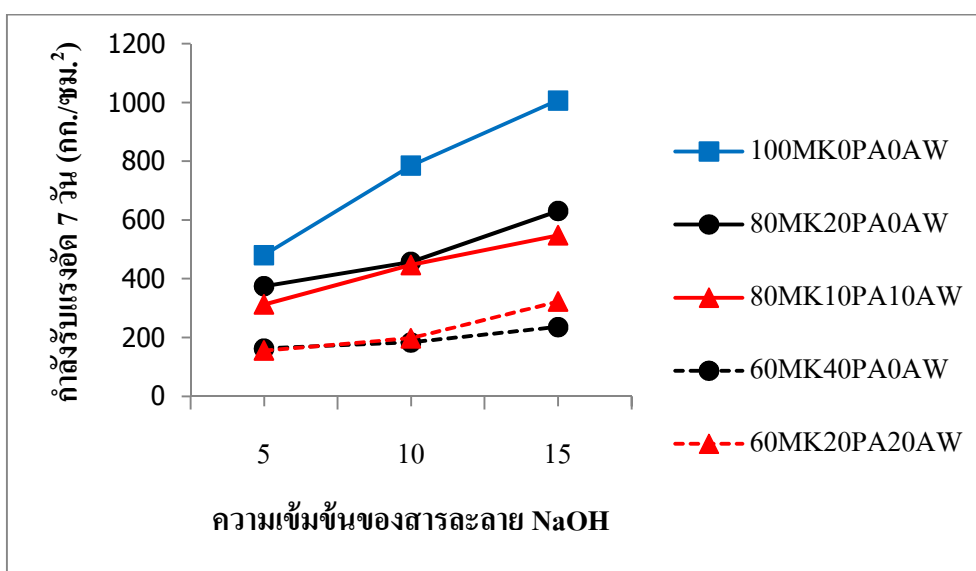
รูปที่ 4.13 SEM images ก. 100MK0PA0AW-15M(2.5), ข. 80MK20PA0AW-15M(2.5)
และ ค. 80MK10PA10AW-15M(2.5)



รูปที่ 4.14 SEM images of the 60MK40PA0AW-15M(2.5)

4.3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ได้ทำการศึกษาโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ ผสมรวมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นสารละลายต่างในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มีผลโดยตรงต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังรูปที่ 4.15 ทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย NaOH โดยเริ่มตั้งแต่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทุกสูตรผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ



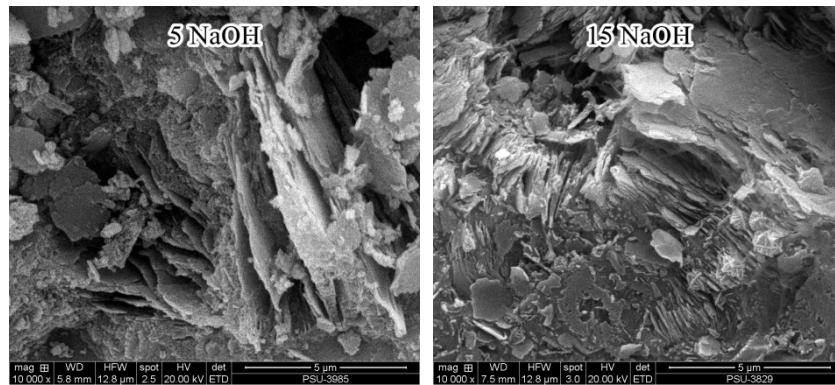
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH กับค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5)

งานวิจัยของ (Ali Nazari และคณะ, 2011) ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถชะละลายซิลิกาและอลูมินาในวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้นทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) สูงขึ้นด้วย ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์โพลิเมอร์ที่สังเคราะห์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ดี (Sanawong และคณะ, 2010; Posi และคณะ, 2010) นอกจากนี้ การศึกษาของ (Kiatsuda Somna และคณะ, 2011) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จาก Original fly ash และ Ground fly ash มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 15 โมลาร์

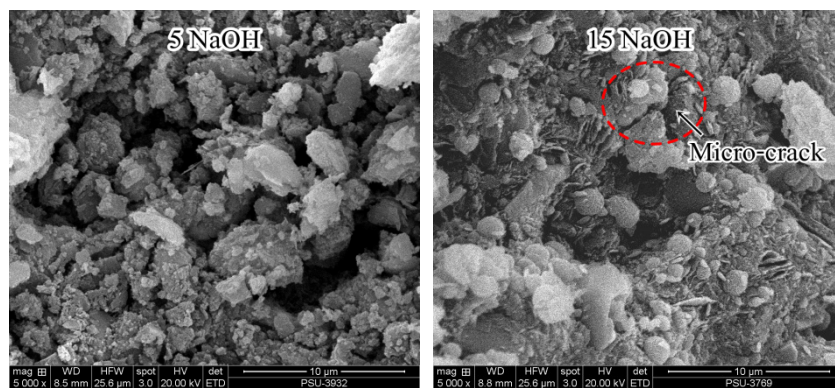
เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่แสดงในรูปที่ 4.15 สังเกตได้ว่าการใช้กากของเสียอลูมินาร่วมกับเถ้าปาล์มทดแทนในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 40 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าการใช้เถ้าปาล์มเพียงอย่างเดียวทดแทนในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 40 อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าปาล์มและกากอลูมินาเป็นส่วนผสมทดแทนในดินขาวเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 40 จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าการทดแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 20 แต่สามารถนำเถ้าปาล์มและกากของเสียอลูมินากลับมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมที่สังเคราะห์จากการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 5 และ 15 โมลาร์ ดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 สังเกตได้ว่าโครงสร้างขนาดเล็กของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว จากการใส่สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ โครงสร้างขนาดเล็กภายในของเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความละเอียดและยึดเกาะเรียงตัวประสานกันหนาแน่นกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่ำ ขนาดอนุภาคของเนื้อสารจะรวมตัวกันได้ไม่ดี เนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ต่ำ ความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นนั้นทำได้น้อยกว่าการใช้ที่ความเข้มข้นสูง (Rattanasak และ Chindaprasirt, 2009) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงกลไกในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยขั้นแรกเป็นการชะละลายวัสดุที่มีสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตไปเป็นสารสังเคราะห์อัลคาไลน์อลูมิโนซิลิเกต จึงจำเป็นต้องใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูงในการชะละลายที่ผิวของอนุภาควัสดุตั้งต้น ซึ่งจะทำให้อลูมิเนียมและซิลิเกตถูกปลดปล่อยเป็นอิสระและอยู่ในรูปของสารโมโนเมอร์ร่วมอยู่ในสารละลาย ทำให้ส่วนผสมมีสารซิลิเกต สารอลูมิเนียมและสารอลูมิโนซิลิเกต เกิดขึ้นรวมกันอยู่ในสารละลายเรียกว่าสภาวะสมดุล จากนั้นจะเกิดเป็นสารละลายอลูมิโนซิลิเกตอิมิตัวสูงอยู่ในรูปของเจล (Gelation) มีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ขึ้น (Reorganization) และแข็งตัวเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ (Duxson และคณะ, 2007)

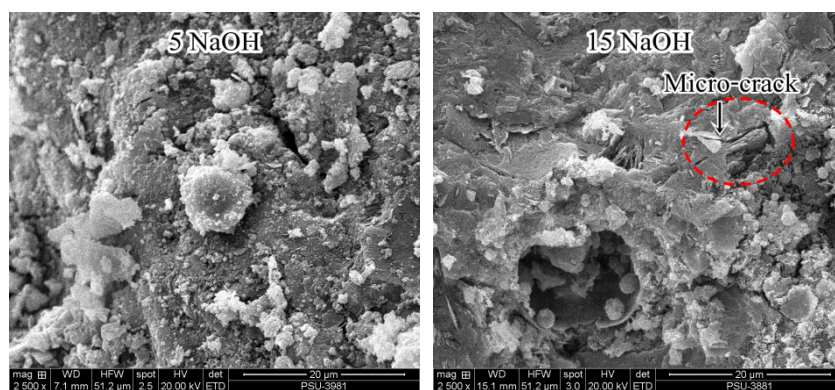
ทั้งนี้ ลักษณะโครงสร้างขนาดเล็กของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 3 สูตรผสมมีความสอดคล้องกัน เมื่อทำการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น โครงสร้างจะประสานกันได้ดี แต่อาจเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้นบ้าง ดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18



រូបភាព 4.16 SEM images of the (100MK geopolymer) at 5 and 15 NaOH



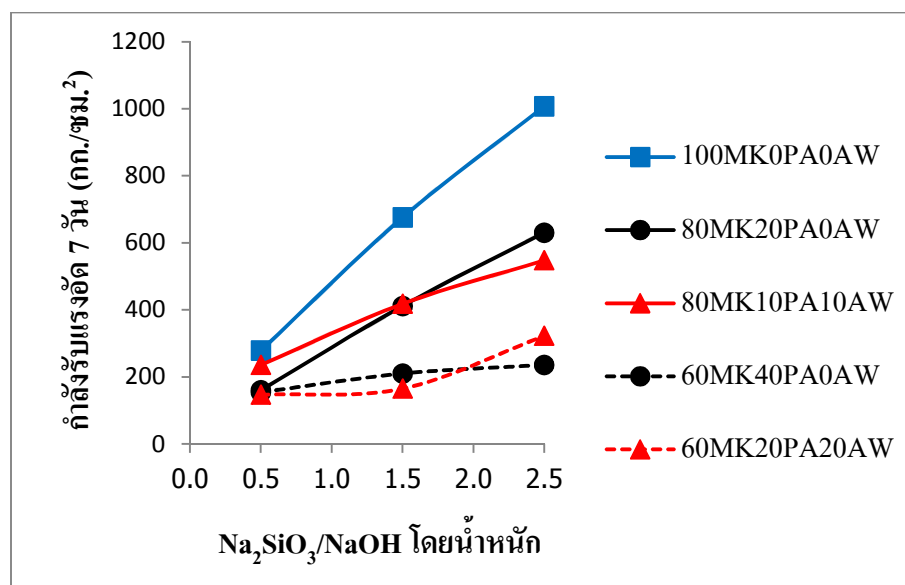
រូបភាព 4.17 SEM images of the (80MK:20PA geopolymer) at 5 and 15 NaOH



រូបភាព 4.18 SEM images of the (80MK:10PA:10AW geopolymer) at 5 and 15 NaOH

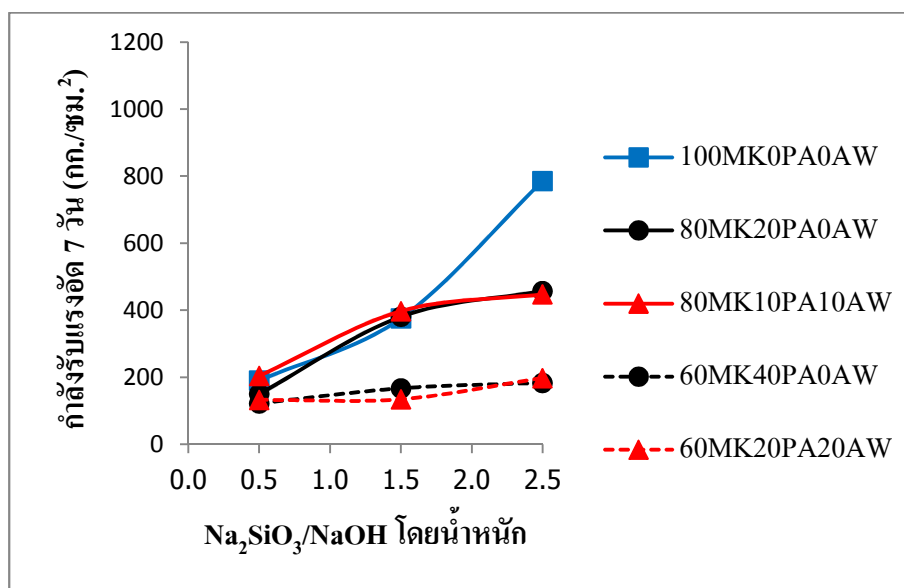
4.3.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$)

การทดลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันเริ่มตั้งแต่ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5, 10 และ 15 โมลาร์ จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 สังเกตได้ว่าการใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยการใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่อัตราส่วน 2.5 โดยน้ำหนักสามารถช่วยให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่ากำลังรับแรงอัดดีกว่าที่อัตราส่วนอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Hardjito และคณะ, 2003) ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 เหมาะสมต่อการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ และการศึกษาของ (เชียรศักดิ์ กลัปประสิทธิ์, 2549) ได้ทดลองโดยใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 โดยน้ำหนัก จากอัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 ทำให้มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ หากใช้ในอัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่สูงเกินไปจะทำให้ยากต่อการขึ้นรูปเนื่องจากส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้น

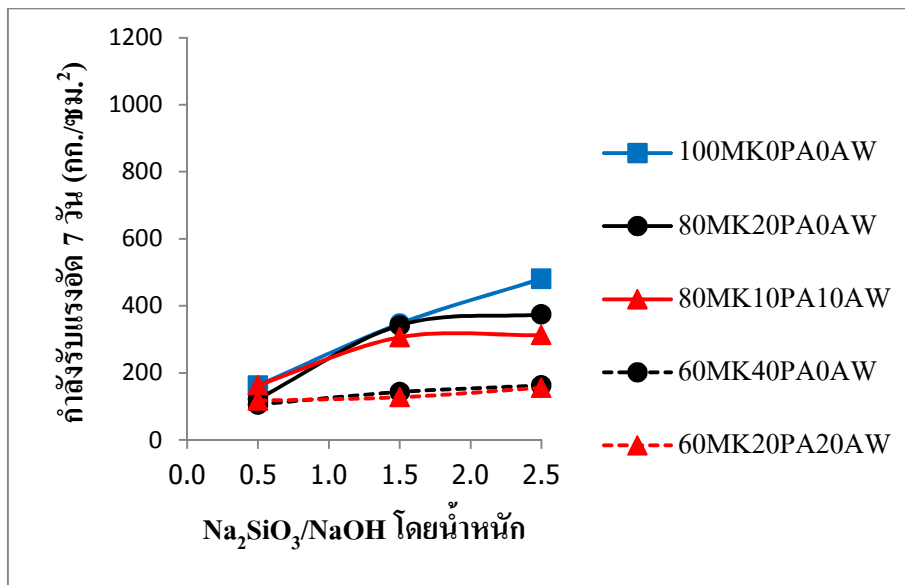


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (15 M NaOH) กับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาการใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เพื่อสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ประกอบด้วยความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้เป็นสารละลายต่างผสมร่วมกับสารละลาย Na_2SiO_3 และวัสดุปอซโซลานที่ใช้เป็นสารตั้งต้น โดยจากรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 15 และ 10 โมลาร์ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ แสดงดังในรูปที่ 4.21 พบว่ากำลังรับแรงอัดที่ได้เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่ต่ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อยู่ที่อัตราส่วน 0.5 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 โมลาร์ ไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ในงานที่ต้องการกำลังรับแรงอัดที่สูง



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (10 M NaOH) กับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

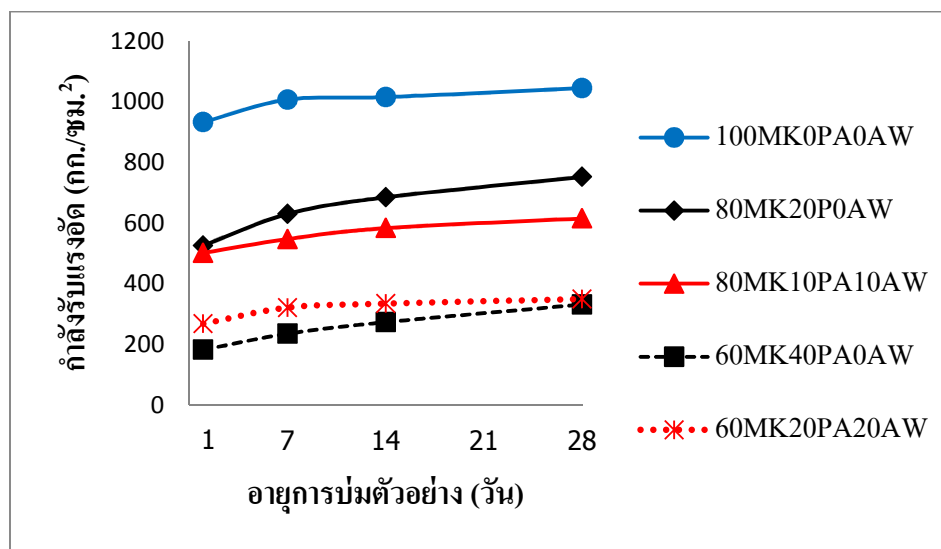


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (5 M NaOH) กับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน

4.3.5 ผลของการพัฒนากำลังรับแรงอัดเมื่ออายุตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้น

การทดลองนี้ได้ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้นหลังจากทำการบ่มร้อนด้วยอุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเก็บรักษาตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่ออายุตัวอย่างครบ 1, 7, 14 และ 28 วัน โดยผลของการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แสดงดังรูปที่ 4.22 สังเกตได้ว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมมีการพัฒนาได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงแรก เนื่องจากซิลิกาและอลูมินาในวัสดุตั้งต้นถูกชะละลายโดยสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง และใช้ความร้อนช่วยในการกระตุ้นจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าสูง โดยเฉพาะจีโอโพลิเมอร์สูตรที่มีเถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมร่วมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 28 ซึ่งจากการศึกษาของ (คนุพล ตันโยภาส และคณะ, 2551) พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มเกิดขึ้นต้องใช้เวลานานพอสมควร จึงทำให้กำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะบ่มตัวอย่างนานขึ้น ในส่วนจีโอโพลิเมอร์สูตรควบคุมซึ่งใช้ดินขาวเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวมีกำลังรับแรงอัดสูงตั้งแต่อายุการบ่ม 1 วัน และเมื่ออายุบ่มของตัวอย่างเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดไม่มากนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (เจริญชัย ฤทธิรุท และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2550; อาบีเต็ง ฮาวา และคณะ, 2556) ซึ่งทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากการใช้ดินขาวเฝ้าเป็นสารตั้ง

ค้นพบว่าเมื่อใช้ความร้อนเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวจีโอโพลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์หลังจากทำการบ่มร้อนในช่วง 6-24 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างออกจากตู้อบ ความร้อนที่อุณหภูมิห้องมีผลต่อการทำปฏิกิริยาไม่มากนัก ทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



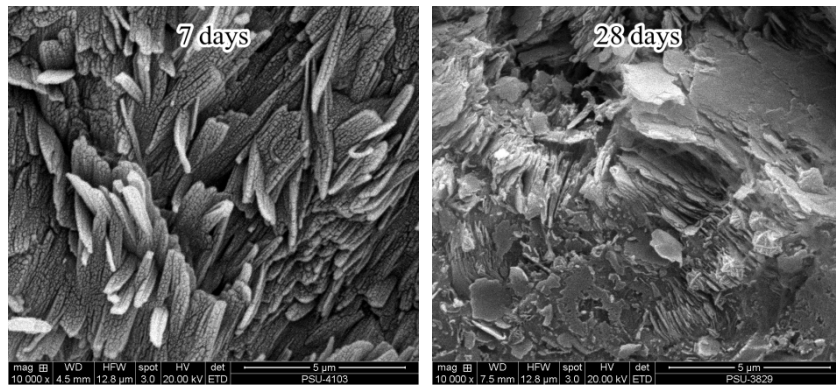
รูปที่ 4.22 การพัฒนากำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่ออายุบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น
ใช้อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้น $\text{NaOH} (\text{aq})$ 15 โมลาร์

ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้น

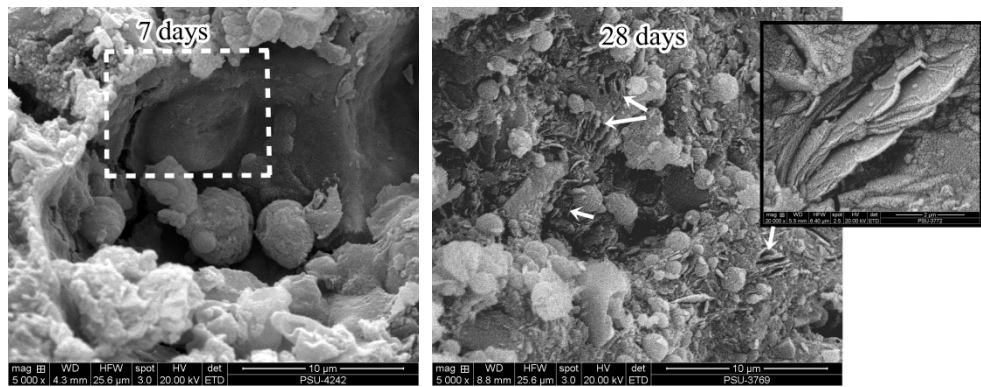
สัญลักษณ์	ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (ก.ก./ซม.²)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
100MK0PA0AW-15M(2.5)	933	1,007	1,016	1,045
80MK20PA0AW-15M(2.5)	526	630	685	752
60MK40PA0AW-15M(2.5)	183	236	274	332
80MK10PA10AW-15M(2.5)	502	548	584	616
60MK20PA20AW-15M(2.5)	268	322	335	350

สัญลักษณ์	ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (กก./ซม. ²)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
100MK0PA0AW-10M(2.5)	688	785	803	858
80MK20PA0AW-10M(2.5)	372	457	484	573
60MK40PA0AW-10M(2.5)	135	184	216	228
80MK10PA10AW-10M(2.5)	360	447	479	524
60MK20PA20AW-10M(2.5)	150	198	228	255
100MK0PA0AW-5M(2.5)	397	481	508	536
80MK20PA0AW-5M(2.5)	307	375	392	441
60MK40PA0AW-5M(2.5)	105	163	171	195
80MK10PA10AW-5M(2.5)	242	313	338	364
60MK20PA20AW-5M(2.5)	98	156	168	183

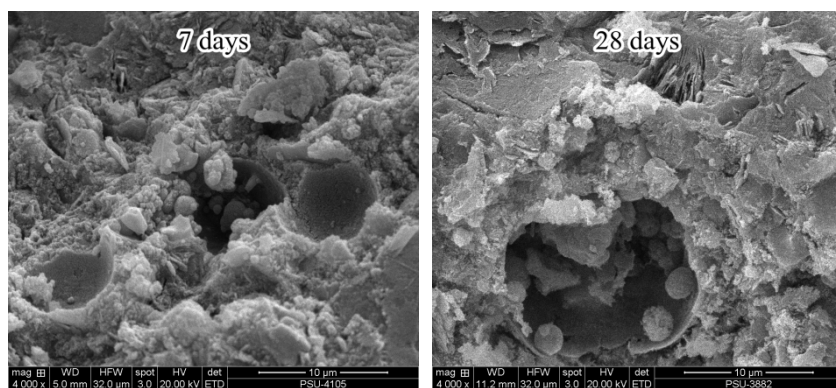
นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 ซึ่งพบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผามีโครงสร้างเป็นแผ่นกระจายตัวอย่างหนาแน่น และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นชั้นหนาแน่นมากขึ้นที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังรูปที่ 4.23 ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมร่วมกับดินขาวเผาที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่าเถ้าปาล์มบางส่วนถูกชะละลายด้วยด่างมีการรวมตัวกันของดินขาวเผาและเถ้าปาล์มเป็นเนื้อจีโอโพลิเมอร์ เถ้าปาล์มบางส่วนไม่สามารถชะละลายได้หมด ทำให้เกิดการแทรกตัวเป็นก้อนกลมตามส่วนต่างๆ ของเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และที่อายุการบ่ม 28 วัน โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการเรียงตัวกันเป็นชั้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งคล้ายกับชั้นของจีโอโพลิเมอร์สูตรที่สังเคราะห์ด้วยดินขาวเผาแต่มีขนาดเล็กกว่า ในส่วนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากอลูมินาทดแทนในดินขาวเผา ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วันจะมีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงกัน แต่ที่อายุการบ่มที่ 28 นั้นจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างมากขึ้น ดังรูปที่ 4.25 จากการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาถึงกำลังรับแรงอัดแต่ละสูตรผสมมีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น แสดงว่าอนุภาคภายในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ยังมีการทำปฏิกิริยาและพัฒนาโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ เมื่อทำการศึกษาความเป็นผลึก พบว่าเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้นความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1



រូប​ភ័​ 4.23 SEM images of the (100MK geopolymer) at 7 and 28 days



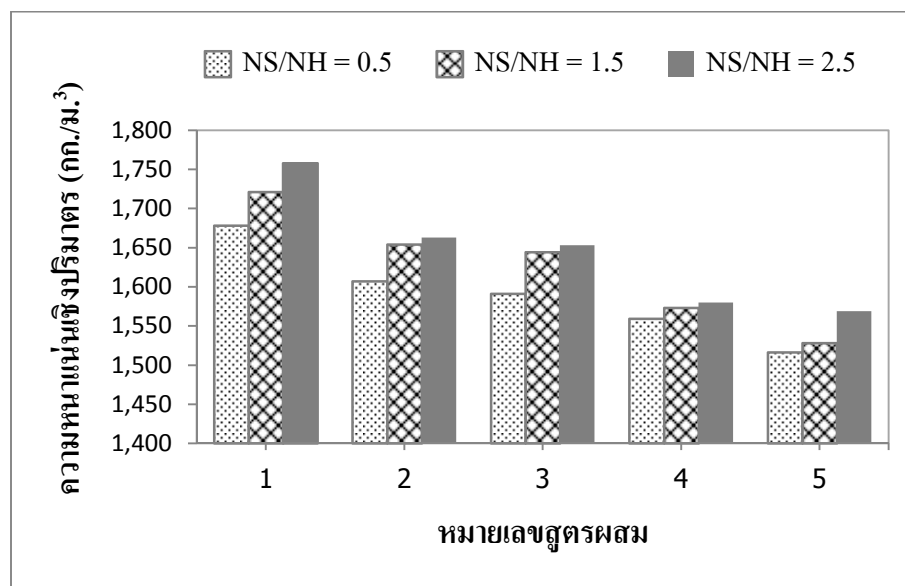
រូប​ភ័​ 4.24 SEM images of the (80MK:20PA geopolymer) at 7 and 28 days



រូប​ភ័​ 4.25 SEM images of the (80MK:10PA:10AW geopolymer) at 7 and 28 days

4.3.6 การศึกษาความหนาแน่นเชิงปริมาตรและการหดตัวแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จากการทดลองศึกษาความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์สูตรผสมที่ใช้ดินขาวเผาเพียงอย่างเดียวมีค่าความหนาแน่นสูงสุด และความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการใช้เถ้าปลาล์มและกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผาในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากสารละลาย Na_2SiO_3 เป็นสารที่มีของแข็งเป็นส่วนผสมรวมอยู่ด้วย ได้แก่ โซเดียม 25% และซิลิกา 33% จึงทำให้สารละลาย Na_2SiO_3 มีความหนืด เมื่อใส่ในอัตราที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีอัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตรสูงขึ้นค่าความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น

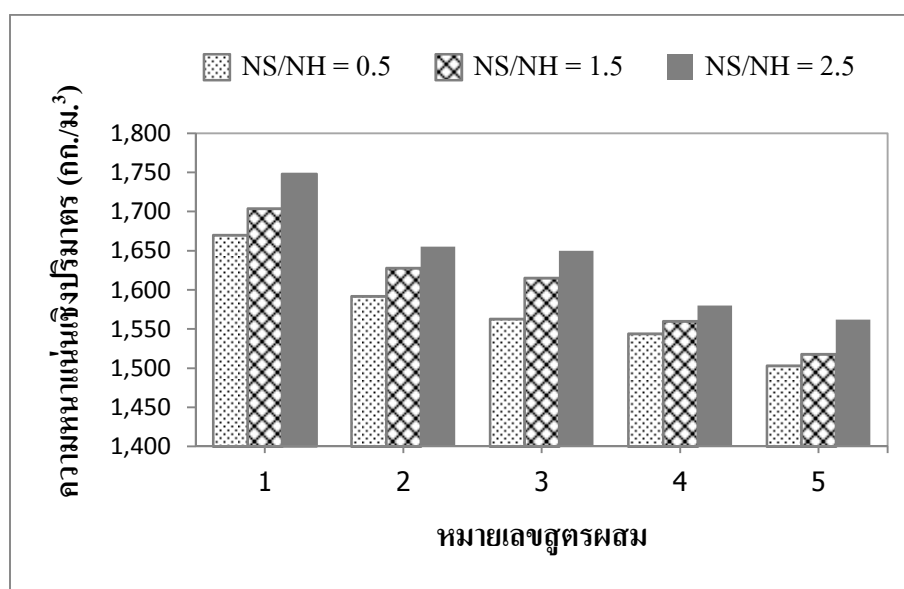


*รูปที่ 4.26 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (15 M NaOH)

*หมายเลขสูตรผสม (1) 100MK0PA0AW (2) 80MK20PA0AW (3) 80MK10PA10AW
(4) 60MK40PA0AW และ (5) 60MK20PA20AW

โดยในรูปที่ 4.26 ได้แสดงค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมที่สังเคราะห์ขึ้นจากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ซึ่งสูตรผสมที่ใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดที่การใช้อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1,678 1,721 และ 1,758 กก./ม.³ ตามลำดับ รองลงมาคือ จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าปลาล์มแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความหนาแน่นที่การใช้อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.5

และ 2.5 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1,607 1,654 และ 1,663 กก./ม.³ ตามลำดับ และจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าปาล์มผสมรวมกันกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความหนาแน่นที่ใช้อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1,591 1,644 และ 1,653 กก./ม.³ ตามลำดับ ในส่วนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้เถ้าปาล์มและกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 40 นั้น ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงมา เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มและกากอลูมินาทำให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความพรุนตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าน้ำหนักต่อปริมาตรลดลงความหนาแน่นจึงลดลงตามมา โดยค่าความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในการทดลองที่สังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 15 โมลาร์ มีค่าอยู่ในช่วง 1,516-1,758 กก./ม.³

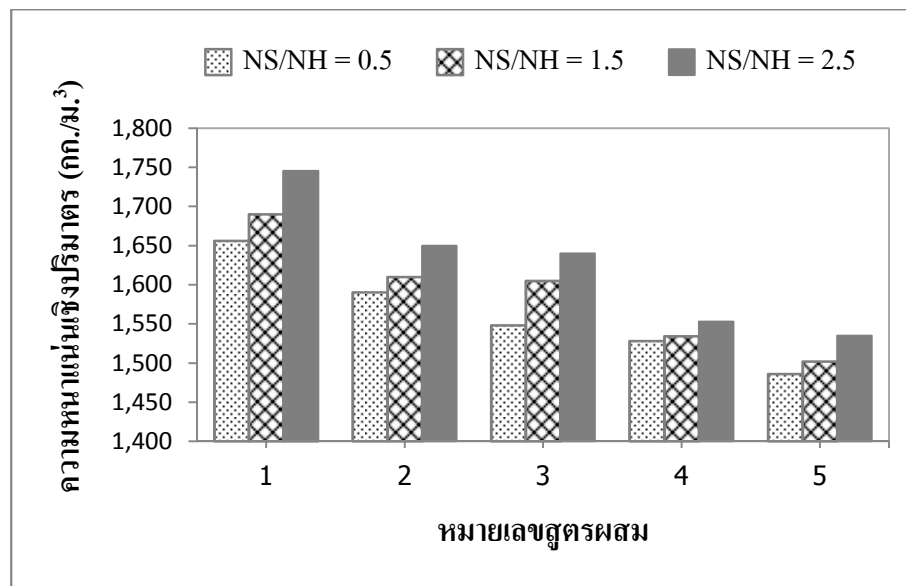


*รูปที่ 4.27 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (10 M NaOH)

*หมายเลขสูตรผสม (1) 100MK0PA0AW (2) 80MK20PA0AW (3) 80MK10PA10AW
(4) 60MK40PA0AW และ (5) 60MK20PA20AW

ทั้งนี้ ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าลดต่ำลงเมื่อทำการทดลองปรับความเข้มข้นของการใช้สารละลาย NaOH ลงมาที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และ 5 โมลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ โดยค่าความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 10 โมลาร์ มีค่าอยู่ในช่วง 1,503-1,748 กก./ม.³ และจากการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 โมลาร์ มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,468-1,745 กก./

ม.³ สังเกตได้ว่าค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อทำการลดความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูงสามารถชะละลายซิลิกาและอลูมินาในวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้น เกิดการยึดเกาะของโครงสร้างที่แข็งแรงส่งผลให้มีความรับแรงอัดสูงขึ้น และทำให้ค่าความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าสูงขึ้นด้วย



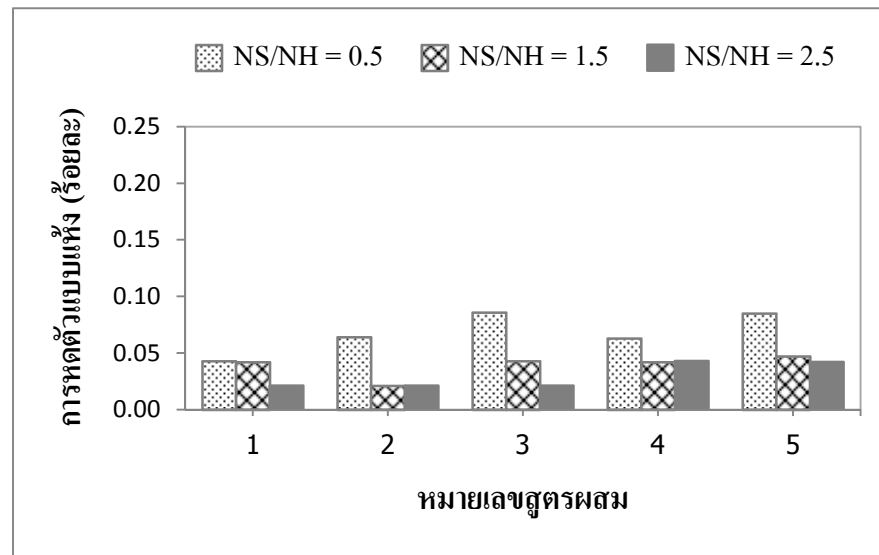
*รูปที่ 4.28 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (5 M NaOH)

*หมายเลขสูตรผสม (1) 100MK0PA0AW (2) 80MK20PA0AW (3) 80MK10PA10AW
(4) 60MK40PA0AW และ (5) 60MK20PA20AW

ในส่วนของการหาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ในการทดลองพบว่า ค่าการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น มีค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.02-0.19 โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการหดตัวประกอบไปด้วย อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้เป็นสารละลายต่างในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ รวมถึงวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง โดยผลการหดตัวแบบแห้งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 ซึ่งเป็นผลการทดลองจากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15, 10 และ 5 โมลาร์ ตามลำดับ

โดยจากรูปที่ 4.29 เป็นผลการทดลองจากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ผสมร่วมกับสารละลาย Na_2SiO_3 ที่อัตราส่วน 0.5, 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

โดยค่าการหดตัวมีค่าดังต่อไปนี้ จีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0PA0AW ซึ่งใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นอย่างเดียวมีค่าการหดตัวแบบแห้งในช่วงร้อยละ 0.02-0.04 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW

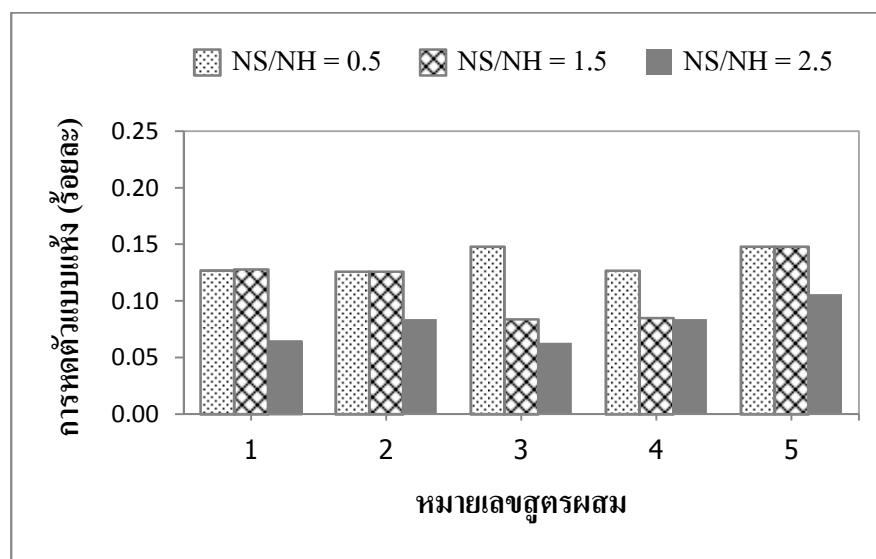


*รูปที่ 4.29 ค่าการหดตัวแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (15 M NaOH)

*หมายเลขสูตรผสม (1) 100MK0PA0AW (2) 80MK20PA0AW (3) 80MK10PA10AW
(4) 60MK40PA0AW และ (5) 60MK20PA20AW

เป็นสูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 มีค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.02-0.06 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW เป็นสูตรผสมใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 ค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.02-0.09 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK40PA0AW เป็นสูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 40 มีค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.04-0.06 และจีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK20PA20AW มีค่าการหดตัวอยู่ในช่วง 0.04-0.09 ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.29 สังเกตได้ว่าค่าการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมมีแนวโน้มการหดตัวสอดคล้องกัน โดยขึ้นกับการใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ซึ่งที่อัตราส่วน 2.5 โดยน้ำหนัก จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าการหดตัวต่ำสุด และการหดตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่อัตราส่วน 1.5 และ 0.5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้นทำให้จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบของซิลิกาเพิ่มขึ้นด้วย เพราะในสารละลาย Na_2SiO_3 มีองค์ประกอบของซิลิกา รวมอยู่ด้วย ส่งผลให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความแข็งแรงขึ้นทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง

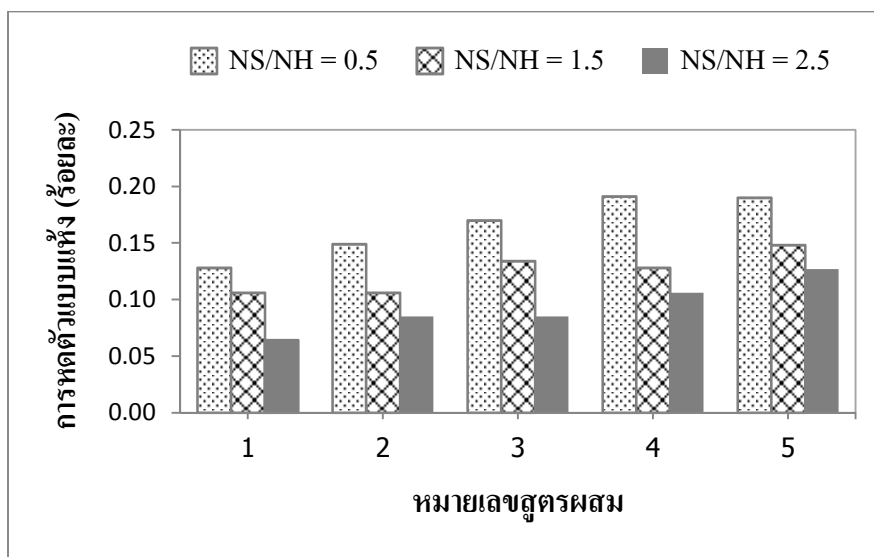
นอกจากนี้ จีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้มีการหดตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ใช้เป็นสารละลายต่างในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 ซึ่งเป็นผลการหดตัวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 และ 5 โมลาร์ โดยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์นั้นมีค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.06-0.15 ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ มีค่าการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.06-0.19 ซึ่งสังเกตได้ว่าความเข้มข้นของการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ มีผลโดยตรงต่อการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ รวมถึงการใช้เถ้าปาล์มและกากของเสี้ยวลูมิน่าแทนที่ในดินขาวเผาในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีอัตราการหดตัวเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาการหดตัวแบบแห้งจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง โดยใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 5 ถึง 15 โมลาร์นั้น มีค่าการหดตัวที่ไม่สูงมากนัก



*รูปที่ 4.30 ค่าการหดตัวแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (10 M NaOH)

*หมายเลขสูตรผสม (1) 100MK0PA0AW (2)80MK20PA0AW (3) 80MK10PA10AW

(4) 60MK40PA0AW และ (5) 60MK20PA20AW

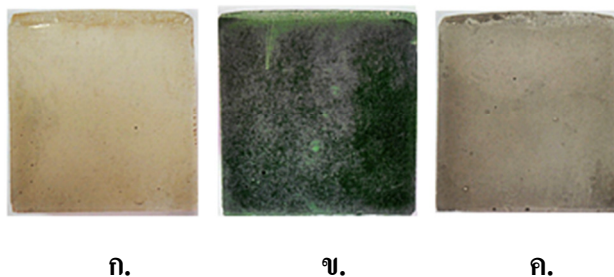


*รูปที่ 4.31 ค่าการดูดน้ำแบบแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (5 M NaOH)

*หมายเลขสูตรผสม (1) 100MK0PA0AW (2)80MK20PA0AW (3) 80MK10PA10AW
(4) 60MK40PA0AW และ (5) 60MK20PA20AW

4.3.7 ลักษณะสีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์ขึ้นในการทดลองมีลักษณะสีแตกต่างกันออกไป โดยการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากการใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวมีลักษณะเป็นสีขาวอมเหลือง สูตรเก่าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผามีลักษณะเป็นสีดำ และสูตรผสมเก่าปาล์มร่วมกับกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผามีลักษณะเป็นสีม่วงอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ซึ่งสีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความเกี่ยวเนื่องกับลักษณะสีของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์



รูปที่ 4.32 แสดงตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ก. 100MK0PA0AW-15M(2.5)

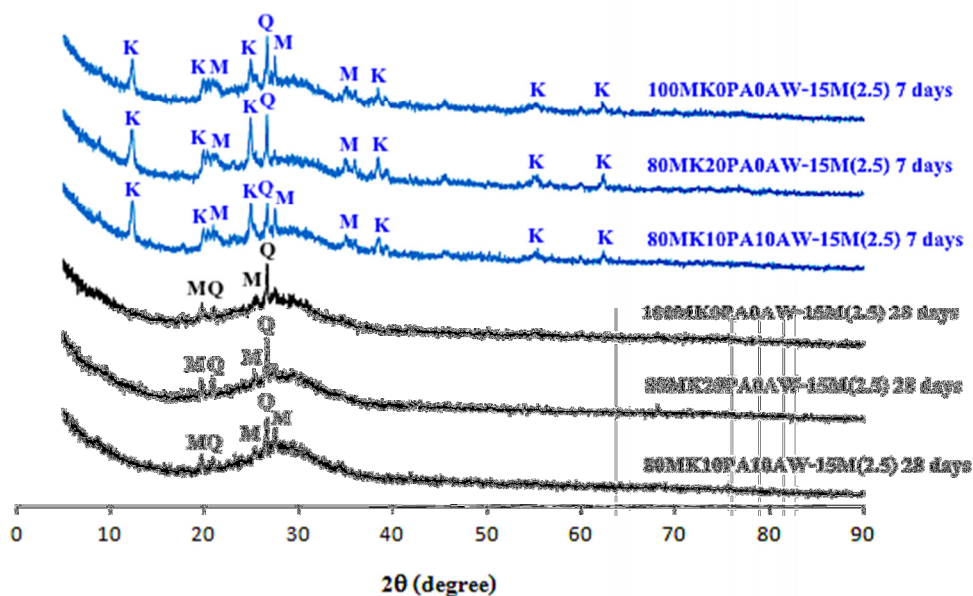
ข.80MK20PA0AW-15M(2.5) และ ค. 80MK10PA10AW-15M(2.5)

4.4 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กภายในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากการใช้ดินขาวเผา ถ้ำป่าลัม และกากอลูมินาเป็นวัสดุตั้งต้น การวิเคราะห์แต่ละส่วนประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) และวิธี Wide-Angle X-ray Scattering (WAXS) การทดสอบหาปริมาณโลหะหนักจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อตรวจสอบปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำจีโอโพลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งานจริง เป็นข้อมูลในการประเมินและป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนักที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ ในส่วนของการศึกษาจากภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสม โดยผล SEM ได้ทำการแสดงไว้ร่วมกับผลการศึกษาคูสมบัติของการรับกำลังแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังในหัวข้อที่ 4.3

4.4.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยวิธี X-Ray Diffraction

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยใช้วิธี XRD เพื่อต้องการศึกษาความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสม และการเปลี่ยนแปลงของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) จีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรผสมต่างๆ ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน โดยที่ K= Kaolinite, Q = Quartz (SiO_2) และ Mi = Microcline (KAlSi_3O_8)

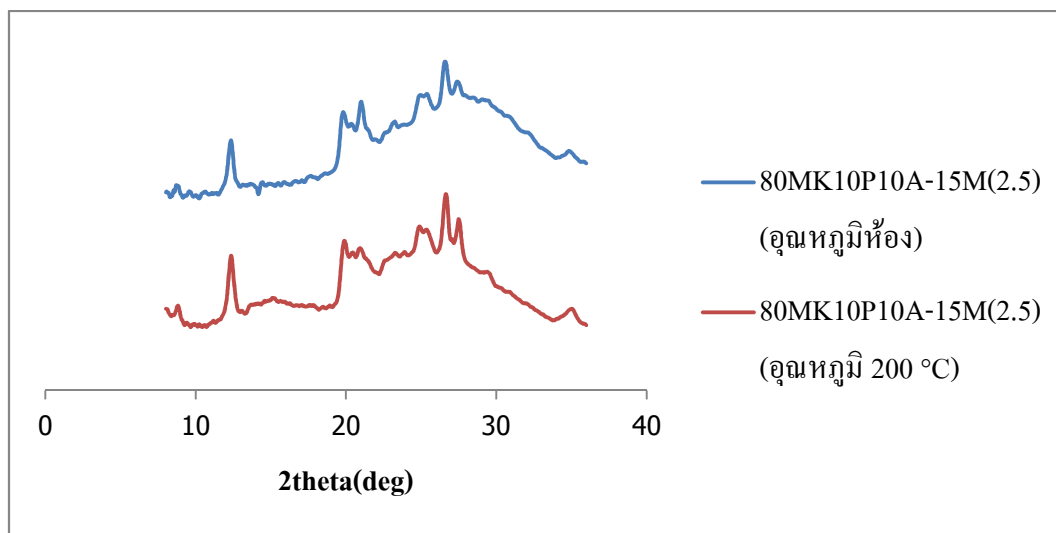
ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมที่อายุการบ่ม 28 วัน มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยจากรูปที่ 4.33 สังเกตได้ว่าที่อายุการบ่ม 7 วัน จีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 3 สูตรผสม พบความเป็นผลึกของ Kaolinite เป็นหลัก ส่วนที่อายุการบ่มที่ 28 วัน ความเป็นผลึกจีโอโพลิเมอร์เพสต์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยความเป็นผลึกของ Kaolinite ได้หายไปเกิดเป็นผลึกของ Microcline ซึ่งมีสูตรเคมีคือ KAlSi_3O_8 และ Quartz มีสูตรเคมีคือ SiO_2 เป็นหลัก โดยเป็นผลมาจากการใช้สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 มีการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้น และมียอด (Peak) ฐานกว้างที่ตำแหน่งประมาณ $18-35^\circ$ ซึ่งแสดงลักษณะความเป็นอสัณฐานของจีโอโพลิเมอร์

4.4.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยวิธี Wide-Angle X-ray Scattering (WAXS)

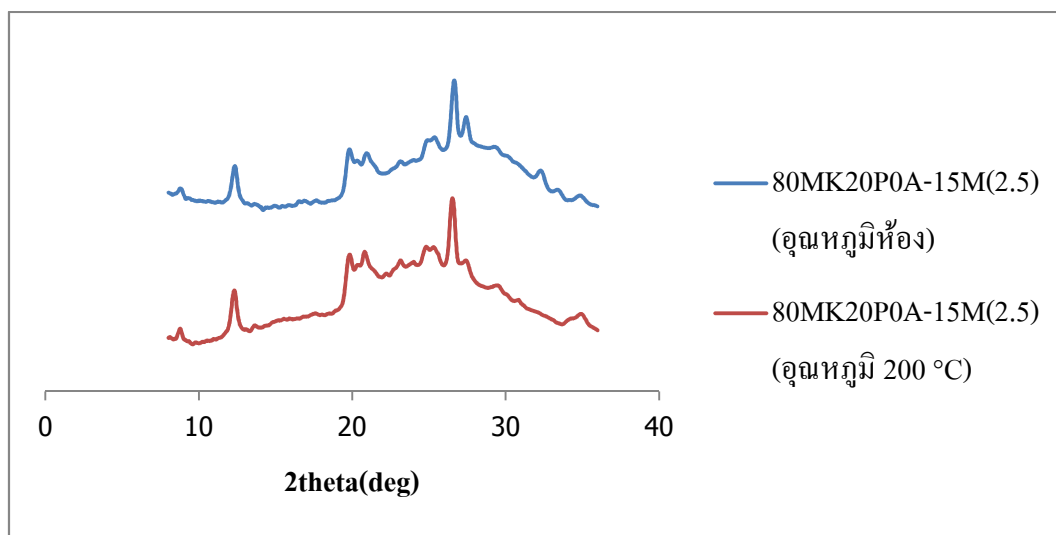
ในการทดลองนี้ได้ใช้เทคนิค WAXS เพื่อศึกษาผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งประกอบไปด้วย (1) การเปรียบเทียบความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200°C (2) การศึกษาความเป็นผลึกของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ระหว่างส่วนผิวและส่วนเนื้อภายใน และ (3) การศึกษาความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

(1) การเปรียบเทียบความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200°C โดยในการศึกษานี้จำเป็นต้องอาศัยเทคนิค WAXS เนื่องจากสามารถทำการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวอย่างที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้ โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนตัวอย่างใหม่ ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของผลึกที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างชนิดเดียวกัน ซึ่งขั้นตอนแรกจะทำการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องก่อน แล้วสั่งให้เครื่องทำการเพิ่มความร้อนให้กับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยเพิ่มสูงสุดได้ถึง 200°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นโดยเปรียบเทียบกับความเป็นผลึกของตัวอย่างเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

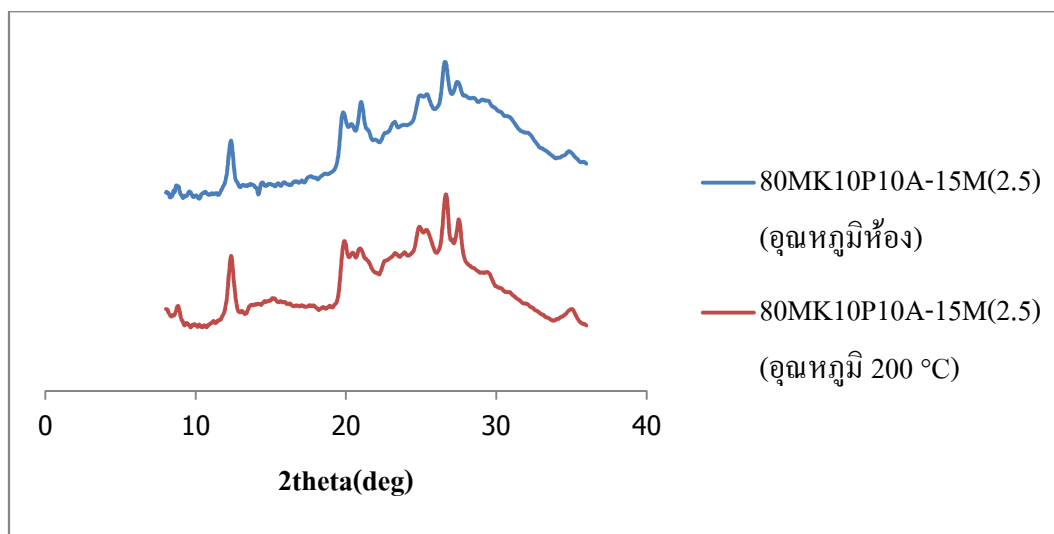
เมื่อทำการเผาตัวอย่างด้วยความร้อน 200°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.34, 4.35 และ 4.36



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดียวก
ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200°C



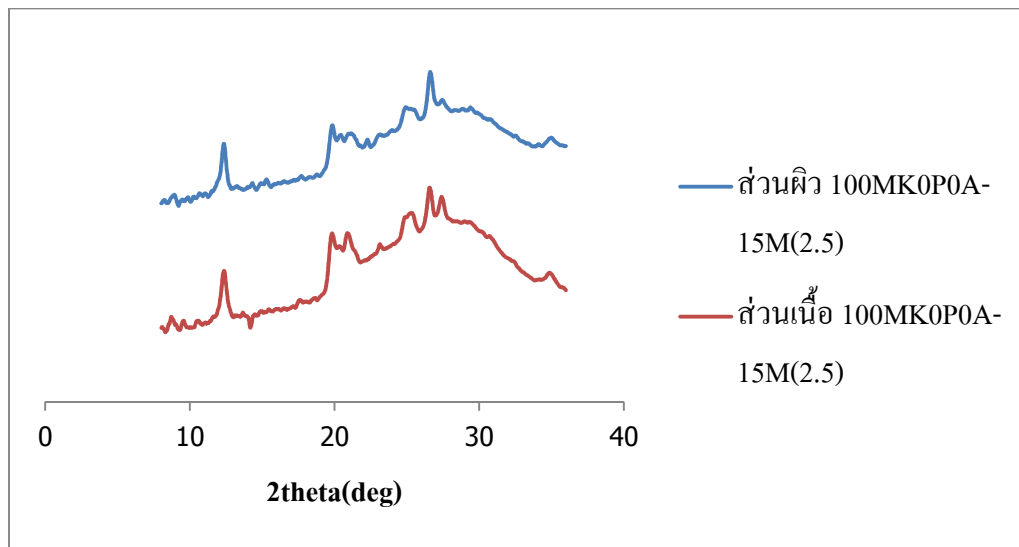
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา: ถ้าปาล์ม
ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200°C



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบความเป็นผลึกของจีโอ โพลีเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา:ถ้ำป่าลัม:กากอลูมิน่า ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 200°C

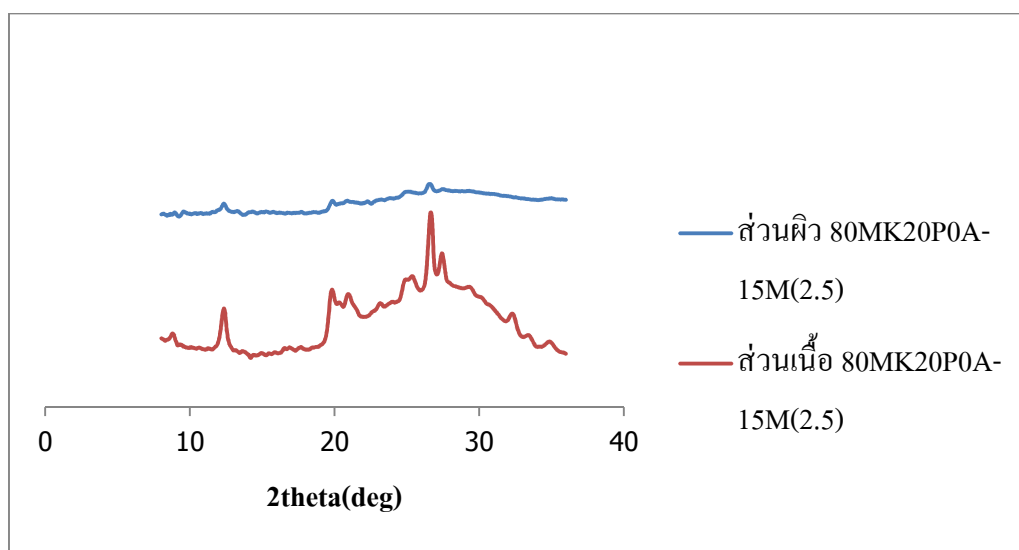
จากการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์เพสต์พบว่า โครงสร้างผลึกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อโดนความร้อนที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จึงคาดว่าไม่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด

(2) การศึกษาความเป็นผลึกของตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์เพสต์ระหว่างส่วนผิวและส่วนเนื้อภายในเพื่อเปรียบเทียบความเป็นผลึกที่เกิดขึ้น เนื่องจากลักษณะทางกายภาพจากการสัมผัสตัวอย่างเพสต์หลังเกิดการวิบัติจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยโครงสร้างเพสต์ภายในมีอนุภาคผิวที่ขรุขระ ส่วนผิวภายนอกนั้นมีลักษณะเรียบและลื่นคล้ายหินอ่อน ซึ่งผลการศึกษาความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค WAXS ทั้งส่วนผิวและส่วนเนื้อของตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์เพสต์ได้แสดงดังในรูปที่ 4.37, 4.38 และ 4.39

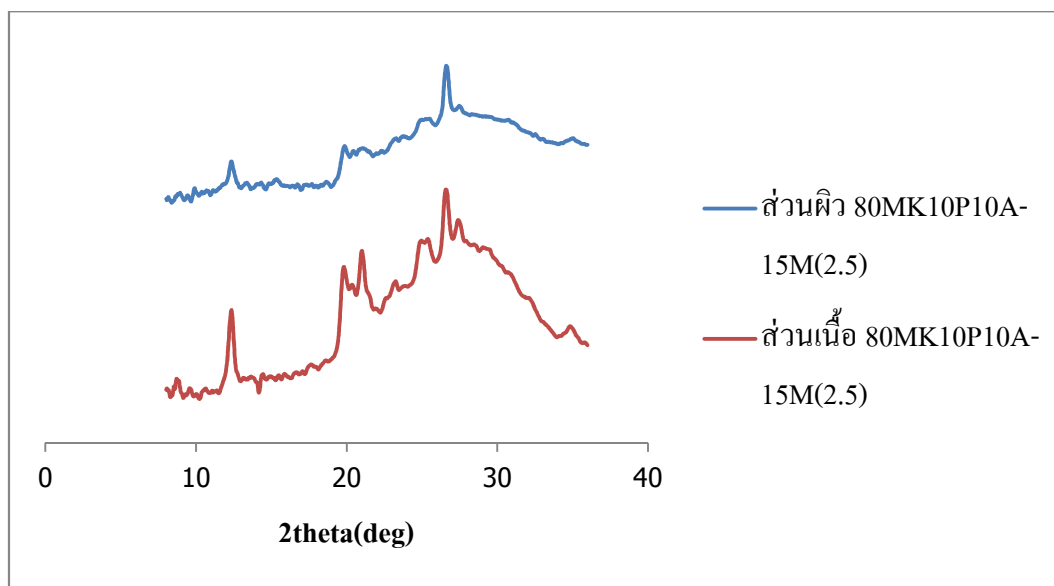


รูปที่ 4.37 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรคินขาวเผาอย่างเดี่ยว

จากรูปที่ 4.37 สังเกตได้ว่าความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์จากการใช้คินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว มีความเป็นผลึกระหว่างส่วนผิวและส่วนเนื้อไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดซึ่งสามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์สูตรผสมอื่น ทั้งนี้ การใช้คินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวส่งผลให้ส่วนผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างทั่วถึงและมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันกว่าจีโอโพลิเมอร์สูตรผสมอื่น



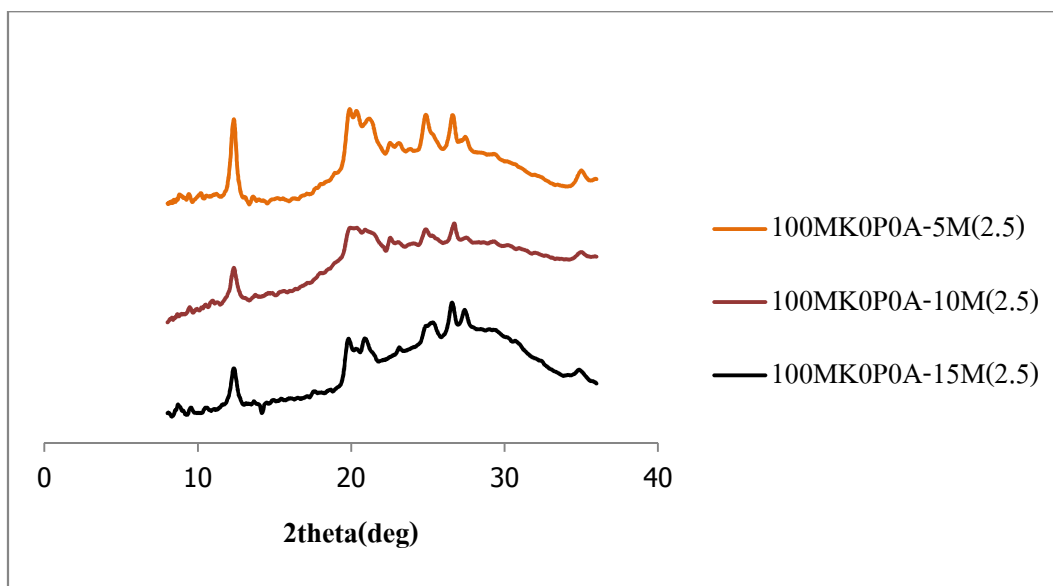
รูปที่ 4.38 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรคินขาวเผา:เข้าป่าลัม



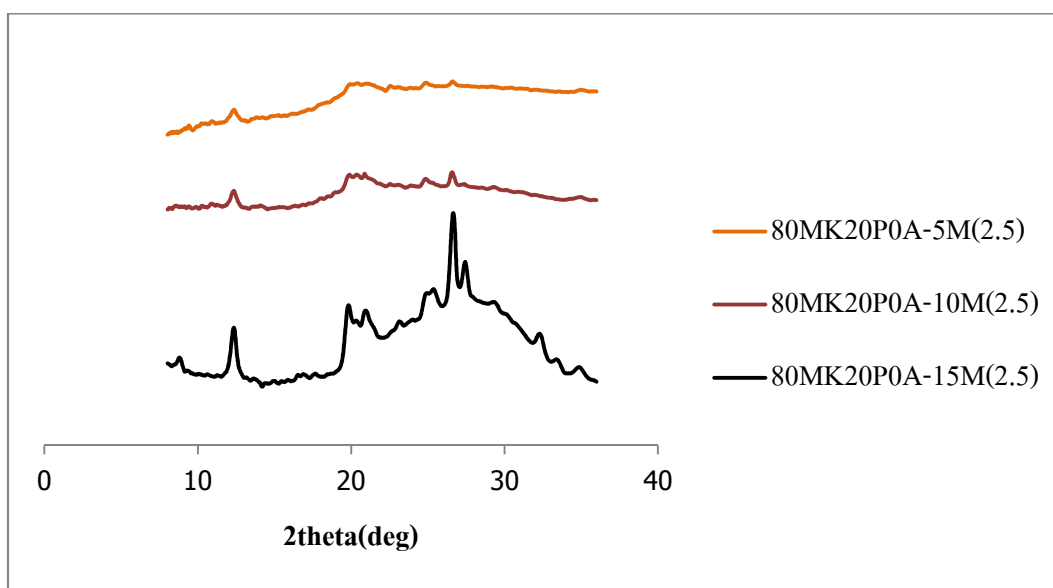
รูปที่ 4.39 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผา: เถ้าปาล์ม: กากอลูมิน่า

ในส่วนของจีโอโพลิเมอร์สูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผา และใช้เถ้าปาล์มผสมร่วมกับกากอลูมิน่าแทนที่ในดินขาวเผา ได้แสดงผลการทดลองดังในรูปที่ 4.38 และ 4.39 สังเกตได้ว่า จีโอโพลิเมอร์ทั้ง 2 สูตรผสม ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่แตกต่างกันระหว่างส่วนผิวและส่วนเนื้อเพสต์ภายใน โดยที่ส่วนผิวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มียอด (Peak) ไม่สูงมากนัก ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงกำลังรับแรงอัด จีโอโพลิเมอร์สูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผา และสูตรผสมที่ใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากอลูมิน่าแทนที่ในดินขาวเผา มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าสูตรผสมที่ใช้ดินขาวเพียงอย่างเดียวอยู่ค่อนข้างสูง

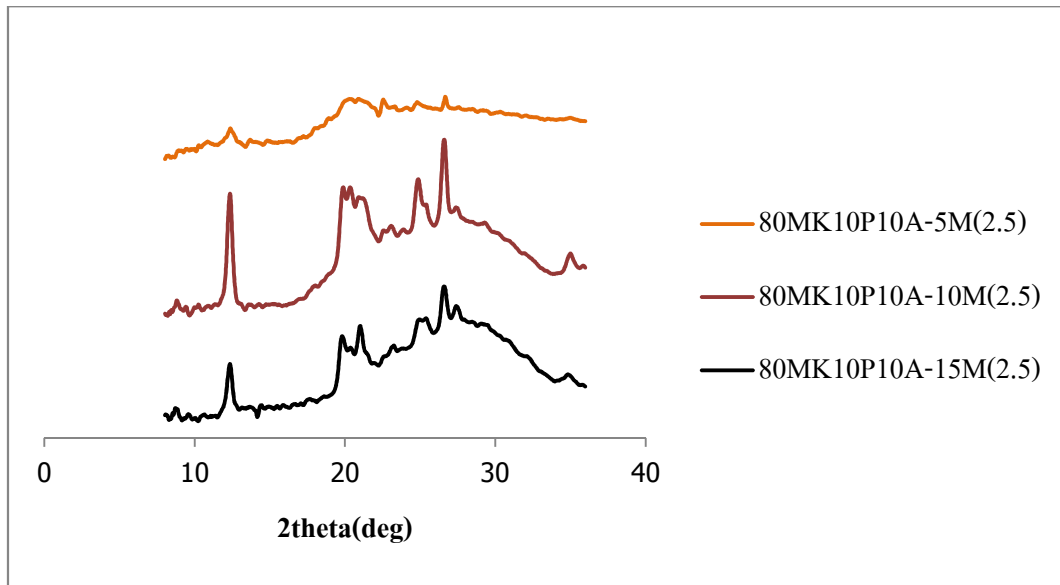
(3) การศึกษาผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสม ที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH แตกต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย (1) สูตรผสมที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว (2) สูตรผสมจากการใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 20 และ (3) สูตรผสมจากการใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากอลูมิน่าแทนที่ในดินขาวเผา ร้อยละ 20 โดยผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 4.40, 4.41 และ 4.42



รูปที่ 4.40 ความเป็นผลึกของจีโอโพลีเมอร์เพสต์สูตรดินขาวเผาอย่างเดี่ยว
ที่การใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์



รูปที่ 4.41 ความเป็นผลึกของจีโอโพลีเมอร์เพสต์สูตรดินขาว:ถ้ำป่าลัม
ที่การใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์



รูปที่ 4.42 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร ดินขาว:เถ้าป่าลัม:กาออลูมิน่า ที่การใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์

จากรูปที่ 4.40 สังเกตได้ว่าความเป็นผลึกของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวจากการใช้ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5, 10 และ 15 โมลาร์ มีความเป็นผลึกที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากดินขาวเผาที่ใช้ในการทดลองมีสภาพความเป็นออสติฐานและมีองค์ประกอบหลักของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) กับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) รวมกันภายในตัววัสดุเอง จึงเกิดการชะละลายองค์ประกอบภายในและก่อตัวเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงได้ง่ายเมื่อใช้สารละลายต่างผสมรวมเพื่อสังเคราะห์เป็นจีโอโพลิเมอร์

ส่วนรูปที่ 4.41 ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้เถ้าป่าลัมเป็นส่วนผสมรวมในดินขาวเผามีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 โมลาร์ มีความเป็นผลึกค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ทั้งนี้ เนื่องมาจากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูงสามารถช่วยในการชะละลายสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตภายในดินขาวเผาและเถ้าป่าลัมได้สูงขึ้น เกิดการทำปฏิกิริยาและก่อตัวเป็นโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแรงกว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่ำ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงผลการศึกษากำลักรับแรงอัดในหัวข้อที่ 4.3.3 เกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย NaOH พบว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่สูงขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลักรับแรงอัดสูงขึ้นด้วย และจากการศึกษาภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.17 ในหัวข้อ 4.3.3 พบว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น จาก 5 โมลาร์ เป็น 15 โมลาร์ จีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรใช้เถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมร่วมในดินขาวเผา มีโครงสร้างที่จัดเรียงตัวกันแน่นขึ้น โดยมีผลไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาโดยใช้เทคนิค WAXS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์มีความเป็นผลึกสูงกว่าที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์

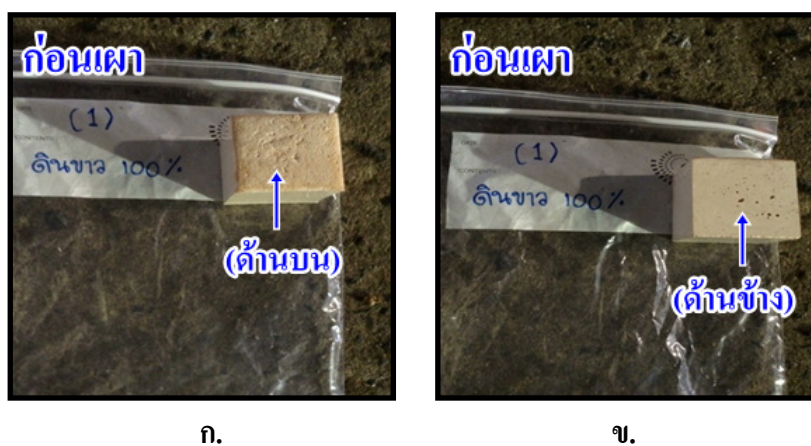
ในส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์จากการใช้เถ้าปาล์มผสมร่วมกับกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผา ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นจากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน มีลักษณะใกล้เคียงกับจีโอโพลิเมอร์สูตรผสมที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมร่วมในดินขาวเผา โดยผลจากการศึกษาโดยใช้เทคนิค WAXS แสดงในรูปที่ 4.42 ซึ่งสังเกตได้ว่าความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ มีความเป็นผลึกของโครงสร้างเพสต์ที่ต่ำ และโครงสร้างเพสต์มีความเป็นผลึกสูงขึ้น เมื่อทำการสังเคราะห์โดยใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ และเมื่อพิจารณาจากการศึกษาภาพถ่ายกำลังขยายสูงดังรูปที่ 4.18 ในหัวข้อ 4.3.3 พบว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์ สามารถช่วยให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์จากการใช้เถ้าปาล์มผสมกับกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผา มีโครงสร้างที่รวมตัวกันหนาแน่นกว่าการใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์

การเปลี่ยนแปลงของผลึกที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากการชะละลายองค์ประกอบภายในวัสดุตั้งต้นในขั้นตอนการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ โดยความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ใช้และขนาดอนุภาคของวัสดุตั้งต้นมีส่วนสำคัญ เนื่องจากสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต เมื่อถูกชะละลายออกมาจะเกิดการทำปฏิกิริยาและมีการจัดเรียงตัวเป็น โครงสร้างใหม่ แล้วมีการเชื่อมโยงโครงข่ายมากขึ้นจนรวมตัวกันเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ โดยจากการศึกษาของ Davidovits พบว่าจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะของโครงสร้างหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตที่มีอยู่ภายในวัสดุตั้งต้นที่ใช้ เมื่อทำการสังเคราะห์เป็นจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้มีการรวมตัวกันของอัตราส่วน

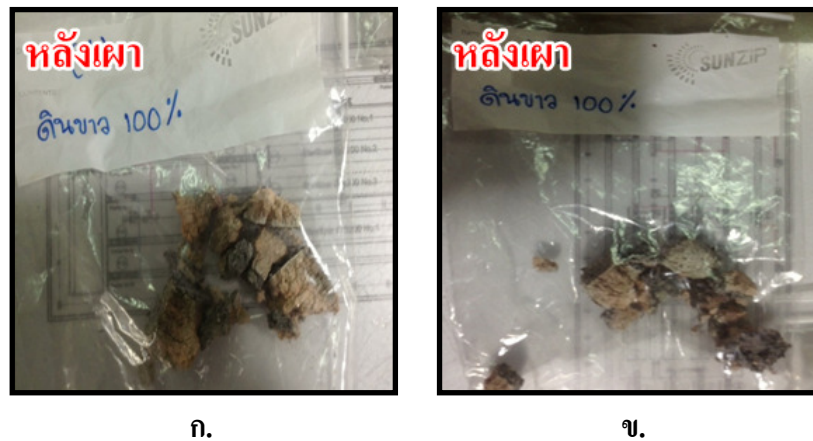
ระหว่างซิลิกาต่ออลูมินาแตกต่างกัน ทำให้จีโอโพลิเมอร์ที่ได้มีความแข็งแรงของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป

4.4.3 การทดสอบการทนความร้อนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C

การทดลองนี้ได้ทำการทดสอบการทนความร้อนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย (1) สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผา 100% (2) สูตรใช้เถ้าปาล์ม 20% แทนที่ดินขาวเผา (3) สูตรใช้เถ้าปาล์ม 40% แทนที่ดินขาวเผา (4) สูตรใช้เถ้าปาล์ม 10% ร่วมกับกากอลูมินา 10% แทนที่ในดินขาวเผา และ (5) สูตรใช้เถ้าปาล์ม 20% ร่วมกับกากอลูมินา 20% แทนที่ในดินขาวเผา โดยแต่ละสูตรผสมสังเคราะห์จากการใช้สภาวะสารละลายต่างๆที่ให้กำลังรับแรงอัดดีที่สุด คือที่อัตราส่วนสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH เท่ากับ 15 โมลาร์ ทั้งนี้ ได้ทดลองโดยทำการเผาตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน ด้วยอุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.43-4.52 ซึ่งเปรียบเทียบการทนความร้อนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมระหว่างก่อนและหลังทำการเผา

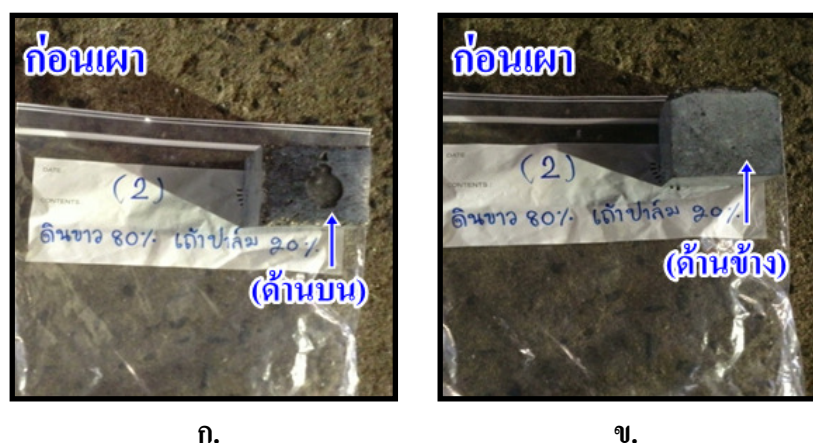


รูปที่ 4.43 จีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0PA0AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านล่าง

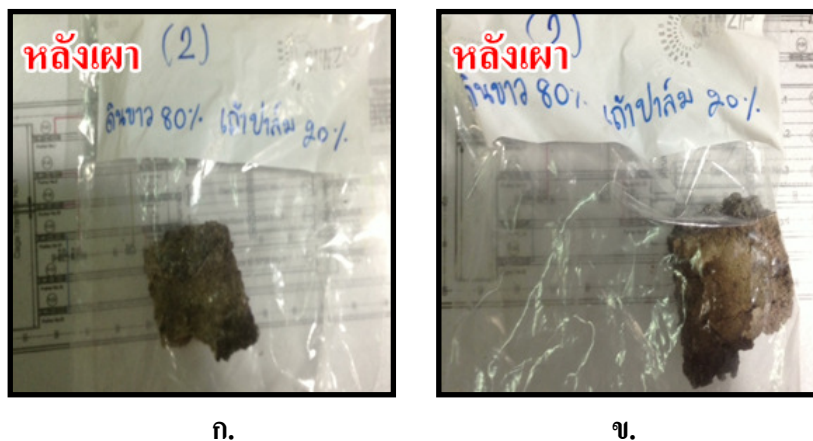


รูปที่ 4.44 จีไอโพลีเมอร์สูตร 100MK0PA0AW-15M(2.5) หลังทำการเผา

จากรูปที่ 4.43 และ 4.44 แสดงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังทำการเผาของ จีไอโพลีเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้น 100% สังเกตได้ว่าจีไอโพลีเมอร์สูตรผสมนี้ไม่สามารถทนความร้อนได้ในระดับสูง โดยหลังจากเผาด้วยความร้อน 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ตัวอย่างเพสต์แตกกระจายเป็นก้อนขนาดเล็ก และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรผสมอื่นจัดได้ว่าสูตรที่สังเคราะห์โดยใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้น 100% มีประสิทธิภาพในการทนความร้อนต่ำกว่าทุกสูตรผสมที่ทำการทดลอง

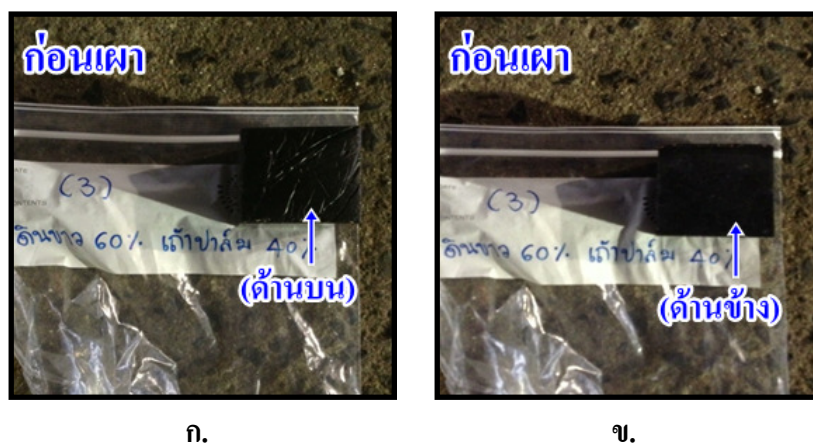


รูปที่ 4.45 จีไอโพลีเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง

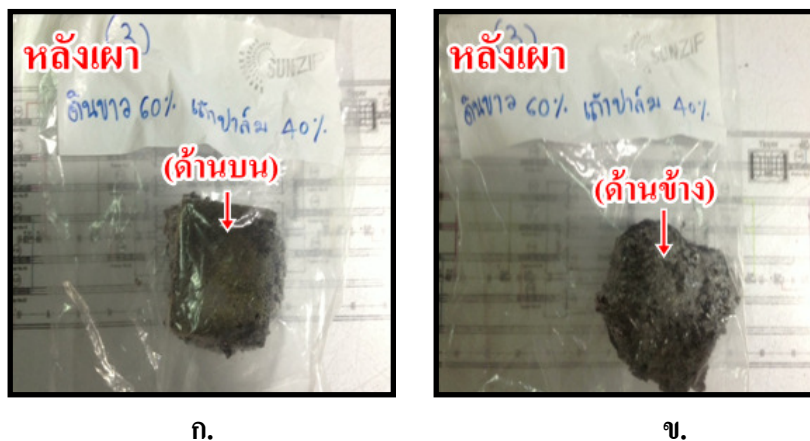


รูปที่ 4.46 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) หลังทำการเผา

จากรูปที่ 4.45 และ 4.46 แสดงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังทำการเผาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าปลาล่มแทนที่ดินขาวเผา 20% สังเกตได้ว่าหลังจากทำการเผาด้วยความร้อนที่ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จีโอโพลิเมอร์สูตรผสมนี้ยังมีการยึดติดกันเป็นก้อนไม่แตกกระจายแบบสูตรที่สังเคราะห์ด้วยดินขาวเผา 100% ทั้งนี้ เนื้อเพสต์บางส่วนได้หายไปและผิวมีสภาพขรุขระ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ทนความร้อนสูงได้

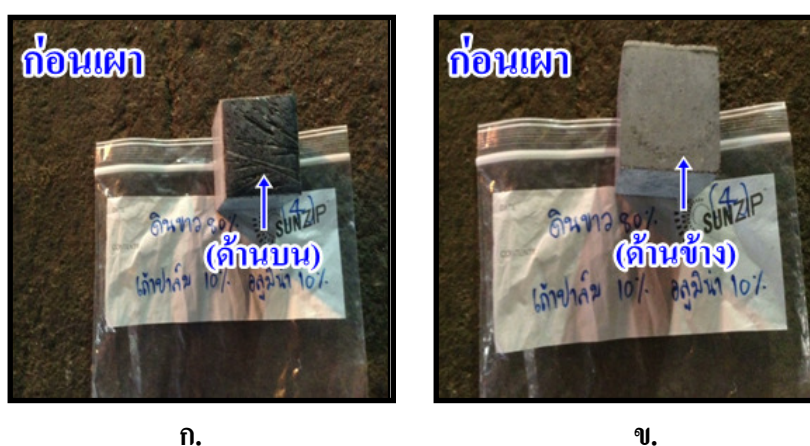


รูปที่ 4.47 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK40PA0AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง

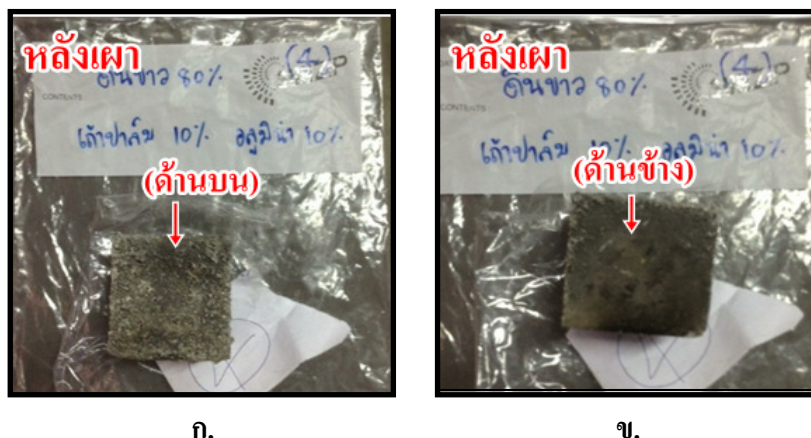


รูปที่ 4.48 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK40PA0AW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง

จากรูปที่ 4.47 และ 4.48 แสดงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังทำการเผาของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าป่าลัมแทนที่ดินขาวเผา 40% สังเกตได้ว่าหลังจากทำการเผาจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีสภาพใกล้เคียงกับสูตรที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าป่าลัมแทนที่ดินขาวเผา 20% จะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าป่าลัมเป็นส่วนผสมร่วมในดินขาวเผา สามารถช่วยให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นทนต่อความร้อนได้ดีกว่าการใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว

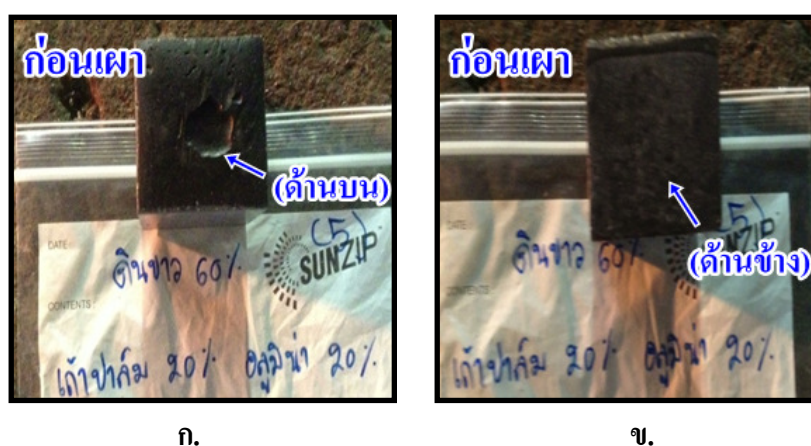


รูปที่ 4.49 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านข้าง



รูปที่ 4.50 จีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านล่าง

จากรูปที่ 4.49 และ 4.50 แสดงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังทำการเผาของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าปาล์ม 10% ร่วมกับกากอลูมินา 10% แทนที่ในดิน ขาวเผา หลังจากทำการเผาด้วยความร้อนที่ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าจีโอโพลิเมอร์ สูตรผสมนี้มีสภาพเพสต์ที่เกือบคงสภาพเดิม โดยมีรอยไหม้เกิดขึ้นและผิวบางส่วนมีสภาพขรุขระ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อนำกากอลูมินาและเถ้าปาล์มมาเป็นส่วนผสมร่วมกับดินขาวเผาในการสังเคราะห์ จีโอโพลิเมอร์จะทำให้เพสต์มีโครงสร้างที่ทนทานต่อความร้อนได้ดีขึ้นและคงสภาพเดิมไม่เกิดการ แตกกระจายตัว



รูปที่ 4.51 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK20PA20AW-15M(2.5) ก่อนทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านล่าง



รูปที่ 4.52 จีโอโพลิเมอร์สูตร 60MK20PA20AW-15M(2.5) หลังทำการเผา ก.ด้านบน ข.ด้านล่าง

จากรูปที่ 4.51 และ 4.52 แสดงความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังทำการเผาของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์สูตรที่สังเคราะห์โดยใช้เถ้าปาล์ม 20% ร่วมกับกากอลูมิน่า 20% แทนที่ในดิน ขาวเผา หลังจากทำการเผาด้วยความร้อนที่ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าจีโอโพลิเมอร์ สูตรผสมนี้มีสภาพเพสต์ค่อนข้างสมบูรณ์และทนความร้อนได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์สูตรผสมอื่นที่ทำการทดลองร่วมกัน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้กากอลูมิน่าเป็นส่วนผสมรวมในปริมาณที่สูงขึ้นมีส่วนช่วยให้โครงสร้างของเพสต์ทนทานต่อความร้อนสูงขึ้นด้วย เนื่องมาจากกากอลูมิน่ามีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งอลูมิเนียมออกไซด์สามารถทนความร้อนได้สูง โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ $2,054^{\circ}\text{C}$ และมีจุดเดือดประมาณ $3,000^{\circ}\text{C}$ (พงศธร นันทนเศ และสุนทร ภูรีปริชาเลิศ, 2553) จึงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีส่วนผสมของกากอลูมิน่าทนต่อความร้อนได้ดี

4.4.4 การวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 วัน โดยใช้วิธีการ สกัดสารตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความใน พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว จากนั้นทำการ วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักโดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-OES) โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

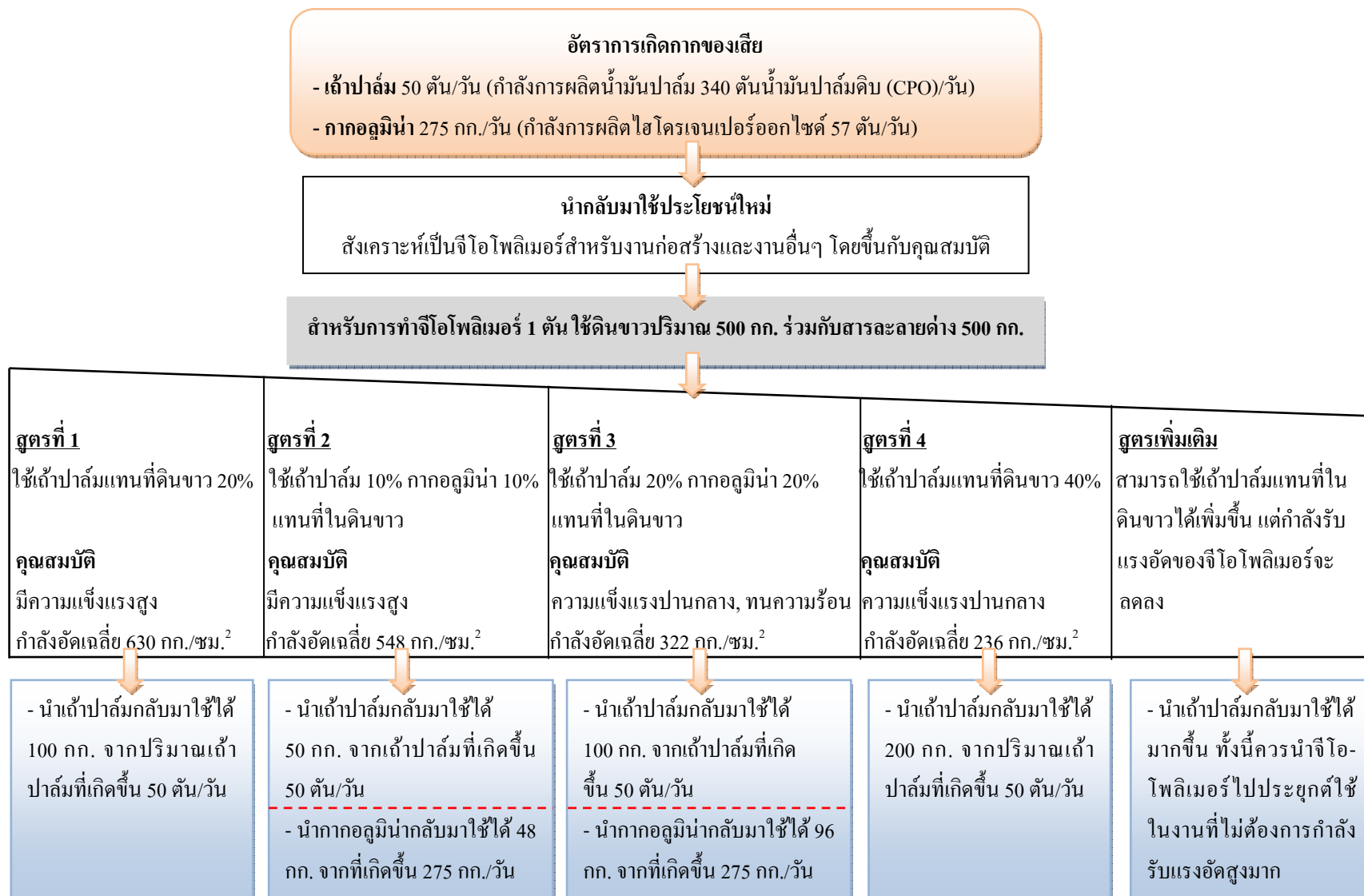
ตารางที่ 4.7 ปริมาณความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้จากการทดสอบ

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	pH	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัม/ลิตร)					
		As	Pb	Cr	Cd	Zn	Hg
100MK0PA0AW-15M(2.5)	12.69	0.119	0.012	0.014	0.001	0.005	ไม่พบ
60MK40PA0AW-15M(2.5)	12.51	0.071	0.042	0.005	0.002	ไม่พบ	ไม่พบ
60MK20PA20AW-15M(2.5)	12.76	0.059	0.034	0.010	0.002	0.003	ไม่พบ
เกณฑ์กำหนด	5.5-9.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤1.0	<5.0	<0.2

จากผลการทดลองพบว่า น้ำที่ชะละลายจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่ละสูตรผสมมีค่าความเป็นด่างอยู่สูง โดยมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 ซึ่งค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) ต้องมีค่าไม่เกิน 5.5-9.0 ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นโลหะหนักที่สกัดจากจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในแต่ละสูตรผสมซึ่งประกอบด้วย (1) สูตรใช้ดินขาวเผาอย่างเดียวเป็นสารตั้งต้น (2) สูตรใช้เถ้าปาล์มแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และ (3) สูตรใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากอลูมินาแทนที่ในดินขาวเผาร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งทุกสูตรผสมมีค่าปริมาณความเข้มข้นโลหะหนักผ่านเกณฑ์กำหนดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

4.5 แนวทางการใช้ประโยชน์จากจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการทดลอง

จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นในงานวิจัยนี้ มีส่วนผสมของเถ้าปาล์มและกากอลูมินาร่วมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นการนำกากของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยนำมาผสมร่วมกับดินขาวเผาในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป สำหรับการนำจีโอโพลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างนั้นควรเลือกสูตรผสมที่สามารถรับแรงอัดได้สูง ส่วนสูตรผสมอื่นสามารถนำไปใช้ในงานอื่นๆ ได้ เช่น การทำอิฐหรือวัสดุตกแต่งสวน เป็นต้น ทั้งนี้ในปัจจุบันได้มีการนำผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Products) ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นงานก่อสร้าง งานตกแต่ง งานอุตสาหกรรมไฟฟ้า รวมถึงการทำอิฐทนไฟ (Geopolymer Institute, 1996-2012) ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น นอกจากนี้ได้นำเสนอข้อมูลจากการทดลองจีโอโพลิเมอร์แต่ละสูตรผสมเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งาน โดยใช้สัดส่วนการนำกากของเสียแทนที่ในดินขาวเป็นเกณฑ์ และวิเคราะห์การนำเถ้าปาล์มและกากอลูมินากลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากการใช้ดินขาวเผา เถ้าปาล์ม และกากอลูมิน่าเป็นวัสดุตั้งต้น ในการทดลองพบว่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์นั้น ต้องมีองค์ประกอบหลักของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในสภาพที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งจะทำให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีกำลังรับแรงอัดที่ดี โดยการเผาดินขาวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 750°C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จะทำให้ดินขาวเปลี่ยนสภาพเป็นอสัณฐานและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์เป็นจีโอโพลิเมอร์

สำหรับการนำเถ้าปาล์มและกากอลูมิน่ามาผสมร่วมกับดินขาวเผา สามารถสังเคราะห์ให้เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดที่สูงได้ โดยต้องผสมร่วมกับสารละลายต่างในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งในการทดลองนี้พบว่าการใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่อัตราส่วน 2.5 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 15 โมลาร์ สามารถช่วยในการชะละลายองค์ประกอบของซิลิกากับอลูมิน่าในวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้น และการบ่มตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ได้เร็วขึ้น

ด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์ขึ้น สูตรใช้เถ้าปาล์มแทนที่ดินขาวเผาในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 7 วัน เท่ากับ 630 กก./ซม.^2 และสูตรใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากอลูมิน่าแทนที่ดินขาวเผาในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 7 วัน เท่ากับ 548 กก./ซม.^2 โดยที่จีโอโพลิเมอร์สูตรควบคุมซึ่งสังเคราะห์จากดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย $1,007 \text{ กก./ซม.}^2$ ที่อายุการบ่ม 7 วัน ทั้งนี้ หากใช้เถ้าปาล์มและกากอลูมิน่าแทนที่ดินขาวเผาในปริมาณที่สูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดต่ำลง โดยในการทดลองได้ใช้เถ้าปาล์มร่วมกับกากอลูมิน่า

แทนที่ในดินขาวเผาสูงสุดที่ปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แต่ยังสามารถให้กำลังรับแรงอัดที่ดีซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 322 กก./ซม.² ที่อายุการบ่ม 7 วัน

นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้กากอลูมินาและเถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมร่วมกับดินขาวเผา นั้น สามารถช่วยให้จีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติการทนความร้อนได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากการใช้ดินขาวเผาเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาไปในด้านการนำเถ้าปาล์มและกากอลูมินากลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยนำมาเป็นส่วนผสมร่วมกับดินขาวเผาเพื่อสังเคราะห์เป็นจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งในอนาคตควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำเศษที่เหลือไปประยุกต์ใช้งานจริง เช่น การใช้ในงานคอนกรีต หรือการทำให้เป็นวัสดุอื่นๆ เช่น วัสดุทนไฟ วัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม เป็นต้น นอกจากนี้ ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพื่อประโยชน์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานและเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- เจริญชัย ฤทธิรุท, และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2550). จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาจากดินขาวระนอง
ผา. วิศวกรรมวารสาร มช., 34(2): 231-242.
- จิรัฐดี บรรจงศิริ. (2555). การศึกษากำลักรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน. การ
 ประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 9.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา, และวิเชียร ชาลี. (2553). กำลักรัดและกำลักรัดเหนียวของจีโอ
 โพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 15(1): 13-22.
- คนุพล ตันนโยภาส, และ สุรเดช อุตระชล. (2551). อิทธิพลของเถ้าเชื้อเพลิงปาล์มน้ำมันที่มีต่อสมบัติ
 คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาหินพิมพ์มิซ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 6.
- เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์. (2549). ผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิต่อกำลักรัดของจีโอโพลิ-
 เมอร์พาสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญา
 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, และสมิตร ส่งพิริยะกิจ.
 (2551). จีโอโพลิเมอร์พาสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล ตอนที่ 1: ผลกระทบของ
 สัดส่วนผสมต่อกำลักรัด. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, 19(2).
- นงภัต โฆษวิทิตกุล. (2555). คู่มือข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และ
 เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ. (2544). คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์พาสต์ผสมเถ้าฟางข้าว. วารสารวิจัยและ
 พัฒนา มจร., 24(1): 85-99.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจิตร, และสมนึก ประภาชนธร. (2549). ปูนซีเมนต์เถ้า
 แกลบ. วารสารวิชาการที่อยู่อาศัยการเคหะแห่งชาติ, 3(2): 81-92.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6. (2540). การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. ค้นเมื่อ
 19 กันยายน 2556, เข้าถึงได้จาก http://teenet.tei.or.th/Knowledge/law1_5_1.pdf
- ประมวล โสมละคร. (2550). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมแร่ดินเบา.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- ประมวล โสมละคร, ชาญชัย เงาะปก, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). *การก่อดัวและพัฒนากำลั่งอัคของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต่ำจากถ้ำลอยผสมแร่ดินเบา*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 13.
- พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์, เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ, และดาวัลย์ วิวรรณะเดช. (2554). *การดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กากโซดาไลต์*. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 10.
- พงศธร นันทนเศรษฐ, และสุนทร ภูรีปริชาเลิศ. (2553). *สารและสมบัติของสาร*. ค้นเมื่อ 19 กันยายน 2556 เข้าถึงได้จาก http://www.truelookpanya.com/new/cms_detail/knowledge/3059-00
- มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม. ค้นเมื่อ 19 กันยายน 2556 เข้าถึงได้จาก <http://www2.diw.go.th/PIC/download/info/water1.pdf>
- วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคุ้ม, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2546). *วัสดุปอชโซลานชนิดใหม่จากถ้ำปาล์มน้ำมัน*. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 26(4).
- ศตคุณ เดชพันธ์, และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). *นวัตกรรมและการส่งเสริมการนำจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา, 13.
- ศักรินทร์ เหลืองกำจร. (2551). *วัสดุจีโอโพลิเมอร์*. วารสารคอนกรีต, (3).
- ศุภกร รักใหม่. (2556). *คู่มือสถานียกเครื่องกระเบื้องรังสีเอ็กซ์*. สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน).
- สถานการณ์การผลิตการตลาดยางพาราและปาล์มน้ำมัน. (2555). *โครงการพัฒนาเศรษฐกิจการค้าการท่องเที่ยวกลุ่มจังหวัดภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย ภายใต้ความร่วมมือทางเศรษฐกิจอินโดนีเซียมาเลเซียและไทย, ประจำปีงบประมาณ 2555*.
- สรารุช จริตงาม. (2548). *คู่มือทฤษฎีและปฏิบัติการทดสอบดิน*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมภพ แต่บัวนหวด, อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, และสุภิชาติ เจนจิระปัญญา. (2555). *พฤติกรรมด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ*. วารสารวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 8(2).
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2550). *ปอชโซลาน*. กรุงเทพฯ: กองฟิสิกส์วิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

- อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ. (2549). *การศึกษาอิโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผา*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อนุพันธ์ รุ่งเผ่าพันธุ์. (2551). *การศึกษาคุณสมบัติอิโพลิเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าแกลบผสมดินขาวเผาด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อาบิเต็ง ฮาวา, ดนูพล ตันนโยภาส, วรพจน์ ประชาเสรี, และพิชัย ธานีรณานนท์. (2556). *สมบัติวัสดุประสานอิโพลิเมอร์ดินขาวเพื่องานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต*. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 5(2): 37-47.
- อายุวัฒน์ สว่างผล. (2543). *วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์*. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). *การศึกษาอิโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน*. สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- A., Elimbi, H.K., Tchakoute, and D., Njopwouo. (2011). *Effect of calcination temperature of kaolinite calys on the properties of geopolymer cements*. Construction and Building Materials 25; 2805-2812.
- A., Nazari, A., Bagheri, and Shadi Riahi. (2011). *Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash*. Materials Science and Engineering A, 528: 7395–7401.
- American Society for Testing and Materials. (2008). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm.] Cube Specimens)¹C 109/C 109M-07*, Annual book of ASTM Standards, Vol.04.01: 78-86.
- American Society for Testing and Materials. (1991). *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02. (ASTM C618-91).
- Baochun, G., Quanliang, Z., Yanda, L., Mingliang, D., Mingxian, L., and Demin, J. (2009). *Crystallization behavior of polyamide 6/halloysite nanotubes nanocomposites*. Thermochemica Acta, 484: 48–56.
- Chaipanich, A., and Nochaiya, T., (2010). *Thermal analysis and microstructure of Portland cementfly ash-silica fume pastes*. J Therm Anal Calorim, 99: 487-493.

- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. (2009). *Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete*. *Construction and Building Materials*, 23(11): 3352-3358.
- Davidovits, J. (1984). *Synthetic mineral polymer compound of the silicodluminates family and preparation process*. Us patent, 3(472): 199.
- Davidovits, J. (1994). *Properties of geopolymer Cements*. Kiev State Technical University, Ukraine: 131-149.
- Davidovits, J. (1999). *Chemistry of geopolymeric systems, Terminology*. Proceeding: 2nd International Conference on Geopolymer. France, Paris: 9-40.
- Davidovits, J. (2002). *Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications*. In *Geopolymer 2002 Conference 1*. ed. Mellbourne, Australia: 1-9.
- Developments and applications in geopolymer. Retrieved August 1, 2013, from <http://www.geopolymer.org/applications/introduction-developments-and-applications-in-geopolymer-2>
- Duxson, P., Fernandez J.A., Provis L., Lukey, G.C., Palomo, A. and J.S.J., van Deventer. (2007). *Geopolymer technology: the current state of the art*. *Journal of Material Science*. 42: 2917-2933.
- E., dos Santos, R.B., Scorzelli, L.C., Bertolino, O.C., Alves, and P., Munayco. (2012). *Characterization of kaolin from the Capim River region — Brazil*. *Applied Clay Science* 55: 164–167.
- Giacomo, O., and Paola, M. (2012). *Tectonic and litho-stratigraphic controls on kaolin deposits within volcanic successions: Insights from the kaoliniferous district of north-western Sardinia (Italy)*. *Ore Geology Reviews* 48: 151–164.
- Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, and Young Soo Chung. (2013). *The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators*. *Construction and Building Materials* 47: 409–418.
- Harben, P.W., and Bates, R.L. (1984). *Geology of the Nonmetallics*. [n.p]: Metal Bulletin Books.

- 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: 14-18.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. (2004). *Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete*. *Dimensi Teknik Sipil*, 6(2): 88-93.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. (2004). *On the development of fly ash based geopolymer concrete*. *ACI Master J.*, 101(6): 467-472.
- Hongling Wang, Haihong Li, and Fengyuan Yan. (2005). *Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer*. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 268: 1–6.
- I.M., Bakr. (2011). *Densification behavior, phase transformations, microstructure and mechanical properties of fired Egyptian kaolins*. *Applied Clay Science* 52: 333–337.
- J.C., Swanepoel, and C.A., Strydom. (2002). *Utilisation of fly ash in geopolymeric material*. *Applied Geochemistry*, 17: 1143-1148.
- J.W., Wang, and T.W., Cheng. (2003). *Production Geopolymer Materials by Coal Fly Ash*. *Proceeding of the 7th International symposium on East Asian Resource Recycling Technology*, 10-14, Tainan, Taiwan.
- J., Tailby, and K.J.D., MacKenzie. (2010). *Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals*. *Cement and Concrete Research*, 40: 787-794.
- Kiatsuda Somna, Chai Jaturapitakkul, Puangrat Kajitvichyanukul, and Prinya Chindaprasirt. (2011). *NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature*. *Fuel* 90: 2118–2124.
- King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Retrieved November 22, 2012, from <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-microscopysem-.html>

- Pavel, Rovnanik. (2010). *Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer*. *Construction and Building Materials* 24: 1176–1183.
- Posi, P., and Chindaprasit, P. (2010). *A study of properties of structural cellular lightweight geopolymer mortar*. The 11th graduate research conference Khon Kean University.
- Rattanasak, U., and Chindaprasirt, P. (2009). *Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer*. *Minerals Engineering* 22: 1073-1078.
- Ridtirud, C., and Chindaprasirt, P. (2007). *Calcined Ranong kaolin geopolymer mortar*. *KKU Engineering Journal*, 34(2): 231-442.
- Sanawong, C., Somna, K., and Chalee, W. (2010). *Compressive and bond strengths of fly ash-based geopolymer concrete*. *Burapha Sci. J.*: 13-22.
- S., Chandrasekhar, and S. Ramaswamy. (2006). *Iron minerals and their influence on the optical properties of two Indian kaolins*. *Applied Clay Science* 33: 269–277.
- Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)*. Retrieved September 19, 2013, from <http://www.sec.psu.ac.th/facilities.php>
- Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University. *Laser Particle Size Analyzer (LPSA)*. Retrieved November 22, 2012, from <http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php>
- Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University. *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Retrieved November 22, 2012, from <http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php>
- Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University. *X-Ray Diffractometer (XRD)*. Retrieved November 22, 2012, from <http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php>
- Scientific Equipment Center, Prince of Songkla University. *X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)*. Retrieved November 22, 2012, from <http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php>
- Scott, A Speakman. (2012). *Introduction to X-Ray Powder Diffraction Data Analysis*. Center for Materials Science and Engineering at MIT.
- Shengli Wang, Zhongren Nan, Jingjing Zeng, and Tingting Hu. (2007). *Desorption of zinc by the kaolin from Suzhou, China*. *Applied Clay Science* 37: 221–225.
- Suksun Horpibulsuk, Patimapon Sukmark and Shui-Long Shen. (2013). *Strength development in clay-fly ash geopolymer*. *Construction and Building Materials* 40: 566-574.

- Vladimir Zivica, Svetozar Balkovic, and Milan Drabik. (2011). *Properties of metakaolin geopolymer hardened paste prepared by high-pressure compaction*. Construction and Building Materials 25: 2206–2213.
- Wongkeo, W., and Chaipanich, A. (2010). *Compressive strength, microstructure and analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume*. Materials Science and Engineering A 527: 3676-3684.
- Z., Zuhua, Y., Xiao, Z., Huajun, and C., Yue. (2009). *Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer*. Applied Clay Science 43: 218–223.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
100MK0P0A-5M(0.5)	1	227.60	5.09	5.10	5.48	5.08	5.08	5.48	0.191	1.599		155.7	
	2	240.08	5.04	5.09	5.50	5.03	5.08	5.50	0.128	1.702	1.656	174.2	162.5
	3	235.25	5.05	5.10	5.48	5.04	5.10	5.48	0.064	1.667		157.5	
100MK0P0A-5M(1.5)	1	240.40	5.04	5.08	5.52	5.04	5.08	5.50	0.128	1.698		360.0	
	2	234.05	5.08	5.12	5.47	5.08	5.12	5.46	0.064	1.645	1.690	332.5	347.2
	3	256.90	5.36	5.09	5.46	5.35	5.09	5.45	0.126	1.726		349.1	
100MK0P0A-5M(2.5)	1	250.12	5.04	5.11	5.56	5.03	5.11	5.56	0.064	1.748		474.2	
	2	242.00	5.06	5.09	5.48	5.05	5.09	5.48	0.064	1.716	1.745	497.5	480.7
	3	252.22	5.03	5.12	5.53	5.03	5.12	5.52	0.064	1.771		470.5	
80MK20P0A-5M(0.5)	1	232.10	5.05	5.09	5.55	5.05	5.08	5.53	0.191	1.625		115.6	
	2	225.40	5.03	5.14	5.45	5.02	5.14	5.44	0.128	1.597	1.590	134.8	122.3
	3	220.61	5.08	5.11	5.49	5.08	5.10	5.48	0.128	1.548		116.5	
60MK40P0A-5M(0.5)	1	210.00	5.04	5.08	5.35	5.04	5.07	5.34	0.129	1.533		110.5	
	2	223.40	5.08	5.12	5.57	5.07	5.12	5.55	0.190	1.541	1.528	102.2	105.8
	3	217.49	5.03	5.15	5.57	5.03	5.13	5.55	0.254	1.509		104.8	

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
80MK20P0A-5M(1.5)	1	223.70	5.07	5.10	5.45	5.06	5.10	5.45	0.064	1.589		367.0	
	2	230.40	5.05	5.12	5.50	5.04	5.12	5.50	0.064	1.619	1.610	335.2	342.0
	3	236.12	5.05	5.09	5.67	5.04	5.08	5.66	0.190	1.621		323.8	
60MK40P0A-5M(1.5)	1	220.40	5.04	5.11	5.63	5.04	5.10	5.63	0.063	1.520		140.8	
	2	216.30	5.05	5.09	5.54	5.05	5.08	5.53	0.128	1.520	1.534	156.3	143.1
	3	214.95	5.07	5.12	5.46	5.06	5.11	5.45	0.192	1.518		132.1	
80MK20P0A-5M(2.5)	1	238.73	5.04	5.10	5.58	5.04	5.10	5.57	0.064	1.665		382.0	
	2	240.23	5.07	5.12	5.67	5.07	5.12	5.66	0.063	1.632	1.650	358.0	374.7
	3	231.68	5.03	5.11	5.45	5.03	5.10	5.44	0.128	1.654		384.2	
60MK40P0A-5M(2.5)	1	226.70	5.05	5.10	5.68	5.05	5.09	5.67	0.126	1.550		160.0	
	2	215.67	5.04	5.12	5.35	5.03	5.12	5.34	0.129	1.564	1.553	174.7	162.7
	3	222.81	5.07	5.12	5.57	5.06	5.12	5.57	0.063	1.545		153.4	
80MK10P10A-5M(0.5)	1	224.56	5.04	5.08	5.57	5.03	5.08	5.56	0.127	1.577		172.6	
	2	215.40	5.07	5.11	5.44	5.06	5.10	5.43	0.192	1.531	1.548	155.0	163.0
	3	221.13	5.06	5.17	5.50	5.04	5.16	5.50	0.191	1.536		161.3	

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
60MK20P20A-5M(0.5)	1	212.40	5.06	5.09	5.56	5.05	5.08	5.56	0.127	1.482		105.4	
	2	216.67	5.04	5.13	5.70	5.03	5.12	5.70	0.126	1.472	1.486	118.5	117.2
	3	215.99	5.05	5.10	5.58	5.03	5.08	5.57	0.318	1.504		127.7	
80MK10P10A-5M(1.5)	1	235.46	5.05	5.12	5.56	5.04	5.12	5.56	0.064	1.637		320.0	
	2	223.45	5.08	5.18	5.44	5.06	5.17	5.44	0.217	1.562	1.605	296.2	306.2
	3	229.19	5.04	5.11	5.51	5.04	5.10	5.50	0.121	1.617		302.3	
60MK20P20A-5M(1.5)	1	220.05	5.04	5.10	5.65	5.04	5.08	5.65	0.127	1.514		120.2	
	2	212.20	5.08	5.10	5.46	5.08	5.10	5.44	0.128	1.500	1.502	134.8	127.2
	3	215.30	5.06	5.11	5.58	5.05	5.11	5.56	0.190	1.492		126.6	
80MK10P10A-5M(2.5)	1	234.50	5.07	5.12	5.56	5.07	5.12	5.55	0.063	1.625		325.5	
	2	242.06	5.06	5.18	5.60	5.05	5.17	5.60	0.126	1.651	1.640	304.3	312.5
	3	232.20	5.05	5.09	5.49	5.05	5.09	5.48	0.064	1.644		307.8	
60MK20P20A-5M(2.5)	1	225.30	5.07	5.19	5.70	5.07	5.18	5.70	0.063	1.502		169.0	
	2	221.78	5.04	5.09	5.56	5.04	5.09	5.54	0.127	1.558	1.535	150.7	155.7
	3	218.01	5.06	5.11	5.46	5.05	5.10	5.45	0.192	1.547		147.4	

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
100MK0P0A-10M(0.5)	1	232.10	5.07	5.09	5.57	5.06	5.08	5.56	0.191	1.619		205.2	
	2	245.88	5.05	5.12	5.67	5.05	5.12	5.66	0.063	1.674	1.670	184.5	190.3
	3	243.91	5.07	5.15	5.45	5.06	5.14	5.45	0.128	1.717		181.1	
100MK0P0A-10M(1.5)	1	239.05	5.04	5.10	5.54	5.03	5.09	5.54	0.128	1.678		382.0	
	2	256.78	5.05	5.16	5.77	5.05	5.15	5.77	0.063	1.708	1.704	360.5	375.9
	3	240.24	5.08	5.13	5.35	5.07	5.12	5.34	0.193	1.726		385.1	
100MK0P0A-10M(2.5)	1	254.46	5.07	5.10	5.68	5.07	5.10	5.67	0.063	1.733		797.2	
	2	251.12	5.04	5.09	5.55	5.04	5.09	5.54	0.064	1.763	1.748	768.0	785.2
	3	245.67	5.05	5.12	5.44	5.05	5.12	5.43	0.064	1.749		790.4	
80MK20P0A-10M(0.5)	1	220.55	5.03	5.12	5.44	5.03	5.11	5.43	0.128	1.576		142.8	
	2	245.62	5.07	5.10	5.79	5.06	5.08	5.79	0.188	1.642	1.592	173.2	150.2
	3	229.62	5.07	5.15	5.65	5.07	5.14	5.65	0.063	1.557		134.5	
60MK40P0A-10M(0.5)	1	222.40	5.07	5.10	5.57	5.06	5.09	5.56	0.191	1.548		109.2	
	2	228.40	5.04	5.20	5.67	5.04	5.20	5.66	0.063	1.535	1.544	135.0	122.3
	3	220.50	5.05	5.18	5.45	5.04	5.17	5.45	0.128	1.549		122.7	

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
80MK20P0A-10M(1.5)	1	236.30	5.08	5.09	5.57	5.07	5.08	5.56	0.191	1.644		367.0	
	2	240.06	5.05	5.13	5.70	5.04	5.13	5.69	0.126	1.626	1.628	382.2	380.5
	3	227.89	5.04	5.16	5.43	5.04	5.15	5.43	0.064	1.614		392.4	
60MK40P0A-10M(1.5)	1	225.40	5.07	5.08	5.59	5.07	5.08	5.58	0.064	1.564		174.3	
	2	218.45	5.04	5.11	5.38	5.03	5.10	5.38	0.129	1.578	1.560	155.0	167.2
	3	226.92	5.06	5.16	5.65	5.06	5.15	5.65	0.063	1.538		172.2	
80MK20P0A-10M(2.5)	1	240.25	5.07	5.12	5.67	5.06	5.12	5.66	0.126	1.634		442.6	
	2	246.00	5.07	5.09	5.70	5.07	5.09	5.69	0.063	1.670	1.655	467.3	457.2
	3	236.42	5.04	5.18	5.44	5.04	5.17	5.44	0.064	1.662		461.7	
60MK40P0A-10M(2.5)	1	235.50	5.07	5.15	5.67	5.06	5.15	5.67	0.063	1.592		177.2	
	2	227.45	5.03	5.20	5.44	5.03	5.20	5.43	0.064	1.598	1.580	194.0	183.5
	3	228.74	5.05	5.17	5.65	5.04	5.17	5.64	0.126	1.551		179.2	
80MK10P10A-10M(0.5)	1	233.35	5.04	5.15	5.68	5.03	5.15	5.67	0.126	1.585		212.4	
	2	220.54	5.07	5.12	5.49	5.07	5.11	5.48	0.128	1.548	1.563	198.6	203.9
	3	222.85	5.06	5.10	5.57	5.05	5.09	5.56	0.191	1.555		200.6	

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
60MK20P20A-10M(0.5)	1	213.32	5.05	5.09	5.45	5.04	5.08	5.45	0.128	1.522		149.5	
	2	220.00	5.06	5.19	5.66	5.05	5.19	5.64	0.189	1.483	1.503	122.1	132.5
	3	216.90	5.06	5.11	5.58	5.06	5.10	5.57	0.127	1.504		125.8	
80MK10P10A-10M(1.5)	1	243.30	5.08	5.12	5.73	5.08	5.11	5.73	0.063	1.633		388.3	
	2	225.57	5.04	5.09	5.45	5.03	5.09	5.45	0.064	1.613	1.615	403.5	397.1
	3	234.35	5.05	5.13	5.67	5.04	5.12	5.67	0.126	1.598		399.5	
60MK20P20A-10M(1.5)	1	210.50	5.08	5.13	5.42	5.07	5.12	5.41	0.192	1.492		124.5	
	2	220.00	5.04	5.10	5.55	5.03	5.09	5.54	0.191	1.546	1.518	142.0	134.5
	3	223.60	5.06	5.14	5.67	5.06	5.13	5.67	0.063	1.516		137.1	
80MK10P10A-10M(2.5)	1	240.02	5.03	5.14	5.66	5.03	5.14	5.65	0.063	1.638		438.8	
	2	232.15	5.08	5.15	5.59	5.08	5.15	5.58	0.063	1.589	1.650	448.3	447.3
	3	259.04	5.06	5.20	5.72	5.05	5.20	5.72	0.063	1.721		454.7	
60MK20P20A-10M(2.5)	1	235.00	5.06	5.12	5.80	5.06	5.12	5.79	0.063	1.564		200.3	
	2	223.78	5.05	5.10	5.52	5.04	5.09	5.52	0.128	1.577	1.562	185.6	197.7
	3	219.25	5.05	5.17	5.44	5.04	5.17	5.43	0.128	1.545		207.3	

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
100MK0P0A-15M(0.5)	1	230.32	5.09	5.09	5.37	5.09	5.09	5.36	0.064	1.655		290.0	
	2	245.08	5.08	5.13	5.50	5.08	5.13	5.50	0.000	1.709	1.678	266.3	278.3
	3	235.66	5.04	5.10	5.49	5.04	5.10	5.48	0.064	1.669		278.7	
100MK0P0A-15M(1.5)	1	255.62	5.04	5.10	5.61	5.04	5.09	5.61	0.063	1.773		689.3	
	2	243.45	5.05	5.13	5.56	5.05	5.13	5.55	0.064	1.690	1.721	662.0	675.4
	3	246.10	5.09	5.10	5.58	5.09	5.10	5.58	0.000	1.700		675.0	
100MK0P0A-15M(2.5)	1	245.65	5.02	5.10	5.44	5.02	5.10	5.44	0.000	1.762		1,004.3	
	2	256.77	5.02	5.18	5.65	5.02	5.18	5.64	0.063	1.749	1.758	992.3	1,007.2
	3	250.19	5.04	5.10	5.52	5.04	5.10	5.52	0.000	1.763		1,024.9	
80MK20P0A-15M(0.5)	1	222.55	5.09	5.17	5.41	5.08	5.17	5.41	0.064	1.563		174.0	
	2	230.45	5.05	5.13	5.44	5.04	5.13	5.44	0.064	1.637	1.607	147.3	160.1
	3	236.46	5.07	5.15	5.59	5.06	5.15	5.59	0.063	1.621		159.0	
60MK40P0A-15M(0.5)	1	230.67	5.08	5.18	5.66	5.08	5.17	5.65	0.126	1.550		142.5	
	2	220.30	5.04	5.09	5.40	5.04	5.09	5.40	0.000	1.588	1.559	170.0	154.1
	3	222.69	5.08	5.12	5.56	5.08	5.12	5.55	0.063	1.539		149.8	

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
80MK20P0A-15M(1.5)	1	235.77	5.05	5.11	5.51	5.05	5.11	5.51	0.000	1.659		403.2	
	2	242.45	5.05	5.11	5.66	5.05	5.11	5.65	0.063	1.659	1.654	425.8	411.6
	3	231.15	5.03	5.08	5.50	5.03	5.08	5.50	0.000	1.643		405.9	
60MK40P0A-15M(1.5)	1	232.45	5.08	5.17	5.74	5.07	5.17	5.74	0.063	1.544		197.2	
	2	242.00	5.03	5.10	5.91	5.03	5.09	5.91	0.062	1.596	1.573	220.4	210.1
	3	231.11	5.04	5.09	5.70	5.04	5.09	5.70	0.000	1.580		212.7	
80MK20P0A-15M(2.5)	1	240.82	5.06	5.14	5.62	5.06	5.14	5.62	0.000	1.646		630.0	
	2	236.98	5.03	5.11	5.50	5.03	5.11	5.49	0.064	1.681	1.663	619.3	630.3
	3	232.68	5.02	5.09	5.47	5.02	5.09	5.47	0.000	1.663		641.6	
60MK40P0A-15M(2.5)	1	221.33	5.07	5.07	5.50	5.07	5.07	5.49	0.064	1.570		245.2	
	2	228.45	5.06	5.07	5.54	5.05	5.07	5.54	0.064	1.607	1.580	224.5	235.8
	3	218.85	5.05	5.06	5.48	5.05	5.06	5.48	0.000	1.562		237.7	
80MK10P10A-15M(0.5)	1	219.45	5.04	5.09	5.31	5.04	5.08	5.30	0.130	1.612		243.1	
	2	224.45	5.05	5.10	5.45	5.05	5.09	5.45	0.064	1.598	1.591	225.0	235.2
	3	228.61	5.07	5.13	5.62	5.07	5.12	5.62	0.063	1.564		237.6	

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลและผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 15 โมลาร์) (ต่อ)

สูตรผสม	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาดก่อน (ซม.)			ขนาดหลัง (ซม.)			การ หดตัว (%)	ความ หนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (กรัม/ซม. ³)	กำลังอัด 7 วัน (กก./ซม. ³)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. ³)
			กว้าง	ยาว	สูง	กว้าง	ยาว	สูง					
60MK20P20A-15M(0.5)	1	223.10	5.10	5.11	5.40	5.09	5.10	5.40	0.128	1.586		153.3	
	2	219.50	5.12	5.20	5.33	5.12	5.20	5.32	0.064	1.547	1.561	140.0	146.5
	3	226.14	5.08	5.20	5.52	5.07	5.20	5.52	0.063	1.550		146.2	
80MK10P10A-15M(1.5)	1	230.00	5.03	5.10	5.49	5.03	5.10	5.47	0.128	1.634		402.0	
	2	225.53	5.04	5.26	5.27	5.04	5.26	5.27	0.000	1.612	1.644	429.3	417.8
	3	236.48	5.05	5.03	5.52	5.05	5.03	5.52	0.000	1.687		422.0	
60MK20P20A-15M(1.5)	1	219.56	5.07	5.07	5.50	5.07	5.07	5.50	0.000	1.551		177.4	
	2	224.54	5.14	5.21	5.70	5.14	5.20	5.70	0.062	1.472	1.528	139.0	165.0
	3	220.60	5.07	5.05	5.51	5.07	5.04	5.50	0.128	1.564		178.6	
80MK10P10A-15M(2.5)	1	231.08	5.05	5.05	5.49	5.05	5.05	5.49	0.000	1.650		550.0	
	2	230.00	5.05	5.11	5.42	5.05	5.11	5.42	0.000	1.645	1.653	568.3	547.7
	3	235.25	5.07	5.06	5.51	5.07	5.06	5.50	0.064	1.664		524.7	
60MK20P20A-15M(2.5)	1	226.65	5.04	5.11	5.60	5.04	5.11	5.60	0.000	1.574		319.2	
	2	229.45	5.05	5.18	5.60	5.05	5.18	5.60	0.000	1.565	1.569	335.4	322.1
	3	233.63	5.07	5.20	5.66	5.06	5.20	5.65	0.126	1.567		311.6	

ตารางที่ ก.10 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5, 1.5 และ 2.5; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 5 โมลาร์)

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น			สารเคมี		ของเหลว/ ของแข็ง (w/b)	กำลังอัด เฉลี่ย 1 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 7 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 14 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 28 วัน (กก./ซม. ²)
	ดินขาวเผา	เถ้าปาล์ม	กากลอยมีนน้ำ	Na ₂ SiO ₃	NaOH					
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)					
100MK0PA0AW-5M(0.5)	483	0	0	173	345	0.56	117.8	162.5	192.0	225.8
100MK0PA0AW-5M(1.5)	483	0	0	311	207	0.43	265.5	347.2	375.3	418.9
100MK0PA0AW-5M(2.5)	483	0	0	369	148	0.38	397.2	480.7	507.7	536.3
80MK20PA0AW-5M(0.5)	386	97	0	173	345	0.56	98.5	122.3	140.5	152.3
60MK40PA0AW-5M(0.5)	290	193	0	173	345	0.56	85.7	105.8	118.4	137.6
80MK20PA0AW-5M(1.5)	386	97	0	311	207	0.43	261.6	342.0	366.5	392.1
60MK40PA0AW-5M(1.5)	290	193	0	311	207	0.43	112.8	143.1	159.9	178.4
80MK20PA0AW-5M(2.5)	386	97	0	369	148	0.38	306.5	374.7	392.2	440.9
60MK40PA0AW-5M(2.5)	290	193	0	369	148	0.38	105.0	162.7	170.6	195.0
80MK10PA10AW-5M(0.5)	386	48	48	173	345	0.56	122.3	163.0	177.8	190.3
60MK20PA20AW-5M(0.5)	290	97	97	173	345	0.56	92.5	117.2	127.3	152.2
80MK10PA10AW-5M(1.5)	386	48	48	311	207	0.43	254.1	306.2	325.3	366.9
60MK20PA20AW-5M(1.5)	290	97	97	311	207	0.43	101.8	127.2	150.0	164.7
80MK10PA10AW-5M(2.5)	386	48	48	369	148	0.38	242.4	312.5	338.3	363.7
60MK20PA20AW-5M(2.5)	290	97	97	369	148	0.38	98.3	155.7	167.5	182.5

ตารางที่ ก.11 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5, 1.5 และ 2.5; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 10 โมลาร์)

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น			สารเคมี		ของเหลว/ ของแข็ง (w/b)	กำลังอัด เฉลี่ย 1 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 7 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 14 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 28 วัน (กก./ซม. ²)
	ดินขาวเผา	เถ้าปาล์ม	กากอลูมินา	Na ₂ SiO ₃	NaOH					
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)					
100MK0PA0AW-10M(0.5)	483	0	0	173	345	0.45	156.6	190.3	225.0	248.2
100MK0PA0AW-10M(1.5)	483	0	0	311	207	0.37	317.3	375.9	420.1	475.9
100MK0PA0AW-10M(2.5)	483	0	0	369	148	0.34	688.0	785.2	802.6	858.2
80MK20PA0AW-10M(0.5)	386	97	0	173	345	0.45	124.7	150.2	159.5	180.0
60MK40PA0AW-10M(0.5)	290	193	0	173	345	0.45	102.6	122.3	135.6	144.3
80MK20PA0AW-10M(1.5)	386	97	0	311	207	0.37	325.8	380.5	398.3	440.7
60MK40PA0AW-10M(1.5)	290	193	0	311	207	0.37	135.5	167.2	186.7	212.2
80MK20PA0AW-10M(2.5)	386	97	0	369	148	0.34	372.0	457.2	484.2	572.6
60MK40PA0AW-10M(2.5)	290	193	0	369	148	0.34	135.2	183.5	215.6	228.1
80MK10PA10AW-10M(0.5)	386	48	48	173	345	0.45	157.0	203.9	214.5	230.0
60MK20PA20AW-10M(0.5)	290	97	97	173	345	0.45	109.6	132.5	147.0	162.3
80MK10PA10AW-10M(1.5)	386	48	48	311	207	0.37	325.5	397.1	420.7	438.9
60MK20PA20AW-10M(1.5)	290	97	97	311	207	0.37	107.5	134.5	156.8	192.4
80MK10PA10AW-10M(2.5)	386	48	48	369	148	0.34	360.4	447.3	478.7	524.2
60MK20PA20AW-10M(2.5)	290	97	97	369	148	0.34	150.0	197.7	228.3	255.1

ตารางที่ ก.12 แสดงอัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แต่ละสูตร (NS/NH = 0.5, 1.5 และ 2.5; ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH 15 โมลาร์)

สัญลักษณ์ตัวอย่าง	วัสดุตั้งต้น			สารเคมี		ของเหลว/ ของแข็ง (w/b)	กำลังอัด เฉลี่ย 1 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 7 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 14 วัน (กก./ซม. ²)	กำลังอัด เฉลี่ย 28 วัน (กก./ซม. ²)
	ดินขาวเผา	เถ้าปาล์ม	กากอลูมินา	Na ₂ SiO ₃	NaOH					
	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)					
100MK0PA0AW-15M(0.5)	483	0	0	173	345	0.36	326.5	278.3	282.3	312.0
100MK0PA0AW-15M(1.5)	483	0	0	311	207	0.33	600.7	675.4	682.3	732.0
100MK0PA0AW-15M(2.5)	483	0	0	369	148	0.31	933.2	1007.2	1015.5	1044.8
80MK20PA0AW-15M(0.5)	386	97	0	173	345	0.36	132.4	160.1	170.2	192.0
60MK40PA0AW-15M(0.5)	290	193	0	173	345	0.36	135.0	154.1	158.5	173.9
80MK20PA0AW-15M(1.5)	386	97	0	311	207	0.33	354.3	411.6	432.0	485.5
60MK40PA0AW-15M(1.5)	290	193	0	311	207	0.33	176.4	210.1	224.5	238.2
80MK20PA0AW-15M(2.5)	386	97	0	369	148	0.31	526.4	630.3	685.2	752.4
60MK40PA0AW-15M(2.5)	290	193	0	369	148	0.31	183.2	235.8	274.0	332.2
80MK10PA10AW-15M(0.5)	386	48	48	173	345	0.36	195.5	235.2	248.8	266.8
60MK20PA20AW-15M(0.5)	290	97	97	173	345	0.36	120.6	146.5	155.2	175.9
80MK10PA10AW-15M(1.5)	386	48	48	311	207	0.33	348.4	417.8	425.2	459.6
60MK20PA20AW-15M(1.5)	290	97	97	311	207	0.33	142.3	165.0	177.8	210.2
80MK10PA10AW-15M(2.5)	386	48	48	369	148	0.31	502.0	547.7	584.1	615.5
60MK20PA20AW-15M(2.5)	290	97	97	369	148	0.31	268.3	322.1	335.2	350.2

แสดงรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอโพลิเมอร์เฟส

ตัวอย่างข้อมูลจีโอโพลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 100%

Mixed ID : 100MK0PA0AW-15M(2.5)

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

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	Alumina w.	[Na ₂ SiO ₃]	[NaOH]	Vol. (kg.)	Total	
		0.483	-	-	0.369	0.148	1.000	mass	mole
[SiO ₂]	60.084	48.080	-	-	32.870	-	-	35.36	0.59
[Al ₂ O ₃]	101.961	37.200	-	-	-	-	-	17.97	0.18
[Na ₂ O]	61.979	-	-	-	25.160	44.000	-	15.82	0.26
[H ₂ O]	18.015	-	-	-	41.970	56.000	-	23.80	1.32

Metakaolin	=	483	กรัม
Palm ash	=	0	กรัม
Alumina waste	=	0	กรัม
Na ₂ SiO ₃ (aq)	=	369	กรัม
NaOH (aq)	=	148	กรัม

Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na ₂ O / SiO ₂	0.43	0.20-0.48
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	3.34	3.30-4.50
H ₂ O / Na ₂ O	5.18	10-25
Na ₂ O / Al ₂ O ₃	1.45	0.80-1.20
W/B	0.31	0.30-0.40

*หมายเหตุ [Na₂SiO₃]+ [NaOH] คือ ส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ตัวอย่างข้อมูลจีโอโพลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 80% : เถ้าปล่ม 20%

Mixed ID : 80MK20PA0AW-15M(2.5)

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

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	Alumina w.	[Na ₂ SiO ₃]	[NaOH]	Vol. (kg.)	Total	
		0.386	0.097	-	0.369	0.148	1.000	mass	mole
[SiO ₂]	60.084	48.080	45.880	-	32.870	-	-	35.14	0.58
[Al ₂ O ₃]	101.961	37.200	0.640	-	-	-	-	14.44	0.14
[Na ₂ O]	61.979	-	-	-	25.160	44.000	-	15.82	0.26
[H ₂ O]	18.015	-	-	-	41.970	56.000	-	23.80	1.32

Metakaolin	=	386	กรัม
Palm ash	=	97	กรัม
Alumina waste	=	0	กรัม
Na ₂ SiO ₃ (aq)	=	369	กรัม
NaOH (aq)	=	148	กรัม

Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na ₂ O / SiO ₂	0.44	0.20-0.48
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	4.13	3.30-4.50
H ₂ O / Na ₂ O	5.18	10-25
Na ₂ O / Al ₂ O ₃	1.80	0.80-1.20
W/B	0.31	0.30-0.40

*หมายเหตุ [Na₂SiO₃]+ [NaOH] คือ ส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ตัวอย่างข้อมูลจีโอโพลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 60% : เถ้าปลั่ม 40%

Mixed ID : 60MK40PA0AW-15M(2.5)

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

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	Alumina w.	[Na ₂ SiO ₃]	[NaOH]	Vol. (kg.)	Total	
		0.290	0.193	-	0.369	0.148	1.000	mass	mole
[SiO ₂]	60.084	48.080	45.880	-	32.870	-	-	34.93	0.58
[Al ₂ O ₃]	101.961	37.200	0.640	-	-	-	-	10.90	0.11
[Na ₂ O]	61.979	-	-	-	25.160	44.000	-	15.82	0.26
[H ₂ O]	18.015	-	-	-	41.970	56.000	-	23.80	1.32

Metakaolin	=	290	กรัม
Palm ash	=	193	กรัม
Alumina waste	=	0	กรัม
Na ₂ SiO ₃ (aq)	=	369	กรัม
NaOH (aq)	=	148	กรัม

Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na ₂ O / SiO ₂	0.44	0.20-0.48
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	5.44	3.30-4.50
H ₂ O / Na ₂ O	5.18	10-25
Na ₂ O / Al ₂ O ₃	2.39	0.80-1.20
W/B	0.31	0.30-0.40

*หมายเหตุ [Na₂SiO₃]+ [NaOH] คือ ส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ตัวอย่างข้อมูลจีโอโพลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 80% : ใ้ป่าล้่ม 10% : กากอลูมิน่า 10%

Mixed ID : 80MK10PA10AW-15M(2.5)

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

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	Alumina w.	[Na ₂ SiO ₃]	[NaOH]	Vol. (kg.)	Total	
		0.386	0.048	0.048	0.369	0.148	1.000	mass	mole
[SiO ₂]	60.084	48.080	45.880	0.090	32.870	-	-	32.93	0.55
[Al ₂ O ₃]	101.961	37.200	0.640	77.930	-	-	-	18.17	0.18
[Na ₂ O]	61.979	-	-	-	25.160	44.000	-	15.82	0.26
[H ₂ O]	18.015	-	-	-	41.970	56.000	-	23.80	1.32

Metakaolin	=	386	กรัม
Palm ash	=	48	กรัม
Alumina waste	=	48	กรัม
Na ₂ SiO ₃ (aq)	=	369	กรัม
NaOH (aq)	=	148	กรัม

Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na ₂ O / SiO ₂	0.47	0.20-0.48
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	3.08	3.30-4.50
H ₂ O / Na ₂ O	5.18	10-25
Na ₂ O / Al ₂ O ₃	1.43	0.80-1.20
W/B	0.31	0.30-0.40

*หมายเหตุ [Na₂SiO₃]+ [NaOH] คือ ส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ตัวอย่างข้อมูลจีโอโพลิเมอร์สูตรดินขาวเผา 60% : ฝ้าปลั้ม 20% : กากอลูมิน่า 20%

Mixed ID : 60MK20PA20AW-15M(2.5)

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

Chemical Composition	[MW]	Metakaolin	Palm ash	Alumina w.	[Na ₂ SiO ₃]	[NaOH]	Vol. (kg.)	Total	
		0.290	0.097	0.097	0.369	0.148	1.000	mass	mole
[SiO ₂]	60.084	48.080	45.880	0.090	32.870	-	-	30.51	0.51
[Al ₂ O ₃]	101.961	37.200	0.640	77.930	-	-	-	18.37	0.18
[Na ₂ O]	61.979	-	-	-	25.160	44.000	-	15.82	0.26
[H ₂ O]	18.015	-	-	-	41.970	56.000	-	23.80	1.32

Metakaolin	=	290	กรัม
Palm ash	=	97	กรัม
Alumina waste	=	97	กรัม
Na ₂ SiO ₃ (aq)	=	369	กรัม
NaOH (aq)	=	148	กรัม

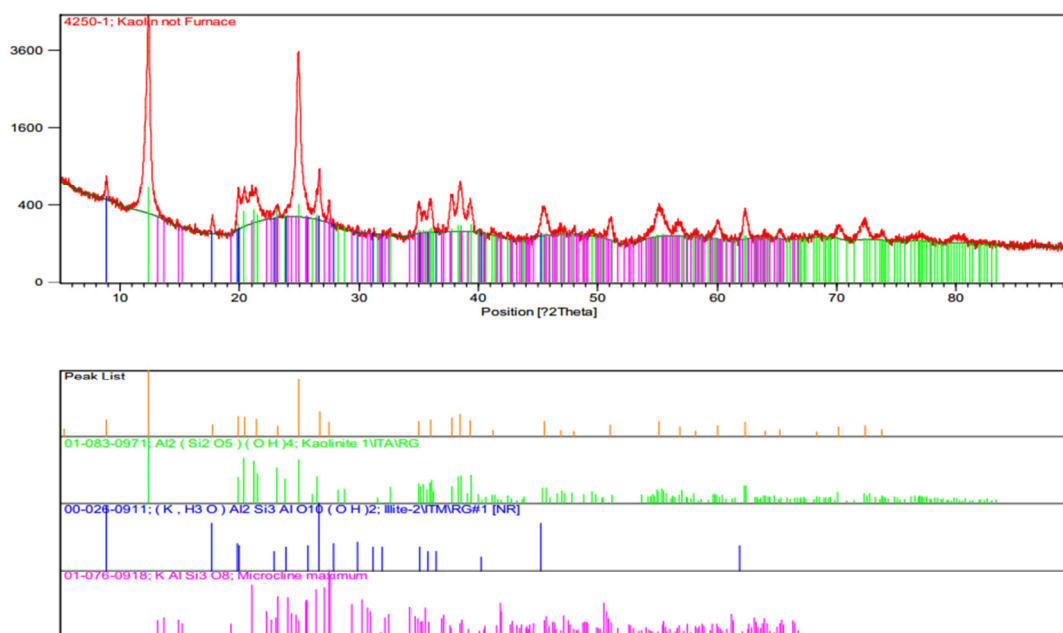
Oxide-Mole Ratios	Mixed	Rec.
Na ₂ O / SiO ₂	0.50	0.20-0.48
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	2.82	3.30-4.50
H ₂ O / Na ₂ O	5.18	10-25
Na ₂ O / Al ₂ O ₃	1.42	0.80-1.20
W/B	0.31	0.30-0.40

*หมายเหตุ [Na₂SiO₃]+ [NaOH] คือ ส่วนที่เป็นของแข็งในสารละลาย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD

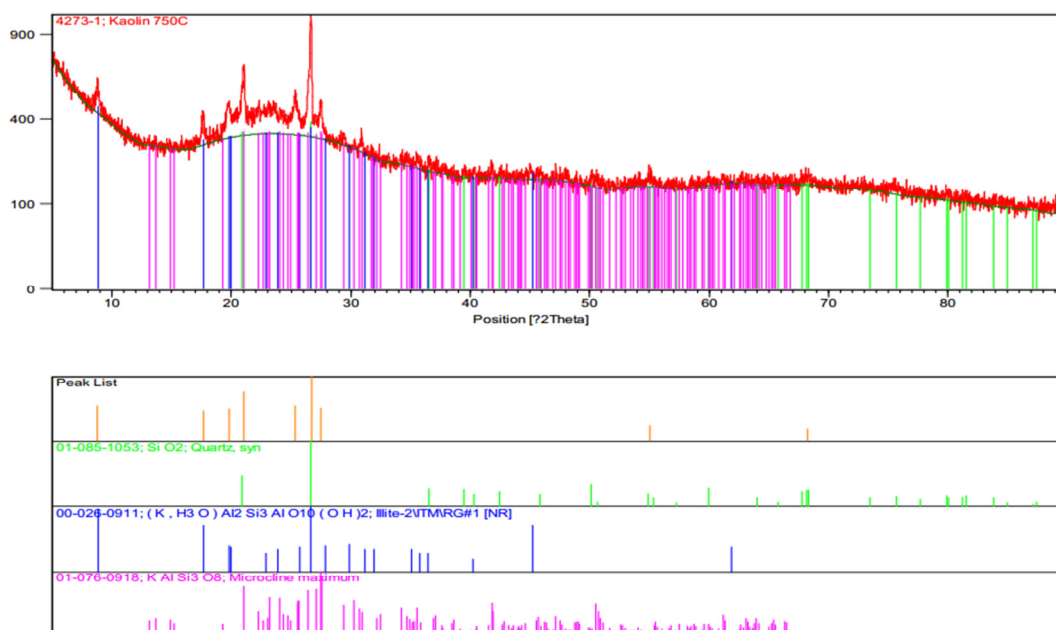
1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองโดยใช้เทคนิค XRD



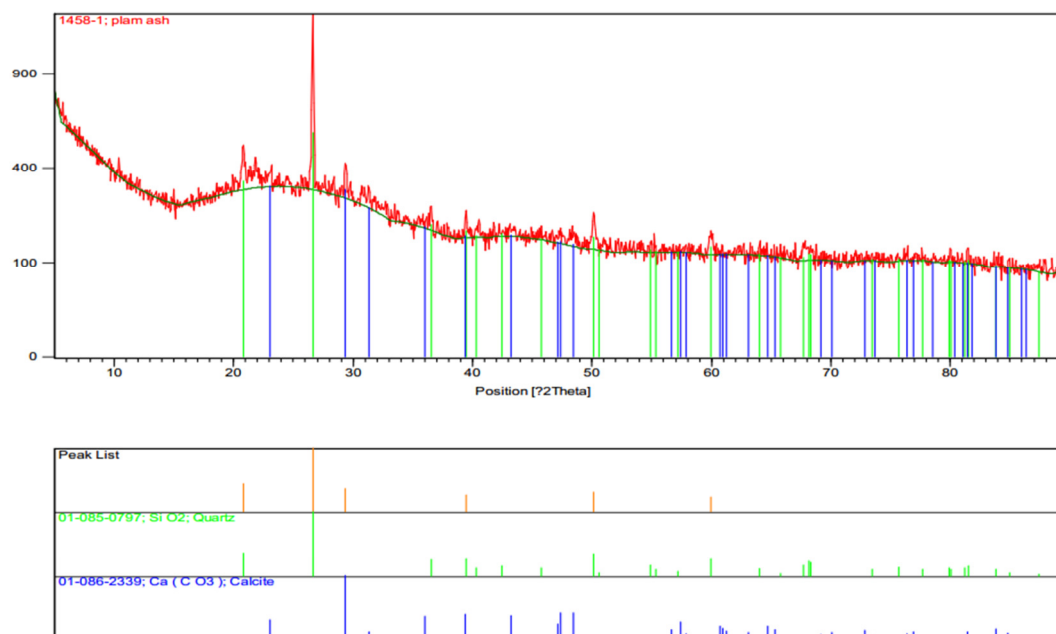
รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวที่ไม่ทำการเผา



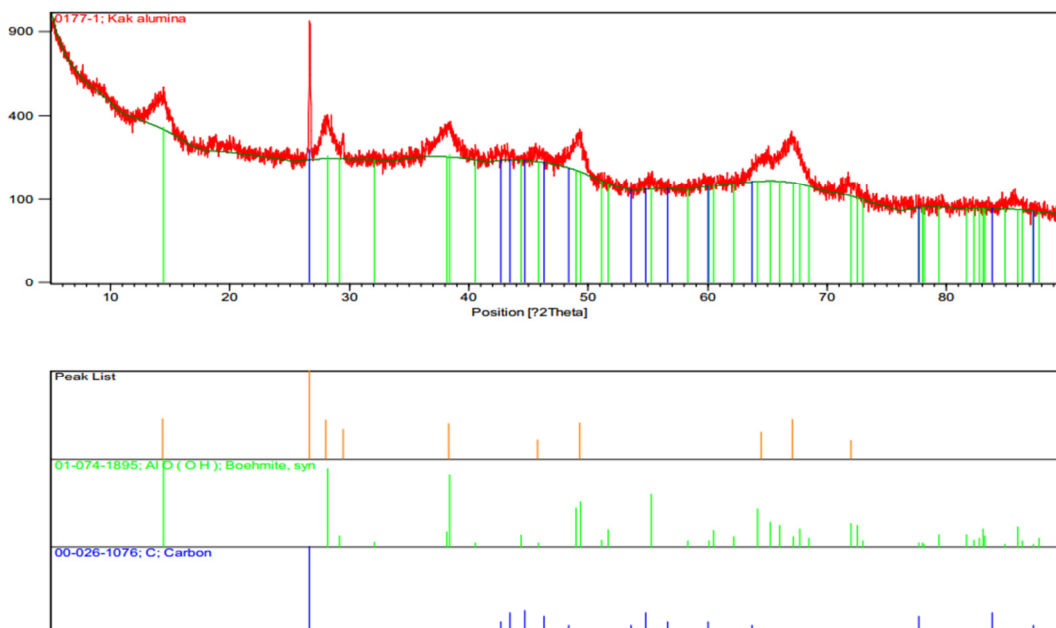
รูปที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของดินขาวเผาที่ 750°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

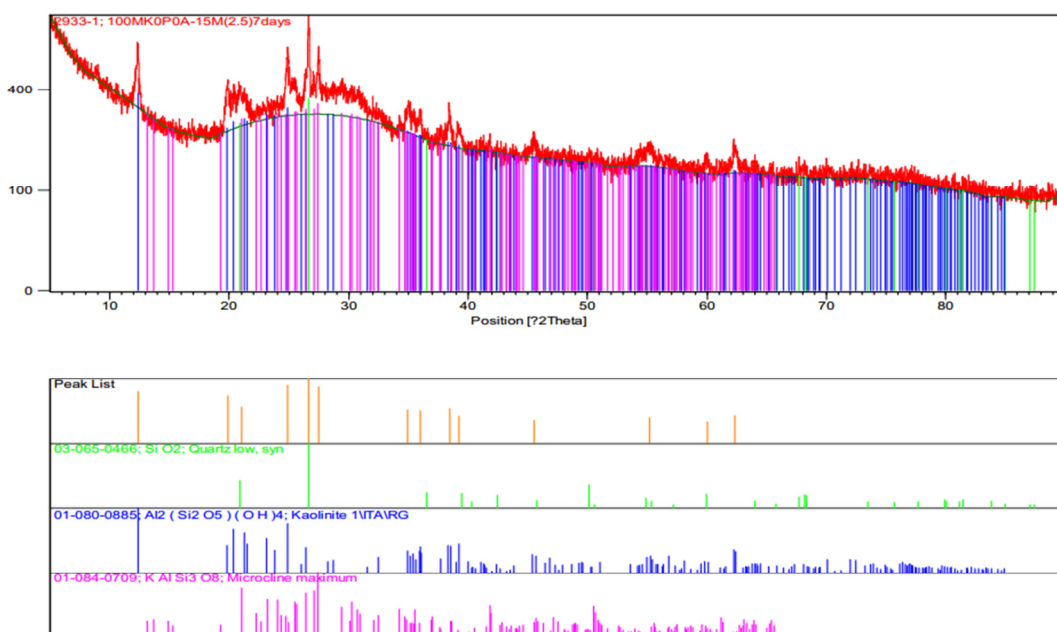


รูปที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของเถ้าปาล์ม

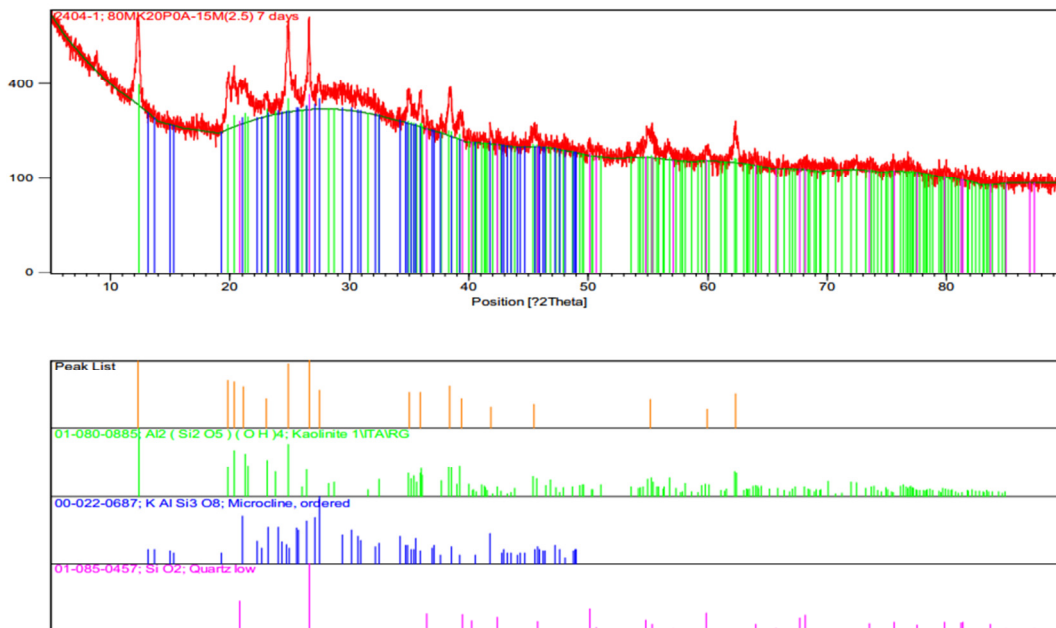


รูปที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของกากอลูมิน่า

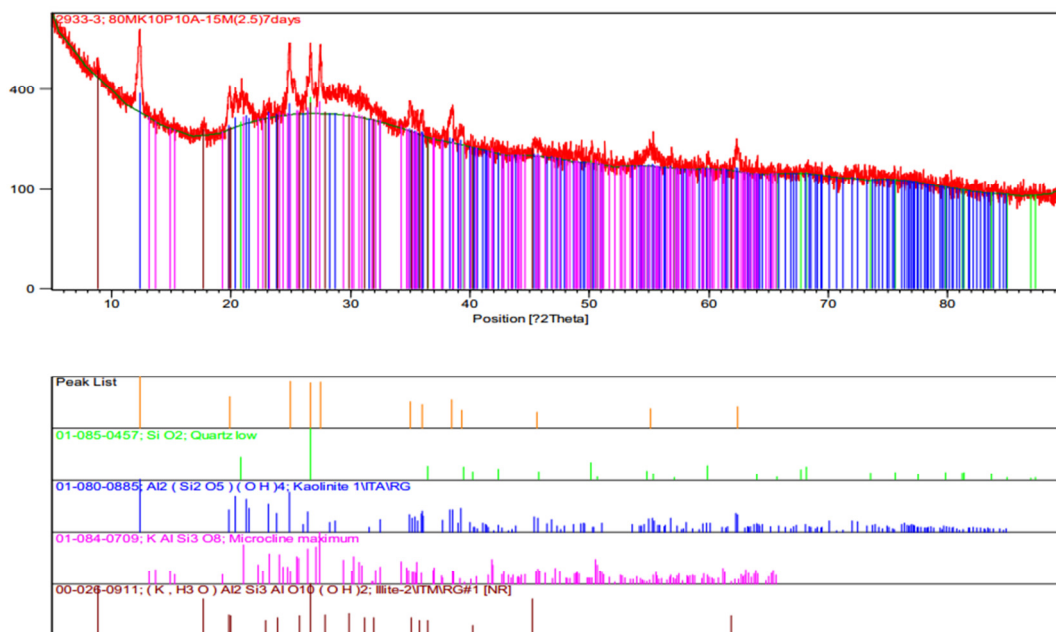
2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์โดยใช้เทคนิค XRD



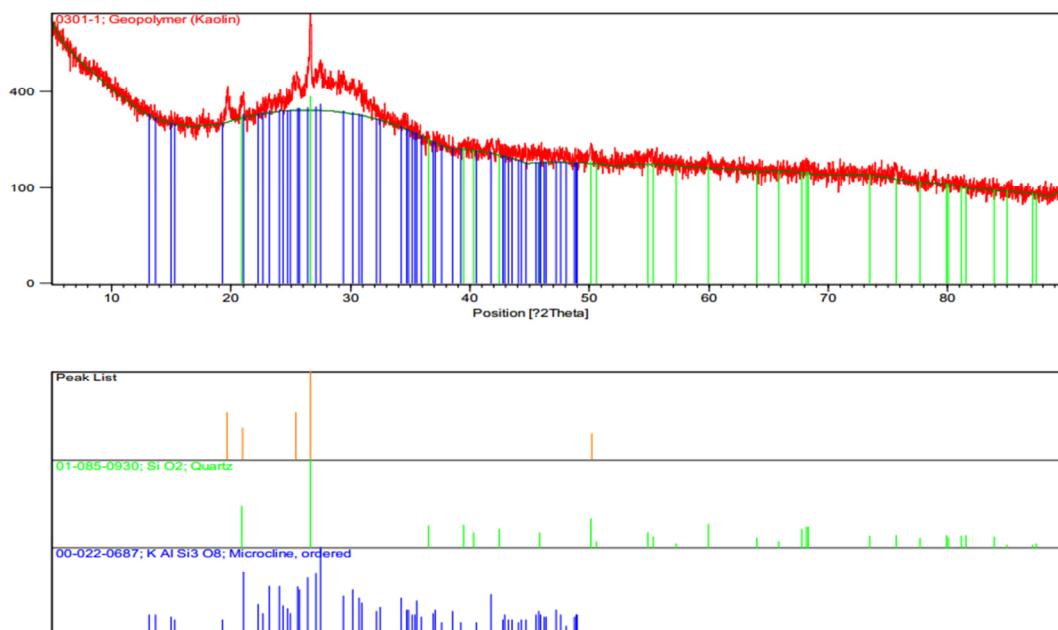
รูปที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0P0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน



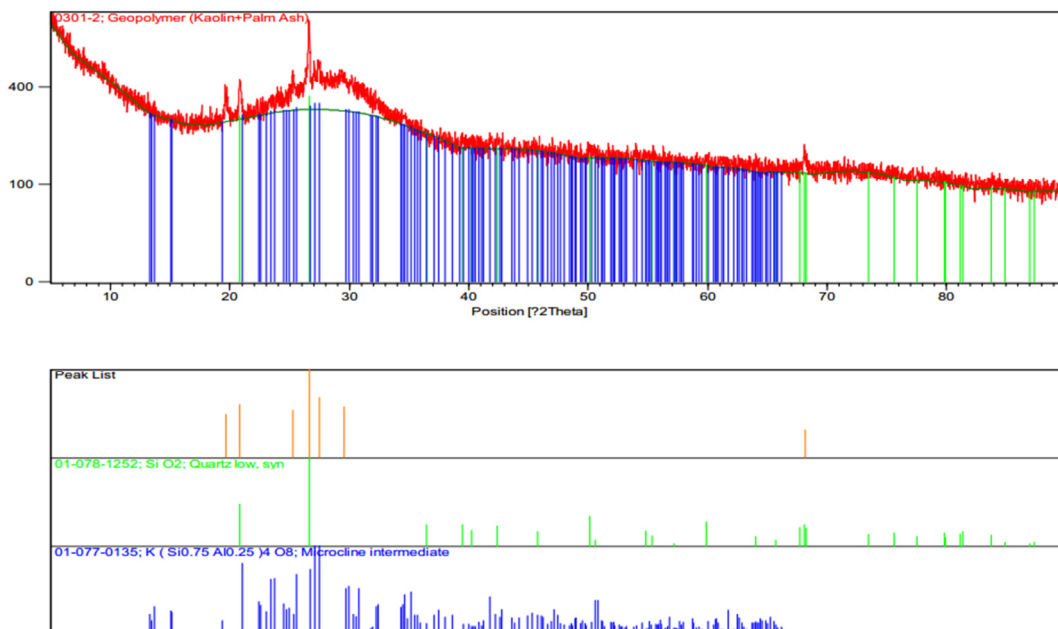
รูปที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน



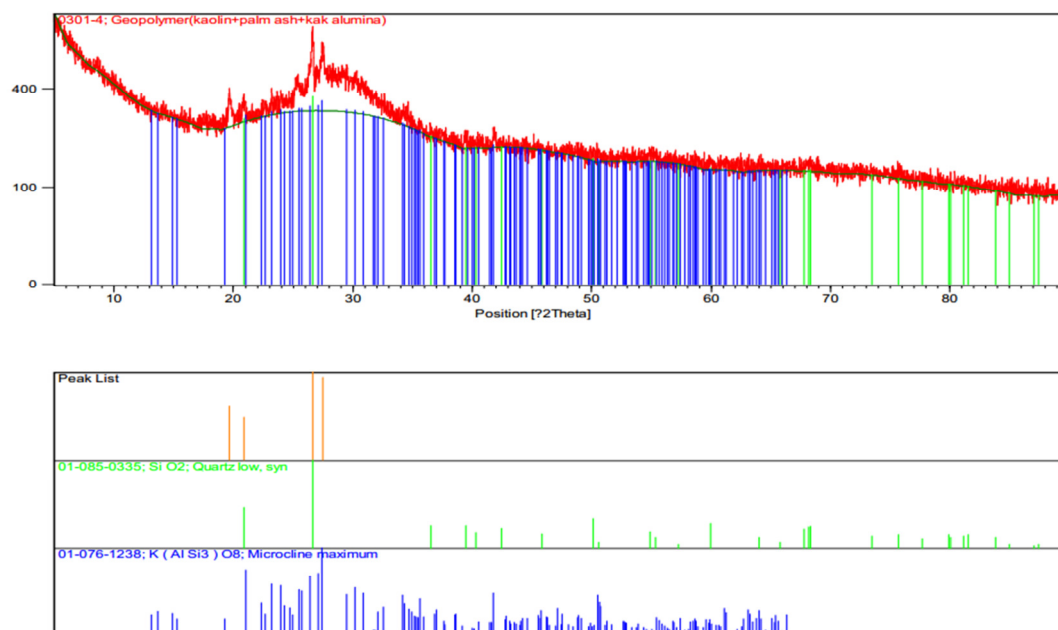
รูปที่ ข.8 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 7 วัน



รูปที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 100MK0PA0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ ข.10 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK20PA0AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของจีโอโพลิเมอร์สูตร 80MK10PA10AW-15M(2.5) ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายอาภากร พรหมเพชร

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5410120019

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENV550381S
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2555

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อาภากร พรหมเพชร, ธนันท์ ชูบอุปการ และชัยศรี สุขสาโรจน์. อิทธิพลของเจ้าปลาล้มและกากอลูมิน่าต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 12. ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออร์คิด, ขอนแก่น. วันที่ 27-29 มีนาคม 2556.