

# การพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2558

**DEVELOPMENT OF THE CEMENT REPLACEMENT  
MATERIAL FROM WATER TREATMENT SLUDGE  
AND RICE HUSK ASH**

**Ekkasit Sirisurawong**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Agricultural and Food Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2015**

## การพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(ผศ. ดร. พยงค์ศักดิ์ จุลยูเสนา)

ประธานกรรมการ

---

(ผศ. ดร. วีระชัย อาจหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

---

(ผศ. ดร. อนรรตน์ ภูวานคำ)

กรรมการ

---

(ผศ. ดร. วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน)

กรรมการ

---

(อ. ดร. พรรษา ลิบลับ)

กรรมการ

---

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

---

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เอกสิทธิ์ ศิริสุวรรณวงศ์ : การพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินตะกอนประปาและ  
เถ้าแกลบ (DEVELOPMENT OF THE CEMENT REPLACEMENT MATERIAL FROM  
WATER TREATMENT SLUDGE AND RICE HUSK ASH) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช อัจหาญ, 102 หน้า

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกใช้ในงานก่อสร้างอย่างกว้างขวางในสังคมมนุษย์ อย่างไรก็ตาม  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในกระบวนการผลิตต้องใช้พลังงานสูง  
และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุหลักของสภาวะ  
โลกร้อน จีโอพอลิเมอร์เป็นหัวข้อที่ถูกศึกษาอย่างมาก ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
เพราะจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุของเสียที่  
หลากหลาย ดินตะกอนประปาเป็นของเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเพื่อผลิตน้ำประปา ดินตะกอน  
ประปาจึงเป็นปัญหาของเมืองใหญ่ทั่วโลก วิธีที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาดินตะกอนประปา  
คือนำมาใช้ซ้ำหรือแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานได้ เถ้าแกลบเป็นของเสียจากการเกษตร เป็น  
แหล่งของซิลิกาที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย และสามารถใส่เถ้าแกลบเพื่อควบคุมสมบัติของจีโอพอลิเมอร์  
เป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อพัฒนาจีโอพอลิเมอร์โดยการใช้ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบเป็น  
สารตั้งต้น ส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตถูกใช้เป็นสารละลายที่ใช้ทำ  
ปฏิกิริยา ผลของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จาก  
ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 3 เท่าตัว ความ  
แข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบใกล้เคียงกับค่าความ  
แข็งแรงขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา  
คือ 60 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน  
โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิในการบ่มจะส่งผลให้ความแข็งแรงของ  
จีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง สภาวะที่เหมาะสมในการ  
ทดแทนดินตะกอนประปาด้วยเถ้าแกลบคือร้อยละ 30 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อบ่มชิ้นงานที่  
อุณหภูมิห้องและ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบจะส่งผลให้ความหนาแน่น  
ของจีโอพอลิเมอร์ลดลงเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง และการเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบส่งผลให้หน่วง  
เวลาในการก่อตัว

งานวิจัยนี้เปิดโอกาสให้ประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาและ  
เถาเถาเพื่อใช้ในการงานทางวิศวกรรมที่หลากหลาย โดยเฉพาะวัสดุก่อสร้างมวลเบา



สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตรและอาหาร  
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

EKKASIT SIRISURAWONG : DEVELOPMENT OF THE CEMENT  
REPLACEMENT MATERIAL FROM WATER TREATMENT SLUDGE  
AND RICE HUSK ASH. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI  
ARJHARN, Ph.D., 102 PP.

GEOPOLYMER/GEOPOLYMERIZATION/CEMENT REPLACEMENT  
MATERIAL/WATER TREATMENT SLUDGE/RICE HUSK ASH

Ordinary Portland cement (OPC) is widely used for construction works in human society. However, OPC has negative environment impacts because the production of OPC requires high energy consumption and emits high quantities of carbon dioxide gas, which is the main cause of the global warming. Geopolymer has been the subject of intense study as the OPC replacement material, because geopolymer is an environmental friendly material and can be synthesized from variety kinds of waste materials. Water treatment sludge (WTS) is a waste from water treatment process in production of tap water. WTS is a problem of big city around the world. The effective way to solve the problem of WTS is re-used or processed it to be usable products. Rice husk ash (RHA) is the agricultural waste. RHA is a source of reactive silica, and can be used to control the properties of geopolymer. The aim of this thesis is to develop a geopolymer by using WTS and RHA as precursors. The mixture of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) is used as the alkali activator. The results of this research show that the density of the WTS-RHA geopolymer is approximately 3 times lower than that of OPC. The strength of the WTS-RHA geopolymer meets the minimum requirement of OPC. The optimum condition for calcined WTS is 600 °C for 4 hours. Strength of geopolymer is

increased, while the setting time of geopolymer is reduced with increasing the sodium hydroxide concentration, the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide and the curing temperature. The optimum condition for replacement WTS by RHA is 30% and 40% RHA replacement for the cured geopolymer at room temperature and 60 °C, respectively. By increasing the amount of RHA replacement with curing at room temperature, density of geopolymer is reduced. The increasing of the RHA replacement leads to delay of the setting time. This research opens an opportunity to apply the WTS-RHA geopolymer for using in variety kinds of engineering applications, especially lightweight construction materials.



School of Agricultural and Food Engineering Student's Signature\_\_\_\_\_

Academic Year 2015 Advisor's Signature\_\_\_\_\_

Co-Advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยการสนับสนุน ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบุคคลที่กรุณาให้ความสนับสนุนอย่างดียิ่งในทุกด้าน ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช อัจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ ภูวนคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา และให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยิ่ง

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลย์สุข ที่กรุณาให้การสนับสนุนวัสดุคิบบและอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดลอง และให้ความอนุเคราะห์เรียงเรียงและตรวจสอบความสมบูรณ์ของเนื้อหาในงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยเสน อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ อาจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ และคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สอนวิชาความรู้ด้านวิศวกรรมเกษตร และให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก รองศาสตราจารย์ ดร.สุทิน ภูเขาเรืองรอง Asst. Prof. Dr. Shigeki Morimoto ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สอนวิชาความรู้ด้านวิศวกรรมเซรามิกเป็นอย่างดี

คณะบุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล และบุคลากรศูนย์เครื่องมือทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ให้การสนับสนุน และหยิบยื่นน้ำใจไมตรี

รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร และอาจารย์ ดร.วิระยุทธ ลอประยูร อาจารย์ที่ผู้วิจัยเคารพเสมือนมารดาและบิดาทางการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์เซรามิก

ดร.พิไลลักษณ์ กาบบาลี ภรรยาผู้ให้ความรักและกำลังใจที่สำคัญของข้าพเจ้า

คุณแม่สิรินทร์พร ศิริสุวรรณค์ มารดาผู้ให้กำเนิด ให้ทุกสิ่ง ให้ความรัก ให้ความอบอุ่นและให้กำลังใจที่สำคัญของข้าพเจ้าตลอดไป

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอตอบแทนโดยใช้ความรู้ความสามารถในทางที่ดีและเกิดประโยชน์แก่ส่วนรวม อุทิศถวายเป็นพระราชกุศลแด่พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช รัชกาลที่ 9

เอกสิทธิ์ ศิริสุวรรณค์



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ไทย).....	ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ).....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 จีโอพอลิเมอร์.....	5
2.1.1 การค้นพบจีโอพอลิเมอร์.....	5
2.1.2 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์.....	5
2.1.3 การใช้งานจีโอพอลิเมอร์ในงานวิศวกรรม.....	6
2.1.4 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	8
2.1.5 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและการให้กำลังรับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์.....	10
2.1.6 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์.....	12
2.1.7 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์.....	15
2.1.7.1 ความเข้มข้นของ NaOH.....	15
2.1.7.2 อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ .....	18
2.1.7.3 อัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลาย.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.7.4	อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม.....	20
2.1.7.5	อุณหภูมิในการบ่ม .....	21
2.2	แก้วเคลือบ .....	21
2.2.1	แหล่งที่มาของแก้วเคลือบ .....	21
2.2.2	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วเคลือบชนิดต่างๆ.....	22
2.2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแก้วเคลือบและวัสดุปอซโซลาน .....	22
2.2.4	ผลของการเติมแก้วเคลือบต่อสมบัติของคอนกรีต .....	22
2.2.5	ปริมาณการผลิตแก้วเคลือบและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของแก้วเคลือบ .....	23
2.3	ดินตะกอนประปา.....	24
2.3.1	ที่มาของดินตะกอนประปา.....	24
2.3.2	องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของดินตะกอนประปา.....	26
2.3.3	ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของดินตะกอนประปา .....	27
2.3.4	การใช้ประโยชน์จากดินตะกอนประปา .....	27
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27
2.4.1	การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา.....	27
2.4.2	การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนเตาถลุงเหล็ก .....	28
2.4.3	การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย.....	29
2.4.4	การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากวัสดุอื่นๆ.....	30
3	วัสดุและวิธีการทดลอง.....	32
3.1	อุปกรณ์การทดลอง .....	32
3.2	วัสดุและสารเคมี .....	33
3.2.1	โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด (Sodium hydroxide pellets) .....	33
3.2.2	โซเดียมซิลิเกตชนิดสารละลาย (Sodium silicate solution) .....	33
3.3	การออกแบบการทดลอง.....	33
3.3.1	การทดลองตอนที่ 1 .....	33
3.3.2	การทดลองตอนที่ 2.....	35
3.4	วิธีการทดลอง .....	36

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1	การเตรียมผงจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา .....	36
3.4.2	การเตรียมผงตัวเติมซิลิกาจากเถ้าแกลบ .....	37
3.4.3	การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์ .....	37
3.4.4	การขึ้นรูปและการบ่มจีโอพอลิเมอร์ .....	37
3.5	การทดสอบสมบัติ .....	39
3.5.1	การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค .....	40
3.5.2	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน .....	41
3.5.3	การทดสอบเวลาในการก่อตัว .....	42
3.5.4	การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมี .....	43
3.5.5	การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟส .....	44
3.5.6	การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง .....	45
3.5.7	การวัดกำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน .....	47
3.5.8	การทดสอบความหนาแน่น .....	48
3.6	การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ .....	49
<b>4</b>	<b>ผลการทดลองและอภิปรายผล .....</b>	<b>50</b>
4.1	ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ .....	50
4.2	ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของดินตะกอนประปา .....	51
4.3	การกระจายขนาดอนุภาคของผงดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ .....	52
4.4	ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟสของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ .....	53
4.5	การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ .....	54
4.6	ผลของสภาวะการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ .....	55
4.7	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ .....	59
4.8	ผลของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ .....	62
4.9	ผลของอัตราส่วนระหว่างผงดินตะกอนประปาต่อปริมาณสารละลายต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ .....	65

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.10	ผลของเก้า้เกลบและอุณหภูมิในการบ่มต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์.....	68
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	72
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	72
5.1.1	สภาวะการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา.....	72
5.1.2	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	73
5.1.3	อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	73
5.1.4	อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลาย.....	73
5.1.5	ปริมาณการเติมเก้า้เกลบ.....	73
5.1.6	อุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ .....	74
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	74
	รายการอ้างอิง.....	75
	ภาคผนวก ก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	87
	ประวัติผู้เขียน .....	102

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....32
3.2	แสดงวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....33
3.3	แสดงตัวแปรในการทดลองตอนที่ 1 .....34
3.4	แสดงตัวแปรในการทดลองตอนที่ 2 .....35
4.1	แสดงผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ .....50



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงการใช้งานจีโอพอลิเมอร์ตามชนิดอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม.....7
2.2	แสดงปฏิกิริยาเคมีชนิดซีเมนต์ไฮดรชันเปรียบเทียบกับชนิดจีโอพอลิเมอร์เรซิน.....9
2.3	แสดงแบบจำลองกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซิน.....11
2.4	แสดงโครงสร้างเคมีของไซอะเลต.....13
2.5	แสดงตัวอย่างโครงสร้างที่ถูกเชื่อมต่อโดยไซอะเลตลิงค์.....14
2.6	แสดงการเข้าปรับสมดุลประจุ $AlO_4^-$ ด้วย $Na^+$ ในโครงสร้างไซอะเลต.....14
2.7	แสดงตัวอย่างแบบวงของไซอะเลต.....15
2.8	แสดงโครงข่ายของโพลีไซอะเลตขณะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซิน.....16
2.9	แสดงแผนภูมิเฟสของส่วนผสมระหว่างไซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ.....17
2.10	แสดงการปรับสมดุลประจุโครงสร้างทรงสี่หน้าของอะลูมินตโดยไซเดียมไอออน.....18
2.11	แสดงแผนภูมิเทอร์นารีของระบบ $Na_2O-SiO_2-H_2O$ ที่อุณหภูมิห้อง.....19
2.12	แสดงผังกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง.....25
3.1	แสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....36
3.2	แสดง Cubic molds 50x50 mm. บริษัทผู้ผลิต Reco รุ่น C-010.....38
3.3	แสดงเครื่อง Laser scattering particle size distribution analyzer (LPA).....40
3.4	แสดงเครื่อง Differential thermal analyzer (DTA).....41
3.5	แสดงเครื่อง Gilmore needle.....42
3.6	แสดงเครื่อง X-ray fluorescence (XRF).....43
3.7	แสดงเครื่อง X-ray diffractometer (XRD).....44
3.8	แสดงเครื่อง Ion sputtering device.....45
3.9	แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM).....46
3.10	แสดงการทดสอบอากาศชื้นงานด้วยเครื่องทดสอบอากาศและหม้อดูดความชื้น.....49
4.1	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนระหว่างดินเคโอลินและดินตะกอนประปา ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์.....51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของผงดินตะกอนประปา (WTS) และถ้ำเกลบ (RHA).....	52
4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของผงดินตะกอนประปา (WTS) และถ้ำเกลบ (RHA) โดย C, M และ Q แสดงเฟสของแร่คริสโตบาไลต์ มัสโคไวต์ และควอทซ์ ตามลำดับ.....	53
4.4 แสดงรูปถ่ายระดับจุลภาคของ (a) ผงดินตะกอนประปา และ (b) ผงถ้ำเกลบจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	54
4.5 แสดงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา.....	55
4.6 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ อุณหภูมิและเวลาต่างกัน .....	56
4.7 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ อุณหภูมิและเวลาต่างกัน .....	57
4.8 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ อุณหภูมิและเวลาต่างกัน .....	58
4.9 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน .....	59
4.10 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน .....	60
4.11 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน .....	61
4.12 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโซเดียม ซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน.....	62
4.13 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโซเดียม ซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน.....	63
4.14 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโซเดียม ซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน.....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนผงดิน ตะกอนประปาต่อสารละลายต่างกัน .....	65
4.16 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนผงดิน ตะกอนประปาต่อสารละลายต่างกัน .....	66
4.17 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนผงดิน ตะกอนประปาต่อสารละลายต่างกัน .....	67
4.18 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเติมเถ้าแกลบและมี อุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ต่างกัน .....	68
4.19 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเติมเถ้าแกลบและมี อุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ต่างกัน .....	69
4.20 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเติมเถ้าแกลบและมี อุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ต่างกัน .....	70
4.21 แสดงรูปถ่ายระดับจุลภาคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอน ประปาและเถ้าแกลบ ที่เติมเถ้าแกลบร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และถูกบ่มที่ (a) อุณหภูมิห้อง และที่ (b) 60 องศาเซลเซียส .....	71



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

น้ำประปาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความจำเป็นต่อการดำเนินชีวิต ทั้งการใช้งานในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม การผลิตน้ำประปาให้เพียงพอต่อความต้องการจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการดำเนินชีวิต หนึ่งในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา คือ การทำน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติให้ใส ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดกากดินตะกอนเป็นจำนวนมาก โรงผลิตน้ำประปาบางแห่งมีกากดินตะกอนเกิดขึ้นหลายสิบตันต่อสัปดาห์ (สุภิญญา สอนง่าย, 2552, ชัชพันธ์ ชาติ, 2007, เพิ่มพล กาญจนามัย, 2003) กากดินตะกอนเหล่านี้ไม่ได้ถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์แต่กลับสร้างปัญหาในการกำจัด โรงผลิตน้ำประปาบางแห่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดหลายล้านบาทต่อปี (สุภิญญา สอนง่าย, 2552, ชัชพันธ์ ชาติ, 2007, เพิ่มพล กาญจนามัย, 2003) แนวทางการแก้ปัญหาและบริหารจัดการของเสียเหล่านี้อย่างยิ่งย่น คือ การหาทางนำกากดินตะกอนเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ การวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กากดินตะกอนประปาที่ผ่านมามีอยู่น้อยชิ้น และประสบความสำเร็จเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถนำกากดินตะกอนประปาไปใช้งานได้อย่างจำกัด เช่น การนำกากดินตะกอนประปาไปใช้เป็นส่วนผสมในการทำอิฐสำหรับงานก่อสร้าง (เพิ่มพล กาญจนามัย, 2003, วินัย ชัยเพชร, 2009) การนำไปใช้เป็นส่วนผสมของกระเบื้องหลังคาหินซีเมนต์ (กิตติพงษ์ สุตรสุคนธ์, 2007, อนุรัถย์ จินตนาพันธ์, 2008, ภาคภูมิ กลั่นไฟรี, 2008) และ การนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทสโตนแวร์ (ถาณุ ศิริพงษ์ไพโรจน์, 2007, S. Sangsuk, et al., 2010) ดังนั้นการเพิ่มความหลากหลายและการพัฒนากากดินตะกอนประปาให้สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าจึงมีความจำเป็นต่อการจัดการขอเสียจากการผลิตน้ำประปาอย่างยิ่งย่น หนึ่งในแนวทางดังกล่าวคือ การพัฒนาดินตะกอนประปาเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีมูลค่าและมีความต้องการสูงในปัจจุบัน

เถ้าแกลบ (Rice husk ash) คือ ผลผลิตพลอยได้จากการเผาแกลบ (Rice husk) ซึ่งเป็นของเสียหลักจากการเกษตร แกลบถูกใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าว โรงไฟฟ้าขนาดเล็กและการเผาอิฐและถ่าน เมื่อแกลบถูกเผาภายใต้สภาวะควบคุม เถ้าแกลบที่ได้จะเป็นซิลิกาอสัณฐาน (G. Sua-iam, and N. Makul, 2014, N. Anwar, et al., 2007) และเมื่อพิจารณาถึงความสามารถเชิงปริมาณของเถ้าแกลบแล้วจะพบว่าในแต่ละปีมีการเกษตรกรรมเพื่อผลิตข้าวในหลายภูมิภาคทั่วโลก เนื่องจากข้าว

เป็นอาหารหลักของประชากรในหลายพื้นที่ทั่วโลก การผลิตข้าวทั้งโลกจึงมีปริมาณมหาศาล เช่น ข้าวที่ผลิตได้ในประเทศไทย เมื่อปี 2011 มีปริมาณสูงถึง 32 ล้านตัน (United Nations FAO, 2012) ทำให้ปริมาณแกลบที่ได้จากการสีข้าวมีมากเช่นกัน ปัจจุบันพบว่าแกลบปริมาณมากไม่ได้ถูกนำไปใช้งาน ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและทำความเสียหายให้กับพื้นที่ที่ถูกนำไปทิ้ง ถ้าแกลบถูกนำไปใช้ในงานคอนกรีตหรือวัสดุอื่นที่ก่อให้เกิดมูลค่า ความต้องการทิ้งแกลบจะหมดไป (G. Sua-iam, and N. Makul, 2014)

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ คือวัสดุที่ประสานเนื้อของแข็งเข้าด้วยกันถูกนำไปใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ เช่น ตึก สะพาน ถนน และเขื่อน เป็นต้น การผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีต้นทุนสูง ใช้พลังงานมาก ทำลายทรัพยากรธรรมชาติ และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) จากกระบวนการเผาไหม้ออกสู่สิ่งแวดล้อมปริมาณมาก (R. Khan, et al., 2012) ซึ่งเป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน (Global warming) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันจึงมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจและมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางคือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอพอลิเมอร์ คือวัสดุที่สังเคราะห์ได้โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเข้มข้นของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) และ/หรือ อัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline silicate) กับสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) (P. Duxson, et al., 2007) ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีสถานะเป็นของแข็ง (ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียกสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตดังกล่าวว่าผงจีโอพอลิเมอร์) จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า และปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (J. L. Provis, and J. S. J. van Deventer, 2009)

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ได้ถูกจำแนกตามโครงสร้างทางเคมี โดยแบ่งตามสัดส่วนระหว่าง Si ต่อ Al ได้แก่

Si:Al = 1 เรียก โพลีไซอะเลต (Poly-sialate)

Si:Al = 2 เรียก โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (Poly-sialate-siloxo)

Si:Al = 3 เรียก โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (Poly-sialate-disiloxo)

และ Si:Al มากกว่า 3 เรียก ไซอะเลตลิงค์ (Sialate link) (J. Davidovits, 1994)

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ จะประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา (Alkaline activated solution) และ ผงจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer powder) โดยผงจีโอพอลิเมอร์ สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก วัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ตะกรันเหล็ก (Arc furnace slag) เป็นวัสดุที่ไม่มีพิษ สามารถใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์สำหรับใช้ที่อุณหภูมิสูง (T.W.

Cheng, and J.P. Chiu, 2003) เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลผลิตพลอยได้ (By product) หลักของโรงไฟฟ้าถ่านหิน วัสดุนี้มีศักยภาพที่ดีมากในการใช้กับคอนกรีต (G. Sua-iam, and N. Makul, 2014, ASTM C618, 2011) และดินขาวเผา (Meta-kaolin) วัสดุอสังฐาน ที่ได้จากการเผาดินขาวเพื่อไล่น้ำที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส (K. Ganesan, 2007) ช่วยเร่งเวลาในการก่อตัว (Setting time) และพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุซีอิโพลิเมอร์ โดยเฉพาะการเพิ่มกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ที่สูงขึ้น (M.D. Safiuddin, and J.S. West, 2010, S. Abhilash, 2011) นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้สูงที่ซีอิโพลิเมอร์จะสามารถสังเคราะห์ได้จากของเสีย (Waste) จากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมอื่น อันได้แก่ ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาของเสียจากการจากการผลิตน้ำประปา และปัญหาการทิ้งเถ้าแกลบอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุซีอิโพลิเมอร์โดยใช้ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ เป็นวัตถุดิบหลัก

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์วัสดุซีอิโพลิเมอร์ โดยใช้ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น
- 2) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีอิโพลิเมอร์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ
- 3) เพื่อหาอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำปฏิกิริยากับซีอิโพลิเมอร์
- 4) เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำปฏิกิริยากับซีอิโพลิเมอร์
- 5) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบ่มซีอิโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ

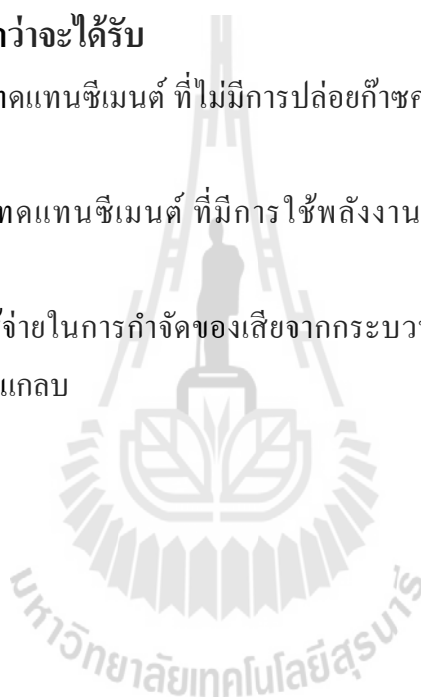
## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) สังเคราะห์วัสดุซีอิโพลิเมอร์โดยใช้ดินตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน และเถ้าแกลบจากโรงสียางสวนเป็นสารตั้งต้น
- 2) ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปา เถ้าแกลบ และวัสดุซีอิโพลิเมอร์ ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของอนุภาค องค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบทางวิฤภาค

- 3) ตรวจสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผงจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการสังเคราะห์
- 4) ตรวจสอบลักษณะของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำปฏิกิริยากับผงจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย สัดส่วนในการผสมสารละลาย และปริมาณที่เหมาะสมในการนำสารละลายไปผสมกับผงทดแทนปูนซีเมนต์
- 5) ตรวจสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบ่มวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้วัสดุทดแทนซีเมนต์ ที่ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้งานและกระบวนการผลิต
- 2) ได้วัสดุทดแทนซีเมนต์ ที่มีการใช้พลังงานในการผลิตต่ำและลดการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ
- 3) ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำประปาและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการทิ้งเถ้าแกลบ



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) คือวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างวัสดุที่มีสารอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) เป็นองค์ประกอบ และสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline activator solution) ซึ่งโดยทั่วไปคือสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมซิลิเกต หลังการเกิดปฏิกิริยาจะได้วัสดุที่มีสมบัติคล้ายกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement, OPC) จีโอพอลิเมอร์ถูกจัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพ สมบัติของจีโอพอลิเมอร์เหมาะสมกับการใช้งาน สามารถใช้ทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้ (J. L. Provis, and J. S. J. van Deventer, 2009)

##### 2.1.1 การค้นพบจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ถูกนักวิทยาศาสตร์จัดให้เป็นซีเมนต์ยุคที่สาม ต่อจากปูนขาว (Lime) และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (B. Singh, I. G. M. Gupta, and S.K. Bhattacharyya, 2015) ในปี 1950 V. Glukhovsky (1989) ได้อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของหินภูเขาไฟกลายเป็นซีโอไลต์ (Zeolite) เกิดจากการก่อตัวของหินตะกอนที่อุณหภูมิและความดันต่ำ ลักษณะดังกล่าวเป็นต้นแบบของซีเมนต์ โดยเรียกอะลูมิเนียม-ซิลิเกตที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ (Alkaline) ว่าซอซิลิเกต (Soil silicates) ต่อมาในปี 1972 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส J. Davidovits (1988d) ได้ตั้งชื่ออะลูมิเนียม-ซิลิเกต ที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิต่ำและใช้เวลานับว่า จีโอพอลิเมอร์ และใช้คำว่า โพลีไซอะเลต (Poly(sialate)) เป็นชื่อทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์ (J. Davidovits, 1988b, J. Davidovits, 1988c, J. Davidovits, and M. Davidovics, 1991) คำว่า ซิลิเกต (Silicate) ย่อมาจากซิลิกอน-ออกซิเจน-อะลูมิเนียม (Silicon-oxo-aluminate) (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) ในปัจจุบันมีหลายชื่อที่ใช้เรียกและบ่งบอกลักษณะของวัสดุนี้ ได้แก่ อัลคาไล-บอนด์-เซรามิก (Alkali-bonded-ceramics) ไฮโดรเซรามิก (Hydroceramics) อัลคาไล-แอคทีเวต-ซีเมนต์ (Alkali-activated-cements) และอินออร์แกนิกพอลิเมอร์ (Inorganic polymer) (P. Duxson และคณะ, 2007)

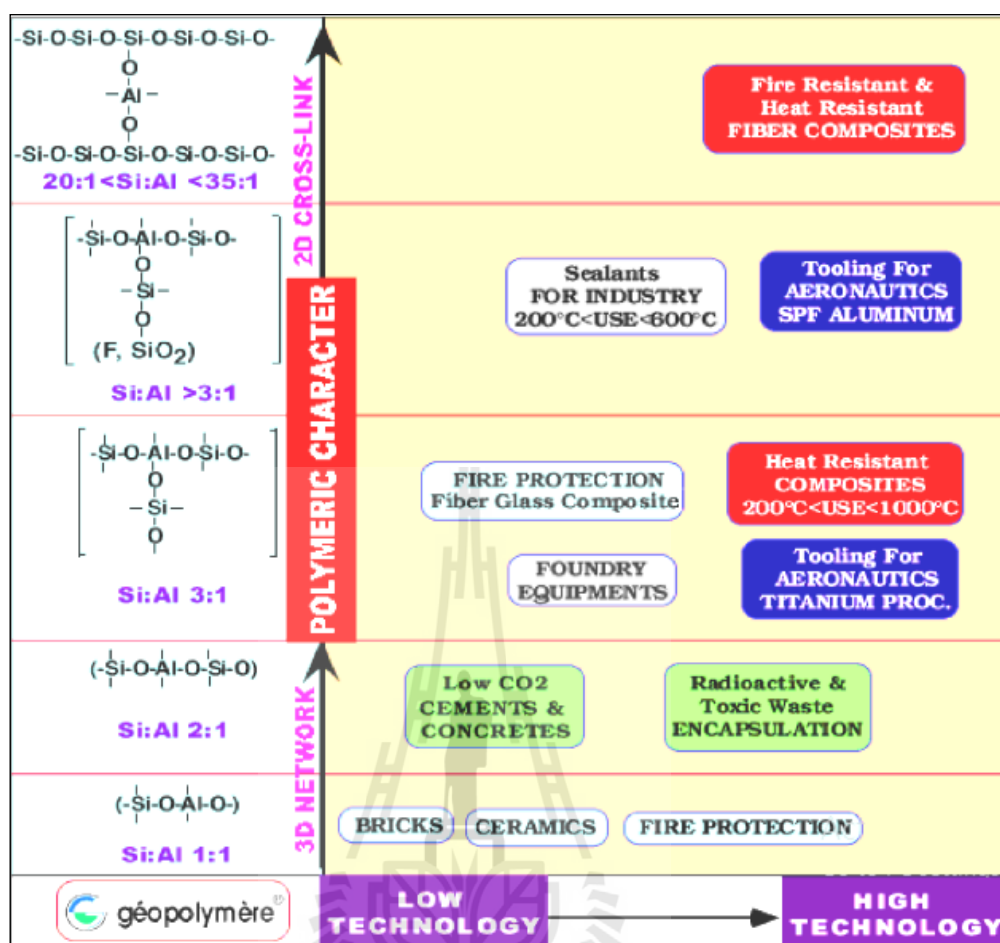
##### 2.1.2 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่สามารถใช้วัตถุดิบที่หลากหลายมาใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ นอกจากการใช้แร่ธาตุอะลูมิเนียมซิลิเกตจากธรรมชาติในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ยังสามารถใช้วัตถุดิบที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมและ

การเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ตะกรันจากการถลุงเหล็ก (Blast furnace slag) เศษแก้ว (Glass waste) และ ีเถ้า (Ash) เป็นต้น จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติทางวิศวกรรมที่โดดเด่นหลายประการณ์ เช่น มีความแข็งแรงในช่วงต้นที่สูง (High early strength) การหดตัวต่ำ (Low shrinkage) ทนทานต่อการเยือกแข็ง-ละลายของน้ำ (Freeze-thaw resistance) ทนทานต่อซัลเฟต (Sulfate resistance) ทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ทนทานต่อกรด (Acid resistance) ทนทานต่อไฟ (Fire resistance) และไม่เกิดอันตรายจากปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-aggregate reaction) (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) เป็นต้น นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ยังมีสมบัติในการแทรกซึมต่ำ กล่าวคือ ไอออนของโลหะหนักถูกยับยั้งการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ (J.S.G. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, and L. Lorenzer, 1995, CANMET Canada, 1988) สมบัติดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการยับยั้งโลหะเป็นพิษในอุตสาหกรรม (J.G.S. van Jaarsveld, and J.S.J. van Deventer, 1996, J. Davidovits, 1994)

### 2.1.3 การใช้งานจีโอพอลิเมอร์ในงานวิศวกรรม

ปัจจุบันการนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมยังไม่แพร่หลายมากนัก ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการใช้งานในทางวิศวกรรม โดย J. Davidovits (1999) ได้จำแนกการใช้งานจีโอพอลิเมอร์ตามโครงสร้างพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ อิฐ คอนกรีต วัสดุกักสารพิษและกัมมันตภาพรังสี วัสดุคอมโพสิตชนิดต่าง ๆ วัสดุสำหรับการสร้างเครื่องบิน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงการใช้งานจีโอพอลิเมอร์ตามชนิดอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

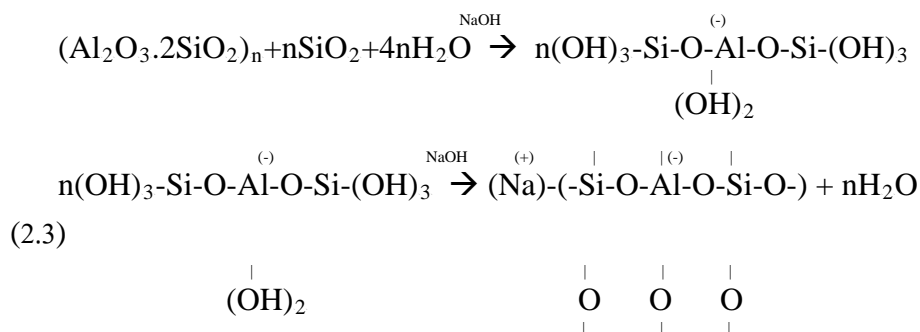
การใช้งานจีโอพอลิเมอร์ในงานวิศวกรรมที่น่าสนใจ ได้แก่ งานวิจัยของ S. Horpibulsuk และคณะ (2015) ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมเถ้าลอยดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ และ ดินเหนียวปนตะกอน (Silty clay) ผสมซีเมนต์ เพื่อการใช้งานในส่วน of โครงสร้างใต้คอสพาน (Bearing units) จากการทดสอบใช้งานพบว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมเถ้าลอยมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าชนิดดินเหนียวปนตะกอนผสมซีเมนต์ ซึ่งทำให้ดินตะกอนประปาเกิดความสำคัญในการใช้งานที่ดีกว่าการนำไปฝังกลบ

C. Siripattanapong และคณะ (2015) ได้ผลิตอิฐจีโอพอลิเมอร์มวลเบาจากดินตะกอนประปาและเถ้าลอย ในการใช้งานดังกล่าวพบว่า ดินตะกอนประปาเป็นวัสดุทางเลือกที่พร้อมในการใช้งานและสร้างมูลค่าให้ดินตะกอนประปาได้

K.H. Mo, U.J. Alengaram และ M.Z. Jumaat (2016) ศึกษาพฤติกรรมของ จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ชิ้นงานสำเร็จรูปเพื่อการก่อสร้าง เช่น ผนังสำเร็จรูป พื้นสะพานสำเร็จรูป ทางลาดขึ้นลงเรือสำเร็จรูป และ คานคอนกรีตสำเร็จรูปจากจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น พบว่าไม่มีสิ่งที่เป็นอันตรายจากการใช้คอนกรีตจีโอพอลิเมอร์เพื่อการรองรับน้ำหนักในงานก่อสร้าง และสามารถใช้งานคอนกรีตจีโอพอลิเมอร์ได้อย่างปลอดภัยตามหลักมาตรฐานสากล

#### 2.1.4 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ วัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งเมื่อผสมกับน้ำแล้วเกิดการแข็งตัว ได้จากการเผาส่วนผสมของหินปูนและหินดินดานหรือดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 4 เฟสอันได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetrecalcium aluminoferrite,  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) แสดงการเกิดปฏิกิริยาปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ไฮเดรชัน (Portland cement hydration) แบบ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไดแคลเซียมซิลิเกต ตามลำดับ (A.A. Ramezianpour, 2014) และสมการที่ (2.3) แสดงการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) แบบโซอะเลตไซลอคโซ (J.G.S. van Jaarsveld, and J.S.J. van Deventer, 1996, S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006)

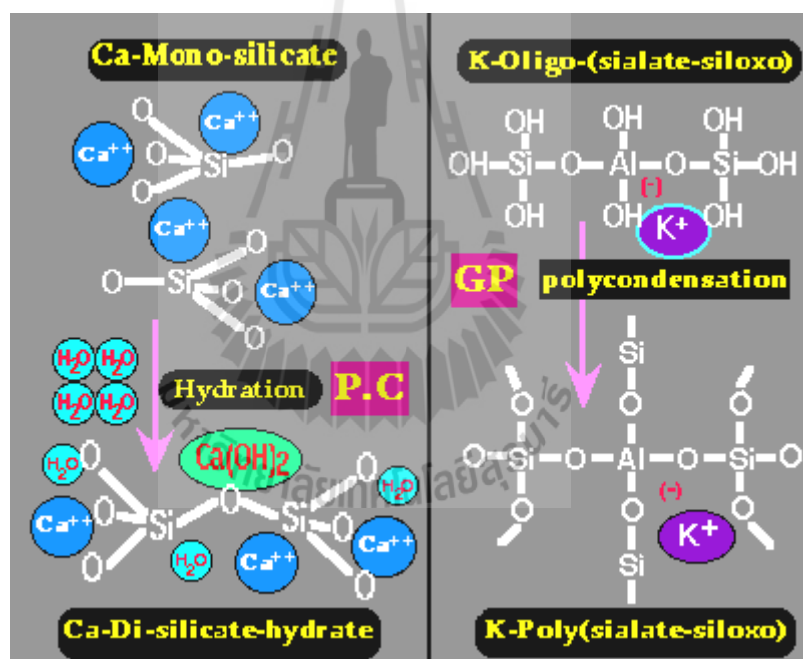


จะพบว่ามี ความแตกต่างระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอพอลิเมอร์ที่ องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาเคมี โดยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทาง



โครงสร้างและมีความแข็งแรงโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์เกิดจากการที่สารอะลูมิเนียมซิลิเกต ทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ ซึ่งอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะสลายพันธะและปล่อยไอออนจากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกต และมีการประสานพันธะใหม่เป็นโมเลกุลลูกโซ่ โดยอัลคาไลไอออนปรับสมดุลประจุในโครงสร้างโพลีไซอะเลตและเกิดการคายน้ำในระหว่างเกิดปฏิกิริยาเคมี (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006)

จากรูปที่ 2.2 ฟังซ้ายมือแสดงการแข็งตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียม-ซิลิเกตกลายเป็นแคลเซียม-ไดซิลิเกต-ไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca(OH)}_2$  ฟังขวามือแสดงการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยโมเลกุลโพแทสเซียมไซอะเลตไฮดรอกไซด์กลายเป็นโครงข่ายโมเลกุลลูกโซ่ของโพแทสเซียมไซอะเลตไฮดรอกไซด์ (J. Davidovits, 1999)



รูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาเคมีชนิดซีเมนต์ไฮเดรชันเปรียบเทียบกับชนิดจีโอพอลิเมอร์ไซอะลัน

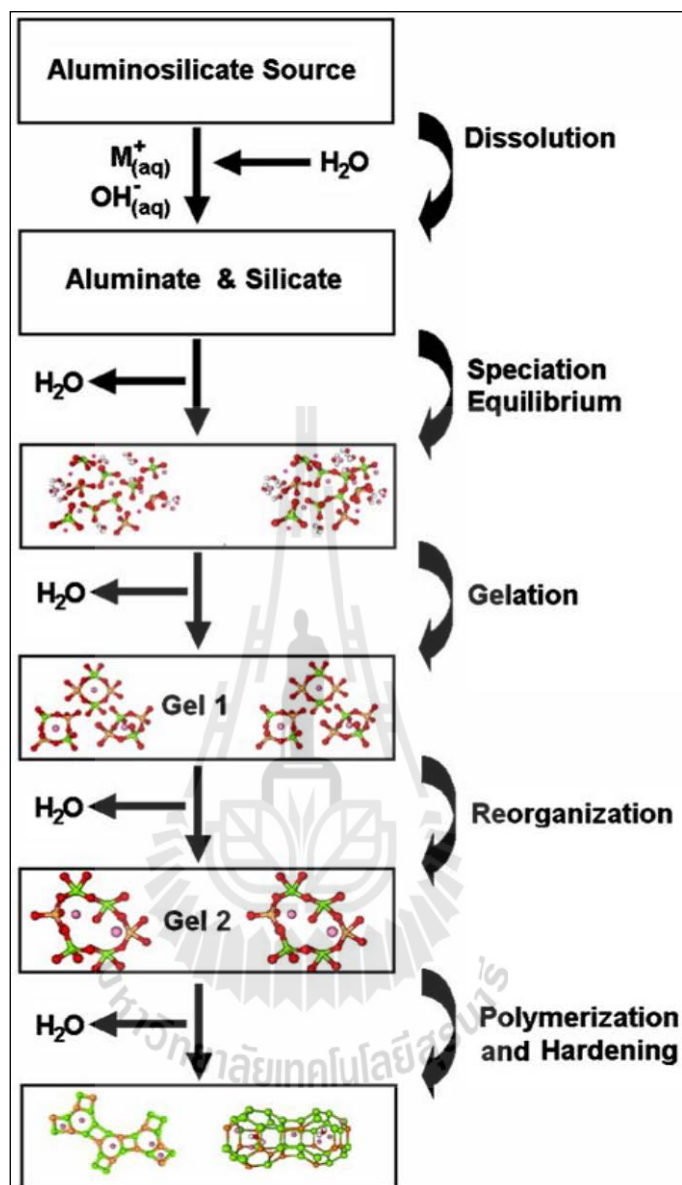
นอกจากนี้ในงานวิจัยหลายงานได้แสดงการเปรียบเทียบจีโอพอลิเมอร์กับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดอะลูมิเนียมซิลิเกต ที่ถูกกระตุ้นโดยอัลคาไลน์ (J. Davidovits, 1994) ต่างจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จีโอพอลิเมอร์ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าและสามารถผลิตได้โดยใช้วัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติผสมกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

และน้ำ (J. Davidovits, 1988c, J.W. Smith, and D.C. Comrie, 1988) เนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ใช้เวลาในการก่อตัวที่เร็วกว่า มีความทนทานต่อกรดที่ดีกว่า (J. Davidovits, 1987, D.C. Comrie, and J. Davidovits, 1988, J. Davidovits, et al., 1990) จีโอพอลิเมอร์ยังมีกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) สูงและมีการหดตัว (Shrinkage) จากการแข็งตัวที่น้อยกว่า (P.G. Malone, T. Kirkpatrick, and C.A. Randall, 1986, J. Davidovits, 1988b) มีความทนทานต่อความร้อนและไฟที่ต่ำกว่า ซึ่งจีโอพอลิเมอร์จะคงกำลังรับแรงอัดที่ความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียส ขณะที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเสื่อมสภาพลงที่ 300 องศาเซลเซียส (J. Davidovits, 1994, J. Davidovits, 1988b) จากการทดลองของ J. Davidovits (1988b) ได้รายงานว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องและได้กำลังรับแรงอัดในช่วง 20 เมกะปาสคาล หลังจาก 4 ชั่วโมงแรกและ 70-100 เมกะปาสคาล หลังจาก 28 วัน และความแข็งแรงส่วนใหญ่ของชิ้นงานอายุ 28 วัน เกิดขึ้นระหว่าง 2 วันแรกของการบ่ม (D.C. Comrie, J.H. Paterson, and D.J. Ritchey, 1988) ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการใช้งานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (J.L. Provis, 2014)

### 2.1.5 ปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

ปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) คือ ปฏิกริยาเคมีที่วัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตทำปฏิกริยากับสารละลายอัลคาไล-โพลีซิลิเกต (Alkali-polysilicate) ทำให้เกิดพันธะโพลีเมอริก (Polymeric) Si-O-Al ในโครงสร้าง โดยทั่วไปโพลีซิลิเกต (Polysilicate) คือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) หรือ โพแทสเซียมซิลิเกต (Potassium silicate,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) ที่ได้จากอุตสาหกรรมเคมีหรือ ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการผลิตโลหะเฟอร์โรซิลิคอน

กลไกการเกิดปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันแสดงในรูปที่ 2.3 (P. Duxson, et al., 2007) พงจีโอพอลิเมอร์ถูกผสมด้วยสารละลายที่ก่อให้เกิดปฏิกริยา โดยอัลคาไลไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์จะเข้าสู่สายพันธะของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ อะลูมิเนียมและซิลิเกตที่ถูกสลายจะเกิดสมดุลขึ้นใหม่ และก่อตัวเป็นเจลของโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกตจัดเรียงและขึ้นรูปเป็นโครงสร้างแบบสายโซ่และแข็งตัว โดยลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกริยา ดังนี้ (1) อัลคาไลเข้าสู่สายโครงข่ายอนุภาคเดิมของแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกต (2) เริ่มเกิดการสร้างสมดุลและจัดโครงข่ายขึ้นใหม่ (3) เริ่มเกิดการควบแน่นและจัดเรียงโครงข่าย (4) เกิดการจัดเรียงโครงข่ายขนาดใหญ่ และ (5) เกิดการควบแน่นแบบโพลีคอนเดนเซชันและมีความแข็งแรง



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

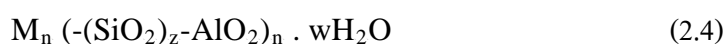
ความแข็งแรงทางกายภาพส่วนใหญ่ของเนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างส่วนผลึก (Crystalline) กับส่วนอสัณฐาน (Amorphous) (P.G. Malone, T. Kirkpatrick C.A. Randall, 1988b) โดยกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะทำให้เกิดพหุผลึก (Polycrystalline) ที่จับตัวกันอย่างหนาแน่นและมีสมบัติทางกลดีกว่าที่พบในซีโอไลต์ (H. Xu, J.S.J. Van Deventer, 2000) ซึ่งในกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันนั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์  $Al_3^+$  ทำ

ให้เกิดออกซิเจนแอนไอออน  $O^-$  ที่ยังขาดสมดุล ส่งผลให้ประจุบวกอย่างโพแทสเซียมไอออน  $K^+$  และโซเดียมไอออน  $Na^+$  มีความจำเป็นในการช่วยปรับสมดุลประจุ (J.G.S. van Jaarsveld, and J.S.J. van Deventer, 1996)

นอกจากนั้น J.G.S. van Jaarsveld และ J.S.J. van Deventer (1996) ได้รายงานไว้ว่า สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างการเกิดจีโอพอลิเมอร์และซีโอไลต์ คือความเข้มข้นของสารตั้งต้น และซีโอไลต์มักจะเกิดในระบบไฮโดรเทอร์มอลแบบปิด (Closed hydrothermal systems) ซึ่งต่างจากการเกิดจีโอพอลิเมอร์ ที่เมื่อผงอะลูมิเนียมซิลิเกต ถูกผสมด้วยสารละลายอัลคาไลน์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่สภาวะปกติและจะก่อตัวกลายเป็นจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งในเวลาไม่นาน (K. Komnitsas and D. Zaharaki, 2007) กำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ถูกพัฒนาสูงขึ้นถึงร้อยละ 70 ในระยะเวลา 4 ชั่วโมงแรกของการแข็งตัว (J. Davidovits, 1994, A. Palomo, A. Marcias, M.T. Blanco, and F. Puertas, 1992) กระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อมีอัตราส่วน  $SiO_2$  ต่อ  $M_2O$  อยู่ในช่วง 4.0 ถึง 6.6 ต่อ 1 เมื่อ M คือธาตุอัลคาไลในสารละลายซิลิเกตที่ละลายน้ำได้ ขณะที่อะลูมิเนียมซิลิเกตออกไซด์ จะต้องใช้อะลูมิเนียมที่พร้อมละลายได้ และอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม อยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 6.5 ต่อ 1 (J. Davidovits, 1988c, J. Davidovits, M. Davidovics, and N. Davidovits, 1994)

### 2.1.6 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย ซิลิกอน-ออกซิ-อะลูมินา (S.E. Wallah, and B.V. Rangan, 2006) ที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายสามมิติ ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวไม่ต่างจากที่พบในโครงสร้างของซีโอไลต์ โดยหน้าที่สี่ (Tetrahedra) ของซิลิกอนและอะลูมิเนียมได้เชื่อมต่อกัน และแบ่งปันอะตอมออกซิเจน (J. Davidovits, 1994) สูตรเคมีของจีโอพอลิเมอร์ แสดงในสมการที่ (2.4)



โดย  $z$  คือ จำนวนโมเลกุลของ  $SiO_2$  เช่น 1 หรือ 2 หรือ 3

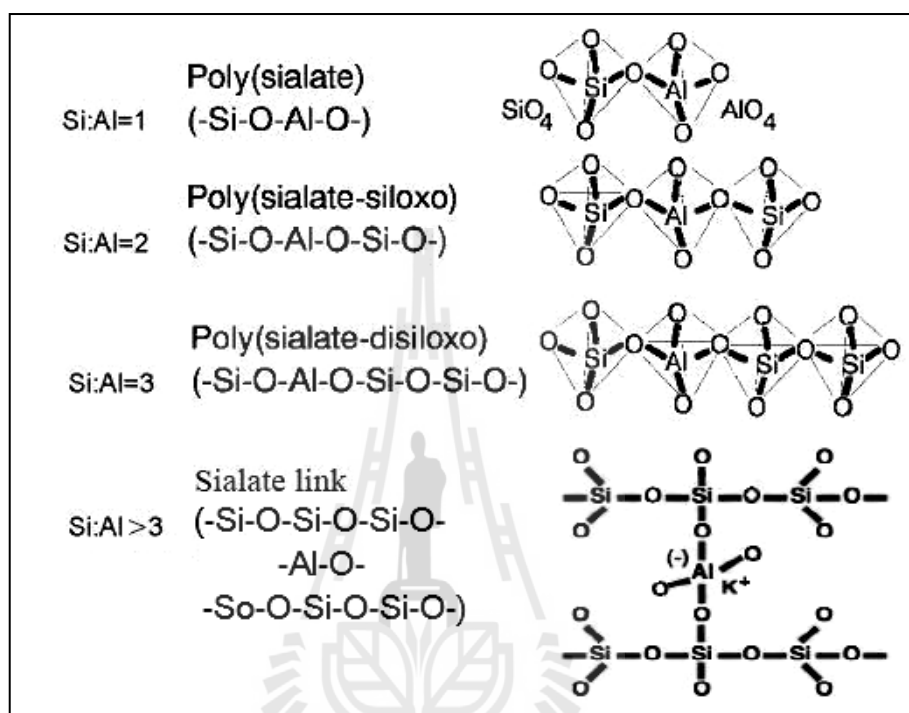
$M$  คือ ไอออนบวกที่มีวาเลนซ์ 1 เช่น  $K^+$  หรือ  $Na^+$  เป็นต้น

และ  $n$  คือ จำนวนหน่วยซ้ำของ โมเลกุลลูกโซ่ (Degree of polycondensation)

(J. Davidovits, 1999, K. Komnitsas, and D. Zaharaki, 2007)

J. Davidovits (1994) ได้จำแนกโครงสร้างพื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์ โดยแบ่งตามสัดส่วนระหว่าง Si ต่อ Al ได้แก่ (1) Si:Al = 1 เรียก โพลีไซอะเลท Poly(sialate) (2) Si:Al = 2 เรียก

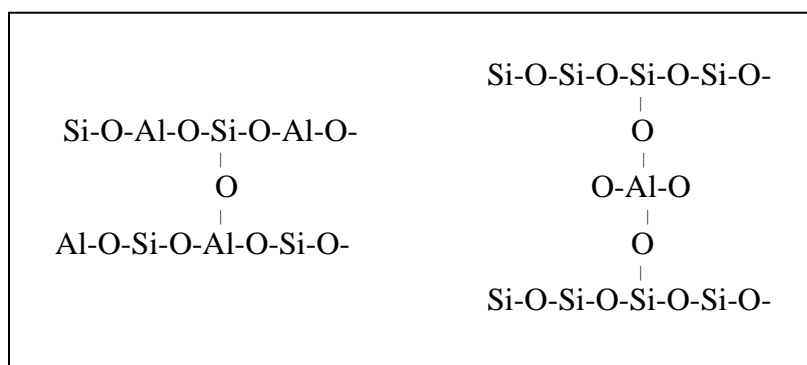
โพลีไซอะเลตไซลอกโซ Poly(sialate-siloxo) (3) Si:Al = 3 เรียก โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ Poly(sialate-disiloxo) และ (4) Si:Al > 3 เรียก ไซอะเลตลิงค์ (Sialate link) ดังแบบจำลองในรูปที่ 2.4 (J. Davidovits, 1999, S.E. Wallah and B.V. Rangan, 2006)



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างเคมีของไซอะเลต

โดย Si:Al = 2 ที่มีองค์ประกอบเหมือนกับโพลีไซอะเลตไซลอกโซ คือ (-Si-O-Si-O-Al-O-) เรียก โมโนไซลอกโซไซอะเลต (Mono-siloxo-sialate) และ Si:Al = 3 ที่มีองค์ประกอบเหมือนโพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ มี 4 แบบคือ แบบเส้น 1 แบบ แบบมีกิ่ง 2 แบบ และแบบวงกลม 1 แบบ (J. Davidovits, 1999)

สำหรับ Si:Al ที่มากกว่า 3 เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ของโพลีไซอะเลตหรือโพลีซิลิเกต โดยไซอะเลตลิงค์ Si-O-Al ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ของโพลีไซอะเลตหรือโพลีซิลิเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้ (J. Davidovits, 1999)



รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่าง โครงสร้างที่ถูกเชื่อมต่อโดยโซอะเลตลิงค์

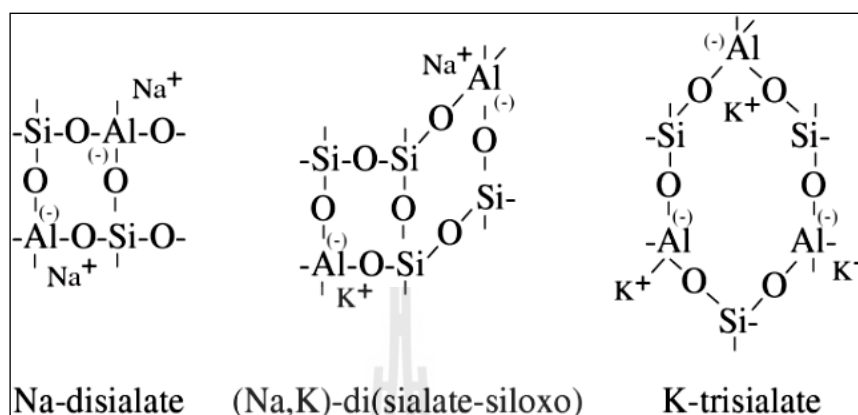
โครงสร้างโซอะเลตประกอบด้วยทรงสี่หน้าของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่เชื่อมต่อกันโดยแบ่งปันออกซิเจนร่วมกัน ไอออนบวกที่สามารถเข้าไปอยู่ที่ช่องว่างในโครงสร้างเพื่อทำหน้าที่ปรับสมดุลประจุให้กับอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ([www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org)) ได้แก่ โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียมไอออน ( $\text{K}^+$ ) แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{++}$ ) แมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{++}$ ) แบเรียมไอออน ( $\text{Ba}^{++}$ ) แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ไฮโดรเนียมไอออน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) เป็นต้น (J. Davidovits, 1999)



รูปที่ 2.6 แสดงการเข้าปรับสมดุลประจุ  $\text{AlO}_4^-$  ด้วย  $\text{Na}^+$  ในโครงสร้างโซอะเลต

สายโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกตโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นจากโครงสร้างโซอะเลตที่มีลักษณะเป็นวง แบบของวงขึ้นอยู่กับขนาดของแคตไอออนในกรณีที่แคตไอออนเป็น  $\text{Na}^+$  หรือ  $\text{Ca}^+$  จะเกิดโครงสร้างแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก ได้แก่ (1) ชนิดโซดาไลต์ (Sodalite type) เรียก โซโคล-ไดโซอะเลต (Cyclodisialate) และ (2) ชนิดฟิลิปไซต์ (Phillipsite type) เรียก โซโคล-ได(โซอะเลต-โซลอกโซ) (Cyclo-di(sialate-siloxo)) แคตไอออน  $\text{K}^+$  จะเป็นโครงสร้างหกเหลี่ยม ได้แก่ ชนิด

แคลซิลิต์ (Kalsilite type) เรียก ไชโคลไตรไซอะเลต (Cyclotrisialate) (J. Davidovits, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนี้



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างแบบวงของไซอะเลต

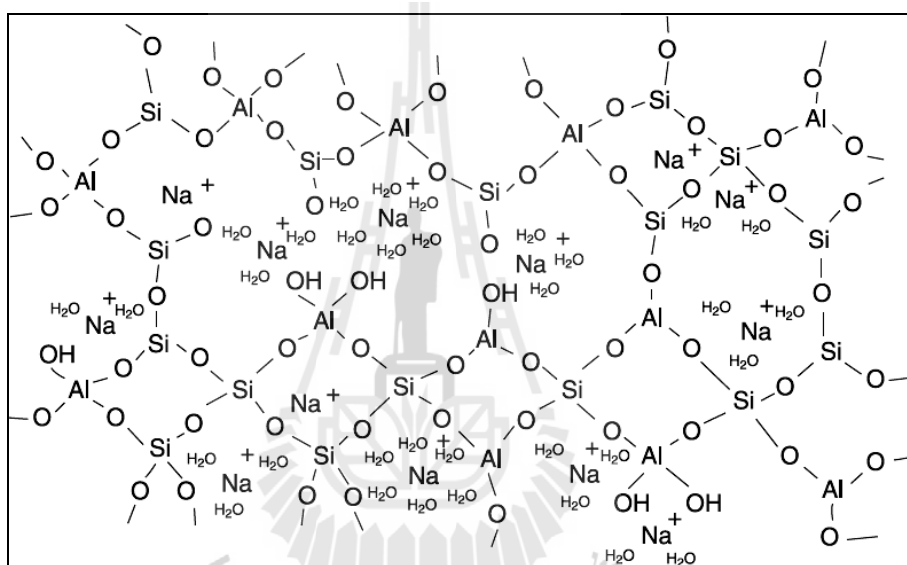
### 2.1.7 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ พบว่าสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณโซเดียมซิลิเกต การเติมผงจีโอพอลิเมอร์ อุณหภูมิและเวลาในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ (T.W. Cheng, and J.P. Chiu, 2003) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จำแนกปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ได้ตามหัวข้อต่างๆดังนี้ (1) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) (2) อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (3) อัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์ต่อสารละลาย (4) อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และ (5) อุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

#### 2.1.7.1 ความเข้มข้นของ NaOH

บทบาทของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซันคือ ทำหน้าที่สลายพันธะโมเลกุลของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตแล้วแตกตัวเป็นไอออนออกมาทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ 2005) โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบสแก่ เมื่ออยู่ในสถานะสารละลายจะสามารถแตกตัวให้โซเดียมไอออน Na<sup>+</sup> และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ได้ดี ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเข้าจับกับไฮดรอกซิลของแหล่งซิลิเกตและอะลูมินेट เกิดเป็นโมเลกุลน้ำ และสลาย

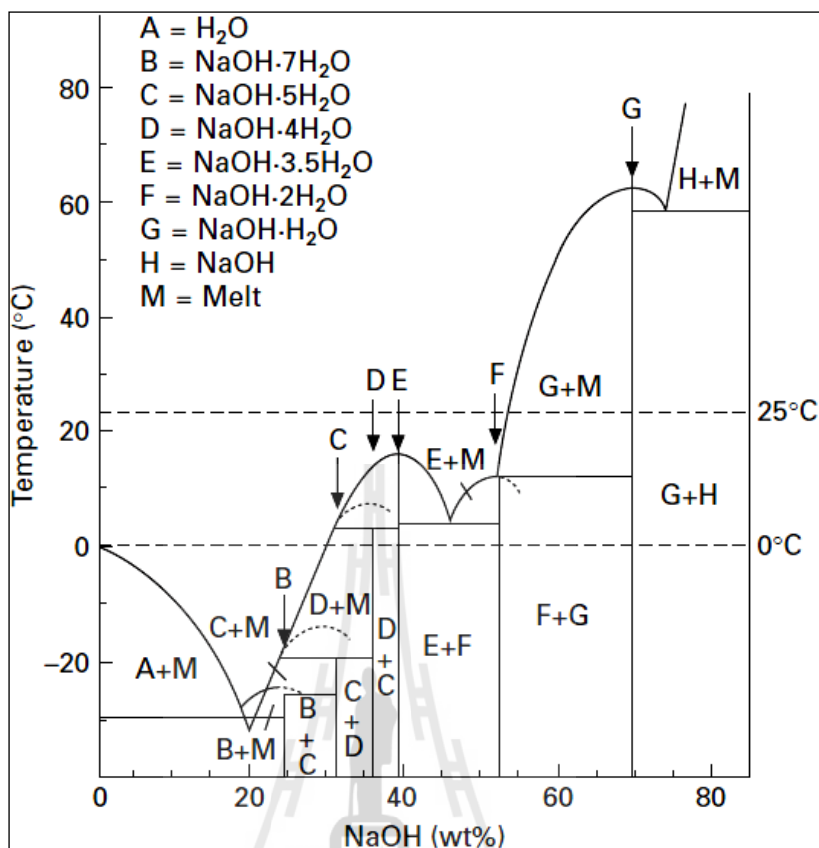
โครงสร้างปลดปล่อยอะลูมิเนียมและซิลิกาให้เป็นอิสระ หน้าที่ของ  $\text{Na}^+$  จะช่วยในการปรับสมดุลประจุของ  $\text{AlO}_4^-$  โดยเข้าไปอยู่กับโครงสร้างทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียม ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และรูปที่ 2.8 (K.J.D. Mackenzie, and M. Welter, 2014) โซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถที่จะสลายโครงสร้างปล่อยซิลิกาและอะลูมิเนียมให้เป็นอิสระได้ดีกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (P. Duxson, et al., 2007) หากโซเดียมไฮดรอกไซด์นี้มีความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันเกิดได้ดีขึ้น เป็นผลให้เวลาในการก่อตัวเร็วขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.8 แสดงโครงข่ายของโพไลไซอะเลตขณะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน

นอกจากนั้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นที่นิยมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์มากที่สุดในกลุ่มของอัลคาไลไฮดรอกไซด์เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีราคาถูกที่สุด หาใช้ได้ง่าย และมีความหนืดต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้งานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นจะต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงถึงร้อยละ 53.3 จะลดลงเหลือร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีความแตกต่างกันมากดังแผนภูมิเฟสในรูปที่ 2.9 (J. L. Provis, and J. S. J. van Deventer, 2009) ซึ่งความเข้มข้นที่ต่างกันนี้อาจส่งผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ในอากาศหนาวเย็น





รูปที่ 2.9 แสดงแผนภูมิเฟสของส่วนผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอย พบว่าเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูงขึ้นจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) พบว่าความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ สัมพันธ์กับระยะเวลาในการก่อตัว สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2005) ได้ศึกษาการแช่ถ้ำลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการละลายของ Si และ Al ในถ้ำลอยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาที่แช่อยู่ในสารละลาย ซึ่งระยะเวลาในการแช่สารละลายมีผลต่อการละลายของ Al มากกว่าการละลายของ Si

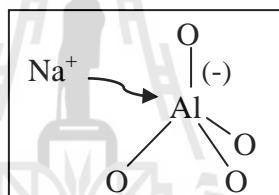
ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี (2011) ศึกษาการนำจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากถ้ำลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปใช้งานในสถานะที่ต้องแช่อยู่ในน้ำทะเล พบว่าการแทรกซึม

ของคลอไรด์ และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaOH สูงขึ้น

D. Hardjito and B.V. Rangan (2005) พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

### 2.1.7.2 อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

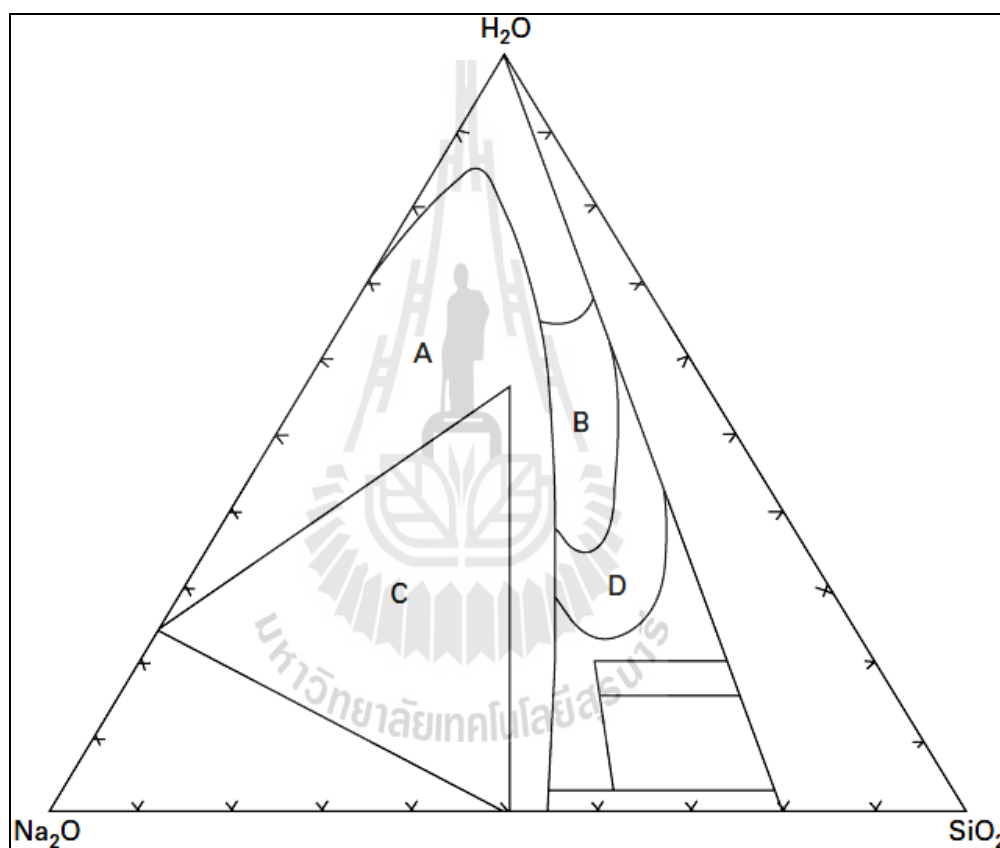
โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) เป็นสารละลายที่มีซิลิกอนละลายได้เป็นองค์ประกอบ มีโครงสร้างแบบกึ่งเสถียรซึ่งจะมีการตกตะกอนเข้ามา (P.W. Brown, 1990) บทบาทของโซเดียมซิลิเกต ในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซินคือ ทำหน้าที่เป็นตัวประสานซิลิกอนไอออนและอะลูมิเนียมไอออนในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซินเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างโพลีไซอะเลตที่มีความเสถียร โซเดียมไอออนและซิลิกอนละลายได้ที่พบในสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่โดยโซเดียมไอออนจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะช่วยปรับสมดุลประจุให้กับ  $\text{AlO}_4^-$  ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการปรับสมดุลประจุโครงสร้างทรงสี่หน้าของอะลูมินตโดยโซเดียมไอออน

ซิลิกอนละลายได้เมื่ออยู่ในรูปของซิลิเกตจะทำหน้าที่ประสานโครงสร้าง โดยเพิ่มการแบ่งปันออกซิเจนร่วมกับอะลูมินตและซิลิเกตที่อยู่ข้างเคียง เป็นการจัดเรียงโครงสร้างเกิดเป็นเจลของอะลูมิโนซิลิเกตและความแน่นเป็นสายโซ่ ปริมาณที่มากขึ้นของซิลิกอนละลายได้ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะทำหน้าที่จัดเรียงโครงสร้างก่อให้เกิดเจลของอะลูมิโนซิลิเกตได้เร็วขึ้น การจัดเรียงโครงสร้างที่รวดเร็วส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์เกิดโครงสร้างแบบออสถฐาน ซึ่งโครงสร้างจะไม่เปลี่ยนไปเป็นแบบผลึกแม้จะผ่านระยะเวลาานาน (P. Duxson, et al., 2007) หน้าที่ดังกล่าวสัมพันธ์กับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไปแล้วถ้าหากอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงถึงค่าที่เหมาะสม จะส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซินเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการก่อตัวที่เร็วขึ้น เกิดโครงสร้างแบบออสถฐานได้มากขึ้นเป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้นด้วย

แผนภูมิเทอร์นารีของระบบ  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิห้องในรูปที่ 2.11 (J.G. Vail, 1952) แสดงบริเวณเขตที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ เขต A โซเดียมซิลิเกตมีผลึกเป็นส่วนผสม มีปริมาณซิลิกาในสารละลายต่ำ มีองค์ประกอบแบบกึ่งเสถียร และเขต B เป็นกรดสารละลายโซเดียมซิลิเกตแบบที่พบมากในเชิงพาณิชย์ ส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เตรียมจากองค์ประกอบในเขต C จะมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดผลึกในสารละลาย และโซเดียมซิลิเกตเขต D มีแนวโน้มที่สารละลายจะมีความหนืดสูง



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภูมิเทอร์นารีของระบบ  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิห้อง

นอกจากนี้นักวิจัยศึกษาบางกลุ่มยังได้รายงานผลของโซเดียมซิลิเกตต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ไว้ ดังนี้

T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) พบว่าเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนเหล็ก สัมพันธ์กับการเติมโซเดียมซิลิเกต

A.L.G. Gastaldini และคณะ (2007) พบว่าคอนกรีตที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำปฏิกิริยาและบ่มนาน 28 วัน ให้ผลการแทรกซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกต

D. Hardjito and B.V. Rangan (2005) พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

### 2.1.7.3 อัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลาย

บทบาทของผงจีโอพอลิเมอร์ในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันคือเป็นแหล่งของอะลูมิเนียมและซิลิกอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไปหากอัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลายมีค่าสูงเกินไป สารละลายจะไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันกับผงจีโอพอลิเมอร์อย่างทั่วถึง เป็นผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากอัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลายมีค่าต่ำ ปริมาณของเหลวสารละลายที่มีมากในส่วนผสมจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น กำลังรับแรงอัดและความสามารถในการใช้งานของจีโอพอลิเมอร์จึงถูกกำหนดโดยอัตราส่วนและสมบัติของวัสดุที่ใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

### 2.1.7.4 อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

บทบาทของซิลิกอนและอะลูมิเนียมในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันคือทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสัมพันธ์กับชนิดของโพลีไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมมีค่าสูงจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์จะมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น

E. Nimwinya และคณะ (2016) พบว่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่สูงขึ้นจะทำให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น เนื่องจากอัตราความแน่นของโครงสร้างชนิดซิลิกา-อะลูมินา เกิดขึ้นเร็วกว่าชนิดซิลิกา-ซิลิกา และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาและเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มที่เหมาะสมจะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น P. Chindaprasirt และคณะ (2012) ศึกษาผลของปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีผลให้เวลาในการก่อตัว

ของจีโอพอลิเมอร์ลดลงซึ่งแตกต่างจากลักษณะของจีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไป ที่เมื่อปริมาณของ  $Al_2O_3$  เพิ่มขึ้นจะมีผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นแต่การเพิ่ม  $SiO_2$  จะมีผลในการหน่วงเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

### 2.1.7.5 อุณหภูมิในการบ่ม

บทบาทของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการบ่มในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมโรไลเซชันคือเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมโรไลเซชัน โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นทำให้จีโอพอลิเมอร์ก่อตัวได้เร็วขึ้น โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์จะเป็นแบบอสัณฐานส่งผลให้ได้ความแข็งแรงในระยะเริ่มต้นสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องซึ่งจะเกิดโครงสร้างแบบพหุผลึกบางส่วน และจะเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อจีโอพอลิเมอร์นั้นมีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง

T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) พบว่าเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก สัมพันธ์กับอุณหภูมิในการบ่ม S. Songpiriyakij (2005) พบว่าอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะเริ่มต้น และเวลาในการบ่มที่นานขึ้นมีผลในการเพิ่มกำลังอัดให้กับจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย และอุณหภูมิการบ่มที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ E. Nimwinya และคณะ (2016) พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ช่วยเร่งอัตราการควบแน่นของโครงสร้างชนิดซิลิกา-อะลูมินา และชนิดซิลิกา-ซิลิกา ได้เร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และพบว่าเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จีโอพอลิเมอร์จะให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 4.5 และ 5.9 ตามลำดับ

## 2.2 เถ้าแกลบ

### 2.2.1 แหล่งที่มาของเถ้าแกลบ

เถ้าแกลบ (Rice husk ash) คือ ผลิตผลพลอยได้จากการเผาแกลบ (Rice husk) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในงานต่างๆ เช่น อบข้าวในโรงสีข้าว ผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก เผาอิฐ และเผาถ่าน เป็นต้น มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาอสัณฐานที่มีพื้นที่ผิวสูง (V. Kannan, and K. Ganesan, 2014, F.R. Carlos, R.M. Sagraario, and B.V.M. Terasa, 2006) โดยเถ้าแกลบในสภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส (G.A. Habeeb, and H.B. Mahmud, 2010, S.D. Nagrale, H. Hajare, and P.R. Modak, 2012) สามารถนำเถ้าแกลบไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนการใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตได้ (S. Rukzon, and P. Chindaprasirt, 2010)

### 2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบชนิดต่างๆ

เถ้าแกลบเกิดจากการเผาแกลบ แบ่งได้สองชนิดตามอุณหภูมิในการเผา โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบที่ได้จะมีสีขาวและมีซิลิกาชนิดผลึกมากกว่าร้อยละ 90 ขององค์ประกอบทางเคมี การเผาเถ้าแกลบในช่วงอุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบที่ได้จะมีสีดำ มีซิลิกาอสัณฐานเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณร้อยละ 85-90 ขององค์ประกอบทางเคมี (S.D. Nagrale, H. Hajare, and P.R. Modak, 2012) จากการค้นคว้าพบว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส จะได้เถ้าแกลบสีดำที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี (A.A. Ramezianpour, 2014) เถ้าแกลบดำที่มีซิลิกาอสัณฐานเป็นองค์ประกอบจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีมากกว่าเถ้าแกลบขาวที่มีซิลิกาผลึกเป็นองค์ประกอบ ซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบของแกลบเกิดจากการดูดซึมธาตุอาหารของต้นข้าว เมื่อธาตุซิลิกอนรวมตัวกับเส้นใยอินทรีย์ จึงกลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของเปลือกข้าว จากผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) พบว่าเถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีซิลิกาสูงถึงร้อยละ 89.17 ขององค์ประกอบทางเคมี

### 2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเถ้าแกลบและวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) คือ วัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อลดปริมาณซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีต การใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีต เช่น พัฒนาความแข็งแรงและสมบัติในการใช้งาน ลดต้นทุนค่าซีเมนต์เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม โดยเป็นการใช้ประโยชน์วัสดุที่เป็นของเสีย และลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (A.A. Ramezianpour, 2014) เถ้าแกลบซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบทางเคมีจัดเป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งมีความละเอียดมีพื้นที่ผิวสูงมาก การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณซิลิกา วัฏภาคผลึกซิลิกา ขนาด และพื้นที่ผิวของอนุภาค เถ้าแกลบจะดูดซับน้ำบางส่วนที่อยู่ในส่วนผสม ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ (G. Sua-iam, and N. Makul, 2014)

V. Kannan และ K.Ganesan (2014) ได้ศึกษาการสังเคราะห์คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมจากเถ้าแกลบและดินขาวเผา พบว่าการทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุปอซโซลาน ได้แก่เถ้าแกลบและส่วนผสมของเถ้าแกลบกับดินขาวเผา ให้ความทนทานมากกว่าการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว และอัตราส่วนซิลิกามีความสัมพันธ์โดยตรงกับการทนทานต่อกรด

### 2.2.4 ผลของการเติมเถ้าแกลบต่อสมบัติของคอนกรีต

ความทนทานของคอนกรีตถูกพัฒนาขึ้นโดยการเติมเถ้าแกลบ เถ้าแกลบสามารถปรับปรุงสมบัติทางเคมีและกายภาพของคอนกรีต อนุภาคเถ้าแกลบขนาดเล็กมีความสามารถในการ

บรรจุนุภาคช่วยลดปริมาตรรูพรุนของซีเมนต์ส่งผลให้การแทรกซึมผ่าน เถ้าแกลบช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์และวัสดุผสม ทำให้เนื้อคอนกรีตทนทานขึ้น อนุภาคที่ละเอียดของเถ้าแกลบทำปฏิกิริยากับอัลคาไลในซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นอัลคาไลซิลิเกต ลดโอกาสที่จะทำให้เกิดความเสียหายจากการทำปฏิกิริยาของอัลคาไลที่หลือค้ำกับส่วนผสมซิลิเกตของคอนกรีตในภายหลัง การเติมเถ้าแกลบอนุภาคละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตช่วยเพิ่มการยึดเกาะกันของส่วนผสมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น ปริมาณเถ้าแกลบที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความต้องการน้ำสูงขึ้นเพื่อคงการยึดตัวของส่วนผสม การใช้เถ้าแกลบจึงส่งผลให้ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น (A.A. Ramezianpour, 2014) และค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมน้ำมากขึ้น (D. Hardjito and B.V. Rangan, 2005)

A.A. Ikpong และ D.C. Okpala (1992) พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบทดแทนซีเมนต์มีความสามารถในการใช้งานได้ในระดับเดียวกับคอนกรีตจากซีเมนต์ ส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบต้องการน้ำมากขึ้นกว่าเดิม

A.L.G. Gastaldini และคณะ (2007) พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบทดแทนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะลดปริมาตรการแทรกซึมผ่านของไอออนได้มาก

V. Saraswathy, และ H. Song (2007) พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบทดแทนซีเมนต์ช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ การทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบทำให้รูพรุนละเอียดขึ้น ลดการแทรกซึมผ่านและลดการกัดกร่อนคอนกรีตได้

### 2.2.5 ปริมาณการผลิตเถ้าแกลบและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของเถ้าแกลบ

แกลบเป็นผลิตผลพลอยได้จากการเกษตร โดยจะได้แกลบร้อยละ 20-22 ของน้ำหนักข้าวเปลือก แกลบประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 50 ลิกนินร้อยละ 25-30 และซิลิการ้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก เมื่อแกลบถูกเผา เซลลูโลสและลิกนินจะหายไปเหลือไว้แค่ซิลิกา เถ้าแกลบเป็นผลิตผลพลอยได้จากการเผาแกลบ โดยจะได้เถ้าแกลบร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของแกลบที่เผา (S.D. Nagrale, H. Hajare, and P.R. Modak, 2012, A.A. Ramezianpour, 2014) ทั่วโลกสามารถผลิตข้าวในปริมาณสูงถึง 649.7 ล้านตันต่อปี (G.A. Habeeb, and H.B. Mahmud, 2010) เถ้าแกลบปริมาณมากจึงได้กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ และก่อความเสียหายให้พื้นที่ที่ถูกนำไปทิ้ง เนื่องจากไม่ได้ถูกนำไปใช้งาน ถ้าเถ้าแกลบถูกนำไปใช้ในงานคอนกรีตหรือวัสดุ ความต้องการทิ้งเถ้าแกลบจะหมดไป (G. Sua-iam, and N. Makul, 2014) ในปัจจุบันมีความพยายามในการนำเถ้าแกลบมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เนื่องจากเถ้าแกลบเป็นวัสดุที่มีศักยภาพและสมบัติในการใช้งานที่ดี เป็นวัสดุฉนวนระดับคลาสเอ ดัดไฟยากและเกิดเชื้อราหรือเห็ดราได้ยาก (A.A. Ramezianpour, 2014) เป็นวัสดุต้นทุนต่ำที่สามารถใช้ผลิตเส้นซิลิกอนคาร์ไบด์เพื่อใช้เสริมแรงในวัสดุเครื่องมือตัด

เซรามิก (R.V. Krishnarao, and Y.R. Mahajan, 1996) สามารถใช้สังเคราะห์ซิลิกาความบริสุทธิ์สูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ (K.M. Omatola, and A.D. Onojah, 2009) สามารถใช้ผลิตเหล็กเบนคุณภาพสูงสำหรับใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ (S. Sugita, 1993) ใช้ผลิตแผ่นฉนวนมวลเบาเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและทนความร้อนสูง (P. Owens, 1999) และใช้ในอุตสาหกรรมอิฐทนไฟสามารถใช้สร้างเตาหลอมเหล็กและเตาเผาซีเมนต์ได้ (K.M. Omatola, and A.D. Onojah, 2009)

G. Sua-iam และ N. Makul (2014) ได้อธิบายการใช้เถ้าแกลบทดแทนวัสดุผสม (Aggregate) และการใช้เถ้าลอยทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 พบว่าปริมาณเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น จะลดกำลังรับแรงอัดและเพิ่มความต้องการน้ำของส่วนผสม การทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 60 จะได้กำลังรับแรงอัด 40-50 เมกะปาสกาล การทดแทนวัสดุผสมซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 25 จะได้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดที่สามารถใช้งานได้ การทดแทนนี้ช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

## 2.3 ดินตะกอนประปา

### 2.3.1 ที่มาของดินตะกอนประปา

ดินตะกอนประปา (Water treatment sludge) คือ ผลผลิตพลอยได้หรือของเสียจากการผลิตน้ำประปา ซึ่งน้ำประปาเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและมีความจำเป็นทั้งต่อภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม โดยในการผลิตน้ำประปามีขั้นตอนในการนำน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติผ่านกระบวนการทำให้ใสสะอาดโดยการทำให้เศษดินละเอียดที่ละลายอยู่ในน้ำจับตัวกันตกตะกอน คัดกรองทราย อินทรีย์วัตถุ และของแข็งที่แขวนลอยที่ผิวน้ำ สารที่ใช้ในการตกตะกอน (Coagulation agent) เช่น สารส้ม (Alum) ถูกใช้เพื่อบำบัดน้ำที่มีอะลูมิเนียม และพอลิเมอร์อินทรีย์ (N. Waijarean, S. Asavapisit, and K. Sombatsompop, 2014) การประปานครหลวงปรับปรุงน้ำดิบจนกลายเป็นน้ำประปาที่ได้มาตรฐาน โดยมีโรงงานผลิตน้ำขนาดใหญ่หลายแห่ง โรงงานผลิตน้ำบางเขนเป็นโรงงานผลิตน้ำประปาที่ใหญ่ที่สุดในเอเชีย ประกอบไปด้วยกระบวนการผลิตน้ำประปาที่สมบูรณ์แบบ ได้แก่ ระบบสูบน้ำดิบ ระบบจ่ายสารเคมี ระบบการตกตะกอน ระบบการกรองน้ำ ระบบฆ่าเชื้อโรคและระบบถังเก็บน้ำใส และระบบสูบน้ำและส่งน้ำและสูบน้ำเป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ปรับปรุงจาก ชีรพร ภู่มาลา และคณะ 2010) ดังนี้





รูปที่ 2.12 แสดงผังกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

ระบบสูบน้ำดิบ (Raw water system) เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตน้ำประปาเริ่มต้นที่สถานีสูบน้ำดิบสำแล จังหวัดปทุมธานี น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาจะถูกลำเลียงผ่านคลองประปา ปรับปรุงคุณภาพตามธรรมชาติ เป็นขั้นตอนแรกของการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เมื่อเข้าสู่โรงงานผลิต น้ำดิบต้องผ่านตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด เพื่อป้องกันไม่ให้เศษพืชและวัสดุต่างๆ เข้าสู่กระบวนการผลิต

เมื่อน้ำดิบถูกสูบส่งไปตามท่อน้ำดิบ จะเข้าสู่ระบบจ่ายสารเคมี (Chemical feeding system) ซึ่งเป็นกระบวนการจ่ายสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จะถูกเติมลงไปเพื่อปรับเพิ่มค่าความเป็นกรดต่าง คลอรีนถูกเติมเพื่อช่วยควบคุมปริมาณสาหร่าย ตะไคร่น้ำ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำ

หลังจากเติมสารสร้างตะกอนในปริมาณที่เหมาะสมแล้ว น้ำดิบจะไหลลงสู่ถังตกตะกอน ในกรณีที่น้ำดินมีความขุ่นสูงมาก จะมีการเติมสารช่วยตกตะกอน คือ โพลีอิเล็กโทรไลต์

(Polyelectrolyte) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน ที่ส่วนปลายของถังจะมีการกวนน้ำเพื่อให้สารแขวนลอยสัมผัสกัน และจับตัวรวมกันเป็นเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีน้ำหนักมากขึ้น ทำให้ตะกอนตกลงสู่ด้านล่างของถัง โดยที่พื้นที่ด้านล่าง จะมีเครื่องกวาด ซึ่งกวาดตะกอนเหล่านี้ลงสู่กันถัง ซึ่งหากตะกอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จะถูกระบายทิ้งออกไปยังบ่อกักตะกอน ทำให้ได้น้ำใสสะอาดไหลเข้าสู่รางรับน้ำด้านบนต่อไป

น้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วจะไหลเข้าสู่ระบบการกรองน้ำ (Filtration system) ต่อไป ที่โรงงานผลิตน้ำบางเขน ใช้ระบบการกรองน้ำแบบระบบการกรองเร็ว มีอัตราการกรองน้ำ 75,000-100,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อบ่อ ในกระบวนการกรองน้ำ จะผ่านสารกรอง 2 ชนิด จากชั้นถ่านแอนทราไซด์สู่ชั้นทราย โดยมีหัวกรองน้ำที่พื้นบ่อกรองป้องกันไม่ให้สารกรองหลุดปนออกไปกับน้ำ เมื่อการใช้งานผ่านไป สารกรองเหล่านี้จะมีความสกปรกมากขึ้นจึงต้องมีการล้างทำความสะอาดเรียกว่าการล้างย้อน โดยการพ่นลมดันย้อนขึ้นทำให้สารกรองเคลื่อนตัวเสียดสีกัน ตะกอนและสิ่งสกปรกที่ติดอยู่จะหลุดออก จากนั้นจึงใช้น้ำดันย้อนเพื่อพัดพาตะกอนและสิ่งสกปรกออกไปสู่ระบบกำจัดตะกอนต่อไป

น้ำจากการกรองจะไหลเข้าสู่ระบบการฆ่าเชื้อโรคภายในถังเก็บน้ำใส โดยเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค ตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก บางครั้งอาจมีการเติมปูนขาวอีกเล็กน้อย เพื่อปรับความเป็นกรดด่างของน้ำ ป้องกันการกัดกร่อนระบบเส้นท่อที่ใช้ลำเลียงน้ำประปาอีกด้วย จากนั้นน้ำประปาจะถูกส่งเข้าสู่ระบบสูบน้ำและสูบน้ำโดยสถานีสูบน้ำจะสูบน้ำจากถังเก็บน้ำใสผ่านอุโมงค์ส่งน้ำขนาดใหญ่ ส่งน้ำประปาไปยังสถานีสูบน้ำจ่ายน้ำปลายทางซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ให้บริการต่างๆ

### 2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของดินตะกอนประปา

องค์ประกอบหลักที่พบในดินตะกอนประปา ได้แก่ ซิลิกาและอะลูมินา (N. Waijarean, S. Asavapisit, and K. Sombatsompop, 2014) ดินตะกอนประปามีอินทรีย์วัตถุอยู่ร้อยละ 12-14 โดยน้ำหนัก ส่วนมากคือกรดไขมัน แร่หลักที่พบ คือ มัสโคไวต์ ควอทซ์ แคลไซต์ โดโลไมต์ และซีราฟิไนต์ มีวัสดูสัณฐานอยู่ร้อยละ 35 ขององค์ประกอบทางเคมี (N.H. Rodriguez และคณะ, 2010) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของดินตะกอนประปาด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินทั้งสองชนิดมีปริมาณสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินา ร้อยละ 58.99 และ 24.64 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับที่พบในดินขาว จึงมีความเป็นไปได้มากที่ดินตะกอนประปาจะสามารถนำมาใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้

### 2.3.3 ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของดินตะกอนประปา

โรงผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง มีดินตะกอนเกิดขึ้นด้วยกำลังการผลิตสูงถึง 300 ตันต่อวันในฤดูแล้ง และประมาณ 700 ตันต่อวันในฤดูฝน (S. Horpibulsuk, et al., 2015) เนื่องจากความต้องการใช้งานน้ำประปาที่สอดคล้องกับจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดินตะกอนประปาจำนวนมากเหล่านี้สร้างปัญหาในการกำจัด ดินตะกอนประปาถูกนำไปฝังกลบ ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดหลายล้านบาทต่อปี (สุภิญญา สอนง่าย, 2009, ชัชพันธ์ ชาติ, 2007, เพิ่มพล กาญจนามัย, 2003) การนำดินตะกอนประปามาใช้ในการผลิตเซรามิกและอิฐเป็นทางเลือก นอกเหนือจากการฝังกลบ (K.Y. Chiang, et al., 2009) และได้มีการศึกษาการนำดินตะกอนประปาไปใช้ประโยชน์ในงานวัสดุก่อสร้าง เพื่อลดของเสียให้เท่ากับศูนย์โดยนำไปใช้เป็นวัสดุมวลรวมของจีโอพอลิเมอร์ (S. Horpibulsuk, et al., 2015)

### 2.3.4 การใช้ประโยชน์จากดินตะกอนประปา

การวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้ดินตะกอนประปาที่ผ่านมามีอยู่ไม่มากนัก และประสบความสำเร็จเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น เช่น การนำดินตะกอนประปาไปใช้เป็นส่วนผสมในการทำอิฐสำหรับงานก่อสร้าง (เพิ่มพล กาญจนามัย, 2003, วินัย ชัยเพชร, 2009) การนำไปใช้เป็นส่วนผสมของกระเบื้องหลังคาดินซีเมนต์ (กิตติพงษ์ สุตรสุคนธ์, 2007, อนุรักษ์ จินตนาพันธ์, 2008, ภาคภูมิ กลั่นไพบรี, 2008) และการนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทสโตนแวร์ (ภานุ ศิริพงศ์ไพโรจน์, 2007, S. Sangsuk, S. Khunthon, and S. Nilpairach, 2010)

N. Waijarean และคณะ (2014) ได้ศึกษาการใช้ดินตะกอนประปาเพื่อเป็นแหล่งของอะลูมินาและซิลิกาในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ดินตะกอนประปามีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเริ่มต้นที่ 1.78 และถูกนำไปเผาแคลไซน์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ 800 องศาเซลเซียส ให้ความแข็งแรงสูงที่สุด

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา

ดินขาวเผา (Metakaolin) คือ ผลผลิตที่ได้จากการเผาแคลไซน์ดินขาว (Kaolin) ที่อุณหภูมิสูง ดินขาวเผาเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อนโดยได้จากการเผาแคลไซน์ดินขาวที่อุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส ขึ้นกับความบริสุทธิ์และสภาพผลึกของดินขาว (K.J.D. MacKenzie, et al. 1985, J. Rocha, and J. Klinowski, 1990, M.L. Granizo, and M.T. Blanco, 1998, E. Badogiannis, et al., 2005, M.L. Granizo, et al., 2007) โครงสร้างของดินขาวเผามีความไม่เป็นระเบียบเนื่องจาก

การปล่อยกลุ่มไฮดรอกซิลออกจากชั้นโครงสร้างของดินขาว และปฏิกิริยาการดึงน้ำออกจากโมเลกุลบางส่วนสามารถย้อนกลับได้ (J. Rocha et al. 1990) ดินขาวเผาที่มีชั้นของซิลิเกตและอะลูมินา ที่มีโคออดิเนชันของซิลิกอนเป็น 4 และโคออดิเนชันของอะลูมิเนียมเป็น 4 5 และ 6 (J. L. Provis, and J. S. J. van Deventer, 2009)

J. Ambroise และคณะ (1994) พบว่าการเติมดินขาวเผาในส่วนผสมของซีเมนต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานได้

J.A. Kostuch และคณะ (1993) พบว่าการเติมดินขาวเผาในส่วนผสมของซีเมนต์สามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตช่วยลดการลำเลียงน้ำและเกลือในชิ้นงาน

P. Duxson (2007) พบว่าดินขาวเผามีความสำคัญในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ในการใช้งานเป็นสารยึดติด งานเคลือบ และงานไฮโดรเซรามิกส์

อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) พบว่าการเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับการเตรียมดินขาวเผาเพื่อใช้ผสมกับแก้วลอยในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์มากที่สุด และปริมาณของดินขาวที่สามารถใช้ผสมกับแก้วลอยได้มากที่สุดคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) พบว่าปริมาณที่ใช้ในการเติมดินขาวเผา มีความสัมพันธ์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกรันเหล็ก

V. Medri และ A. Ruffin (2012) สามารถเตรียมจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ดินขาวเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นตัวเชื่อมประสานอนุภาคของ SiC พบว่าซิลิกาอสัณฐานที่ผิวของอนุภาค SiC ร่วมเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ด้วย

#### 2.4.2 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก คือผลผลิตพลอยได้จากการถลุงเหล็ก เกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายเหล็กในเตาถลุง ตะกรันเตาถลุงเหล็กจัดเป็นวัสดุโลหะที่มี ซิลิกา อะลูมินา หินปูน เหล็กออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ เป็นองค์ประกอบทางเคมี

T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) ได้ใช้ตะกรันเหล็ก เพื่อใช้สังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ที่สามารถทนไฟความร้อนสูง 1,100 องศาเซลเซียส โดยที่อีกด้านของชิ้นงานมีความร้อนน้อยกว่า 350 องศาเซลเซียส โดยได้ชิ้นงานที่มีกำลังอัดสูงถึง 79 MPa

Y. Pontikes และคณะ (2013) พบว่าโครงสร้างอนุภาคของตะกรันที่มี Fe และ Al สูง เมื่อเย็นตัวเร็วขึ้นจะเกิดวัฏภาคอสัณฐานมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกรันดังกล่าวมีความแข็งแรงสูง

J. Xie และคณะ (2009) พบว่าการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากส่วนผสมระหว่าง ตะกรันเหล็ก เถ้าลอย และ ดินขาวเผาในสัดส่วน 3:3:1 MPa ให้ความแข็งแรงสูงถึง 31.6 MPa และ จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ยังสามารถเก็บกักโลหะหนักเช่น Pb Cu Cr และ Ni ไว้ในตัวได้

H. Runttia และคณะ (2016) ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกรันเหล็กและ ดินขาวเผา โดยเติมแบเรียมเพิ่มกำจัดซัลเฟตไอออน โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โซเดียมไอออนที่อยู่ในโครงสร้างจะถูกแทนที่ด้วยแบเรียมไอออน

#### 2.4.3 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย

เถ้าลอย คือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าถ่านหิน เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหิน มีขนาดเล็กลอยขึ้นเหนือเตาไปพร้อมกับอากาศร้อน มีอะลูมินา ซิลิกา เหล็กออกไซด์ และ แคลเซียมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมี

ณัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) พบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า แม่เมาะสามารถใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอย 15 ตัวอย่างเพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยบ่มที่อุณหภูมิห้องและทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังจากบ่มที่ 28 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ได้มี ช่วงผลลัพท์กำลังรับแรงอัดตั้งแต่ไม่สามารถใช้งานได้ไปจนถึง 95 เมกะปาสกาล

A. Bhowmick และ S. Ghosh (2012) ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยโรงผลิตไฟฟ้า พบว่าการปรับองค์ประกอบของสัดส่วนเถ้าลอย ต่อทราย ซิลิกาต่อโซเดียมออกไซด์ และน้ำต่อเถ้าลอย จะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีการไหลตัวที่เหมาะสม กับการใช้งาน และพบว่าสัดส่วนที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูง คือสัดส่วนระหว่าง เถ้าลอยต่อทรายเป็น 2 สัดส่วนซิลิกาต่อโซเดียมออกไซด์เป็น 1.5 และสัดส่วนระหว่างน้ำต่อเถ้าลอย อยู่ระหว่าง 0.37 ถึง 0.40

H.Y. Leong (2016) พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยแหล่งซาราวักมีค่ากำลัง รับแรงอัด 55 เมกะปาสกาล ต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยแหล่งเกลดสโตนที่มีค่ากำลัง รับแรงอัดสูงถึง 62 เมกะปาสกาล และผลของความแตกต่างทางด้านการกระจายตัวของอนุภาค องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางรูปร่าง และวัฏภาคอสัณฐาน มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด

S. Onutai และคณะ (2016) ได้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโดยใช้ ไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน พบว่าโครงสร้างที่มีรูพรุนของจีโอพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นได้เมื่อใช้ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง และได้รับความร้อนจากเตาอบไมโครเวฟที่ใช้กำลังไฟ 850 วัตต์ อธิบายได้ว่าการที่ชิ้นงานที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงเมื่อได้รับอุณหภูมิ เพิ่มขึ้นอย่างทันที จะทำให้เกิดพันธะอะลูมิโนซิลิเกตในจีโอพอลิเมอร์ได้ในเวลา 1 นาที

N. Ranjbar และคณะ (2016) ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากถั่วลอ่ย พบว่าการเติมไมโครสตีลไฟเบอร์ช่วยพัฒนาความสามารถในการยืดหยุ่นและความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์

#### 2.4.4 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากวัสดุอื่นๆ

Z. Chen และคณะ (2016) พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากเตาเผาขยะสามารถสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ที่อากาศเข้าได้โดยมีความหนาแน่นต่ำ การวิเคราะห์โครงสร้างอนุภาคแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซิน โดยการกระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก และพบวัฏภาคผลึกที่เกิดขึ้นประกอบด้วยโซเดียม อะลูมินา และ ซิลิกา

M. Cyr, R. Idir และ T. Poinot (2012) พบว่าเศษขวดแก้วสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้โดยไม่ต้องใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสม

M. Kyncl (2008) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนอะลูมินาและเหล็กที่ได้จากการบำบัดน้ำและผลิตน้ำดื่ม ไปใช้ซ้ำในกระบวนการบำบัดน้ำ การผลิตซีเมนต์ และการเกษตร พบว่านอกจากประโยชน์จากการนำดินตะกอนไปใช้งานแล้ว ยังช่วยลดปริมาณของเสียและช่วยปกป้องสิ่งแวดล้อมได้ด้วย

N.U. Amin และคณะ (2016) พบว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์จากถั่วลอ่ยชานอ้อย และดินขาวได้ โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด 2,487 PSI (17.1 MPa) เมื่อใช้อัตราส่วนถั่วลอ่ยชานอ้อยต่อดินขาว 36 ต่อ 64 คิดเทียบเท่าเป็นอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ 2.5

J. He และคณะ (2013) พบว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากเรดมัตต์และถั่วแกลบ ค่าความแข็งแรง ค่าความต้านทานของวัสดุต่อการเสียดสี และความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์จะแปรผันตามอัตราส่วนถั่วแกลบต่อเรดมัตต์ การบ่มที่นานขึ้นจะเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความยืดหยุ่นแต่จะทำให้ความเหนียวลดลง

T.A. Kua และคณะ (2016) พบว่ากากกาแฟที่เป็นของเสียจากการชงกาแฟสามารถผสมกับตะกอนเหล็กและถั่วลอ่ยและสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายที่เตรียมจากโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ โดยการผสมกากกาแฟกับตะกอนเหล็กให้สมบัติที่ดีกว่าการผสมกับถั่วลอ่ย

แม้ในปัจจุบันจะมีงานวิจัยหลายชิ้นศึกษาเกี่ยวกับการนำผลิตผลพลอยได้หรือของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เตรียมเป็นจีโอพอลิเมอร์ แต่ยังไม่พบงานวิจัยชิ้นใดทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ดินตะกอนประปาและถั่วแกลบ งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์ที่จะสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยใช้กากดินตะกอนประปาและถั่วแกลบเป็นวัตถุดิบตั้งต้น เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อันจะส่งผลให้มีการนำวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมไปใช้

อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถแก้ปัญหาการจัดการของเสียจากระบวนการผลิตน้ำประปาและการผลิตข้าวได้อย่างยั่งยืน



### บทที่ 3

## วัสดุและวิธีการทดลอง

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง การวิเคราะห์ และการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
X-ray fluorescence (XRF)	Horiba	XGT-5200
X-ray diffractometer (XRD)	Bruker	D2
Scanning electron microscope (SEM)	Joel	JSM-6010LV
Ion sputtering device	Joel	JFC-1110E
Laser particle size analyzer (LPA)	Horiba	LA-950V2
Differential thermal analyzer (DTA)	Perkin Elmer	DTA7
Uniaxial press	Carver	2702
Drying oven	Binder	ED240
Laboratory test sieve	Retsch	# 325 MESH
Precision wafering diamond saw	Buehler	ISOMET 1000
Furnace	Nabertherm	LH 30/13
Gilmore needle ASTM C266	Humboldt	H-3150



### 3.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุและสารเคมี	ผู้ผลิต	ชนิด / เกรด
Sodium hydroxide	Merck	ACS, Reag. Ph Eur
Sodium silicate solution	Merck	Extra pure
Water treatment sludge	โรงผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง	-
Rice husk ash	Yong-sa-nguan rice mill Co.,ltd.	-

#### 3.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด (Sodium hydroxide pellets)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด สูตรเคมี NaOH ใช้เกรด ACS, Reag. Ph Eur เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก สิ่งเจือปนหลักคือ Potassium ไม่เกินร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจากบริษัท Merck & Co., Inc.)

#### 3.2.2 โซเดียมซิลิเกตชนิดสารละลาย (Sodium silicate solution)

โซเดียมซิลิเกตชนิดสารละลาย สูตรเคมี  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  องค์ประกอบหลักประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์  $\text{Na}_2\text{O}$  7.5-8.5 โดยน้ำหนัก ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 27.0 โดยน้ำหนัก และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 65.0 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจาก บริษัท Merck & Co., Inc.)

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

#### 3.3.1 การทดลองตอนที่ 1

เป็นการทดลองการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาโดยศึกษาสถานะที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ สถานะการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลาย ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3 และมีการกำหนดสถานะในการทดลอง ดังนี้

1) การทดลองสถานะในการเผาแคลไซน์ กำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

เป็น 1.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายเป็น 1.0 โดยน้ำหนัก และบ่ม  
ชั้นงานที่อุณหภูมิห้อง

2) การทดลองความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำหนดให้  
เผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อ  
โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายเป็น 1.0  
โดยน้ำหนัก และบ่มชั้นงานที่อุณหภูมิห้อง

3) การทดลองอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำหนดให้  
เผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลาย  
โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายเป็น 1.0 โดย  
น้ำหนัก และบ่มชั้นงานที่อุณหภูมิห้อง

4) การทดลองอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลาย กำหนดให้  
เผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลาย  
โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1.5  
โดยน้ำหนัก และบ่มชั้นงานที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรในการทดลองตอนที่ 1

WTS calcination		NaOH concentration (M)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> to NaOH ratio	WTS to Solution ratio
500 °C	600 °C			
-	2 hr.	5	0.5	0.8
4 hr.	4 hr.	10	1.0	1.0
6 hr.	6 hr.	15	1.5	1.2
8 hr.	-	20		

### 3.3.2 การทดลองตอนที่ 2

เป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณเถ้าแกลบเป็นตัวเติมในส่วนผสมงีไอพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของจีไอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอน และศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่มจีไอพอลิเมอร์ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.4 และมีการกำหนดสถานะในการทดลอง ดังนี้ เสาเคลไซน์ดินตะกอนประปา 600 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายเป็น 1.0 โดยน้ำหนัก

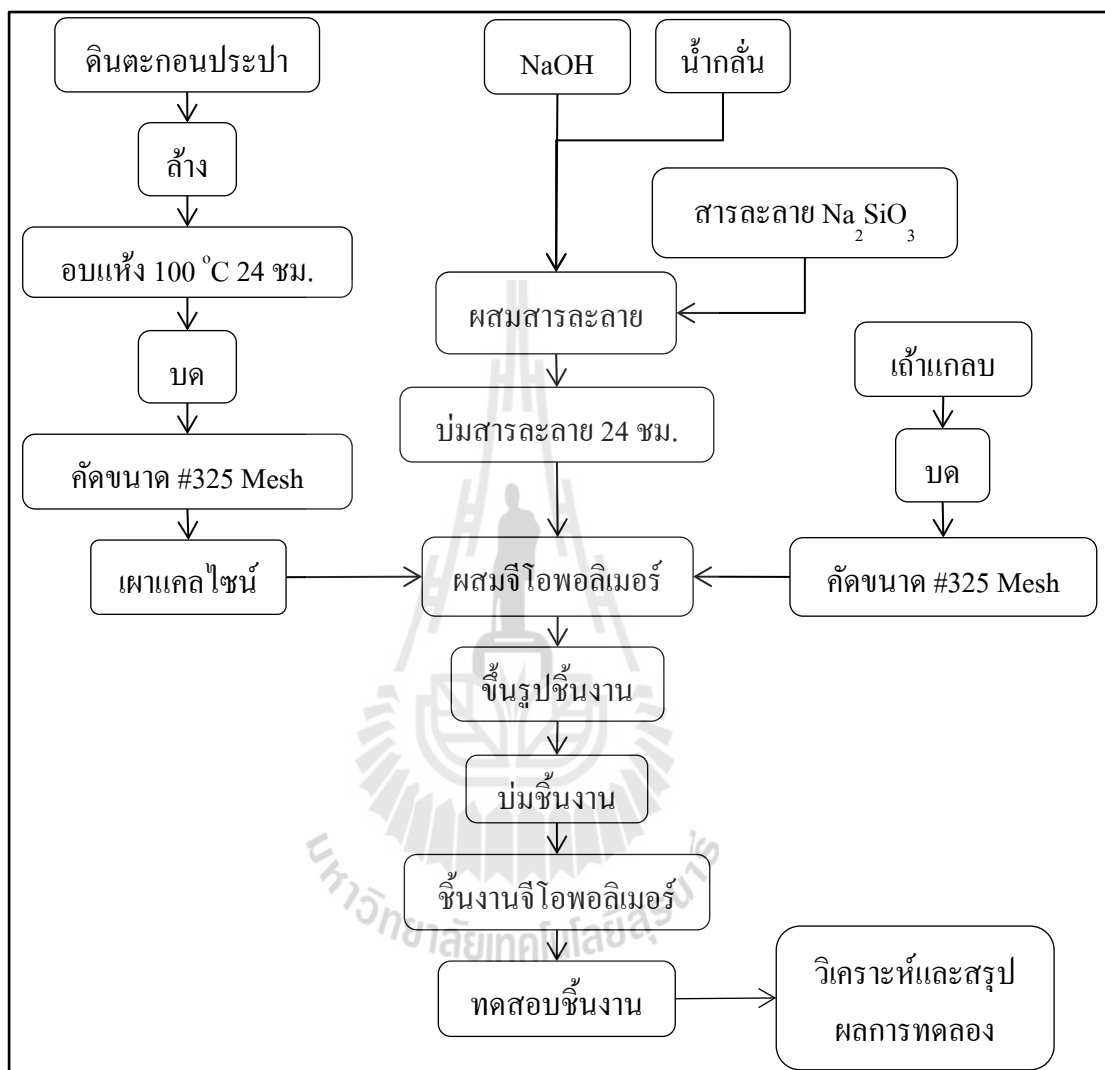
ตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรในการทดลองตอนที่ 2

RHA content (%)	Curing temperature
0	RT
15	60
30	
40	
50	



### 3.4 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงรูปขั้นตอนและวิธีการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองและวิธีการทดลองอธิบายไว้ดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 3.4.1 การเตรียมผงจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา

1) ดินตะกอนประปาที่ได้มาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน การประปา นครหลวง เป็นก้อนดินที่ผ่านการรีดน้ำด้วยวิธีฟลอตเตอร์เพรส เนื้อดินที่ได้ค่อนข้างแข็งจึงถูกย่อยลดขนาดด้วยเครื่องบด ให้มีขนาดเล็กง่ายต่อการล้างและละลายน้ำ

- 2) ดินที่ได้จะถูกนำไปปั่นผสมกับน้ำ ด้วยอัตราส่วนดินต่อน้ำ 0.8-1.2 โดยน้ำหนัก ปั่นเป็นเวลา 6-12 ชั่วโมง
- 3) กรองน้ำดินผ่านตะแกรง #325 Mesh เพื่อแยกกรวดทรายและอินทรีย์วัตถุออกจากน้ำดิน
- 4) อบน้ำดินด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นานประมาณ 12 ชั่วโมงจนแห้งสนิท
- 5) บดดินแห้งด้วยโกร่งไฟฟ้า ลดขนาดดินเพื่อนำไปคัดขนาด
- 6) คัดขนาดดินด้วยตะแกรง #325 Mesh
- 7) เผาแคลไซต์ดินตะกอนประปาด้วยความร้อน 500 และ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเผาแ่ง 2-8 ชั่วโมง

### 3.4.2 การเตรียมผงตัวเติมซิลิกาจากเถ้าแกลบ

- 1) นำเถ้าแกลบไปล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อล้างแยกแกลบดิบ ดิน หิน และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ
- 2) บรรจุเถ้าแกลบที่ล้างแล้วใส่ใน Ball mill บดทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง เพื่อลดขนาด
- 3) คัดขนาดเถ้าแกลบด้วยตะแกรง # 325 Mesh
- 4) อบเถ้าแกลบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นานประมาณ 12 ชั่วโมง จนแห้งสนิท

### 3.4.3 การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์

สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ คือ สารละลายที่เตรียมได้จากการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

- 1) นำ NaOH ชนิดเม็ดไปกวนผสมกับน้ำกลั่นทิ้งไว้ 15-30 นาที เตรียมให้ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 5 10 15 และ 20 โมลาร์
- 2) นำสารละลาย NaOH ไปกวนผสมกับสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  นาน 30 นาที ในอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  เป็น 0.5 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนัก
- 3) บ่มสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งาน

### 3.4.4 การขึ้นรูปและการบ่มจีโอพอลิเมอร์

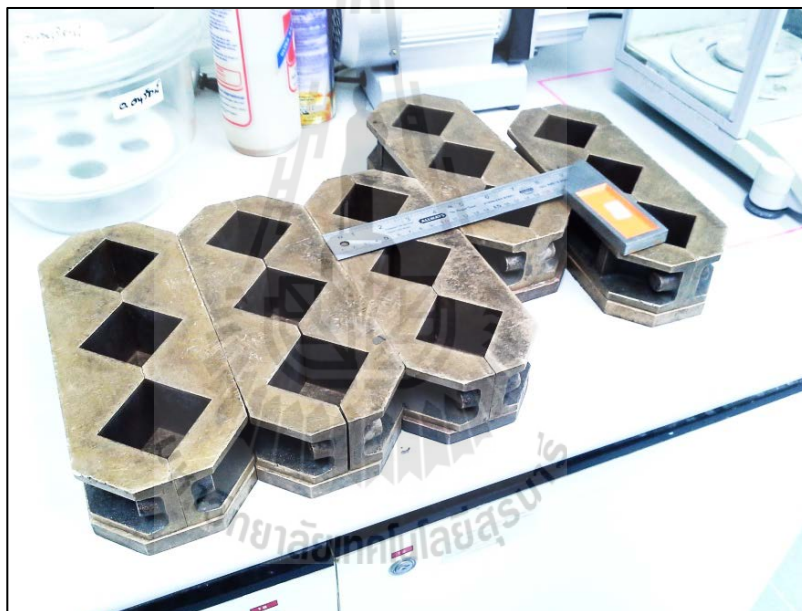
- 1) ผสมผงจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบเป็นส่วนผสม โดยชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียด 0.001 กรัม โดยชั่งน้ำหนัก

140-150 กรัมต่อ 1 ตัวอย่าง ให้มีปริมาณแก้วแกลบในส่วนผสมร้อยละ 0 15 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก

2) เทผงจีโอพอลิเมอร์ลงในโถรงสำหรับกวนผสมสาร นำสารละลายที่เตรียมได้ มาผสมเข้ากับผงจีโอพอลิเมอร์ กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้สัดส่วนผงจีโอพอลิเมอร์ต่อสารละลายอัลคาไลน์ 0.8 1.0 และ 1.2 โดยน้ำหนัก

3) ขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการเติมส่วนผสมลงในแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (2012) ดังรูปที่ 3.2

4) จีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปบ่มที่ อุณหภูมิห้อง และ/หรือ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน และ/หรือ 28 วัน และบันทึกเวลาในการก่อตัว

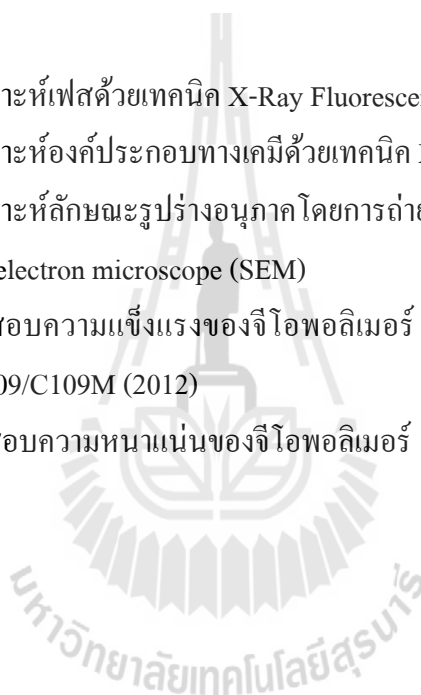


รูปที่ 3.2 แสดง Cubic molds 50x50 mm. บริษัทผู้ผลิต Reco รุ่น C-010.

### 3.5 การทดสอบสมบัติ

ดินตะกอนประปา เถ้าแกลบ และชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ จะถูกทดสอบลักษณะและคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค ของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ โดยการทดสอบด้วยเทคนิค Laser particle size analysis (LPA)
- 2) การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของดินตะกอนประปาด้วยเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA)
- 3) เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้กิลล์มอร์นีดเดิลส์ ตามมาตรฐาน ASTM C266 (2013)
- 4) การวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)
- 5) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
- 6) การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างอนุภาคโดยการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)
- 7) การทดสอบความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ โดยการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (2012)
- 8) การทดสอบความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์



### 3.5.1 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง อาศัยหลักการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของแสง โดยใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

เครื่องมือ : Laser scattering particle size distribution analyzer (LPA) ดังแสดงใน

รูปที่ 3.3

ผู้ผลิต : HORIBA

รุ่น : LA-950V2



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่อง Laser scattering particle size distribution analyzer (LPA)

#### วิธีการทดสอบ

- 1) เตรียมผงตัวอย่าง โดยสุ่มปริมาณ 1 กรัม
- 2) เติมผงตัวอย่างลงไปในช่องลักษณะเหมือนกรวยภายในเครื่อง
- 3) ควบคุมการทดสอบ โดยคอมพิวเตอร์
- 4) บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป



### 3.5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน

การวิเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของผงดินตะกอนประปา โดยอาศัยหลักการ การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน ค่าที่วัดได้คือค่าการดูดและคายพลังงานเพื่อเปลี่ยนแปลงทางเฟสของตัวอย่าง

เครื่องมือ : Differential thermal analyzer (DTA) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ผู้ผลิต : Perkin Elmer

รุ่น : DTA7



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่อง Differential thermal analyzer (DTA)

#### วิธีการทดสอบ

- 1) เตรียมผงตัวอย่างโดยสุ่มปริมาณ 1 กรัม
- 2) เติมผงตัวอย่างลงไปในห้องใส่ผงตัวอย่างภายในเครื่อง
- 3) ควบคุมการทดสอบโดยกำหนดอุณหภูมิในการทดสอบในช่วง 25 ถึง 1,190 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 4) บันทึกผลการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.5.3 การทดสอบเวลาในการก่อตัว

การทดสอบเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ โดยกิลล์มอร์นีดเดิลส์ ตามมาตรฐาน ASTM C266 (2013) เข็มสำหรับวัดเวลาในการเริ่มก่อตัวมีน้ำหนัก 113.4 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 2.12 มิลลิเมตร และเข็มวัดเวลาสิ้นสุดการก่อตัวมีน้ำหนัก 453.6 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 มิลลิเมตร โดยเวลาในการก่อตัวจะถูกบันทึกเมื่อปลายเข็มทั้งสองไม่สามารถกดชิ้นงานให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้

เครื่องมือ : Gilmore needle ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ผู้ผลิต : Humboldt

รุ่น : H-3150



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่อง Gilmore needle

#### วิธีการทดสอบ

- 1) วัดค่าเวลาในการเริ่มก่อตัว ยกเข็มฝั่งเริ่มก่อตัวขึ้น
- 2) นำชิ้นงานวางลงที่แน่นอน
- 3) วางเข็มลงบนผิวชิ้นงานเบาและปล่อยมือ
- 4) บันทึกเวลาเมื่อเข็มไม่สามารถกดผิวชิ้นงานให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้
- 5) วัดค่าเวลาในการสิ้นสุดก่อตัว ยกเข็มฝั่งสิ้นสุดก่อตัวขึ้น ทำซ้ำข้อที่ 2-4
- 6) บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.5.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี อาศัยหลักการที่รังสีเอ็กซ์ไปกระทบ ทำให้ตัวอย่างเกิดการปล่อยโฟตอน ที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด

เครื่องมือ : X-ray fluorescence (XRF) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

ผู้ผลิต : HORIBA

รุ่น : XGT-5200



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่อง X-ray fluorescence (XRF)

#### วิธีการทดสอบ

- 1) เติมหางตัวอย่างลงในอุปกรณ์ใส่หางตัวอย่าง (Sample holder) ให้เต็มช่อง
- 2) นำอุปกรณ์ใส่หางตัวอย่างใส่เข้าที่วางในเครื่อง XRF
- 3) ควบคุมการทดสอบโดยคอมพิวเตอร์
- 4) บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.5.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส อาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยรังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบนเมื่อกระทบกับผลึก การเลี้ยวเบนในช่วงมุมตกกระทบ จะเป็นรูปแบบเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด

เครื่องมือ : X-ray diffractometer (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3.7

ผู้ผลิต : BRUKER

รุ่น : D2



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

#### วิธีการทดสอบ

- 1) เติมหงตัวอย่างลงในช่องว่างของอุปกรณ์ใส่ผงตัวอย่างให้เต็มช่อง
- 2) ใช้แผ่นกระจกกดคลึงผงตัวอย่างในอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างให้แน่นและเรียบ
- 3) นำอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างประกอบเข้าชุดแล้วนำเข้าเครื่องตรวจวิเคราะห์
- 4) ควบคุมการทดสอบโดยคอมพิวเตอร์
- 5) บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

#### สถานะที่ใช้ในการทดสอบ

Generator tension	= 30 KV	End angle	= 80 degree
Generator current	= 10 mA	Time per step	= 0.2 s.
Start angle	= 5 degree	Step size	= 0.01 degree

### 3.5.6 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง

การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง อาศัยหลักการปล่อยลำอิเล็กตรอนให้สะท้อนกับพื้นผิวของชิ้นงาน อิเล็กตรอนที่สะท้อนจะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่จะถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณแสดงในจอภาพและสามารถบันทึกและนำไปวิเคราะห์ได้ พื้นผิวของวัสดุจะสามารถสะท้อนอิเล็กตรอนตามหลักการนี้ได้เมื่อมีพื้นผิวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงต้องทำการฉาบพื้นผิวชิ้นงานด้วยเครื่องฉาบไอออนโลหะทองคำ

เครื่องมือ : Ion sputtering device ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ผู้ผลิต : Joel

รุ่น : JFC-1110E



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่อง Ion sputtering device

เครื่องมือ : Scanning electron microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ผู้ผลิต : Joel

รุ่น : JSM-6010LV



รูปที่ 3.9 แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

#### วิธีการทดสอบ

- 1) เตรียมตัวอย่างชนิดก้อน ให้ได้ขนาดประมาณ 5 x 5 เซนติเมตร โดยหักชิ้นงานเปิดพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์ และเตรียมตัวอย่างชนิดผง โดยโรยลงบนเทปคาร์บอนและเกาะให้ผงส่วนเกินหลุดออกไป
- 2) นำตัวอย่างไปติดตั้งที่แท่นติดชิ้นงาน โดยใช้เทปคาร์บอนติดระหว่างชิ้นงานกับแท่น
- 3) ฉาบผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Ion sputtering device
- 4) นำชิ้นงานที่ฉาบได้ ไปเข้าเครื่อง SEM
- 5) ควบคุมการทดสอบ โดยคอมพิวเตอร์
- 6) บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.5.7 การวัดกำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน

การทดสอบความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (2012) โดยเครื่อง Uniaxial press เป็นเครื่องอัดไฮดรอลิกชนิดควบคุมด้วยมือ โดยอัดทำลายชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานได้รับแรงอัดเกินกำลังรับแรงอัด ชิ้นงานจะแตกออก จุดบันทึกค่าแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตก และนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ไปทำการวิเคราะห์

เครื่องมือ : Uniaxial press

ผู้ผลิต : Carver

รุ่น : 2702

วิธีการทดสอบ

- 1) เตรียมเครื่อง Uniaxial press โดยตั้งระดับแผ่นเพดานและแผ่นพื้นล่างให้มีระยะห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร
- 2) นำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบกำลังรับแรงอัดวางบริเวณกลางแผ่นพื้นล่าง ปิดฝาเครื่อง
- 3) อัดชิ้นงานอย่างช้าๆ อ่านค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นบนเกจ
- 4) เมื่อชิ้นงานแตก ให้บันทึกค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อัดได้
- 5) บันทึกผลการทดลอง แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดในหน่วย เมกะปาสกาล (MPa) ดังแสดงในสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$fm = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้  $fm$  คือ ค่ากำลังรับแรงอัดในหน่วย [MPa]

$P$  คือ ค่าแรงอัดสูงสุดในหน่วย [N]

$A$  คือ พื้นที่รับแรงของชิ้นงานในหน่วย [ $\text{mm}^2$ ]

### 3.5.8 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่าง จะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C373-88 (1994)

วิธีการทดสอบความหนาแน่น

- 1) ชั่งงานจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านการบ่มไปอบในตู้อบไล่ความชื้น อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง ( $W_D$ )
- 2) นำชิ้นงานลงแช่น้ำกลั่นในบีกเกอร์ แล้วนำไปใส่หม้อดูดความชื้น (Desiccator) โดยให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลา จากนั้นใช้เครื่องดูดสุญญากาศเพื่อไล่อากาศออกจากชิ้นงานเป็นเวลา 6-12 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.10
- 3) นำตัวอย่างในข้อที่ 2 ไปทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ ( $W_{SS}$ )
- 4) ต่อมาชั่งน้ำหนักอิมเมอร์ชันในน้ำ ( $W_S$ ) โดยใช้ผ้าชุบน้ำบิดให้หมาดแล้วเช็ดน้ำส่วนเกินที่ผิวออก แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่น
- 5) การคำนวณหาความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของตัวอย่าง

สูตรคำนวณปริมาตร ( $V$ ) ของตัวอย่าง ดังแสดงในสมการ (3.2)

$$V = W_S - W_{SS} \quad (3.2)$$

สูตรคำนวณความหนาแน่นของตัวอย่าง ดังแสดงในสมการ (3.3)

$$\text{Bulk density} = \frac{W_D}{V} \quad (3.3)$$





รูปที่ 3.10 แสดงการวัดความดันอากาศในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องวัดความดันอากาศและหม้อสุญญากาศ

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ใช้วิธีการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics)

- 1) การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean) มีสูตรดังสมการที่ (3.4)

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (3.4)$$

- 2) การวัดการกระจาย ได้แก่ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) มีสูตรดังสมการที่ (3.5)

$$SD. = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}} \quad (3.5)$$

เมื่อกำหนดให้  $SD.$  คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\sum x$  คือ ผลบวกของข้อมูลทั้งหมด

$n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ

ซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการพัฒนาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการศึกษาร่องรอยองค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบด้วยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าดินตะกอนประปามีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณร้อยละ 58.99 และ 24.64 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับที่พบในเถ้าลอย (C. Suksiripattanapong, et al., 2015) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของดินเคโอลิน (Kaolin) พบว่าดินตะกอนประปามีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาในปริมาณที่ใกล้เคียงกับดินเคโอลิน แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนประปาเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้เช่นเดียวกับดินเคโอลิน

การปรับปรุงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์โดยการเพิ่มอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเหมาะสมที่จะใช้วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ผลการศึกษาร่องรอยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบจากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบเป็นวัสดุที่ไม่มีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ แต่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงถึงร้อยละ 89.17 โดยน้ำหนัก ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้ซิลิกาเป็นวัสดุเพื่อใช้ปรับอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น เวลาในการก่อตัว และความแข็งแรงของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น

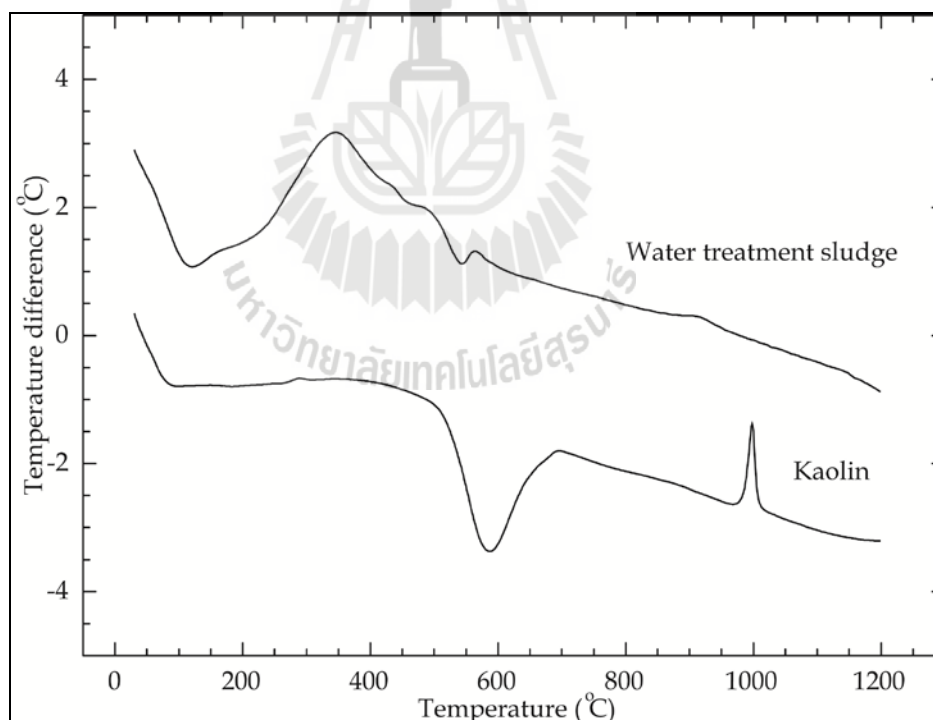
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโดยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)								
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Etc.
ดินเคโอลิน*	33.08	58.91	2.02	3.52	0.12	1.03	0.68	0.62	0.02
ดินตะกอนประปา	24.64	58.99	1.54	4.08	0.69	1.14	6.63	0.88	1.41
เถ้าแกลบ	0.00	89.17	1.12	7.29	0.61	1.22	0.41	0.03	0.15

\*ตัวอย่างดินเคโอลิน จากบริษัท Sigma-Aldrich

## 4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของดินตะกอนประปา

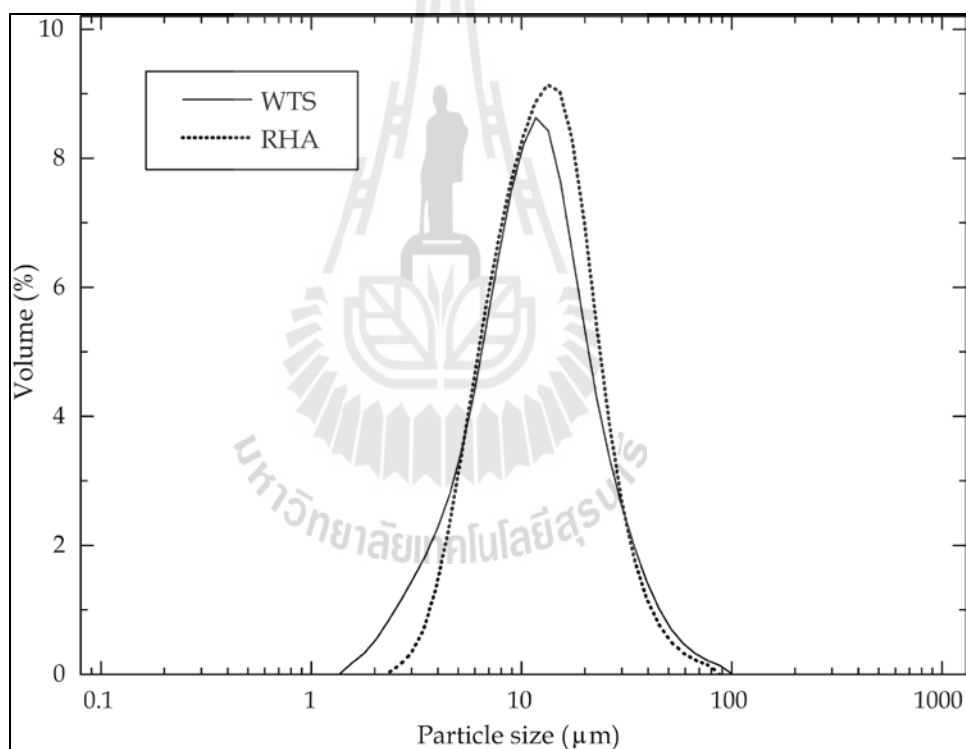
การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential thermal analysis, DTA) ของดินตะกอนประปาแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินตะกอนประปา ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับดินเคโอลินแล้วพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินทั้งสองมีลักษณะคล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยช่วงอุณหภูมิที่มีความสำคัญคือช่วงที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) เมื่อดินเกิดการสูญเสียน้ำใน โครงสร้าง (Chemical combined water) จะทำให้ โครงสร้างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเคโอลินไนต์ไปเป็นเมตะเคโอลิน (Metakaolin) ส่งผลให้ความเสถียรของโครงสร้างดินลดลงเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ช่วงอุณหภูมิที่ส่งผลให้ดินตะกอนประปาเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวคือช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส ในขณะที่ดินเคโอลินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิ 525 ถึง 675 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินตะกอนประปาที่ 500 และ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนเปรียบเทียบระหว่างดินเคโอลินและดินตะกอนประปาด้วยเครื่องวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์

#### 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของผงดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ

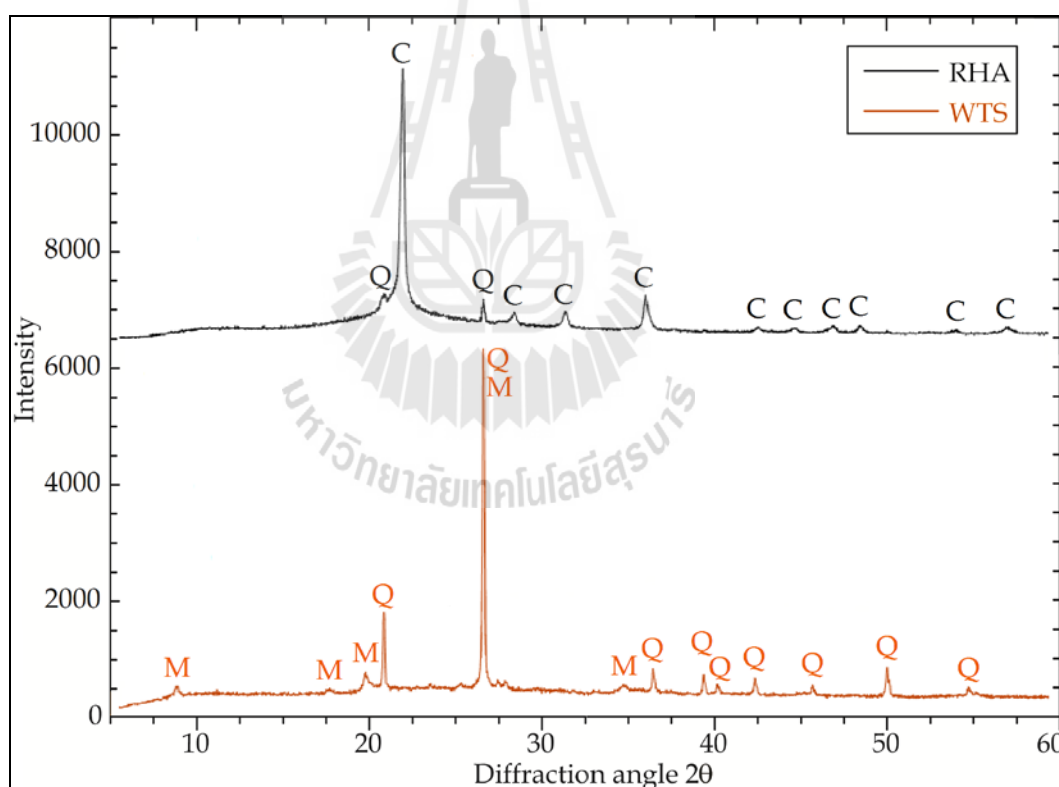
ผลการวัดการกระจายขนาดอนุภาคของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าการกระจายขนาดของอนุภาคดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบมีค่าใกล้เคียงกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบมีค่าเท่ากับ 13.20 และ 13.70 ไมโครเมตร ตามลำดับ ด้วยการใช้ตะแกรงคัดขนาดที่เท่ากัน ในการเตรียมวัตถุดิบ ส่งผลให้การกระจายขนาดอนุภาคของดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในการทดลองนี้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคและการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันสามารถตัดออกไปได้ ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับสมบัติของวัตถุดิบและสภาวะในการสังเคราะห์เท่านั้น



รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของผงดินตะกอนประปา (WTS) และเถ้าแกลบ (RHA)

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของดินตะกอนประปาและถ้ำแถบ

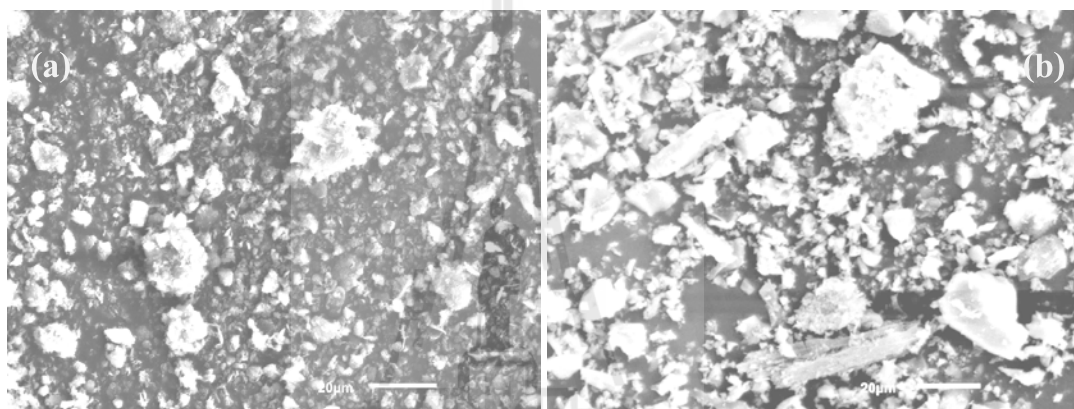
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนประปาประกอบด้วยแร่ควอทซ์ (Quartz,  $\text{SiO}_2$ ) และแร่มีสโคไวต์ (Muscovite,  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) แต่จากผลการทดลองไม่สามารถตรวจพบฟิสิกของแร่โอลิไนต์ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากแร่โอลิไนต์ที่ปะปนอยู่ในดินตะกอนประปามีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับคอลลอยด์ จึงทำให้ไม่สามารถตรวจพบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์แสดงหลักฐานการมีอยู่ของแร่โอลิไนต์ในดินตะกอนประปา (ดังอธิบายในหัวข้อ 4.2) เนื่องจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันในช่วงอุณหภูมิ 525 ถึง 675 เป็นลักษณะเฉพาะของแร่โอลิไนต์ ขณะที่ถ้ำแถบมีซิลิกาที่อยู่ในรูปของแร่ควอทซ์และคริสโตบาไลต์ (Cristobalite,  $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก



รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของผงดินตะกอนประปา (WTS) และถ้ำแถบ (RHA) โดย C, M และ Q แสดงเฟสของแร่คริสโตบาไลต์ มีสโคไวต์ และควอทซ์ ตามลำดับ

#### 4.5 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของดินตะกอนประปาและถ้ำเกลบ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของดินตะกอนประปาและถ้ำเกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 4.4 จากรูปแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของดินตะกอนประปาและถ้ำเกลบมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้อภิปรายไว้ในหัวข้อ 4.3 เมื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะรูปร่าง พบว่าผงดินตะกอนประปาและถ้ำเกลบมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) ซึ่งความไม่สม่ำเสมอของรูปร่างนี้ไม่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ (E. Nimwinya, et al., 2016)



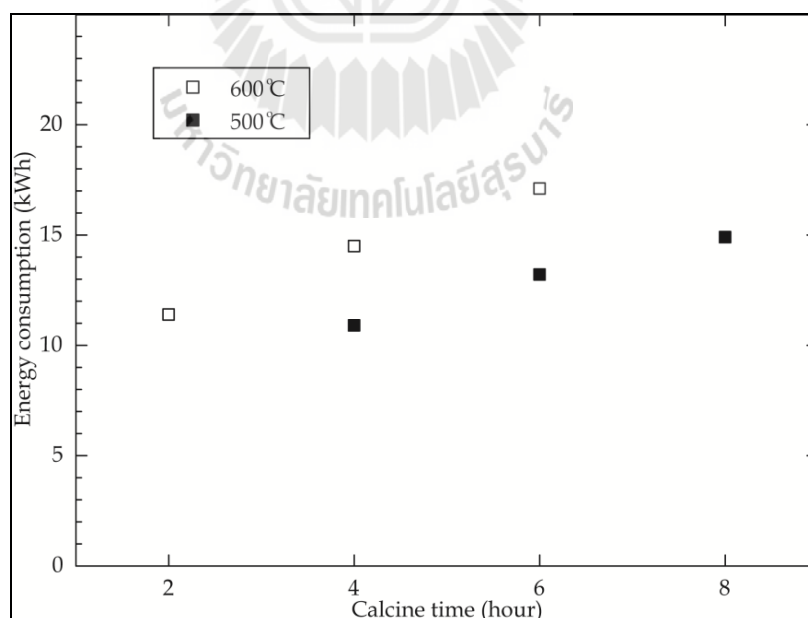
รูปที่ 4.4 แสดงรูปถ่ายระดับจุลภาคของ (a) ผงดินตะกอนประปา และ (b) ผงถ้ำเกลบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.6 ผลของสภาวะการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษาผลของสภาวะการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่ โดยควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตที่ 10 โมลาร์ ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 ควบคุมอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายที่ 1.0 และทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน

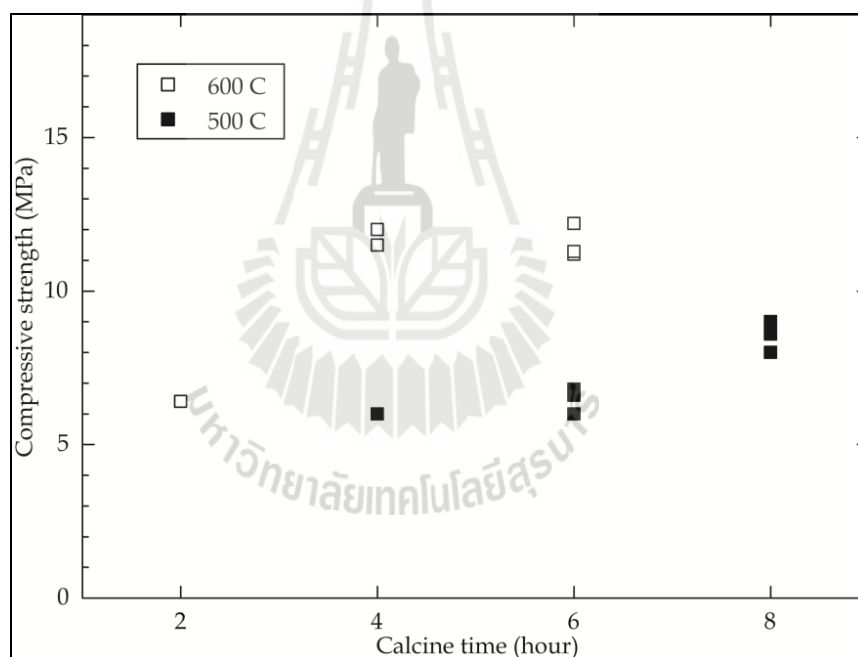
จากการทดลองพบว่าการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นและใช้เวลาในการเผาแคลไซน์ที่นานขึ้นจะส่งผลให้ใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 และจากการทดลองพบว่าการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ 600 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าการเผาแคลไซน์ที่ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 ถึง 33

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของสภาวะการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ พบว่าการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ทำให้ได้ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าและใช้ระยะเวลาในการเผาแคลไซน์ที่รวดเร็วกว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง ในขณะที่ใช้พลังงานในการเผาแคลไซน์ที่ไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 แสดงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา

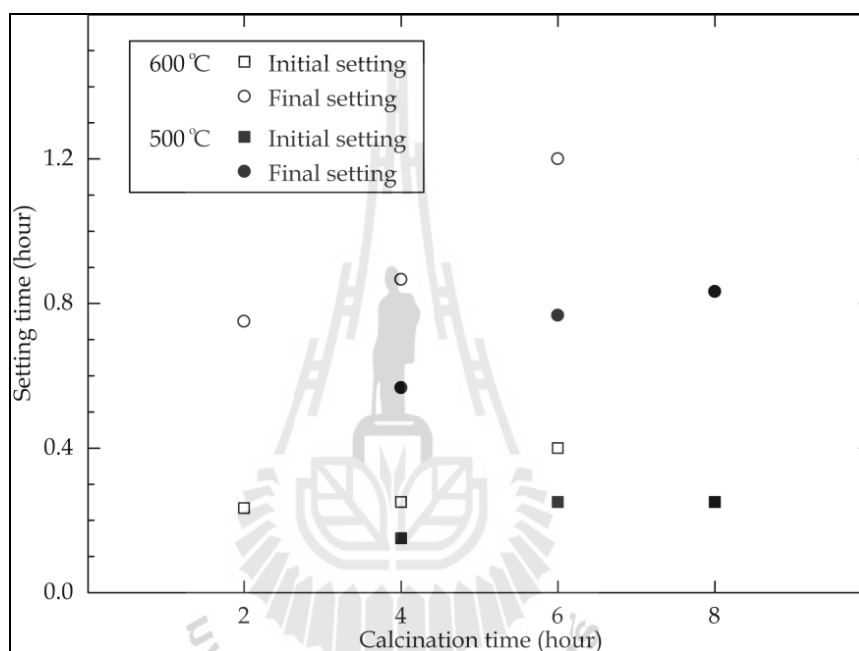
นอกจากนี้ จากผลการทดลองยังพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซต์ที่ 600 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเผาแคลไซต์ 4 และ 6 ชั่วโมง จะทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซต์ที่เหมาะสม และใช้เวลาในการเผาแคลไซต์ที่มากพอ จะทำให้ดินเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของดินจากเคโอลิไนต์เปลี่ยนไปเป็นเมตะเคโอลินได้สมบูรณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเผาแคลไซต์ดินตะกอนประปาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 และ 6 ชั่วโมง จะให้จีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน เนื่องจากดินตะกอนประปาทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างได้ในระดับที่ไม่แตกต่างกัน การเผาแคลไซต์ที่นานเกินไปจึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาแคลไซต์ดินตะกอนประปาคือการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซต์ดินตะกอนประปาที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน

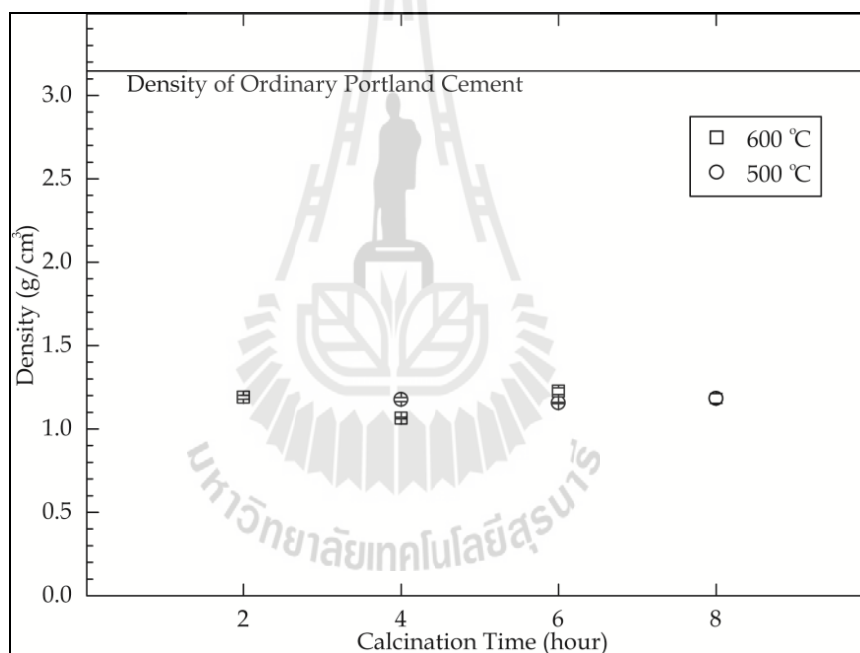


รูปที่ 4.7 แสดงผลของสถานะในการเผาแคลไซต์ดินตะกอนประปรายต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซต์ดินตะกอนประปราย พบว่าชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซต์จาก 500 องศาเซลเซียสเป็น 600 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 53 ถึง 57 ลักษณะดังกล่าวคาดว่าเป็นผลจากสัดส่วนของเฟสเมตะเคโอลินที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซต์ จึงส่งผลให้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซต์ดินตะกอนประปรายที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาไม่ส่งผลต่อการควบคุมความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และจากการทดลองพบว่าชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปามีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ทั่วไปที่มีค่าสูงถึง 3.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ASTM C138/C138M, 2013a) เนื่องจากหลังการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันแล้วจะเกิดรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน (P. Duxson, et al., 2007, V. Saraswathy, and H. Song, 2007, P. Rovnanik, 2010, I. Balczar, et al., 2015, M.L. Gualtieri, et al., 2016) ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีน้ำหนักที่เบา มีความหนาแน่นน้อยกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประมาณ 3 เท่า ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการผลิตวัสดุมวลเบาสำหรับงานก่อสร้าง (E. Nimwinya, et al., 2016)

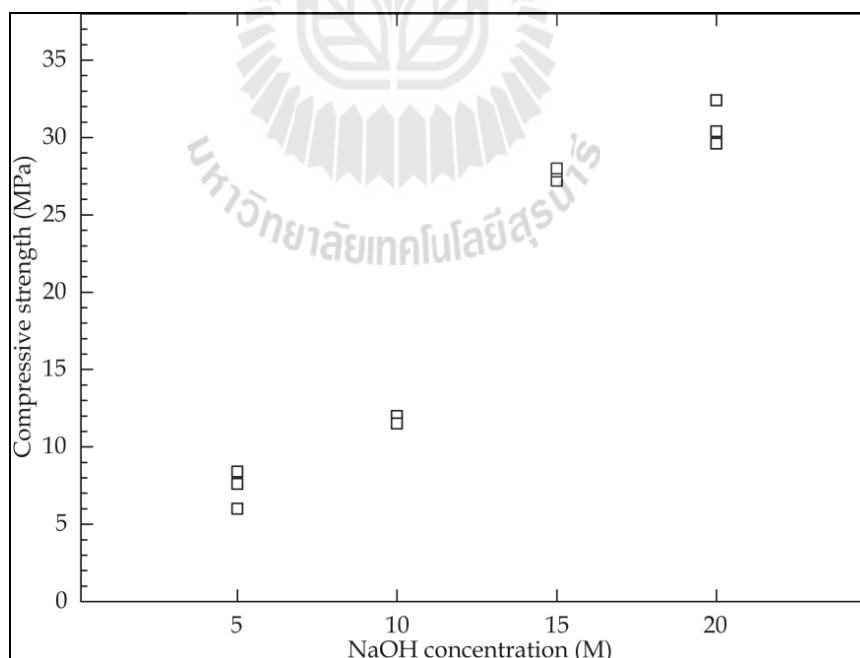


รูปที่ 4.8 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน

#### 4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์

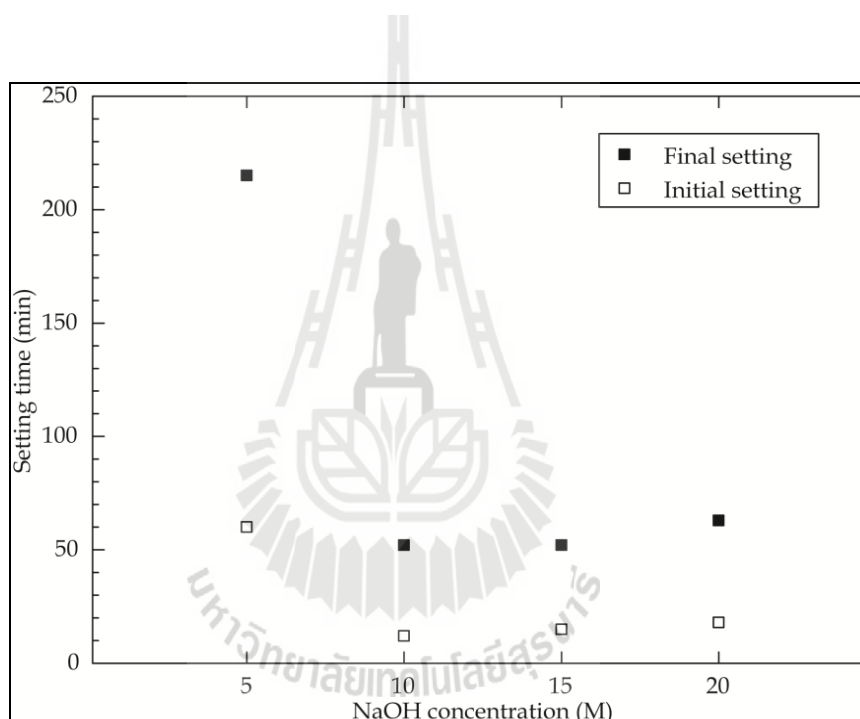
ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่ โดยควบคุมการเผา แคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 ควบคุมอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายที่ 1.0 และ ทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ จากรูปพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปามีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะส่งผลให้ขั้นตอนการแตกตัวของวัตถุดิบอะลูมิโนซิลิเกตเป็นไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้น กำลังรับแรงอัดสูงสุดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 31 เมกะปาสคาล เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 โมลาร์



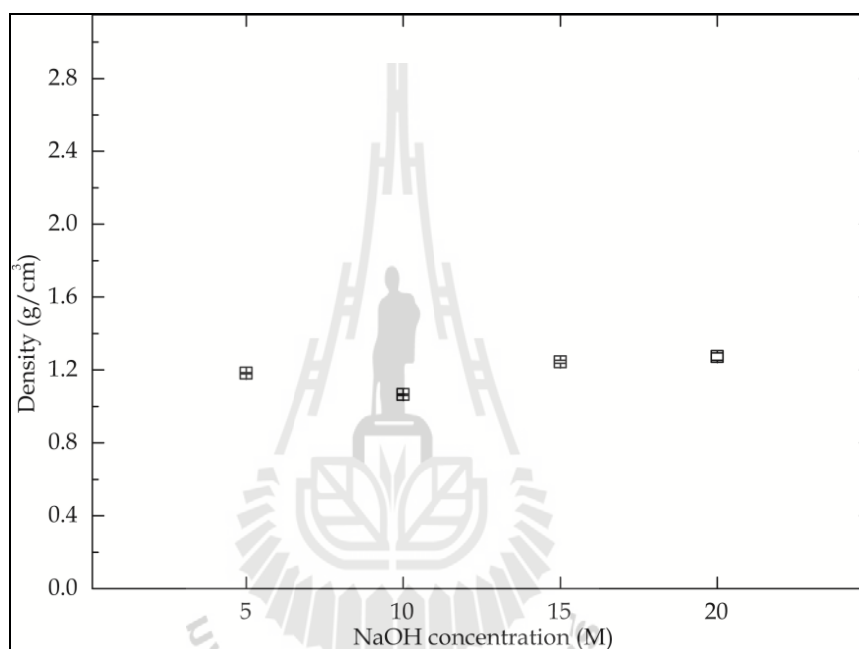
รูปที่ 4.9 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ แสดงในรูปที่ 4.10 เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มสั้นลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายที่สูงจะส่งผลให้กระบวนการแตกตัวของวัตถุดิบเป็นไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเกิดได้เร็วมากขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ 2005) และทำให้มีปริมาณไอออนของโซเดียมซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อไอออนของอะลูมิเนียมและซิลิกอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เชชันเกิดได้รวดเร็วมมากขึ้น และทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง เวลาในการก่อตัวที่เร็วที่สุดของจีโอพอลิเมอร์คือ 52 นาที เมื่อใช้ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์



รูปที่ 4.10 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

รูปที่ 4.11 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ จากรูปพบว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกันไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปามีค่าอยู่ในช่วง 1.07 ถึง 1.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความหนาแน่น 3.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ASTM C138/C138M, 2013a)

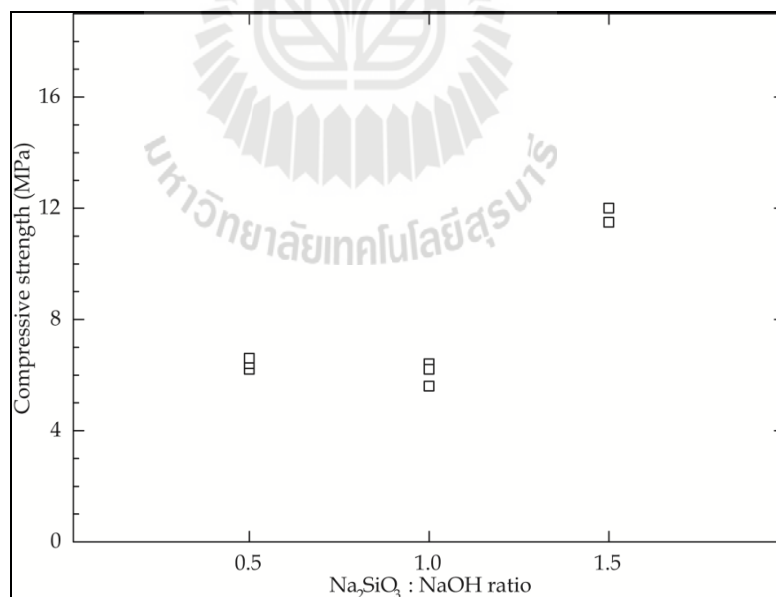


รูปที่ 4.11 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

#### 4.8 ผลของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

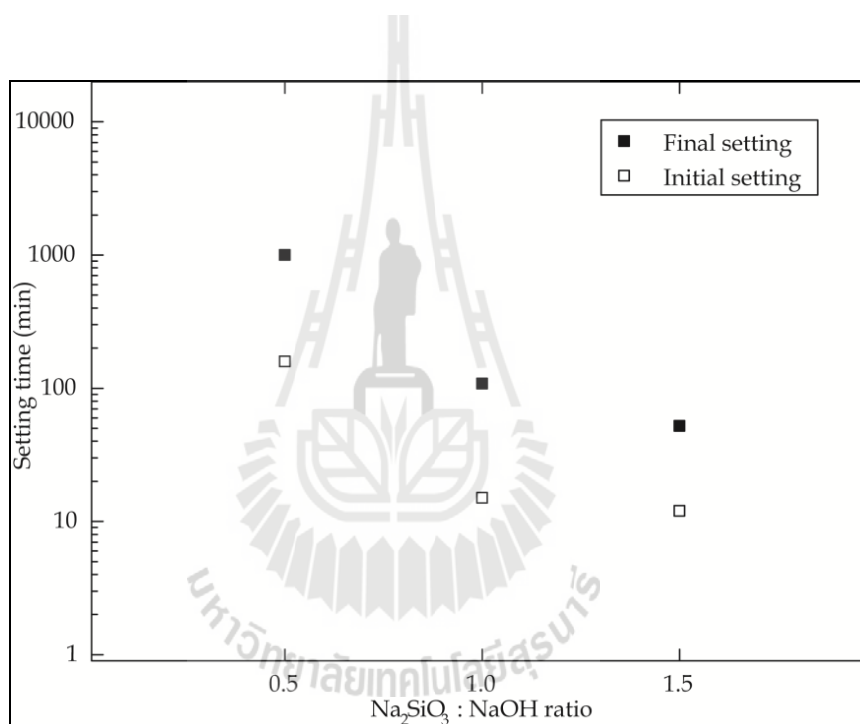
ในการศึกษาผลของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ไว้คงที่ โดยควบคุมการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต 10 โมลาร์ ควบคุมอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายที่ 1.0 และทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน

รูปที่ 4.12 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวยึด (Binder) ไอออนของอะลูมิเนียมและไอออนของซิลิกอนเข้าด้วยกัน ดังนั้นเมื่อมีปริมาณตัวยึดมากขึ้นจึงส่งผลให้การเชื่อมต่อกันของไอออนเป็นโครงสร้างแบบพอลิเมอร์เกิดได้ดีขึ้น เป็นผลให้ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น



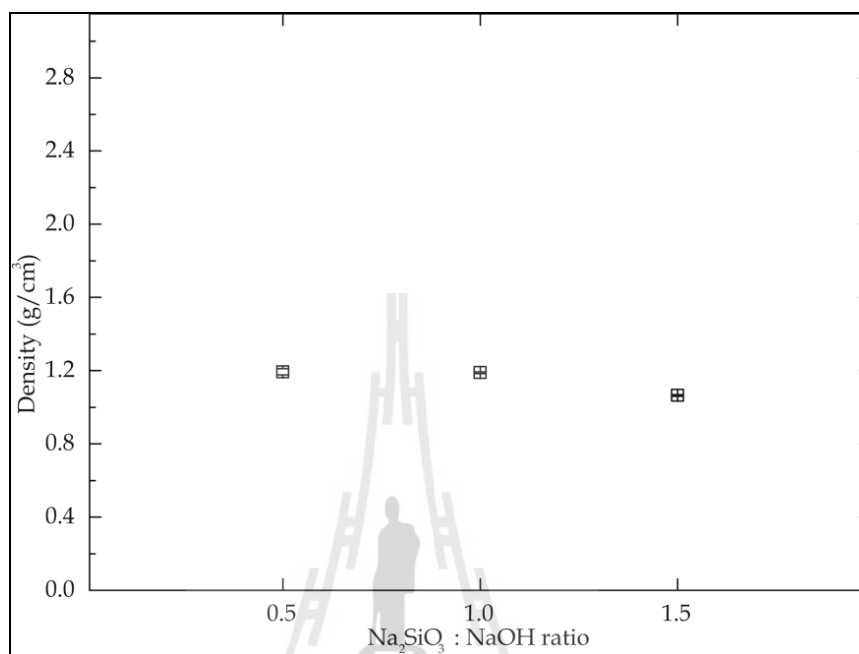
รูปที่ 4.12 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสัมพันธ์ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มในการก่อตัวเร็วขึ้นมาก โดยอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ค่าที่ 0.5 จะใช้เวลาในการก่อตัวนานถึง 1000 นาที และเมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นถึง 1.5 จีโอพอลิเมอร์จะใช้เวลาก่อตัวลดลงเหลือ 52 นาที การก่อตัวที่เร็วขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของโซเดียมซิลิเกตส่งผลให้การเชื่อมประสานโครงสร้างเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น และสอดคล้องกับผลการทดลองของ P. Duxson และคณะ (2007)



รูปที่ 4.13 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

อัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



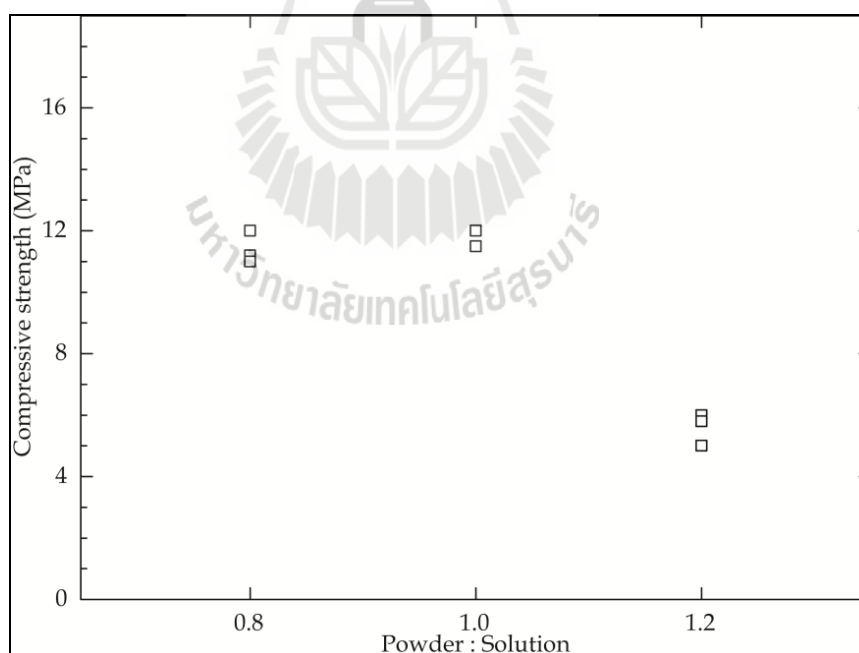
รูปที่ 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน



#### 4.9 ผลของอัตราส่วนระหว่างผงดินตะกอนประปาต่อปริมาณสารละลายต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

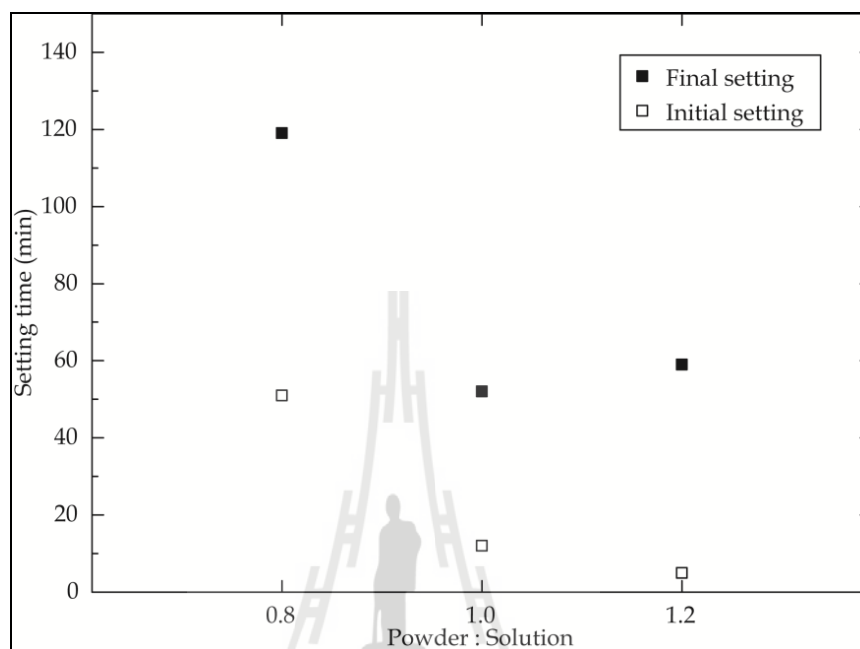
ในการศึกษาผลของอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ไว้คงที่ โดยควบคุมการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต 10 โมลาร์ ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 และทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน

การใช้อัตราส่วนระหว่างผงดินตะกอนประปาต่อปริมาณสารละลายที่ต่างกัน ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์ต่อปริมาณสารละลาย จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีกำลังรับแรงอัดต่ำสุดเท่ากับ 5.6 เมกะปาสคาล เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างผงดินตะกอนประปาต่อปริมาณสารละลายเป็น 1.2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อพื้นที่ผิวของดินตะกอนประปา



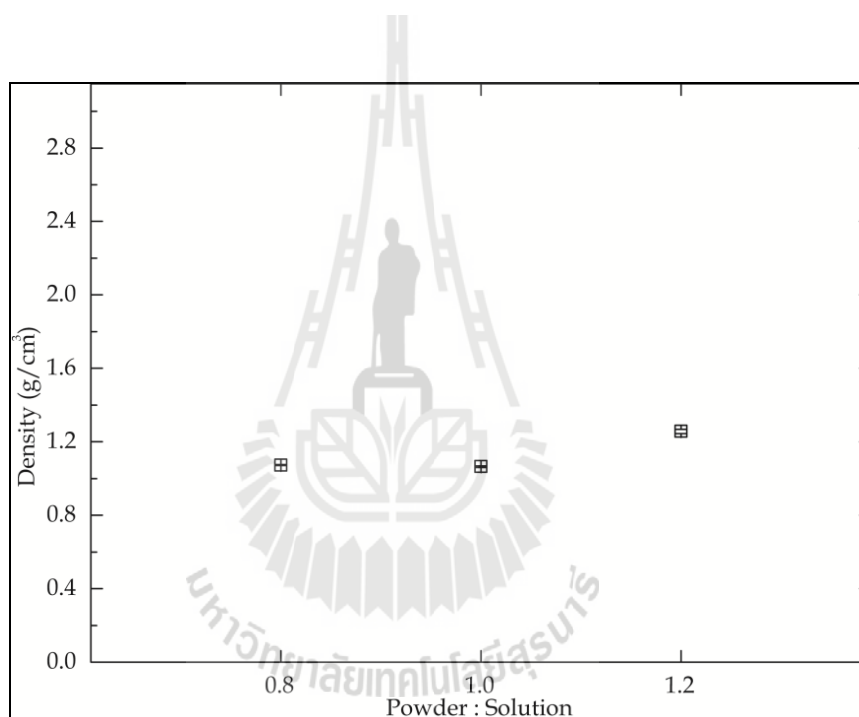
รูปที่ 4.15 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายต่างกัน

ในขณะที่เพิ่มอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาดัสนารละลายสูงขึ้น จะส่งผลให้เวลาในการเริ่มก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาดัสนารละลายต่างกัน

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างผงดินตะกอนประปาต่อปริมาณสารละลาย ส่งผลให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเพิ่มขึ้นจาก 1.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็น 1.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายจาก 0.8 เป็น 1.2 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ในระบบมีปริมาณสารละลายน้อยทำให้ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้บางส่วน ทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีดินตะกอนประปาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันปนอยู่ ซึ่งความหนาแน่นของดินตะกอนประปามีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงานสูงขึ้น

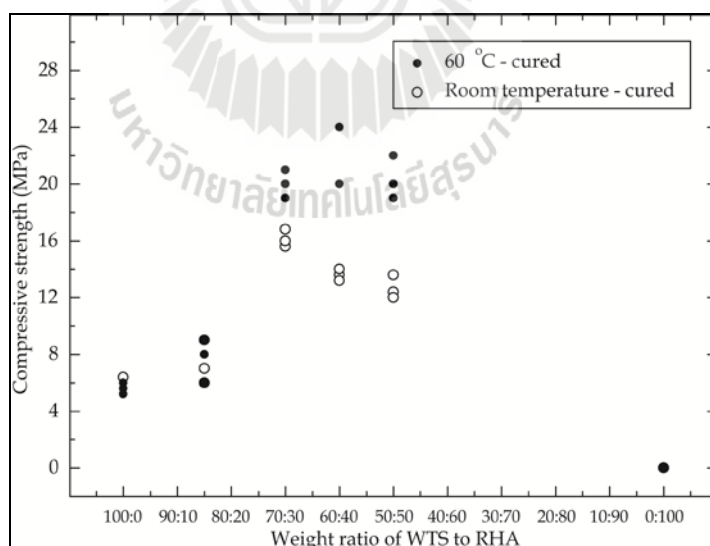


รูปที่ 4.17 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายต่างกัน

#### 4.10 ผลของเถ้าแกลบและอุณหภูมิต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

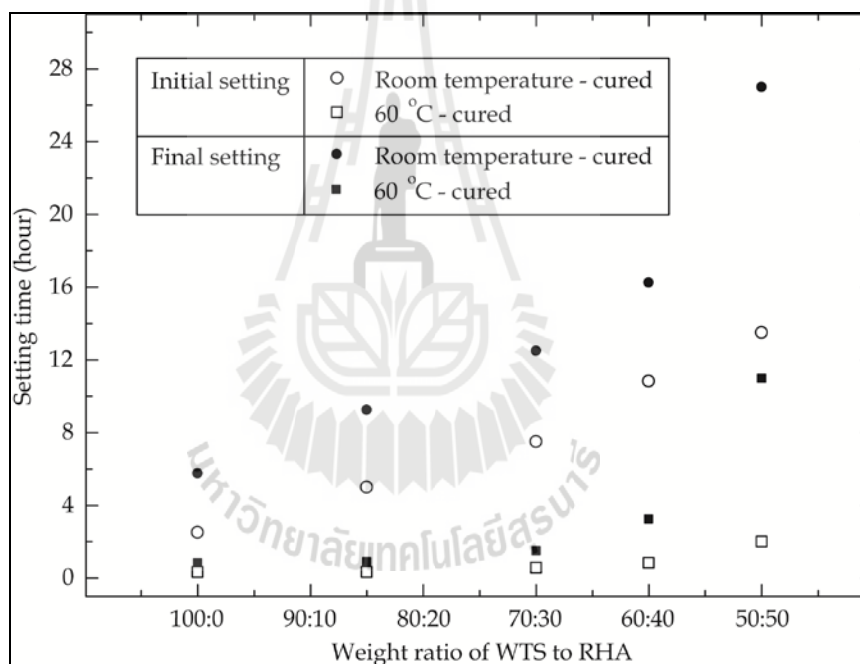
ในการศึกษาผลของการเติมเถ้าแกลบและอุณหภูมิต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้ควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่ โดยควบคุมการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลเฟต 10 โมลาร์ ควบคุมอัตราส่วนโซเดียมซัลเฟตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 และควบคุมอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายที่ 1.0

ปริมาณเถ้าแกลบและอุณหภูมิต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ มีความสัมพันธ์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ พบว่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบถึงปริมาณที่เหมาะสม และกำลังรับแรงอัดจะลดลงเหลือ 0 เมกะปาสกาล เมื่อเพิ่มเถ้าแกลบร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเถ้าแกลบขาดอะลูมิเนียมที่จะเกิดการควบแน่นพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิเกตที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัว (P.D. Silva, and K. Sagoe-Crentsil, 2008, U.Rattanasak, and P.Chindaprasirt, 2009) จากรูปที่ 4.18 พบว่าปริมาณเถ้าแกลบที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 30 ถึง 40 โดยน้ำหนัก เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับจีโอพอลิเมอร์ที่เติมเถ้าแกลบตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไป แต่ไม่ส่งผลต่อจีโอพอลิเมอร์ที่เติมเถ้าแกลบต่ำกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



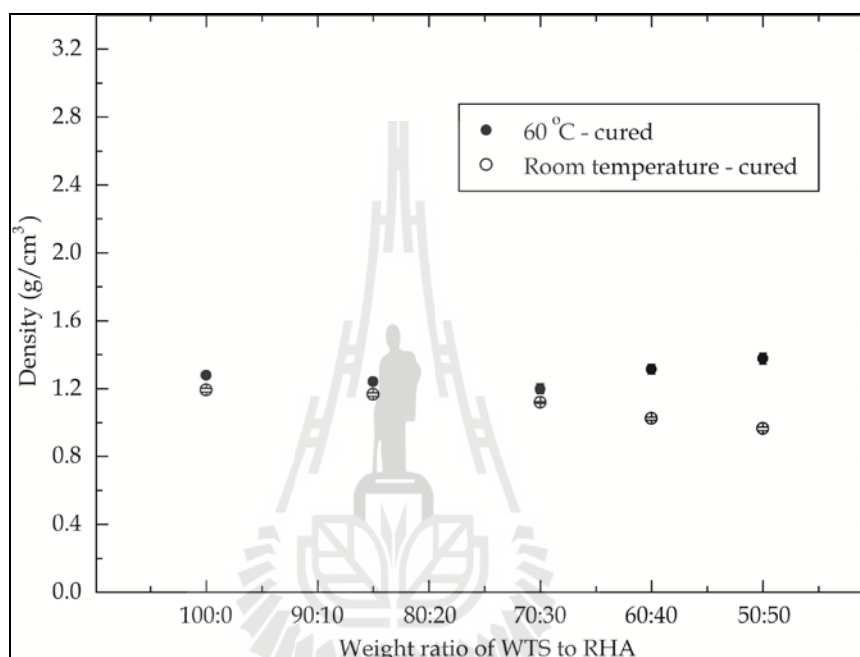
รูปที่ 4.18 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเติมเถ้าแกลบและมีอุณหภูมิต่อสมบัติในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ต่างกัน

เวลาในการเริ่มและสิ้นสุดการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เป็นตัวแปรสำคัญต่อความสามารถในการใช้งานของจีโอพอลิเมอร์ จากรูปที่ 4.19 พบว่าปริมาณเถ้าแกลบและอนุหภูมิในการบ่มมีผลต่อการควบคุมเวลาในการก่อตัว โดยการเติมเถ้าแกลบส่งผลให้ใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษานของ P. Chindapasirt, et al. (2012) และ A.M. Rashad (2013) เนื่องจากปริมาณเถ้าแกลบมีผลต่ออัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ (N. Waijarean, 2014) และการควบแน่นพันธะระหว่างซิลิกาเกิดกับอะลูมินาใช้เวลาเร็วกว่าการควบแน่นพันธะระหว่างซิลิกาเกิดกับซิลิกาเกิด (P. Chindapasirt, et al., 2012) ในขณะที่การบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ก่อตัวเร็วขึ้น เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนเป็นการเร่งกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (S. Pangdaeng, et al., 2014)



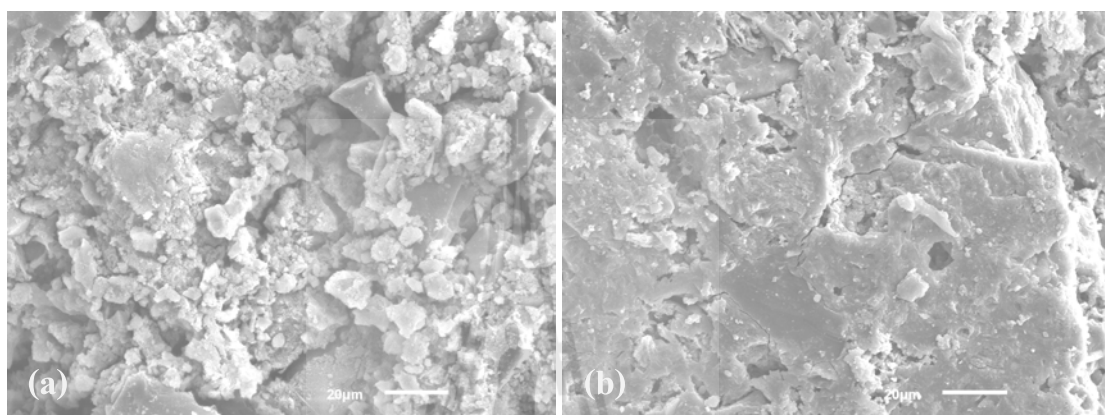
รูปที่ 4.19 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเติมเถ้าแกลบและมีอุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อเพิ่มเถ้าแกลบในส่วนผสมมากขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงาน จีโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบเป็นวัสดุน้ำหนักเบาที่มีความพรุนตัวสูง (S. Songpiriyakij, et al., 2010) และความหนาแน่นของเถ้าแกลบต่ำกว่าความหนาแน่นของ ดินตะกอนประปา ดังนั้นการแทนที่ดินตะกอนประปาด้วยเถ้าแกลบจึงทำให้ความหนาแน่นของ จีโพลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโพลิเมอร์ที่มีปริมาณการเติมเถ้าแกลบและมีอุณหภูมิในการบ่มจีโพลิเมอร์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.21 แสดงรูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน จีโพลิเมอร์ที่เติมเส้นใยแก้ว 50 โดยน้ำหนัก พบว่าชิ้นงานที่บ่มที่อุณหภูมิห้องมีความพรุน ตัวสูงส่งผลให้มีความหนาแน่นต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.20 ในขณะที่ชิ้นงานที่ถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีเนื้อที่แน่นกว่าชิ้นงานที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาจีโพลิเมอไรเซชันได้มากขึ้น



รูปที่ 4.21 แสดงรูปถ่ายระดับจุลภาคของชิ้นงานจีโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปา และเส้นใยแก้ว ที่เติมเส้นใยแก้วร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และถูกบ่มที่ (a) อุณหภูมิห้อง และที่ (b) 60 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ ในขณะที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 3 เท่า ซึ่งเป็นผลจากรูพรุนในชิ้นงานหลังการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน (Geopolymerization) ประกอบกับดินตะกอนประปาและเถ้าแกลบมีน้ำหนักเบา วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำนี้เป็นประโยชน์ต่อการใช้งานเป็นตัวประสานในงานสิ่งปลูกสร้างน้ำหนักเบา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ สภาพการเผาแคลไซน์ (Calcined) ดินตะกอนประปา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อผงจีโอพอลิเมอร์ ผลของปริมาณเถ้าแกลบ สภาพการบ่มชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ จากการทดลองสามารถสรุปผลของตัวแปรต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ได้ดังนี้

##### 5.1.1 สภาพการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปา

ด้วยการใช้สภาวะในการเผาแคลไซน์ที่เหมาะสม ดินตะกอนประปาสามารถพัฒนาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ สภาพการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่ทำให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) สูงสุดคือการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง การเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เนื่องจากดินตะกอนประปาที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันได้ดีกว่า เป็นผลให้เวลาในการก่อตัวของดินตะกอนประปาใช้เวลาน้อยกว่า เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุนพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว พบว่าสภาพการเผาแคลไซน์ดินตะกอนประปาที่เหมาะสมที่สุดคือการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง



### 5.1.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่สลายโครงสร้างเดิมของอะลูมินาและซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบหลักของดินตะกอนประปา การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นขึ้นจึงทำให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นได้ดีขึ้น จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจึงมีเวลาในการก่อตัวที่สั้นกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์

### 5.1.3 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้สารละลายที่มีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวประสานในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อปริมาณของโซเดียมซิลิเกตมากขึ้นความสามารถในการเชื่อมประสานจึงมากขึ้น เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเร็วขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของโซเดียมซิลิเกตส่งผลให้การเชื่อมประสานเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชิ้นงาน

### 5.1.4 อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลาย

การใช้อัตราส่วนของผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายในสัดส่วนที่สูงส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำ เนื่องจากปริมาณของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลาย 0.8 และ 1.0 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณสารละลายของทั้งสองอัตราส่วนมีมากพอสำหรับทำปฏิกิริยากับผงดินตะกอนประปา จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนผงดินตะกอนประปาต่อสารละลาย 1.2 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุด เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์แปรผกผันกับอัตราส่วนของผงดินตะกอนประปาต่อสารละลาย เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของผงดินตะกอนประปาต่อสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายส่วนเกินส่งผลให้การแข็งตัวในกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นได้ช้า

### 5.1.5 ปริมาณการเติมเถ้าแกลบ

เพื่อให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด จำเป็นต้องใช้เถ้าแกลบร่วมกับผงดินตะกอนประปาเพื่อลดพลังงานในการเผาแคลไซน์ ค่ากำลังรับแรงอัดของ

จีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าแกลบที่ถูกเติมเข้าไปในดินตะกอนประปรามากขึ้นจนถึงสัดส่วนดินตะกอนประปราคือเถ้าแกลบเป็นร้อยละ 50 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จะมีแนวโน้มลดลง การลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดเป็นผลมาจากสัดส่วนของซิลิกอน (Si) ต่ออะลูมิเนียม (Al) มีค่าสูงกว่า 5.9 และจากการทดลองพบว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ไม่สามารถพัฒนาได้จากการใช้เถ้าแกลบเพียงลำพังเนื่องจากเถ้าแกลบขาดอะลูมิเนียมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้น เนื่องจากเวลาในการก่อตัวถูกควบคุมโดยอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่สูงขึ้นจะใช้เวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น เพราะอัตราการควบแน่นของพันธะระหว่างซิลิกอนกับอะลูมิเนียมเร็วกว่าอัตราการควบแน่นของพันธะระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอน

#### 5.1.6 อุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์

อุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานที่สูงขึ้น มีผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นและมีผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เร็วขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้เร็วขึ้น ผลของอุณหภูมิการบ่มต่อเวลาในการก่อตัวและค่ากำลังรับแรงอัดจะมีผลมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมมีค่ามากขึ้น เนื่องจากสัดส่วนดังกล่าวต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นาน เมื่อชิ้นงานถูกบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงเป็นการเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้นและมีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปรายและเถ้าแกลบเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และการศึกษาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปรายและเถ้าแกลบมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในงานก่อสร้าง ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ จึงควรค่าต่อการศึกษาต่อในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (1) ศึกษาการใช้ตัวเติมอื่นๆที่มีผลต่ออัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา โดยการใช่วัสดุเหลือใช้หรือวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากการเกษตรหรืออุตสาหกรรมที่มีในท้องถิ่น (2) พัฒนาระบบการสังเคราะห์ใช้งานที่สะดวกมากขึ้น โดยการศึกษาการเตรียมสารละลายและผงจีโอพอลิเมอร์เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่สามารถลดขั้นตอนในการผสมใช้งานเบา

## รายการอ้างอิง

- A. Bhowmick, and S. Ghosh (2012). Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of Fly ash based Geopolymer mortar. **International Journal of Civil and Structural Engineering**. 3 [1]: 168-177.
- A. Palomo, A. Marcias, M.T. Blanco, and F. Puertas (1992). Physical, chemical and mechanical characterisation of geopolymers. **Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement**. 9: 505-511.
- A. Poowancum, E. Nimwinya, and S. Horpibulsuk (2015). Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash. **Calcined Clay for Sustainable Concrete 1**; 291-297.
- A.A. Ikpong, and D.C. Okpala (1992). Strength characteristics of medium workability ordinary Portland cement-rice husk ash concrete. **Building and Environment**. 27(1): 105–111
- A.A. Ramezani-pour (2014). Rice husk ash. **Cement replacement materials**. 257-298.
- A.L.G. Gastaldini, G.C. Isaja, N.S. Gomes, and J.E.K. Sperb (2007). Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators. **Cement and Concrete Composites**. 29: 176–180.
- A.M. Rashad (2013). Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer – an overview. **Construction and Building Materials**. 41: 751-765.
- American Society for Testing and Materials, 2011. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM C109 C109M, Philadelphia, United States of America.

- American Society for Testing and Materials, 2013a. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM C138 C138M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2013. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. ASTM C266, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM D854, Philadelphia, United States of America.
- B. Singh, I. G. M. Gupta, and S.K. Bhattacharyya (2015). Geopolymer concrete A review of some developments. **Construction and Building Materials**. 85: 78-90.
- C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, S. Boongrasan, A. Udomchai, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah (2015). Unit weight, strength and microstructure of water treatment sludge-fly ash geopolymer lightweight cellular geopolymer. **Construction and Building Materials**. 94: 807-816.
- C.A. Langton, D.A. Roy (1984). Longevity of borehole and shaft sealing materials: Characterisation of ancient cement-based building materials, **Materials Research Society**. 26; 543-549.
- Crop Prospects and food situation (2012). **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)**, Rome, Greek.
- D. Hardjito and B.V. Rangan (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete. **Research Report GC1**, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at [espace@curtin](mailto:espace@curtin).
- D.C. Comrie, and J. Davidovits (1988). Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals. **Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy**. 1: 125-134.

- D.C. Comrie, J.H. Paterson, and D.J. Ritchey (1988). Geopolymer technologies in toxic waste management, **First European Conference on Soft Mineralurgy Geopolymer '88**.
- E. Badogiannis, G. Kakali, and S. Tsivilis (2005). Metakaolin as supplementary cementitious material, Optimization of kaolin to metakaolin conversion. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. 81: 457–462.
- E. Nimwinya, W. Arjharn, S. Horpibulsuk, T. Phoo-ngernkham, and A. Poowancum (2016). A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. **Journal of Cleaner Production**. 119: 128-134.
- F.R. Carlos, R.M. Sagraario, and B.V.M. Terasa (2006). Modeling of slakes lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables, **Cement and Concrete Composites**. 28: 458-467.
- G. Sua-iam, and N. Makul (2014). Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. **Journal of Cleaner Production**. 78: 184-194.
- G.A. Habeeb, and H.B. Mahmud (2010). Study on Properties of rice husk ash and its use as cement replacement material. **Materials Research**. 13[2]: 185-190.
- H. Runttia, T. Luukkonenb, M. Niskanena, S. Tuomikoskia, and T. Kangasa (2016). Sulphate removal over barium-modified blast-furnace-slag geopolymer. **Journal of Hazardous Materials**. 317: 373–384.
- H. Yun Leong (2016). Suitability of Sarawak and Gladstone fly ash to produce geopolymer A physical, chemical, mechanical, mineralogical and microstructural analysis. **Ceramics International**. 42: 9613-9620.
- H. Xu, and J.S.J. Van Deventer (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**. 59[3]: 247–266.

- I. Balczar, T. Korim, and A. Dobradi (2015). Correlation of strength to apparent porosity of geopolymers – Understanding through variations of setting time, **Construction and Building Materials**. 93: 983–988.
- J. Ambroise, S. Maximilien, and J. Pear (1994). Properties of metakaolin blended cements. **Advanced Cement Based Materials**. 1: 161–168.
- J. Davidovits (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference?. **Concrete International**. 9[12]: 23-35.
- J. Davidovits, and M. Davidovics (1988a). Geopolymer room temperature ceramic matrix for composites, **Ceramic Engineering and Science Proceedings**. 9: 835-842.
- J. Davidovits (1988b). Geopolymer chemistry and properties, **Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy**. 1: 25-48.
- J. Davidovits (1988c). Geopolymers of the first generation: SILIFACE-process. **Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy**. 1: 49-67.
- J. Davidovits (1988d). Soft Mineralurgy and Geopolymers. **Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88**. 1: 19–23.
- J. Davidovits, D.C. Comrie, J.H. Paterson, and D.J. Ritcey (1990). Geopolymeric concretes for environmental protection. **Concrete International**. 12[7]: 30-40.
- J. Davidovits, and M. Davidovics (1991). Geopolymer: Ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites, **36th International SAMPE Symposium** 36: 1939-1949.
- J. Davidovits (1994a). Properties of geopolymer cements. **First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**. 1: 131-149
- J. Davidovits (1994b). Geopolymer: Inorganic polymeric new materials, **Journal of Materials Education** 16: 91-139.
- J. Davidovits, M. Davidovics, and N. Davidovits (1994c), Processing for obtaining a geopolymeric aluminosilicate and products thus obtained. **U.S. Patent no. 5**: 342-595.

- J. Davidovits (1994d). High-Alkali Cements for 21st Century Concretes, Past, Present and Future. **University of California, Berkeley.**
- J. Davidovits (1999). Chemistry of Geopolymeric system, terminology. **Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer '99.** 1: 9–40.
- J. Davidovits (2005). Geopolymer chemistry and sustainable Development. The Poly(sialate) terminology : a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. **Proceedings of the World Congress Geopolymer.** 9–15.
- J. He, Y. Jie, J. Zhang, Y. Yu, and G. Zhang (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash. **Cement & Concrete Composites.** 37: 108–118.
- J. Rocha, and J. Klinowski (1990). Solid-state NMR studies of the structure and reactivity of metakaolinite. **Angewandte Chemie International Edition, English.** 29: 553–554.
- J. Rocha, J.M. Adams, and J. Klinowski (1990). The rehydration of metakaolinite to kaolinite: Evidence from solid-state NMR and cognate techniques. **Journal of Solid State Chemistry.** 89: 260–274.
- J. Xie, J. Yin, J. Chen, J. Xu (2009). Study on the geopolymer based on fly ash and slag. **Proceeding of 2009 International Conference on Energy.**
- J.A. Kostuch, G.V. Walters, and T.R. Jones (1993). High performance concrete containing metakaolin-A review. **Proceedings of the Concrete 2000 International Conference on Economic and Durable Concrete Through Excellence.** 2: 1799–1811.
- J.G. Vail (1952). Soluble Silicates: Their Properties and Uses, **New York, Reinhold.**
- J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, L. Lorenzer (1995). Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash. **University of Stellenbosch Research Report.**
- J.G.S. van Jaarsveld, and J.S.J. van Deventer (1996). The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metal. **Minerals Engineering.** 10[7]: 659-669.

- J.L. Provis, and J. S. J. van Deventer (2009). Introduction to geopolymers. **Geopolymers structure processing properties and industrial applications**. 1-11.
- J.L. Provis (2014). Geopolymers and other alkali activated materials why how and what, **Materials and Structures**. 47: 11–25.
- J.W. Smith, and D.C. Comrie (1988). Geopolymeric building materials in third world countries. **Proceedings of the 1st International Conference Geopolymer '88**. 1: 89–92.
- K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavelu (2007). Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, **Construction and Building Materials** 22: 1675-1683.
- K. Komnitsas, and D. Zaharaki (2007). Geopolymerization: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**. 20: 1261-1277.
- K.J.D. MacKenzie, I.W.M. Brown, R.H. Meinhold, and M.E. Bowden (1985). Outstanding problems in the kaolinite-mullite reaction sequence investigated by  $^{29}\text{Si}$  and  $^{27}\text{Al}$  solid-state nuclear magnetic resonance: I. Metakaolinite. **Journal of the American Ceramic Society**. 68: 293–297.
- K.J.D. Mackenzie, and M. Welter (2014). Geopolymers (aluminosilicate) composites synthesis, properties and applications, **Woodhead Publishing Limited, Victoria University of Wellington, New Zealand**. 445-470
- K.H. Mo, U.J. Alengaram, and M.Z. Jumaat (2016). Structural performance of reinforced geopolymer concrete member : a review. **Construction and Building Materials**. 120: 251-264.
- K.M. Omatola, and A.D. Onojah (2009). Elemental analysis of rice husk ash using X-ray fluorescence technique. **International Journal of Physical Sciences**. 4[4]: 189-193.
- K.Y. Chiang, P.H. Chou, C.R. Hua, K.L. Chien, and C. Cheeseman (2009). Light weight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. **Journal of Hazardous Materials**. 171: 76–82.



- M. Cyr, R. Idir, and T. Poinot (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. **Journal of Material Science**. 47: 2782–2797.
- M. Kyncl (2008). Opportunity for water treatment sludge re-use. **GeoScience Engineering** 54[1]: 11-22.
- M.D. Safiuddin, and J.S. West (2010). Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash, **Cement and Concrete Composites** 32: 708-717.
- M.L. Granizo, and M.T. Blanco (1998). Alkaline activation of metakaolin – An isothermal conduction calorimetry study. **Journal of Thermal Analysis**. 52: 957–965.
- M.L. Granizo, M.T. Blanco Varela, and S. Martínez-Ramírez (2007). Alkali activation of metakaolins: Parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. **Journal of Materials Science**. 42: 2934–2943.
- M.L. Gualtieri, A. Cavallini, and M. Romagnoli (2016). Interactive powder mixture concept for the preparation of geopolymers with fine porosity, **Journal of the European Ceramic Society**. 36: 2641–2646.
- M.S. Ismail, and A.M. Waliuddin (1996). Effect of rice husk ash on high strength concrete. **Construction and Building Material**. 10(7): 521–526.
- N. Anwar, P. Nimityongskul, and L.R. Austriaco (2007). Thailand development and applications of cementitious composites, **CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan**. 295-303.
- N. Ranjbar, M. Mehrali, M. Mehrali, U.J. Alengalam, and M.Z. Jumaat (2016). High tensile strength fly ash based geopolymer using copper coated micro steel fiber. **Construction and Building Materials**. 112: 629-638.
- N. Waijarean, S. Asavapisit, and K. Sombatsompop (2014). Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals. **Construction and Building Materials**. 50: 486-491.

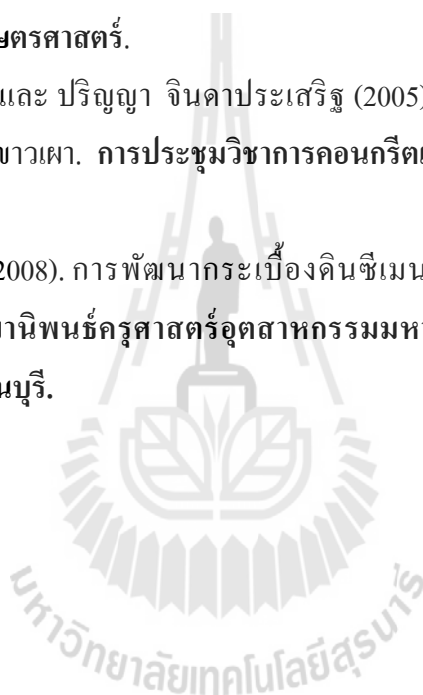
- N.H. Rodriguez, S.M. Ramirez, M.T.B. Varela, M. Guillem, J.Puig, E. Larrotcha, and J. Flores (2010). Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research** 40: 778–786.
- N.U. Amin, M. Faisal, K. Muhammad, S. Gul (2016). Synthesis and characterization of geopolymer from bagasse bottom ash, waste of sugar industries and naturally available china clay. **Journal of Cleaner Production**. 129: 491-495.
- P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, W. Chalee (2005). A Study of Leaching of Lignite Fly Ash in Sodium Hydroxide Solution. การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ 1: 7-11.
- P. Chindaprasirt, P. D. Silva, K. S. Crentsil, and S. Hanjitsuwan (2012). Effect of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. **Journal of Material Science**. 47: 4876-4883.
- P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo and J. S. J. van Deventer (2007). Geopolymers technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**. 42: 2917-2933.
- P. Owens (1999). Pulverized Fuel Ash Part 1: Origin and Properties. **Current Practice**. 116: 27.
- P. Rovnanik (2010). Effects of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**. 24: 1176-1183.
- P.D. Silva, and K. Sagoe-Crentsil (2008). The effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  on setting and hardening of  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  geopolymer systems. **Journal of the Australian Ceramic Society**. 44: 39-46.
- P.G. Malone, T. Kirkpatrick, and C.A. Randall (1986). Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations. **Report WES/MP/GL-85-15**.
- P.W. Brown (1990). The system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ . **Journal of the American Ceramic Society**, 73, 3457–3561.

- R. Khan, A. Jabbar, I. Ahmad, W. Khan, A.N. Khan, and J. Mirza (2012). Reduction in environmental problems using rice husk ash in concrete. **Construction and Building Materials**. 30: 360-365.
- R.V. Krishnarao, and Y.R. Mahajan (1996). Formation of SiC whiskers from raw rice husks in argon atmosphere. **Ceramic International**. 22(5): 353–358.
- S. Abhilash, C.K. Singh, and A.K. Sharma (2011). Study of the properties of concrete by partial replacement of ordinary Portland cement by rice husk ash, **International Journal of Earth Sciences and Engineering** 4[6]: 965-968.
- S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, W. Samingthong, R. Rachan, and A. Arulrajah (2015). Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 28[1]: ISSN 1943-5533.
- S. Onutai, S. Jiemsirilers, P. Thavorniti, and T. Kobayashi (2016). Fast microwave syntheses of fly ash based porous geopolymers in the presence of high alkali concentration. **Ceramic International**. 42: 9866-9874.
- S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindapasirt (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. **Materials & Design**. 53: 269-274.
- S. Rukzon, and P. Chindapasirt (2010). Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness. **Journal of Material Civil Engineering**. 22[3]: 253-259.
- S. Sangsuk, S. Khunthon, and S. Nilpairach (2010). Nano-Porous pottery using calcined waste sediment from tap water production as an additive. **Journal of Waste Management & Research**. 28: 908-912.
- S. Songpiriyakij (2005). Effect of Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer mortar. การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ 1: 83-87.

- S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt (2010). Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer. **Construction and Building Materials**. 24: 236-240.
- S. Sugita (1993). On the Economical Production of Large Quantities of Highly Reactive Rice Husk Ash. **International Symposium on Innovative World of Concrete**. 2: 3–71.
- S.D. Nagrale, H. Hajare, and P.R. Modak (2012). Utilization of rice husk ash. **International Journal of Engineering Research and Application**. 2: 1-5.
- S.E. Wallah, and B.V. Rangan (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties. **Research Report GC2, Curtin University of Technology**. 14.
- T.A. Kua, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk, Y.J. Duc, S.L. Shen (2016). Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement. **Construction and Building Materials**. 115: 565–575.
- T.W. Cheng, and J.P. Chiu (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. **Minerals Engineering**. 16: 205-210.
- U.Rattanasak, and P Chindaprasirt (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. **Minerals Engineering**. 22: 1073-1078.
- V. Kannan, and K. Ganesan (2014). Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials** 51: 225-234.
- V. Medri, and A. Ruffini (2012). Alkali-bonded SiC based foams. **Journal of the European Ceramic Society**. 32: 1907–1913.
- V. Saraswathy, and H. Song (2007). Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. **Construction and Building Material**. 21(8): 1779–1784.
- V.D. Glukhovskiy (1989). Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products on the Durability of Concrete. **Proceedings of the 2nd International Seminar**. 2: 59-62.

- Y. Pontikes, L. Machiels, S. Onisei, L. Pandelaers, D. Geysen, P.T. Jones, and B. Blanpain (2013). Slags with a high Al and Fe content as precursors for inorganic polymers. **Applied Clay Science**. 73: 93-102.
- Z. Chen, Y. Liu, W. Zhu, E.H. and Yang (2016). Incinerator bottom ash (IBA) aerated geopolymer. **Construction and Building Materials**. 112: 1025-1031.
- กิตติพงษ์ สุตรสุคนธ์ (2007). การใช้ดินตะกอนจากน้ำประปาเพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้องหลังคาดินซีเมนต์. **วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.
- ซัชพันธ์ ชาติ (2007). การพัฒนาอิฐดินซีเมนต์โดยใช้ดินตะกอนน้ำประปาจังหวัดหนองคายเป็นส่วนผสม. **วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.
- ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาติ (2011). การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ** 21[2]: 257-265.
- ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005). การศึกษาเบื้องต้นของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำถ่านหินแม่เมาะคัดขนาด. **การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ** 1: 111-114.
- ธีรพร ภู่มาลา, บุญยฤกษ์ เกียรติวิทยากุล, อนันต์ มิตรประสิทธิ์, สนธยา กิจภคพาณิชย์, ณัฐภูมิ ปุ้ยพันธุวงศ์, อภิวัฒน์ นกเกษม, ปฐมทัศน์ โพธิ์เงิน (2010). การบริหารจัดการน้ำเพื่อการประปาของการประปานครหลวง, **โครงการปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**.
- เพิ่มพล กาญจนามัย (2003). การใช้ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง. **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**.
- ภาคภูมิ กลั่นไพบรี (2008). การปรับปรุงคุณภาพอิฐดินซีเมนต์ที่ผสมดินตะกอนประปาด้วยดินลูกรังและทราย. **วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.

- ภานุ ศิริพงศ์ไพโรจน์ (2007), ผลของการพัฒนาดินตะกอนประปาที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และรูปแบบเครื่องปั้นดินเผา. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วินัย ชัยเพชร (2009). การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินซีเมนต์ที่ใช้ดินตะกอนประปาผสมกับ ดินเหนียว. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุภิญญา สอนง่าย (2552). ผลกระทบของดินตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาต่อการสะสมธาตุอาหารพืชของสับปะรด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนุชาติ ลือนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005). การศึกษาสารจีโอโพลิเมอร์จาก เถ้าลอยและดินขาวเผา. การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ. 1: 153-161.
- อนรรักษ์ จินตนาพันธ์ (2008). การพัฒนากระเบื้องดินซีเมนต์ที่ใช้ดินตะกอนประปาจังหวัด ขอนแก่น. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.





ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



## A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer



Ekkasit Nimwinya<sup>a</sup>, Weerachai Arjarn<sup>a</sup>, Suksun Horpibulsuk<sup>b,\*</sup>,  
Tanakorn Phoo-ngernkham<sup>c</sup>, Anurat Poowancum<sup>d</sup>

<sup>a</sup> School of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>b</sup> School of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Chai, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>c</sup> Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand

<sup>d</sup> School of Ceramic Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 27 June 2015

Received in revised form

17 December 2015

Accepted 22 January 2016

Available online 30 January 2016

#### Keywords:

Geopolymer

Water treatment sludge

Rice husk ash

Sustainability

Alternative cement

### ABSTRACT

Geopolymer is an environmentally friendly cementing agent and is an alternative to Ordinary Portland Cement (OPC). Calcined Water Treatment Sludge (WTS) and Rice Husk Ash (RHA) blends are used as a sustainable precursor for developing a lightweight geopolymer binder in this research. The alkali activator is a mixture of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>). The effects of the SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio, which reflects the characteristics of chemical compositions of WTS and RHA, and the heat-curing temperature (at room temperature and 60 °C) on density, setting time and Unconfined Compressive Strength (UCS) are investigated. It is evident from this study that the density of WTS–RHA geopolymers at various SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios and temperatures is essentially the same and is approximately 3 times lower than that of OPC (of 3.15 g/cm<sup>3</sup>). The SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio and temperature significantly affect the setting time and UCS. A higher SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio results in longer initial and final setting times as the condensation rate between silicate and aluminate species is faster than that between silicate and silicate species. The optimum SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio providing the highest strength is found at approximately 4.9 and 5.9 for room temperature and 60 °C curing conditions. At these optimum SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios, the UCSs of geopolymers meet the minimum requirement for OPC of 19 MPa. This research will enable WTS and RHA traditionally destined for landfills to be used in a sustainable manner as a precursor in geopolymer binders. This sustainably, in terms of economic and environmental perspectives, is also analyzed and discussed in this paper.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

Ordinary Portland Cement (OPC) is widely used for construction works human society. However, OPC has negative environment impacts because the production of OPC requires high energy consumption and emits high quantities of carbon dioxide gas (Gartner, 2004; Habert et al., 2011; Turner and Collins, 2013), thereby

contributing to the global warming. Geopolymers have recently been investigated by several researchers as an alternative cementing agent to OPC (Chindaprasit and Chalee, 2014; Sun et al., 2013).

A geopolymer is an inorganic polymer technology (Cheng and Chiu, 2003; He et al., 2012; Komnitsas and Zaharaki, 2007; Lemounga et al., 2013) and is synthesized by the aluminosilicate compound materials with alkali hydroxide and/or alkali silicate (He et al., 2013; Zhang, 2013). Geopolymers have been the subject of intense study because they are an environmentally friendly cementing agent, with low energy consumption and low toxicity, are stable at high temperature and have high durability (Pacheco-Torgal et al., 2012). Previous studies (Sukmak et al., 2013a, 2013b, 2015) have investigated the strength and durability of clay–fly ash geopolymers as masonry bearing units. The durability against

\* Corresponding author, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

E-mail addresses: [arjarn@sur.ac.th](mailto:arjarn@sur.ac.th) (W. Arjarn), [suksun@g.sur.ac.th](mailto:suksun@g.sur.ac.th) (S. Horpibulsuk), [tanakorn.ph@rmuti.ac.th](mailto:tanakorn.ph@rmuti.ac.th) (T. Phoo-ngernkham), [anurat@sur.ac.th](mailto:anurat@sur.ac.th) (A. Poowancum).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.060>

0959-6526/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.



sulfate attack of clay–fly ash geopolymers is superior to that of clay–cement; i.e., there is no major change in the microstructure and pH of clay–fly ash geopolymers when exposed to sulfate solutions.

Geopolymers can be synthesized from a variety of silica and alumina rich materials (Gouny et al., 2012; Palamo et al., 2007), such as clay or kaolin (Buchwald and Kaps, 2002), fly ash, and bottom ash (Davidovits, 1999). Fly ash derived from coal-fired electricity generation provides the greatest opportunity for commercial utilization of this technology due to the plentiful worldwide raw material supply (Mohapatra and Rao, 2001; Van Jaarsveld et al., 1998). High quality fly ash is a highly desirable commodity in the construction industry. The recycled waste silica and alumina rich materials are thus of interest for sustainability research and practice.

Water Treatment Sludge (WTS) is a waste by-product from the water treatment process in the production of tap water and drinking water as it is extracted from raw water by coagulation techniques (Keeley et al., 2012). The increasing demand of treated water has resulted in increasing quantities of sludge by-products generated annually (Rodríguez et al., 2010; Teixeira et al., 2011). Environmentalists have proposed effective ways to solve the problem of WTS by re-using or processing it into usable products (Kyncl, 2008; Mery et al., 2014). The important chemical compositions of WTS are  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$  (Suksiripattanapong et al., 2015b), which are the essential components of the geopolymer structure.

At the Metropolitan Waterworks Authority (MWA) of Thailand, the WTS is generated with the maximum capacity of 300 tons per day in the dry season and approximately 700 tons per day in the wet season. With continuous increases in water demand due to a rapidly growing population, the quantity of WTS is subsequently and perpetually increasing and has been mainly disposed of in landfills. There has been a recent initiative by MWA to study the usage of WTS as construction and building materials according to the zero-waste directive. WTS has been successfully used as aggregates to manufacture sustainable geopolymer bearing units (Horpibulsuk et al., 2015; Suksiripattanapong et al., 2015b) and geopolymer lightweight blocks (Suksiripattanapong et al., 2015a). The liquid alkali activator was a mixture of  $Na_2SiO_3$  and NaOH and the precursor was a high calcium fly ash. In addition to aggregates, silica- and alumina-rich WTS can be also used as precursors after being calcined.

Waijarean et al. (2014) showed that the calcined WTS could be used as a precursor, but the strength was low due to an unsuitable  $SiO_2/Al_2O_3$  ratio. Khater et al. (2012) reported that the strength development of a geopolymer matrix depended on the type of precursor and the  $SiO_2/Al_2O_3$  ratio. The quality of the calcined WTS as a precursor can be improved by the modification of the intrinsic  $SiO_2/Al_2O_3$  ratio. A cost-effective means is blending calcined WTS with a  $SiO_2/Al_2O_3$  rich waste material. Rice Husk Ash (RHA) is considered to be a potential waste material of a biomass power generation and the rice drying process. Typically, RHA is composed of  $SiO_2$  by more than 80 wt% (Sua-lam and Makul, 2015). It is a reactive silica material (Billong et al., 2011; Bui et al., 2012) that is abundant in rice producing countries, including Thailand. This blended precursor (WTS and RHA) is a sustainable alternative to quality fly ash.

The present paper aims to develop a geopolymer binder using calcined WTS and RHA blends as a sustainable precursor. The effect of WTS/RHA ratios and heat-curing conditions (room temperature and 60 °C) on the density, setting time, and Unconfined Compressive Strength (UCS) of the WTS–RHA geopolymer are examined and analyzed. This research will enable WTS and RHA traditionally destined for landfills to be used in a sustainable manner as a

precursor in geopolymer binders, which is significant from engineering, economical and environmental perspectives.

## 2. Materials and methods

The schematic of the WTS/RHA geopolymer producing process is illustrated in Fig. 1. The details are as follows:

### 2.1. Precursor preparation

WTS was obtained from the Bangkok water treatment plant of the Bangkok metropolis, Thailand. To remove the impurities in the WTS, the WTS was mixed with water at a WTS/water ratio of approximately 0.8–1.2 by mass and then the WTS slurry was passed through a sieve (number 325) and oven-dried at 100 °C for 24 h. The dried WTS was milled by an electric mortar and passed through a sieve (number 325) before being calcined at 600 °C for 2 h to obtain the calcined WTS powder. RHA was obtained from the Korat Yong-sa-nguan Company Limited, Thailand. The RHA was wet milled by a ball mill for 6 h and then dried at 100 °C for 24 h before being passed through a sieve (number 325).

### 2.2. Sample preparation

Sodium hydroxide (NaOH) pellets and distilled water were mixed to obtain a concentration of 10 M, then allowed to cool down at a room temperature (27–30 °C). NaOH solution was mixed with sodium silicate ( $Na_2SiO_3$ ) solution to prepare the alkali activator solution.  $Na_2SiO_3$  consists of  $Na_2O = 8.0\%$ ,  $SiO_2 = 27.0\%$  and  $H_2O = 65.0\%$ . The ratio of  $Na_2SiO_3$  solution to NaOH solution was fixed at 1.5 by weight. The mixed solution was stored for 24 h prior to usage.

The calcined WTS powder and RHA powder were mixed at various WTS/RHA ratios of 100:0, 85:15, 70:30, 60:40 and 50:50. The mixed powder was then mixed with an alkali activator solution by a mortar at a solid to liquid ratio of 1.0. The geopolymer paste was poured into a 50 mm × 50 mm × 50 mm steel mold and compacted, as described in ASTM C109 (2002). The geopolymer samples along with the molds were then sealed with vinyl sheet to prevent moisture evaporation during curing either at the ambient room temperature (27–30 °C) or 60 °C. Both room temperature-cured and 60 °C-cured samples were dismantled and immediately wrapped within vinyl sheet after 24 h. The room temperature cured samples were next cured for an additional 6 days (7 days of curing) whereas the 60 °C-cured samples were cured in the oven at 60 °C for an additional 6 days. The density and UCS of all of the geopolymer samples were measured after 7 days of curing. The carefully broken and small samples of 7-day cured (both room temperature and 60 °C) geopolymers with WTS/RHA ratios of 50:50 were taken for SEM analysis to investigate the role of heat curing on the density and UCS of calcined WTS–RHA geopolymers.

### 2.3. Characterization techniques

The chemical compositions, morphologies, and particle size distributions of the WTS, RHA and calcined WTS–RHA geopolymers were evaluated by X-ray fluorescence (XRF, HORIBA XGT-5200), scanning electron microscopy (SEM, JOEL JSM-6010LV), and laser particle size analysis (Horiba, LA-950), respectively. The densities of WTS and RHA were measured by a pycnometer following ASTM D854-14 (2014). The setting time of the geopolymer pastes was examined according to ASTM C266 (2013). The density and UCS of the 7 days cured geopolymer were measured following ASTM C138 (2009) and ASTM C109 (2002), respectively.

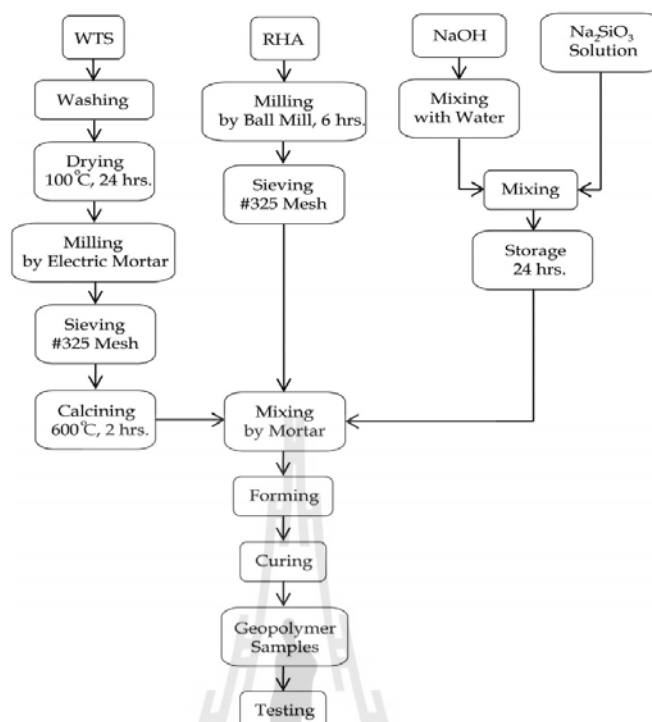


Fig. 1. A schematic of the WTS/RHA geopolymer processing.

### 3. Results and discussion

The chemical compositions of the WTS powder and RHA powder are shown in Table 1. The major components of WTS are  $\text{SiO}_2$  (58.99 wt%) and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (24.64 wt%), which are similar to those of fly ash (Suksiripattanapong et al., 2015a, 2015b). RHA mainly consists of  $\text{SiO}_2$  (89.17 wt%), with no  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . The degree of the geopolymerization reaction is predominantly dependent upon the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio. The suitable  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio of metakaolin geopolymer was found to be approximately 3–4 (Silva and Sagoe-Crentsil, 2008; Chindaprasirt et al., 2012), whereas the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio for calcined WTS was only approximately 2. Ideally, the replacement material for the WTS (as primary material), which already contains both  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  but is not in a suitable ratio, is a homo- $\text{SiO}_2$  material. RHA, which is the silica-rich material, is thus more suitable as a replacement material than fly ash in practice. The particle size distributions of calcined WTS and RHA are similar, as shown in Fig. 2. The median particle sizes of calcined WTS and RHA are

13.2  $\mu\text{m}$  and 13.7  $\mu\text{m}$ , respectively. Both calcined WTS and RHA particles are irregular in shape, as illustrated in Fig. 3. As such, the effect of the particles on the density, setting time and UCS of developed geopolymers is insignificant.

The 7-day density of geopolymers is significantly lower than that of OPC (Fig. 4). The density of OPC is approximately  $3.15 \text{ g/cm}^3$  (ASTM C138, 2009; ASTM C185, 2008; ASTM C595/C595M, 2013), whereas the density of the geopolymers is between 0.96 and  $1.38 \text{ g/cm}^3$ , which is 3 times lower than that of OPC. This low density is an advantage of the geopolymer over OPC, which can be used for development of lightweight non-bearing and bearing structures. The geopolymer has a lower density because RHA is a lightweight material with high porosity (Songpiriyakij et al., 2010), and the geopolymer comprises several micro-pores after the geopolymerization process (Rovnanik, 2010). For a particular curing temperature, the density decreases with increasing RHA replacement as the specific gravity of RHA is lower than that of WTS (Table 1). For a particular WTS/RHA ratio, the density of the geopolymer binder increases with increasing heat temperature.

Table 1  
Chemical compositions and density of WTS and RHA.

Raw materials	Chemical compositions (wt %)									Density ( $\text{g/cm}^3$ )
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	Etc.	
WTS	24.64	58.99	1.54	4.08	0.69	1.14	6.63	0.88	1.41	2.61
RHA	0	89.17	1.12	7.29	0.61	1.22	0.41	0.03	0.15	2.15

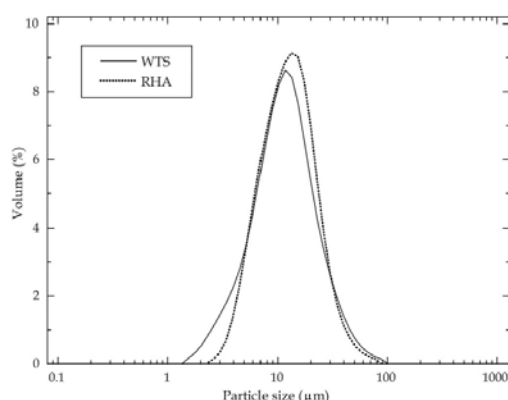


Fig. 2. Particle size distribution of calcined WTS and RHA powders.

The initial and final setting times of geopolymer pastes are the parameters controlling the workability of concrete geopolymers. Fig. 5 shows the effect of the WTS/RHA ratio and heat curing on the setting time. It is evident that both the WTS/RHA ratio and the heating temperature mainly control the setting time. To

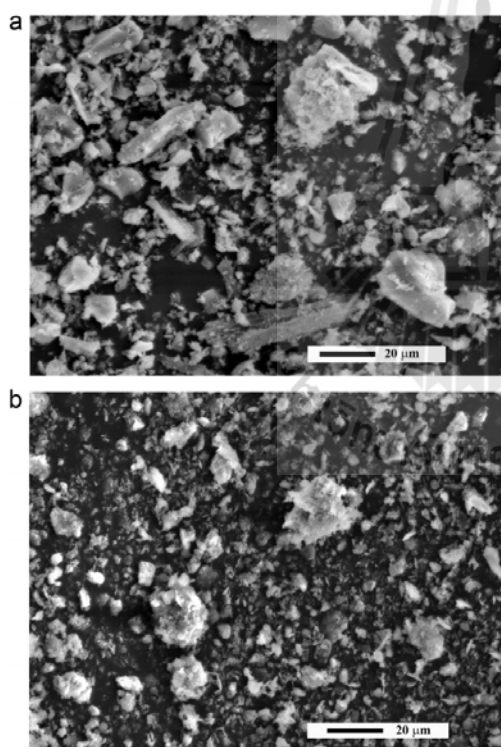


Fig. 3. SEM micrographs of (a) RHA and (b) calcined WTS.

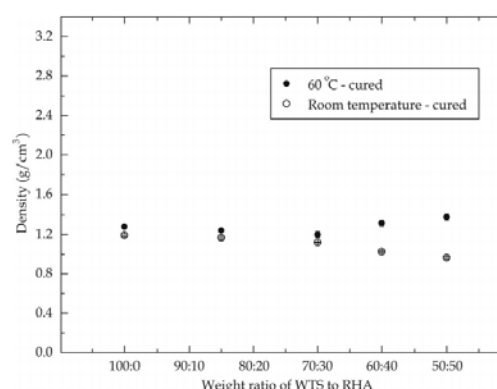


Fig. 4. Density of geopolymer after curing at room temperature or 60 °C for 7 days.

understand the role of the WTS/RHA ratio, it is preferable to express the relationship in terms of the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio, as it has been demonstrated to be the primary factor (Waijarcan et al., 2014). Table 2 presents  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratios for various WTS/RHA ratios, which were calculated from the chemical compositions of the RHA and WTS (Table 1), as well as the  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  concentrations.

A higher  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio results in a longer setting time; i.e., the initial setting time is 2.5 h for calcined WTS-geopolymer paste (WTS/RHA = 100:0 and  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio = 3.1) for room temperature curing, whereas it is 13.5 h for material with a WTS/RHA ratio of 50:50 ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio = 7.3). The hardening of the geopolymer results from the condensation of aluminate and silicate species during the geopolymerization process (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009; Silva and Sagoe-Crentsil, 2008). The condensation rate between silicate and aluminate species is faster than that between silicate and silicate species (Chindaprasirt et al., 2012). As such, the increase of the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio caused by the decrease in the WTS/RHA ratio leads to the delay of the setting time, which is in agreement with previous studies (Chindaprasirt et al., 2012; Rashad, 2013). The initial setting time increases with increasing RHA replacement as a logarithmic function. Heat curing

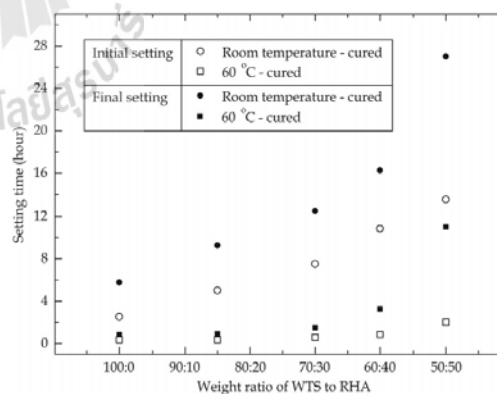


Fig. 5. Initial and final setting times of geopolymer after curing at room temperature or 60 °C for 7 days.

**Table 2**  
Calculation of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio in different replacement of RHA.

Compositions (weight %)		$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio
RHA	WTS	
0	100	3.1
15	85	3.8
30	70	4.9
40	60	5.9
50	50	7.3

accelerates the geopolymerization reaction, as demonstrated by the dramatic reduction in the initial setting time when the curing temperature increases from room temperature to 60 °C for a given WTS/RHA ratio.

The  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio also controls the UCS development of the geopolymer. Fig. 6 shows the relationship between the UCS and the WTS/RHA ratio. For a particular curing temperature, the UCS of the geopolymer increases with increasing RHA replacement up to an optimum value. An addition of RHA within the optimum value enriches the Si in the matrix and develops strong Si–O–Si bonds (Songpiriyakij et al., 2010) in a class of silicate-link (Chindaprasit et al., 2012). Beyond this optimum value, the UCS decreases with increasing RHA replacement and tends toward zero at 100% RHA replacement (WTS/RHA = 0:100). The optimum  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio is found to be at approximately 30% and 40% RHA replacement for the cured samples at room temperature and 60 °C, respectively. The maximum UCS for curing at room temperature and 60 °C is found at  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratios of 4.9 and 5.9, respectively (30% and 40% RHA replacement, respectively). However, Silva and Sagoe-Crentsil (2008) showed that the optimum  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio was found at approximately 3.0–3.8 for metakaolin-geopolymer. The difference in the optimum  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio is possibly because the silica and alumina in metakaolin are mainly in the amorphous phase. The maximum 7-day UCS of the geopolymer paste cured at room temperature is found to be 16 MPa, which is close to the minimum requirement for OPC of 19 MPa (ASTM C150, 2003). The 60 °C curing does not play a significant role in the UCS development when the RHA replacement ratio is lower than 30% ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio < 4.9). In other words, heat curing is not economical and is environmentally unfriendly for  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio < 4.9.

Fig. 7a and b shows SEM images of 7-day cured WTS–RHA geopolymers (WTS/RHA = 50:50) at room temperature and 60 °C, respectively. The 60 °C-cured sample (Fig. 7b) shows a denser

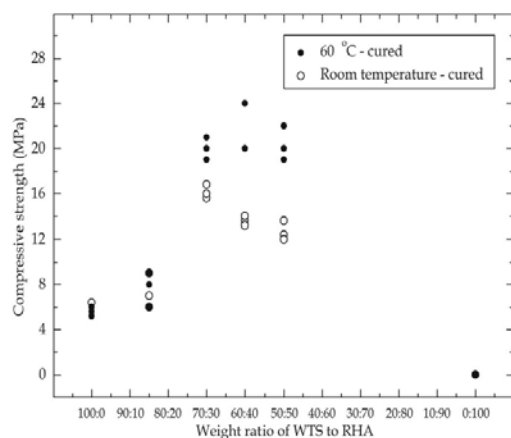


Fig. 6. Compressive strength of 7-day cured geopolymer.

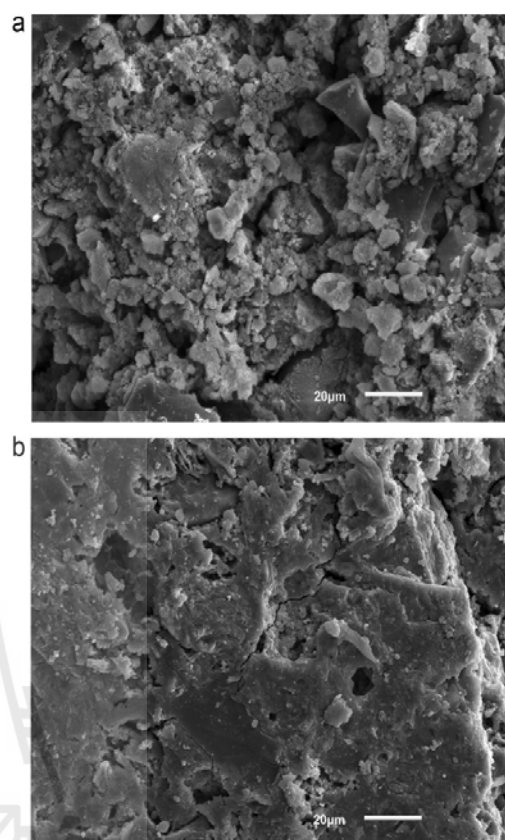


Fig. 7. SEM images of RHA–WTS geopolymer (WTS/RHA = 50:50) cured at (a) room temperature and (b) 60 °C.

matrix than the room temperature-cured sample (Fig. 7a) because the heat curing accelerates the geopolymerization process (Pangdaeng et al., 2014). The observed higher porosity of the room temperature-cured sample is associated with the lower density as reported in Fig. 4. In addition to the looser structure, a large amount of non-reacted WTS and RHA particles in the cementitious matrix of the room temperature-cured sample is also observed. This implies that the higher heat curing results in more geopolymerization products (Sodium Alumino Silicate Hydrate, NASH) and, hence, a WTS–RHA geopolymer with a denser structure and greater strength (Fig. 6).

The results from this study show that calcined WTS and RHA blends can be used as a sustainable precursor for the development of geopolymer binders whose 7-day UCS meets the minimum strength requirement for OPC and whose density is three times lower than that of OPC. The  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio, reflecting the effect of chemical compositions of both WTS and RHA, is used as a primary parameter for investigating the setting and UCS development of the WTS–RHA geopolymers for the curing times tested. This proposed methodology is based on sound principles and is possibly applicable to other WTS materials from different sources. The methodology can be further refined with the analysis of more test data generated for this specific purpose. Based on this research, the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratios of 4.9 and 5.9 are suggested for the development of WTS–RHA geopolymers at room temperature and 60 °C curing, respectively. The targeted WTS/RHA ratio

corresponding to these  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratios is simply calculated by using the chemical formula.

With continuous increases in water demand, the quantity of WTS is rising at an ever-increasing rate and has been mainly disposed of in landfills. This causes social, environmental and economic problems. The MWA spends more than 10,000 US dollars daily (3.6 million US dollars annually) for haulage cost to the landfill (not including the landfill cost). In other words, the MWA spends 33 US dollars/1 ton of WTS. The production of geopolymer binder using WTS as a primary precursor is thus considered to be a sustainable alternative. The total electricity consumed to produce 1 ton of WTS/RHA geopolymers (including preparation of materials and calcining) is approximately 520 and 540 kWh for geopolymers cured at room temperature and 60 °C, respectively. The electrical costs are 65 and 68 US dollars for the geopolymers cured at room temperature and 60 °C, respectively, which are double higher than the cost of hauling WTS to a landfill. However, this higher production cost can be recovered by selling the geopolymers. The carbon footprints for the production of WTS/RHA geopolymers cured at room temperature and 60 °C are 364 and 378 kg  $\text{CO}_2$ /ton (estimated by using a conversion factor of 0.7 kg  $\text{CO}_2$ /kWh (Keijzer et al., 2015)), respectively, whereas the carbon footprint for OPC production is 900 kg  $\text{CO}_2$ /ton (Mohammed et al., 2012) at approximately 1500 °C combustion (Madlool et al., 2011). The outcome of this research is thus significant from engineering, economical and environmental perspectives.

#### 4. Conclusions

The viability of using recycled Water Treatment Sludge (WTS) and Rice Husk Ash (RHA) blend as a sustainable precursor to synthesize lightweight geopolymers is investigated in this research. The alkali activator solution is a mixture of sodium hydroxide and sodium silicate. Due to the formation of micro-pores after the geopolymerization process and the lightweight nature of RHA, the density of the geopolymers is 3 times lower than that of Ordinary Portland Cement (OPC), which is useful as a binder to develop lightweight construction structures. The initial and final setting times and strength are strongly controlled by the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio. A higher  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio results in high initial and final setting times as the condensation rate between silicate and aluminate species is faster than that between silicate and silicate species. The maximum UCS of the WTS–RHA geopolymer is found at  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio of 4.9 and 5.9 at room temperature and 60 °C curing, respectively. The 7-day UCS of the WTS–RHA geopolymer at room temperature and at a  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio of 4.9 is close to the minimum requirement of OPC. Heat curing at 60 °C can improve the UCS of this WTS–RHA geopolymer when  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratios are greater than 4.9 but has an insignificant impact at  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratios less than 4.9. The carbon footprint for the production of WTS–RHA geopolymer is 2.4 times lower than that for OPC.

#### Acknowledgments

This research was supported by the Suranaree University of Technology and the Office of Higher Education Commission under NRU project of Thailand. The third author acknowledges the Thailand Research Fund under the TRF Senior Research Scholar program Grant No. RTA5680002.

#### References

ASTM C109. 2002. Standard Test Method of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). In: Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.01.

- ASTM C138. 2009. Standard Test Method for Unit Weight of Mortar. In: Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.01.
- ASTM C150. 2003. Standard Specification for Portland Cement. In: Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.02.
- ASTM C185. 2008. Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar. In: Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.01.
- ASTM C266. 2013. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. In: Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.01.
- ASTM C595/C595M. 2013. Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. In: Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.02.
- ASTM D854-14. 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. In: Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.08.
- Billong, N., Mielo, U.C., Kamseu, E., Kinuthia, J.M., Njopwouo, D., 2011. Improving hydraulic properties of lime–rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK). *Constr. Build. Mater.* 25, 2157–2161.
- Buchwald, A., Kaps, C., 2002. Property Controlling Influences on the Generation of Geopolymeric Binders Based on Clay. Geopolymers, Melbourne, Australia.
- Bui, L.A.T., Hwang, C.L., Chen, C.L., Lin, K.L., Hsieh, M.Y., 2012. Manufacture and performance of cold bonded lightweight aggregate using alkaline activators for high performance concrete. *Constr. Build. Mater.* 35, 1056–1062.
- Cheng, T.W., Chiu, J.P., 2003. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Miner. Eng.* 16, 205–210.
- Chindaprasit, P., Chalee, W., 2014. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Constr. Build. Mater.* 63, 303–310.
- Chindaprasit, P., De Silva, P., Sagoe-Crensil, K., Hanjitsuwan, S., 2012. Effect of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *J. Mater. Sci.* 47, 4876–4883.
- Davidovits, J., 1999. Geopolymeric cement based on low cost geologic material, results from the European Research project GEOCIS-TEM. In: Davidovits, J., et al. (Eds.), Proceedings of Second International Conference Geopolymer, pp. 83–96.
- Gartner, E., 2004. Industrially interesting approaches to “low- $\text{CO}_2$ ” cements. *Cem. Concr. Res.* 34, 1489–1498.
- Gouy, F., Fouchal, F., Maillard, P., Rossignol, S., 2012. A geopolymer mortar for wood and earth structures. *Constr. Build. Mater.* 36, 188–195.
- Habert, G., d’Espinose de Lacallierie, J.B., Roussel, N., 2011. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *J. Clean. Prod.* 19, 1229–1238.
- He, J., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G., 2012. The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: a comparative study. *Constr. Build. Mater.* 30, 80–91.
- He, P., Jia, D., Wang, S., 2013. Microstructure and integrity of leucite ceramic derived from potassium-based geopolymer precursor. *J. Eur. Ceram. Soc.* 33, 689–698.
- Horpibulsuk, S., Suksiripattananong, C., Samingthong, W., Rachan, R., Anitrajah, A., 2015. Durability against wetting–drying cycles of water treatment sludge–fly ash geopolymer and water treatment sludge–cement and silty clay–cement systems. *J. Mater. Civ. Eng.* 04015078.
- Keeley, J., Jarvis, P., Judd, S.J., 2012. An economic assessment of coagulant recovery from water treatment residuals. *Desalination* 287, 132–137.
- Keijzer, E.E., Leegwater, G.A., Vos-Effting, S.E. de, Wit, M.S. de, 2015. Carbon footprint comparison of innovative techniques in the construction and maintenance of road infrastructure in The Netherlands. *Environ. Sci. Policy* 54, 218–225.
- Khater, H.M., El-Sabbagh, B.A., Fanny, M., Ezzat, M., Lotfy, M., 2012. Effect of nano-silica on alkali activated water cooled slag geopolymer. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2, 170–176.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., 2007. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry. *Miner. Eng.* 20, 1261–1277.
- Kyncl, M., 2008. Opportunities for water treatment sludge re-use. *Geosci. Eng.* 1, 11–22.
- Lemouyna, P.N., Chirje Melo, U.F., Delplancke, M.P., Rahier, H., 2013. Influence of the activating solution composition on the stability and thermo-mechanical properties of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash. *Constr. Build. Mater.* 48, 278–286.
- Madlool, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A., 2011. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2042–2060.
- Mery, Y., Tiruta-Barna, L., Baudin, I., Benetto, E., Igos, E., 2014. Formulation of a technical procedure for process ecodesign dedicated to drinking water treatment plants. *J. Clean. Prod.* 68, 16–24.
- Mohammed, S.J., Collette, C., Sean, M.K., 2012. Trends and developments in green cement and concrete technology. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 1, 194–216.
- Mohapatra, R., Rao, J.R., 2001. Some aspects of characterisation, utilisation and environmental effects of fly ash. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 76, 9–26.
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Miraldo, S., Baklouti, S., Ding, Y., 2012. An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. *Constr. Build. Mater.* 36, 1053–1058.
- Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., Lopez-Hombrados, C., Lleyda, J.L., 2007. Railway sleepers made of alkali activated fly ash concrete. *Rev. Constr.* 22, 75–80.
- Panglaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Chindaprasit, P., 2014. Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Mater. Des.* 53, 269–274.
- Rashad, A.M., 2013. Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer – an overview. *Constr. Build. Mater.* 41, 751–765.
- Rattanasak, U., Chindaprasit, P., 2009. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Miner. Eng.* 22, 1073–1078.

- Rodríguez, N.H., Ramírez, S.M., Varela, M.T.B., Guillem, M., Puig, J., Larrrocha, E., Flores, J., 2010. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. *Cem. Concr. Res.* 40, 778–786.
- Rovnanik, P., 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 24, 1176–1183.
- Silva, P.D., Sagoe-Crentsil, K., 2008. The effect of  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$  on setting and hardening of  $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  geopolymer systems. *J. Aust. Ceram. Soc.* 44, 39–46.
- Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., Chindaprasit, P., 2010. Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 24, 236–240.
- Sua-Iam, G., Makul, N., 2015. Utilization of coal- and biomass-fired ash in the production of self-consolidating concrete: a literature review. *J. Clean. Prod.* 100, 59–76.
- Sulcmak, P., De Silva, P., Horpibulsuk, S., Chindaprasit, P., 2015. Sulfate resistance of clay-Portland cement and clay high-calcium fly ash geopolymer. *J. Mater. Civ. Eng.* 04014158.
- Sulcmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.L., 2013a. Strength development in clay-fly ash geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 40, 566–574.
- Sulcmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.L., Chindaprasit, P., Suksiripattanapong, C., 2013b. Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 47, 1125–1136.
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Boongrasan, S., Udomchai, A., Chinkulkajaiwat, A., Arulrajah, A., 2015a. Unit weight, strength and microstructure of water treatment sludge-fly ash geopolymer lightweight cellular geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 94, 807–816.
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sulcmak, P., Arulrajah, A., 2015b. Compressive strength development in geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Constr. Build. Mater.* 82, 20–30.
- Sun, Z., Cui, H., An, H., Tao, D., Xu, Y., Zhai, J., Li, Q., 2013. Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. *Constr. Build. Mater.* 49, 281–287.
- Teixeira, S.R., Santos, G.T.A., Souza, A.E., Alessio, P., Souza, S.A., Souza, N.R., 2011. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Appl. Clay Sci.* 53, 561–565.
- Turner, L.K., Collins, F.G., 2013. Carbon dioxide equivalent ( $CO_2-e$ ) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Constr. Build. Mater.* 43, 125–130.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., Lorenzen, L., 1998. Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* 29, 283–291.
- Waijarean, N., Asavapit, S., Sombatsompop, K., 2014. Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals. *Constr. Build. Mater.* 50, 486–491.
- Zhang, L., 2013. Production of bricks from waste materials – a review. *Constr. Build. Mater.* 47, 643–655.



# Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash

Anurat Poowancum, Ekkasit Nimwinya and Suksun Horpibulsuk

**Abstract** Geopolymer is an environmental friendly material, and is expected to use as the cement replacement materials. Because, the geopolymer production does not emit carbon dioxide gas, and is a low energy consuming process. Moreover, geopolymer can be synthesized from variety kinds of waste materials. The present work, the room temperature curing geopolymer has been developed by using the calcined water-treatment-sludge (WTS) and the rice husk ash (RHA) as the precursors. Mixture of sodium hydroxide solution and sodium silicate solution was used as an alkali activator solution. The results show that the RHA promotes strength of the WTS-geopolymer. By adding RHA 30 wt%, strength of geopolymer is close to the minimum required strength of the ordinary Portland cement (OPC). In addition, density of WTS-RHA geopolymer is 3 times lower than that of the OPC. Knowledge in the present work opens an opportunity to apply geopolymer for using in variety kinds of engineering applications, especially the lightweight construction materials.

## 1 Introduction

The ordinary Portland cement (OPC) is widely used for constructing work in civilization of human society. However, OPC is an environmental unfriendly material. Because, the producing process of OPC requires high energy consumption

A. Poowancum (✉)  
School of Ceramic Engineering, Faculty of Engineering,  
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand  
e-mail: anurat@sut.ac.th

E. Nimwinya  
School of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering,  
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

S. Horpibulsuk  
School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhon Ratchasima, Thailand

© RILEM 2015  
K. Scrivener and A. Favier (eds.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*,  
RILEM Bookseries 10, DOI 10.1007/978-94-017-9939-3\_36

291

and emit high quantities of carbon dioxide gas [1]. The latter is cause of the global warming problem, and is the important reason that induces numerous researchers study on the geopolymer for using as the cement replacement materials [2].

Geopolymer is an inorganic polymer technology [3], and is synthesized by the aluminosilicate compound materials with alkali hydroxide and/or alkali silicate [4]. Nowadays, geopolymer has been the subject of intense study, because it is an environmental friendly material, does not emit carbon dioxide gas, low energy consumption, low toxicity, and stable at high temperature [5]. Moreover, geopolymer can be synthesized from variety kinds of waste materials.

Water treatment sludge (WTS) is a waste from the water treatment process in production of tap water and drinking water, is extracted from raw water by coagulation technique [6]. WTS is a problem of big city around the world [7]. Environmentalist proposes the effective way to solve the problem of WTS is reused or processed it to be the usable products [8]. The important chemical compositions of WTS are  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  [9], which are the essential components of the geopolymer structure. However, geopolymer is synthesized from WTS has low strength [10]. Khater et al. [11] reported that the strength development of geopolymer matrix depended on types of precursor and the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio [11]. The strength of WTS-geopolymer can be improved by the modification of the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio. Rice husk ash (RHA) is the waste from the biomass power generation and the rice drying process. It is a source of reactive silica, which is abundant in the rice producing countries, including Thailand. By using abundance wastes, i.e., WTS and RHA as the precursor, the sustainable materials for replacement cement can be obtained.

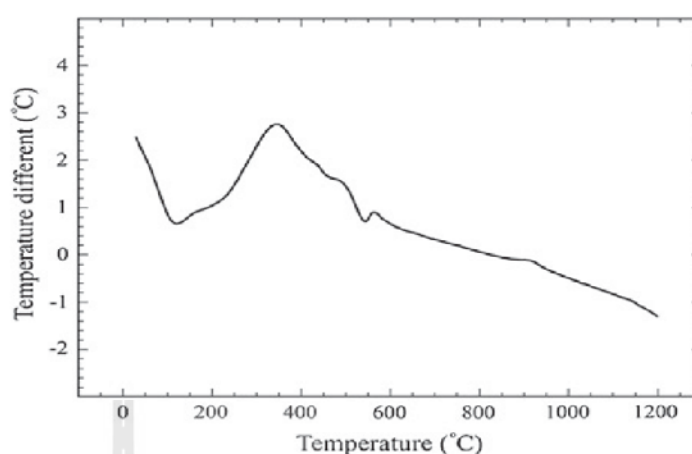
The aim of this work is to develop the room temperature curing geopolymer by using the calcined WTS and RHA as a sustainable precursor. Effect of WTS/RHA ratios on density, setting time, and compressive strength are examined.

## 2 Experimental Procedure

WTS was obtained from Bangkok water treatment plant at Bangkok metropolis, Thailand. To remove impurities, WTS was washed by mixed with water at a WTS/water ratio of about 1.2 by mass, then passed through sieve number 325 mesh, and dried at 100 °C for 24 h. The dried WTS was milled by electric mortar and passed through sieve number 325 mesh, after that was calcined at 600 °C for 2 h to obtain the calcined WTS powder. RHA was obtained from Korat Yong-sa-nguan Company, Thailand. The RHA was wet milled by ball mill for 6 h, then dried at 100 °C for 24 h before being passed through sieve number 325 mesh. Sodium hydroxide (NaOH) pellets and distilled water were mixed to obtain a concentration of 10 M, then mixed with sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) solution to prepare alkali activator solution.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  consists of  $\text{Na}_2\text{O} = 8.0 \%$ ,  $\text{SiO}_2 = 27.0 \%$  and  $\text{H}_2\text{O} = 65.0 \%$ . The ratio of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solution to NaOH solution was fixed at 1.5 by weight. The mixed solution was stored of 24 h prior to use. The calcined WTS



**Fig. 1** The thermal behavior of WTS



powder and RHA powder were mixed at various WTS/RHA ratios of 100:0, 85:15, 70:30, 60:40 and 50:50 by weight. The mixed powder was then mixed with an alkali activator solution by a mortar at a solid to liquid ratio of 1.0. The geopolymer paste was poured into a 50 mm × 50 mm × 50 mm steel mold and compacted as described in ASTM C109 [12]. The molded samples were sealed with a film to prevent moisture evaporation during curing at room temperature (27–30 °C). Density and compressive strengths were measured after 7 days of curing. Chemical compositions of WTS and RHA was evaluated by X-ray fluorescence (XRF, HORIBA, XGT-5200). The thermal behavior of WTS was investigated by a differential thermal analysis (DTA, Perkin Elmer, DTA 7). The measurements were made with heating rate of 10 °C/min. The result of DTA in Fig. 1 presented that dehydroxylation occurred at approximately 550 °C. Therefore, WTS was calcined at 600 °C. Density of WTS and RHA was measured by a pycnometer following ASTM D854 [13]. Setting time of geopolymer pastes was examined according to ASTM C266 [14]. Density and compressive strength of the cured geopolymers were measured following to ASTM C138 [15] and ASTM C109 [12], respectively.

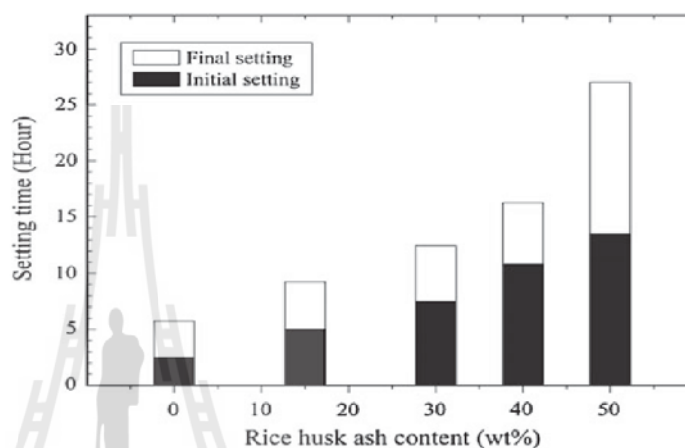
### 3 Results and Discussion

Chemical compositions of WTS and RHA are shown in Table 1. The main components of WTS is SiO<sub>2</sub> (58.99 wt%) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (24.64 wt%). RHA mainly consists of SiO<sub>2</sub> (89.17 wt%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> does not be detected.

Initial and final setting times of geopolymer pastes are the parameters controlling the workability of the concrete geopolymer. Setting time of WTS-RHA geopolymer is increased with increasing of the RHA contents, as shown in Fig. 2. The initial setting time is 2.5 h for the WTS-geopolymer paste while it is 13.5 h for RHA replacement ratio of 50 wt%. It is clearly note that the initial setting time increases

**Table 1** Chemical compositions and density of WTS and RHA

Raw materials	Chemical compositions (wt%)									Density (g/cm <sup>3</sup> )
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Etc.	
WTS	24.64	58.99	1.54	4.08	0.69	1.14	6.63	0.88	1.41	2.61
RHA	0	89.17	1.12	7.29	0.61	1.22	0.41	0.03	0.15	2.15

**Fig. 2** Initial and final setting times of geopolymer after curing for 7 days

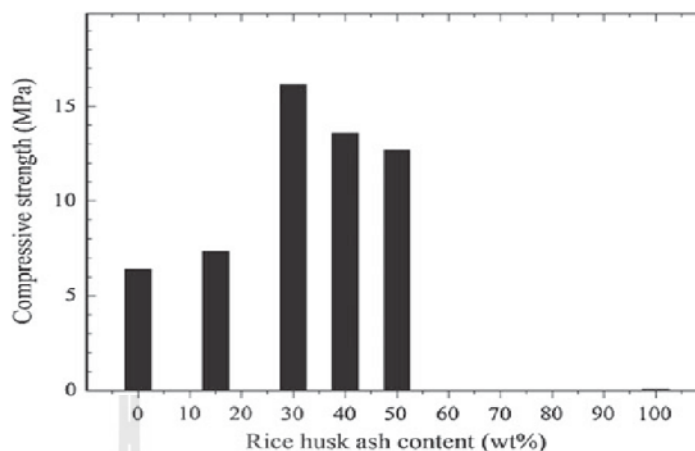
as the increasing in silica content. To understand the role of RHA on the setting time of WTS-RHA geopolymer, it is preferable to express in term of SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio as it has been proved as a prime factor [10]. Table 2 presents SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios for various RHA/WTS ratios, which was calculated from the chemical compositions in RHA and WTS (Table 1) as well as in Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. The hardening of geopolymer is a result from the condensation of aluminate and silicate species during geopolymerization process [16]. The condensation rate between silicate and aluminate species is faster than that between silicate and silicate species [16]. As such, the increase of SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio caused by increasing of RHA content leads to the delay of setting time, which is in agreement with the previous studies [16].

Figure 3 shows the relationship between strength and RHA replacement. The strength of geopolymer paste is increased with increasing of RHA replacement up

**Table 2** Calculation of SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio in different replacement of RHA

Compositions (wt%)		SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ratio
RHA	WTS	
0	100	3.1
15	85	3.8
30	70	4.9
40	60	5.9
50	50	7.3

**Fig. 3** Compressive strength of 7 days cured geopolymer

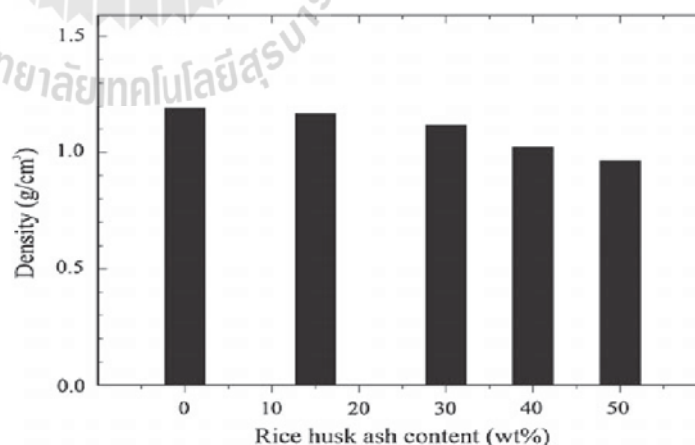


to 30 wt% which is regarded as the critical replacement. At the critical replacement of RHA, the maximum strength of geopolymer paste is 16 MPa, which is slightly lower than that of the minimum requirement of OPC (19 MPa) [17].

Beyond the critical replacement, the strength decreases and tends toward zero at 100 wt% RHA replacement. This indicates that only the silica rich material (no presence of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) is not suitable used as a geopolymer precursor. Silica and alumina ratio plays a significant role on the strength development of geopolymer paste. The maximum strength of WTS-RHA geopolymer found at the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio of 4.9 (30 wt% RHA replacement). However, Silva et al. [16] showed that the optimum  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio was found at approximately 3.0-3.8. The difference in the optimum  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio is possibly due to different types of the precursor.

Density after 7 days of the cured geopolymer is remarkable lower than that of the OPC, as shown in Fig. 4. Density of the OPC is approximately  $3.15 \text{ g/cm}^3$  [18],

**Fig. 4** Density of geopolymer after curing for 7 days



while density of geopolymer in the present work is in between 0.96 to 1.19 g/cm<sup>3</sup>. The density tends to decrease with increasing RHA replacement due to the specific gravity of RHA is lower than that of WTS, as shown in Table 1. Compared to density of the OPC, the density of geopolymer paste is 3 times lower than that of OPC. The lower density is an advantage of the geopolymer binder over the OPC, which can be used for lightweight non-bearing and bearing structures.

#### 4 Conclusions

In this work, the room temperature curing geopolymer has been developed. Geopolymers were synthesized by using the calcined water-treatment-sludge (WTS) as well as the rice-husk-ash (RHA) as the precursors, and the mixture of sodium hydroxide solution and sodium silicate solution as an alkali activator solution. The RHA promotes strength of WTS-geopolymer. By adding RHA 30 wt %, strength of geopolymer is significantly increased, and is close to the minimum requirement of the ordinary Portland cement (OPC). Setting times and strength of WTS-RHA geopolymer are strongly controlled by SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio. The higher SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio results in delay of setting times, because the condensation rate between silicate and aluminate species is faster than that between silicate and silicate species. The highest strength is obtained at the SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio of 4.9. The density of WTS-RHA geopolymer is 3 times lower than that of the OPC, which is useful as a binder to develop the lightweight structures.

**Acknowledgments** This research was supported by the Suranaree University of Technology and the Office of Higher Education Commission under NRU project of Thailand. The third author acknowledges the Thailand Research Fund under the TRF Senior Research Scholar program Grant No. RTA5680002.

#### References

1. Gartner, E.: Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements. *Cem. Concr. Res.* **34**(9), 1489–1498 (2004)
2. Chindaprasirt, P., Chalee, W.: Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. *Constr. Build. Mater.* **63**, 303–310 (2014)
3. Lemougna, P.N., Chinje Melo, U.F., Delplancke, M.P., Rahier, H.: Influence of the activating solution composition on the stability and thermo-mechanical properties of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash. *Constr. Build. Mat.* **48**:278–86 (2013)
4. Zhang, L.: Production of bricks from waste materials—a review. *Constr. Build. Mater.* **47**, 643–655 (2013)
5. Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Miraldo, S., Baklouti, S., Ding, Y.: An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. *Constr. Build. Mater.* **36**, 1053–1058 (2012)

6. Keeley, J., Jarvis, P., Judd, S.J.: An economic assessment of coagulant recovery from waste treatment residuals. *Desalination* **287**, 132–137 (2012)
7. Husillos Rodriguez, N., Martinez Ramirez, S., Blanco Varela, M.T., Guillem, M., Puig, J., Larrotcha, E., Flores, J.: Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. *Cement concr. Res.* **40**, 778–786 (2010)
8. Kyncl, M.: Opportunities for water treatment sludge re-use. *Geoscience engineering* **1**, 11–22 (2008)
9. Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P., Arulrajah, A.: Compressive strength development in geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Constr. Build. Mat.* Submitted for publication (2014)
10. Naprarath, W., Suwimol, A., Kwannate, S.: Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals. *Constr. Build. Mater.* **50**, 486–491 (2014)
11. Khater, H.M., El-Sabbagh, B.A., Fanny, M., Ezzat, M., Lottfy, M.: Effect of nano-silica on alkali activated water cooled slag geopolymer. *ARPJ. Eng. App. Sci.* **2**(2), 170–176 (2012)
12. ASTM C109: Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). *Ann. Book ASTM Standard*, vol. 04.01 (2002)
13. ASTM D854-14: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. *Ann. Book ASTM Standard*, vol. 04.08 (2014)
14. ASTM C266: Standard test method for time of setting of hydraulic-cement paste by Gillmore needles. *Ann. Book ASTM Standard*, vol. 04.01 (2013)
15. ASTM C138: Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. *Ann. Book ASTM Standard*, vol. 04.02 (2011)
16. Silva, P.D., Sagoe-Crentsil, K.: The effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  on setting and hardening of  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  geopolymer systems. *J. Aust. Ceram. Soc.* **44**(1), 39–46 (2008)
17. ASTM C150/C150 M: Standard specification for Portland cement. *Ann. Book ASTM Standard*, vol. 04.01 (2012)
18. ASTM C595/C595 M: Standard specification for blended hydraulic cements. *Ann. Book ASTM Standard*, vol. 04.02 (2013)



## ประวัติผู้เขียน

นายเอกสิทธิ์ ศิริสุวรรณค์ นามสกุลเดิม นิมวิญญา เกิดเมื่อวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา เมื่อปี พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาสายสามัญ จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2548 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้ประกอบธุรกิจร่วมกับครอบครัว จากนั้นศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะที่ศึกษาอยู่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่บทความทางวิชาการลงในวารสารวิชาการ Journal of Cleaner Production 2016 ภายใต้วหัวข้อ “A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer” และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2558

