

การศึกษาจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา
A Study of Water treatment plan sludge-based geopolymer

นายเอกรัฐ	ตั้งศรีวงศ์
นายสิทธิศักดิ์	บัวโหม
นายदनุพล	ทาบุญ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2561
1-61CE018

ใบรับรองโครงการ

ชื่อหัวข้อ การศึกษาจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา
ชื่อนักศึกษา นายเอกรัฐ ตั้งศรีวงศ์
นายสิทธิศักดิ์ บัวโคม
นายตฤพล ทานบุญ
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
ภาควิชา วิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม อนุมัติให้โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา
โครงการวิศวกรรมโยธา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพจิตร ผาวัน)
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง

.....
(อาจารย์สุรพันธ์ สันติยานนท์)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้อ	การศึกษาจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สุรพันธ์ สันตียนนท์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง
คณะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้าง (Construction material) เป็นตะกอนดินประปาจีโอพอลิเมอร์ โดยการนำตะกอนดินประปาไปผสมเข้ากับสารกระตุ้น เพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงขึ้น นอกจากนี้จะเป็นการเพิ่มมูลค่าและคุณประโยชน์ของตะกอนดินประปา (วัสดุเหลือใช้) โดยศึกษาการนำตะกอนดินประปามาทำเป็นจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ โดยตัวแปรต้น ตัวแปรควบคุม ดังนี้ อัตราส่วนตะกอนดินประปากับทราย ปริมาณสารกระตุ้น อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ โดยศึกษาการใช้อัตราส่วนตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 1.00:0.45:1.00 1.00:0.45:1.50 และ 1.00:0.45:2.00 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนร้อยละของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 60:40 70:30 และ 80:20 ทำการบ่มที่อายุ 7 14 และ 28 วัน นำค่ากำลังอัดมาเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอर्टาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ

ผลจากการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดที่มีค่ามากที่สุดในการทดลองคืออัตราส่วนตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนร้อยละของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 60:40 ทำการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่ากำลังอัด 8 ksc แต่ค่ากำลังอัดที่ได้ไม่สามารถนำจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปาไปใช้ในการทดแทนปูนซีเมนต์ได้เนื่องจากค่าการรับกำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ / ตะกอนดินประปา / กำลังอัด

Project Title	A Study of Water treatment plan sludge-based geopolymer
Project Advisor	Suraphan Santiyanon
Program	Bachelor
Field of Study	Civil Engineering
Faculty	Civil Engineering
B.E.	2018

Abstract

This project aims to study the possibility of using left over sediment from the tap water manufacturing to produce construction materials. It is sediment geopolymer, by bringing soil sediment mixed with stimulants to get higher strength and make more value and sediment benefits (Waste Material) by studying sediment from the tap water manufacturing, to make geopolymer that can get compressive strength as much as the cement. The Independent variable, the controlled variable as follows: ratio of tap water sediment and sand. Quantity of stimulants, ratio of Na_2SiO_3 : NaOH . Studying about ratio of tap water sediment : solution : sand equals 1.00:0.45:0.50 1.00:0.45:1.00 1.00:0.45:1.50 and 1.00:0.45:2.00 by weight percentage ratio of Na_2SiO_3 : NaOH equals 50:50 60:40 70:30 and 80:20, set curing time at 7, 14 and 28 days, compare compressive strength with Mortar Cement Industrial product standards for masonry work and plastering work.

Results from the experiment showed that the most valuable compressive strength was the ratio of tap water sediment : solution: sand equals 1.00: 0.45: 1.50 by weight Na_2SiO_3 percentage ratio: NaOH is equals 60:40. 14 days with a compressive strength of 8 ksc when considered in the standards of industrial products for construction and plastering TIS 2595-2556 found that the power is less than the standard.

KeyWords : Geopolymer / Sludge-Based / Compressive Strength

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการครั้งนี้มีความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความร่วมมือจากหลายฝ่ายด้วยกันทั้งได้รับความรู้ คำแนะนำเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์จากท่านอาจารย์สุรพันธ์ สันติยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ได้รับตะกอนดินประปาจากโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ และได้รับความช่วยเหลือในการบดและทำการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในคณะวิศวกรรมโยธาที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมโยธาและในด้านอื่นๆอย่างมากมาย ตลอดจนให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สมบูรณ์แบบยิ่งขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประกอบวิชาชีพได้ต่อไปในอนาคต สิ่งใดที่โครงการนี้มีความผิดพลาดผู้จัดทำจะขอรับไว้แต่เพียงผู้เดียว ส่วนความดีความชอบทั้งหลายผู้จัดทำขอมอบให้กับผู้สนับสนุนโครงการนี้ทุกท่าน

นายเอกรัฐ	ตั้งศรีวงศ์
นายสิทธิศักดิ์	บัวโถม
นายดนูพล	ทาบุญ

ผู้จัดทำโครงการ

วันที่ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปูนซีเมนต์	3
2.2 วัสดุปอซโซลาน	11
2.3 ความต้านแรงอัดสำหรับปูนฉาบ	13
2.4 ประวัติความเป็นมาของจีโอพอลิเมอร์	13
2.5 วัสดุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	
3.1 บทนำ	27
3.2 การจัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	28

สารบัญต่อ

	หน้า
3.3 การทดสอบจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา	30
3.4 การเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา	30
3.5 การทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวของจีโอพอลิเมอร์ตะกอนดินประปา	31
3.6 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง	32
บทที่ 4 ผลการศึกษา	
4.1 การวิเคราะห์ข้อมูล	34
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดสอบกำลังอัด	47
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดสอบการไหลผ่าน	59
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดสอบ SETTING TIME	63
ภาคผนวก ข รูปตัวอย่างที่อัตราส่วนต่างๆ	65
ภาคผนวก ค ประวัติผู้ศึกษา	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	4
2.2 สารประกอบที่สำคัญในปูนเม็ด	5
2.3 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
2.4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80	10
2.5 สมบัติทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618	12
2.6 การคัดขนาดมวลผสมสำหรับมอร์ตาร์	12
2.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ มอก.2595-2556	13
2.8 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว	18
2.9 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา	24
3.1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการศึกษา	29
3.2 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง	32

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
--------	------

2.1 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2.2 polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework	14
2.3 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน	16
2.4 ระบบการผลิตน้ำประปาพื้นฐาน	21
2.5 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำ โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์	23
2.6 ลักษณะของตะกอนดินประปាក่อนนำไปปรับปรุงคุณภาพ	24
2.7 โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปา	24
2.8 โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปาเมื่อมีการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	25
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการ	27
3.2 ตะกอนดินประปา	28
3.3 ทราย	28
3.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH)	29
3.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na ₂ SiO ₃)	30
3.6 ทดสอบการไหลผ่าน	31
3.7 ทดสอบการรับกำลังอัด	31
4.1 การพัฒนากำลังอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:0.50	35
4.2 การพัฒนากำลังอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:1.00	36
4.3 การพัฒนากำลังอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:1.50	37
4.4 การพัฒนากำลังอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:2.00	38
4.5 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na ₂ SiO ₃ : NaOH เท่ากับ 50 : 50	39
4.6 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na ₂ SiO ₃ : NaOH เท่ากับ 60 : 40	40
4.7 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na ₂ SiO ₃ : NaOH เท่ากับ 70 : 30	41
4.8 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na ₂ SiO ₃ : NaOH เท่ากับ 80 : 20	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ผลิตน้ำประปาโดยใช้น้ำดิบจากเขื่อนแม่กลอง โดยถูกส่งมาตามคลองประปาที่มีความยาว 106 กิโลเมตร เนื่องด้วยระยะที่ไกลกว่าจะมาถึงโรงงานผลิตน้ำย่อมมีสิ่งเจือปนผสมมากับน้ำดิบ ดังนั้นก่อนที่จะส่งน้ำให้ผู้ใช้ได้อุปโภคบริโภคต้องมีการเติมสารเคมีและกรอง สิ่งที่แขวนลอยในน้ำดิบ ในส่วนนี้จะทำให้เกิดตะกอน โดยวิธีการคือเติมสารเคมีลงในน้ำดิบก่อนเข้า ถังตกตะกอน(Clarifiers) ซึ่งจะทำให้ตะกอนรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และตกลงสู่ก้นบ่อตกตะกอน แล้วจึงทำการระบายตะกอนเหลวออกไปยังลานตากตะกอน (Sludge Lagoons) ในพื้นที่ประมาณ 50 ไร่ เพื่อรอการกำจัดต่อไป ที่ลานตากตะกอนจะอาศัยสภาพแวดล้อมช่วยทำให้ตะกอนแห้ง เช่น กระแสลม แสงแดด และอุณหภูมิ เพื่อให้น้ำระเหยออกจากเนื้อดินตะกอน ลักษณะของตะกอนดินที่แห้งแล้วจะร่วนซุย เมื่อใช้ซ้ำเรื่อย ๆ ตะกอนดินจะเต็มและไม่สามารถรับตะกอนเหลวได้ จะต้องทำการกำจัดขุดลอกบ่อตากตะกอนและขนย้ายตะกอนออกจากพื้นที่โรงงานหรือนำกลับไปถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ เนื่องจากในอนาคตจะมีการเพิ่มกำลังการผลิต ปริมาณตะกอนดินประปาจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ตระหนักถึงปัญหาปริมาณของตะกอนที่เพิ่มขึ้นและแนวทางการกำจัดตะกอนที่จะเกิดในอนาคต

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้าง (Construction material) เป็นตะกอนดินประปาจีโอพอลิเมอร์ โดยการนำตะกอนดินประปาไปผสมเข้ากับสารกระตุ้น เพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงขึ้น นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าและคุณประโยชน์ของตะกอนดินประปา (วัสดุเหลือใช้)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือจากการผลิตน้ำประปามาทำเป็นจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ โดยตัวแปรต้น ตัวแปรควบคุม ดังนี้ อัตราส่วนตะกอนดินประปากับทราย ปริมาณสารกระตุ้น อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH ระยะเวลาในการบ่ม แล้วจะนำผลการศึกษาที่ได้มาวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมของตะกอนดินประปา จีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ดินตะกอนประปามาทำจีโอพอลิเมอร์
- 2) เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา จากโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ใช้อัตราส่วนตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 1.00:0.45:1.00 1.00:0.45:1.50 และ 1.00:0.45:2.00 โดยน้ำหนัก ต่อสมบัติด้านกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

2) อัตราส่วนของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 60:40 70:30 และ 80:20 โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์(M)

3) เทียบกำลังอัดกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบคุณสมบัติด้านกำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา
- 2) เพิ่มมูลค่าของตะกอนดินประปา
- 3) สามารถนำจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปาไปประยุกต์ใช้กับงานอื่น ๆ ได้จริง

1.5 สมมติฐานของการวิจัย

- 1) ตะกอนดินประปาสามารถนำไปใช้แทนปูนซีเมนต์และนำไปใช้ผลิตจีโอพอลิเมอร์ได้

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1) จีโอพอลิเมอร์ หมายถึง เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วย อัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการก่อตัวและรับกำลังอัดได้

2) ตะกอนประปา คือ ของเหลือจากกระบวนการผลิตน้ำประปา มีลักษณะคล้ายดินเหนียว เบียดขึ้น ควรนำไปตากแห้งและบดให้มีขนาดเล็กก่อนที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณที่สูงเช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลาน โครงสร้างโดยทั่วไปมีทั้งผลึกและไม่เป็นผลึก หากมีการเผาจะทำให้สารประกอบในตะกอนประปามีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

3) การบ่ม หมายถึง การนำก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มาห่อพลาสติก แล้ววางไว้ทิ้งไว้ในที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน

4) กำลังแรงอัด หมายถึง ความสามารถในการรับน้ำหนักจากเครื่องทดสอบ Compression Testing Machine

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เมอไรเซชันของสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูง และออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้ คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีแนวโน้มเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ วัสดุที่ใช้ผสมทำจีโอพอลิเมอร์คือวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ซึ่งมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบจะถูกนำเสนอในบทนี้ โดยจะกล่าวถึงความสำคัญของจีโอพอลิเมอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

เป็นคำที่มาจากภาษาละติน (Latin) หมายถึง สารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็ง หรือมวลรวม เช่น หิน กรวด ทราย ให้แข็งติดเป็นเนื้อเดียวกัน นิยมใช้ในงานก่อสร้างเป็นหลัก โดยมีการนำปูนซีเมนต์ไปใช้งานทั้งในรูปแบบของ ซีเมนต์เพสต์, มอร์ตาร์, และคอนกรีต

- ซีเมนต์เพสต์(Cement Paste) คือส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์กับน้ำ อาจมีสารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสม
- มอร์ตาร์(Mortar) คือ ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ กับ ทราย
- คอนกรีต(Concrete) คือ ส่วนผสมของมอร์ตาร์ กับ หิน กรวด

คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายและทางเคมี

2.1.1 สมบัติของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี เมื่อวัตถุดิบได้รับการเผาในหม้อเผาปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้
ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนหรือดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียม (จากหินปูนหรือดินสอพอง) กับซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก (จากดินดำหรือดินเหนียวหรือหินดินดาน)

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยกระบวนการ ตกผลึก เมื่อทำให้เย็นลงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์แสดงใน ตาราง 2.1 เมื่อรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบ	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	CaO	60-67
	SiO ₂	17-25
	Al ₂ O ₃	3-8
	Fe ₂ O ₃	0.5-6
ออกไซด์รอง	MgO	0.1-5.5
	Na ₂ O+K ₂ O	0.5-1.3
	TiO ₂	0.1-0.4
	P ₂ O ₅	0.1-0.2
	SO ₃	1-3

2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะดังนี้คืออาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบขึ้นใหม่ การเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรกดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์ ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญในปูนเม็ด อ้างอิงจาก : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.)

ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_2$	C_4AF

คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

คุณสมบัติของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด มีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S หรือ Alite)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีอ่อนกว่า C_2S คุณสมบัติของ C_3S จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์ของ C_3S เพิ่มขึ้นโดยปริมาณยิปซัมจะมีผลต่อกำลังอัดของ C_3S ด้วย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3S อยู่ประมาณ 50 - 70%

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S หรือ Belite)

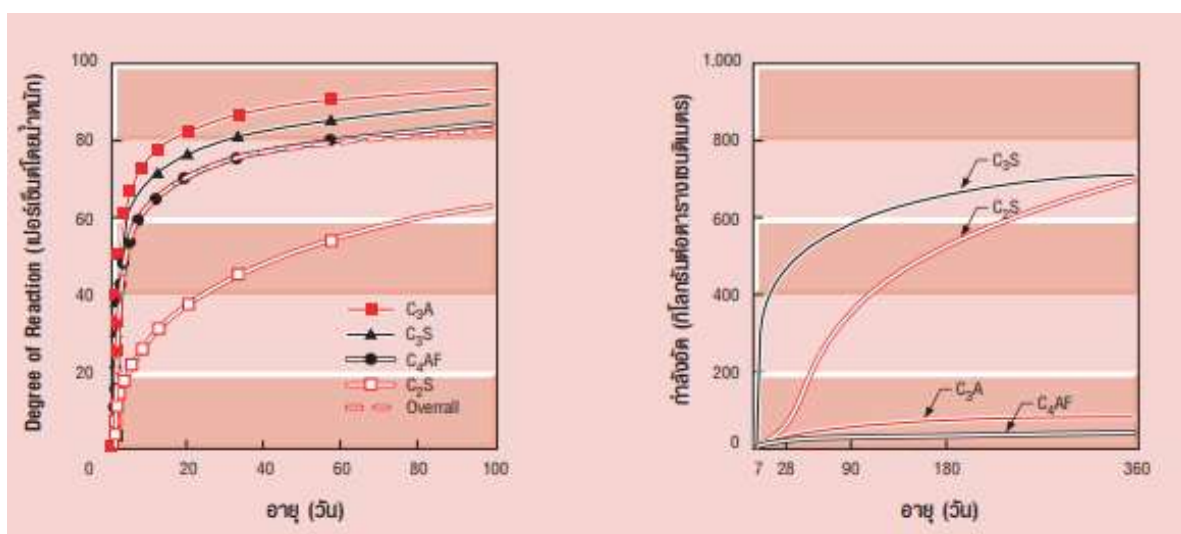
C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแต่มีเพียง $\beta\text{C}_2\text{S}$ เท่านั้นที่มีความเสถียร ณ อุณหภูมิทั่วไป $\beta\text{C}_2\text{S}$ มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและเกิดความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ ในช่วงแรก และกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุ มากกว่า 7 วัน แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_2S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_2S อยู่ประมาณ 15 - 30%

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติม ยิปซั่มลงไปในช่วงต้นของการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ C_3A และจะพัฒนากำลังอัดในช่วง 1 - 2 วัน แต่มีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ประมาณ 5 - 10% นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนซีเมนต์ ที่มี C_3A ต่ำกว่า จะสามารถทนทานต่อซัลเฟต ได้ดีกว่า

4. เตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF หรือ Celite)

C_4AF เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและ อลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และ จะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา C_4AF มีคุณสมบัติทำ ปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่ากำลังอัดของ C_4AF มีค่าต่ำและไม่แน่นอนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ประมาณ 5 - 15%



ก) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ข) กำลังอัดของสารประกอบหลัก

รูปที่ 2.1 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล, 2551)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
-----------	--------	--------	--------	---------

	(Alite)	(Belite)		(Celite)
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Rate of Hydration)	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด (Strength Development)	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย (Ultimate Strength)	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)	ปานกลาง (500 จูลต่อกรัม)	น้อย (250 จูลต่อกรัม)	สูงมาก (850 จูลต่อกรัม)	ปานกลาง (420 จูลต่อกรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติ เหมือน ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์		ไม่เสถียรใน น้ำ และถูก ซัลเฟต ทำลายได้ง่าย	ทำให้ ปูนซีเมนต์ มีสีเทา

คุณสมบัติของสารประกอบรอง

1. ยิปซั่ม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate Dihydrate หรือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

ยิปซั่มเป็นหนึ่งในสามรูปแบบของสารประกอบคัลเซียมซัลเฟต โดยจะมีการเติมยิปซั่มในระหว่างการผลิตปูนซีเมนต์ เพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A เป็น Ettringite (Calcium Trisulphoaluminate) เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A หรือเป็นการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ถ้าไม่ได้เติมยิปซั่ม ปูนซีเมนต์จะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ปริมาณยิปซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ปูนซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงสุดและเกิดการหดน้อยที่สุด

2. Free Lime (CaO)

Free Lime สามารถเกิดได้ 2 กรณี ได้แก่

2.1 เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด

2.2 เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO ไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากทำปูนซีเมนต์ แข็งตัวแล้วทำให้เกิดการขยาย

ปริมาณ ที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าว และเสียหายได้ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime (Unsoundness Due to Lime)”

3. แมกนีเซียมออกไซด์ หรือ แมกนีเซีย (Magnesium Oxide หรือ Magnesia หรือ MgO) วัตถุประสงค์ในการผลิตปูนซีเมนต์โดยปกติจะมี $MgCO_3$ เมื่อเผาจะเกิดการแยกตัวเป็น MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะ อยู่ในรูปผลึก Periclese (MgO) ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO คือ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

3.1 ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์

3.2 ขนาดของ MgO ความไม่อยู่ตัวของ MgO จะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก เพราะถ้าผลึกมีขนาดเล็ก

3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว

4. อัลคาไลออกไซด์ (Alkali Oxides หรือ Na_2O , K_2O)

อัลคาไลออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบาง ประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือต่างในปูนซีเมนต์มาผสมเป็นคอนกรีตจะทำให้เกิด “ปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction หรือ AAR)” ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้ คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ

2.1.3 การก่อตัวและการแข็งตัว

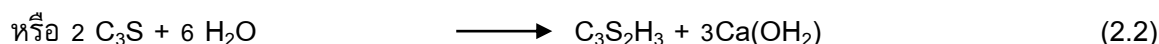
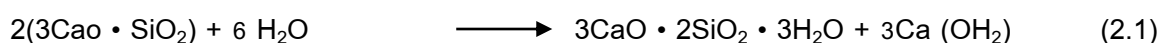
ปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)” ทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงได้

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ จะก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวและสามารถลื่นไหลได้ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยจะเรียกช่วงเวลาที่คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า “Dormant Period” หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มจับตัว (Stiff) ถึงแม้ว่าจะยังนิ่มอยู่ แต่ก็ไม่สามารถไหลตัวได้อีกแล้ว (Unworkable) จุดนี้จะเป็นจุดที่เรียกกันว่า “จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set)” และระยะเวลาตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดนี้เรียกว่า “เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time)” การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ จะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อยๆจนถึงจุดที่เป็นของแข็งที่คงสภาพ (Rigid Solid] ซึ่งจะเรียกว่า “จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)” และเวลาที่ใช้นจนถึงจุดดังกล่าวเรียกว่า

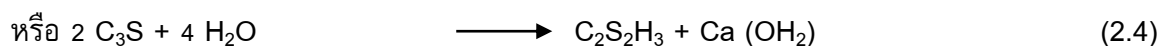
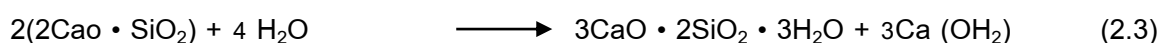
“เวลาการก่อดัวสุดท้าย (Final Setting Time)” ซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไปจนกระทั่งสามารถรับน้ำหนักได้ กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า “การก่อดัวและการแข็งตัว (Setting and Hardening)”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S) แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด “แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)” ประมาณร้อยละ 15-25 และสารประกอบ “(Calcium Silicate Hydrate $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH)” ที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน และให้ความแข็งแรงดั่งสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3S



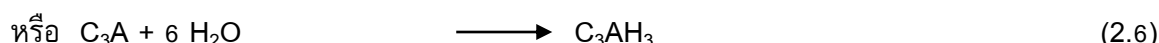
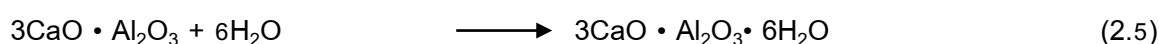
สมการของ C_2S



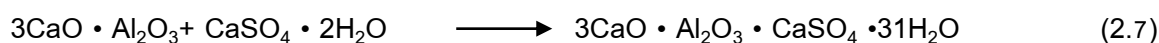
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิดเนื้อวุ้น (Gel) ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์นอกจากนี้ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดี

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนียม (C_3A) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการ แข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดั่งสมการต่อไปนี้

สมการของ C_3S



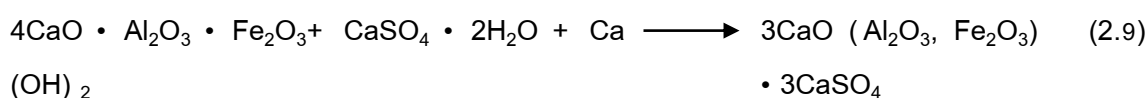
ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยยิปซัมที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดั่งสมการต่อไปนี้



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อดัวของ C_3A และทำให้การก่อดัวในช่องแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ละชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของ

ของแข็งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างไรไปจนกระทั่งไอออนซัลเฟต (Sulphate Ions) มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดขึ้น Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_3AF) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_3AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลโฟอะลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Sulphoferrite) ดังสมการต่อไปนี้



เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ ร้อยละ 80 ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลังทั้ง 4 แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จร้อยละ 80

สารประกอบ	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก็จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วด้วยเช่นกัน

- อายุของซีเมนต์เพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์

- องค์ประกอบของซีเมนต์อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงแรกเท่านั้นที่จะขึ้นอยู่กับสารประกอบหลักแต่ละสาร โดยปูนซีเมนต์ที่มี C_3S และ C_3A มากจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงปลายของแต่ละสารประกอบหลักจะไม่แตกต่างกัน

- ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อความละเอียดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัส กับน้ำได้มากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความละเอียดจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงปลาย

- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ส่งผลให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันโดยเฉลี่ย และ ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย

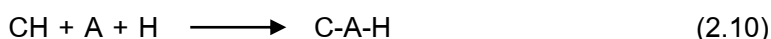
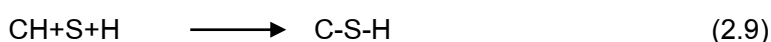
- อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เฟส

- สารผสมเพิ่ม มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทหน่วงปฏิกิริยา ไฮเดรชัน เช่น สารจำพวกน้ำตาล, กรดและเกลือของลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulphonic) และประเภทเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น CaCl_2

2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic material)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติเชื่อมประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ จะได้สารที่มีสมบัติเชื่อมประสาน (ปริญญา, 2553) วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แห่ง ได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติและปอซโซลานที่ได้จากอุตสาหกรรมหลักการทำงานของวัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลาน กระทำได้ 2 ลักษณะ คือ

2.2.1 ทางด้านเคมี คือ วัสดุปอซโซลานนั้นเมื่อนำมาผสมในซีเมนต์ ซิลิกาที่มีอยู่จำนวนมาก ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เราเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ส่งผลให้ซีเมนต์ที่ผสมด้วยวัสดุ ปอซโซลานมีกำลังเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10



2.2.2 ทางด้านกายภาพ คือ อนุภาคที่เล็กของวัสดุปอซโซลานทำให้สามารถแทรกตัว (Filler) เข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ กันในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและกำลังสูงขึ้น

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618

สมบัติทางเคมี(ปริมาณร้อยละ)	มาตรฐานปอซโซลาน		
	N	F	C

SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ น้อยที่สุด	70	70	50
SO ₃ มากที่สุด	4	5	5
Na ₂ Oมากที่สุด	1.5	1.5	1.5
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้(LOI)มากที่สุด	10	6	6

มวลรวม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อยที่ใช้เป็นวัสดุแทรกในวัสดุปอซโซลาน ที่เป็นส่วนผสมที่สำคัญของวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากมวลรวมมีปริมาณมาก ซึ่งมวลรวมมีความสำคัญคือมวลรวมมีราคาถูก ช่วยให้วัสดุปอซโซลานมีความคงทน และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นคุณภาพของมวลรวม มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุปอซโซลานเป็นอย่างมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องให้ความสำคัญกับมวลรวม มาตรฐาน ASTM C227

ตารางที่ 2.6 การคัดขนาดมวลผสมสำหรับมอร์ตาร์

ขนาดร็อง ISO (ASTM)		มวล ร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)
ผ่าน	ค้าง	
4.75 mm (No.4)	2.36 mm (No.8)	10
2.36 mm (No.8)	1.18 mm (No.16)	25
1.18 mm (No.16)	600 µm (No.30)	25
600 µm (No.30)	300 µm (No.50)	25
300 µm (No.50)	150 µm (No.100)	15

2.3 ความต้านแรงอัดสำหรับปูนฉาบ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ มอก.2595-2556 ความต้านแรงอัดของก้อนลูกบาศก์ 7 และ 28 วัน

ตารางที่ 2.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ มอก.2595-2556

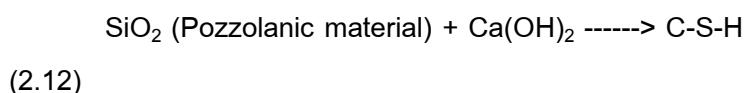
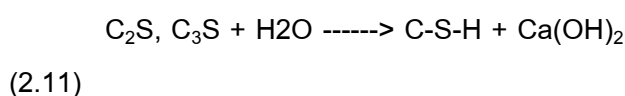
ประเภท	เกณฑ์ที่กำหนด (Mpa)
--------	---------------------

(ไม่รับน้ำหนัก)	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
ภายในอาคาร	3.4	6.2
ภายนอกอาคาร	9.0	14.5

2.4 ประวัติความเป็นมาของจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

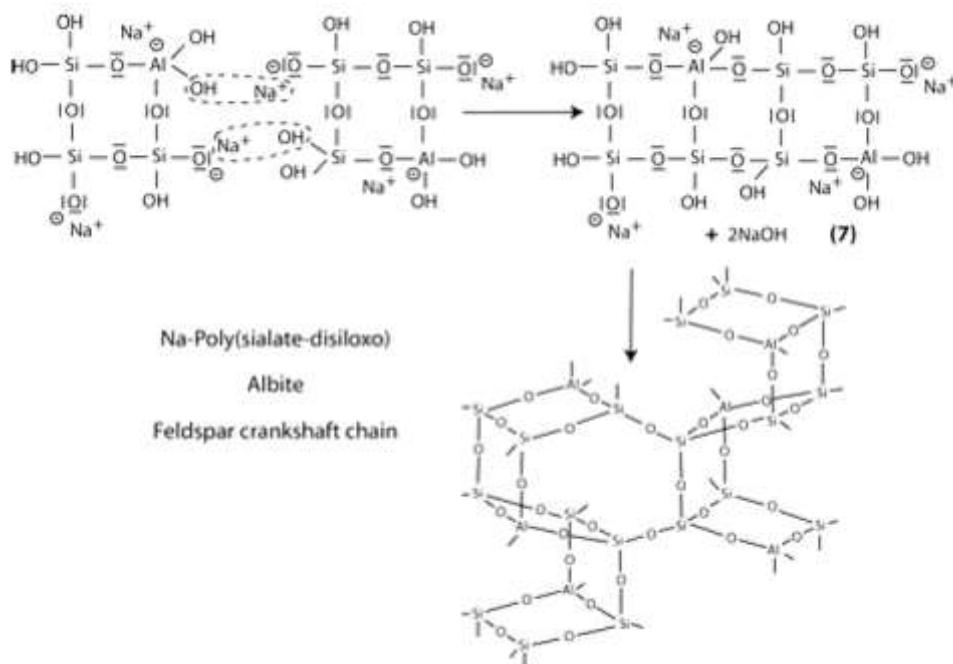
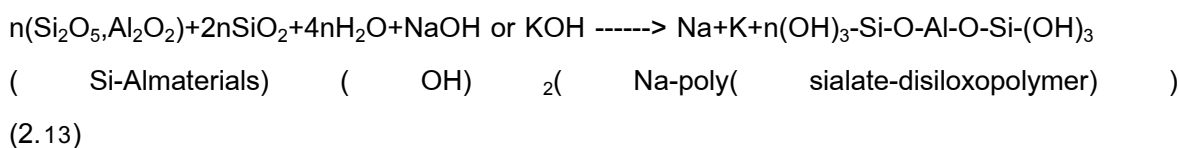
จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบ-อสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอพอลิเมอร์ดังนี้ จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ใน รูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ และถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลหรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัด

ลักษณะโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอพอลิเมอร์นั้นต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือ โครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นแบบไฮเดรชัน ซึ่งประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) ดังสมการที่ 2.11 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่สองขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังสมการที่ 2.12 ปฏิกิริยานี้เองจะเพิ่มผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จีโอพอลิเมอร์เกิดจากวัตถุดิบที่มีซิลิเกต (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้องค์ประกอบหลักเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีและเกิดเป็น Polymer

chain ปฏิกิริยาจะเกิด ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สมการที่ 2.13 แสดง สมการทางเคมีของปฏิกิริยา พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)



รูปที่ 2.2 polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ้าถ่านหินมีส่วนประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักหากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลจะสามารถทำให้เกิดสารประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีตสารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินารวมตัวกันและเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาก็จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H) ในกระบวนการและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก(Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework ดังกรณีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายมากกว่า

2.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์

การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์เกิดได้โดย ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันจึงเกี่ยวข้องกับการชะละลาย (Dissolution) การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ (Polymerization) การก่อเจล (Gelation) การจัดเรียง (Reorganization) และการรวมตัวเป็นสารเกาะกลุ่ม (Polymerisation) ซึ่งการแข็งตัวของสารประกอบซิลิกา และอะลูมินา จะเกิดบริเวณผิวของอนุภาคปรากฏให้เห็นเป็นส่วนอนุภาคแข็งที่ไม่ละลายน้ำ

จากแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกตเจลาปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ ในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปสัณฐาน ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะมีกลไกการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

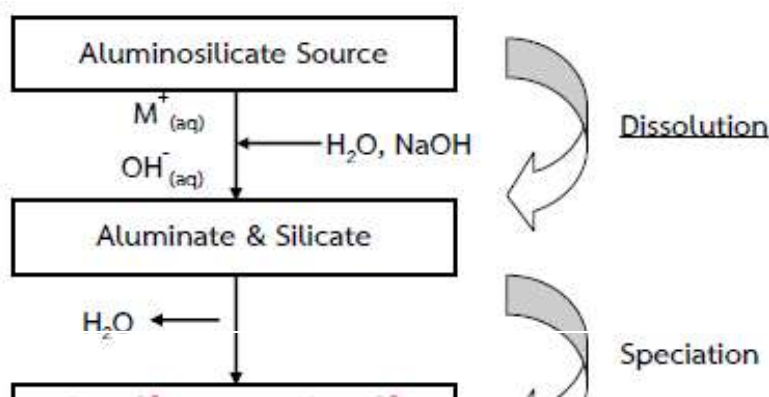
1) ขั้นตอนการละลาย (Dissolution) การเปลี่ยนวัสดุของแข็งที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกต (Solid Aluminosilicate Source) ไปเป็นการสังเคราะห์อัลคาไลน์อะลูมิเนียมซิลิเกต (Synthetic Alkali Aluminosilicate) โดยการละลายของวัสดุของแข็งที่ประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกต ด้วยสารละลายด่าง ที่มีอ็อกไซด์ไฮดรอกไซด์ จะได้สารละลายอะลูมิเนียมและซิลิเกต

2) ขั้นตอนสถานะสมดุลจำเพาะ (Speciation Equilibrium) การละลายของอนุภาคของแข็งที่พื้นผิวเป็นผลให้อะลูมิเนียมและซิลิเกตปลดปล่อยเป็นอิสระ จะอยู่ในรูปของโมโนเมอร์ เข้าไปในสารละลายส่วนผสมที่ซับซ้อนของซิลิเกต อะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมซิลิเกต จะเกิดขึ้นและอยู่ในสถานะที่มีสภาวะสมดุลจำเพาะ กระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ นั้นในขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนสถานะสมดุลจำเพาะ (Speciation Equilibrium) น้ำจะถูกปลดปล่อยระหว่างปฏิกิริยาเคมี น้ำถูกขับออกจากเนื้อ จีโอพอลิเมอร์ระหว่างการบ่มและช่วงที่อยู่ในสภาพแห้งต่อไปดังรูปที่ 2.3 น้ำที่เหลือจะอยู่ในโพรงขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Nano pore) ซึ่งมีผลดีต่อการทำงาน หรือการเกิดปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ น้ำในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ ไม่ได้มีส่วนสำคัญในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เพียงแค่เป็นส่วนผสมในการทำปฏิกิริยา ในระหว่างการผสม

3) ขั้นตอนการกลายเป็นเจล (Gelation) การชะของอัญฐานอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าพีเอชสูง แล้วเกิดสารละลายอะลูมิเนียมซิลิเกตอิ่มตัวอย่างมาก (Supersaturated Aluminosilicate Solution) สารละลายเข้มข้นนี้จะอยู่ในรูปเจล (Gel) ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ในรูปแบบสภาวะที่มีน้ำมีโครงข่ายใหญ่โดยการควบแน่น กระบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่สะสมระหว่างการละลาย น้ำมีส่วนในปฏิกิริยาขั้นกลางแต่ส่วนที่เหลือจะอยู่ในโพรงของเจล โครงสร้างเจลมีสองเฟส ประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกตและน้ำ

4) ขั้นตอนการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ (Reorganization) หลังจากเกิดเจล ระบบยังคงดำเนินต่อไป มีการจัดเรียงตัวและโครงสร้างใหม่

5) ขั้นตอนการเกิดการก่อตัวแบบลูกโซ่ (Polymerization and Hardening) มีการเชื่อมโยงโครงข่ายมากขึ้น ทำให้เกิดโพรงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกต 3 มิติ



รูปที่ 2.3 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน Duxson et al. (2007)

2.4.2 ปัจจัยการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ปัจจัยที่สำคัญหลายประการ เพื่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่สูง ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงได้แก่ องค์ประกอบของวัตถุดิบและอัตราส่วน ชนิดและความเข้มข้นของต่าง และอุณหภูมิในการปฏิกิริยา ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถอธิบายตามขั้นตอนได้ดังนี้

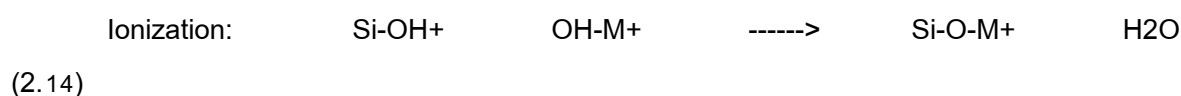
2.4.2.1 องค์ประกอบของวัตถุดิบและอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

องค์ประกอบสารตั้งต้นที่มีธาตุซิลิกอนและอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลักมีความสำคัญในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ส่วนอัตราส่วน Si และ Al มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ และส่วนใหญ่เป็นวัสดุปอซโซลาน เช่น แก้วลอย แก้วกลบ แก้วกลบดำ ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก ตะกรันจากโรงกรองน้ำ ซึ่งอัตราส่วน Si/Al ในสารตั้งต้นเหมาะสม จะเป็นปัจจัยที่สำคัญส่งผลให้ต่อการเกิดปฏิกิริยาและการจับตัวของพันธะทางเคมีภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์

2.4.2.2 ชนิดและความเข้มข้นของต่าง

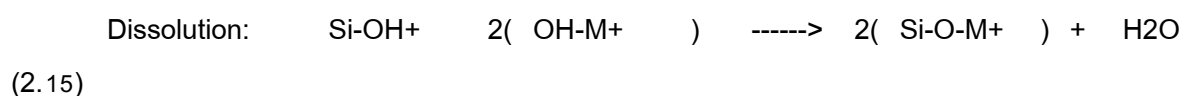
อัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxides) นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นในการสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เกิดกระบวนการกระจาย (Dispersant) ส่งผลต่อการเกิดพันธะของโพลิเมอร์อินทรีย์ เกิดกลไกการ ดุลประจุในตำแหน่งที่มีการแทนที่ซิลิกา (Si) ด้วยอะลูมิเนียม (Al) ให้เกิดการควบแน่นในโครงสร้าง และก้อนวัสดุ มีความแข็งแรงมากขึ้นกระบวนการเกิดโพลิเมอร์ของซิลิกาในสารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการหลักคือ

1) กระบวนการไอออนไนเซชัน (Ionization) เกิดขึ้นเมื่ออัลคาไลไฮดรอกไซด์แพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ผิวของอนุภาคทำให้ซิลานอลกรุป (Silanol Group) เกิดการแตกตัว ดังสมการ 2.14



อัตราการเกิดกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเป็นต่างของอัลคาไลไอออนโดย $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนมีขนาดใหญ่มีความไวในการแตกตัวได้ดีกว่าและง่ายกว่าโซเดียมและ ลิเทียม ไอออนในเวลาเท่ากัน

2) กระบวนการชะละลาย (Dissolution) ดังสมการ อัตราการชะละลายของซิลิกาขึ้นอยู่กับดีกรีของแคตไอออนไฮเดรชัน (Degree of cation hydration) ซึ่ง $\text{K}^+ < \text{Na}^+ < \text{Li}^+$ มีผลอย่างมากเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่อโลหะออกไซด์มีค่าสูง ($\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$)



2.4.2.3 อุณหภูมิในการบ่ม

การใช้อุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ส่งผลต่ออัตราการเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้นช่วยเร่งให้เกิดผลิตภัณฑ์และส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นการบ่มจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้อย่างรวดเร็วและเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วงต้นได้ดีจีโอพอลิเมอร์สามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้ในกระบวนการเกิด จีโอพอลิเมอร์เป็นไปได้จะต้องใช้ระยะเวลาเพื่อที่จะพัฒนากำลังอัดได้ดี จึงมีการนำความร้อนมาช่วยเพื่อที่จะลดระยะเวลาบ่มให้น้อยลง และเร่งปฏิกิริยาในช่วงต้น ซึ่งการบ่มแบ่งได้หลายแบบ เช่นบ่มแบบ ใต้น้ำความดันสูง บ่มแบบอุณหภูมิห้อง บ่มแบบความร้อน และบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น

2.4.2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นค่าที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลาย ของเกลือคลอไรด์มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้าง ขี้ออก เช่นอุตสาหกรรมทาสีอุตสาหกรรมกระดาษตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน

ต้น โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อน แต่ไม่รุนแรงนัก

2.4.2.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำจัดเป็นต่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วน โดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:1.97 ถึง 1:2.17	1:2.34 ถึง 1:2.58	1:3.18 ถึง 1:3.59
เหล็ก ร้อยละ ไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละ ไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

2.5 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์มีมากมายหลากหลาย แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตะกอนดินประปา ที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ นครปฐม มาเป็นวัตถุประสงค์หลักซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ซึ่งมี ซิลิกอนไดออกไซด์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ อยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสม แต่องค์ประกอบของตะกอนดินประปาจะมีซิลิกอนไดออกไซด์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์รวมทั้งสารประกอบอื่น ๆ ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับฤดูกาลและสารเคมีที่เติมลงไปในการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา ซึ่งกระบวนการผลิตน้ำประปามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.5.1 ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

ตะกอนดินประปาจากการผลิตน้ำประปาเป็นตะกอนที่เหลือจากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาเริ่มจาก นำน้ำดิบเข้าสู่โรงผลิตน้ำประปา ผ่านการดักตะกอน (Screening) ตะกอนหนักจะตกลงสู่ถังตกตะกอน (Sedimentation tank) ส่วนตกตะกอนแขวนลอยจะตกตะกอนโดยการผสมสารเคมีในกระบวนการ สร้างตะกอน (Coagulation) และแปรสภาพตะกอนขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดและมีน้ำหนักมากขึ้นในกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) ตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะตกลงในถังตกตะกอน จากนั้นน้ำใส จะไหลผ่านระบบกรอง (Filtration) ทำให้น้ำใสสะอาดมากขึ้นและผ่านระบบฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีนเรียกว่ากระบวนการ Disinfection ส่วนกลืนและรสที่ไม่เหมาะสม

สำหรับการอุปโภคและบริโภคถูกบำบัดด้วยระบบ Activated carbon ส่วนการเติมปูนขาว (Lime) เพื่อควบคุมความเป็นกรดของน้ำและลดการกัดกร่อนของระบบท่อประปา ระบบการเติมคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนในระบบ เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2549)

2.5.1.1 การสร้างแกนตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation)

เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของตะกอนที่อยู่ในน้ำเกิดการเสียเสถียรภาพและเกิดการจับตัวกับสารสร้างแกนตะกอน เกิดเป็นเม็ดตะกอนขนาดเล็ก (Floc) ขนาดเล็ก เมื่อมีจำนวนมากขึ้นจะเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ง่าย ซึ่งการสร้างแกนตะกอนสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมี ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้มีชื่อเรียกว่า สารส้ม เมื่อเติมลงไปลงในน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำทำให้อนุภาคความขุ่นจับตัวกันเกิดเป็นแกนตะกอน

2.5.1.2 การรวมตะกอน (Flocculation)

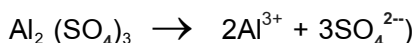
เป็นขั้นตอนที่เกิดต่อเนื่องจากการสร้างแกนตะกอน โดยมีหลักการคือเปิดให้อากาศให้เม็ดตะกอนขนาดเล็ก ได้ผสมกันอย่างทั่วถึงด้วยการกวนน้ำอย่างช้าๆ และนานเพียงพอ ทำให้เม็ดตะกอนและสารปนเปื้อนต่างๆในน้ำเกาะยึดและรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น จนกระทั่งเม็ดตะกอนมีน้ำหนักและขนาดโตพอที่จะตกตะกอนออกจากน้ำได้

2.5.1.3 สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulants)

สารที่นำมาใช้ในกระบวนการสร้างแกนตะกอนหรือกระบวนการโคแอกกูแลนต์เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ เป็นสารที่ให้อนุภาคที่มีประจุบวก ซึ่งสามารถจับกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ ทำให้คอลลอยด์เสียเสถียรภาพได้แบ่งออกเป็นสารเคมีและสารอินทรีย์ในกลุ่มของสารเคมีนิยมใช้ เกลือของธาตุอะลูมิเนียม และเกลือของธาตุเหล็กโดยมีรายละเอียดดังนี้

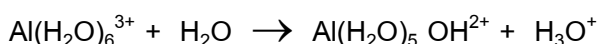
สารส้ม

สารส้มเป็นสารประกอบของอะลูมิเนียม เรียกว่า Aluminum Sulfate หรือ Alum มีสูตรทางเคมี ดังนี้ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ เป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่าง ๆ หาซื้อได้ง่ายและมีราคาพอประมาณเมื่อสารส้มละลายน้ำจะมีการแตกตัวของไอออน ดังนี้

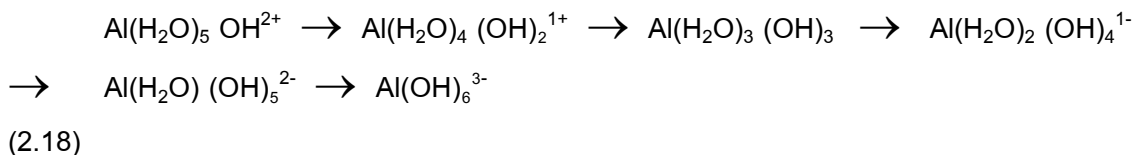


(2.16)

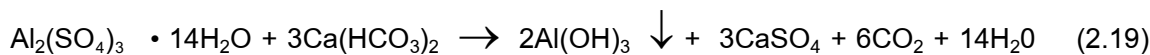
สารส้มที่ละลายน้ำแตกตัวได้ไอออนบวกของโลหะอะลูมิเนียมที่มีประจุ +3 ซึ่งจะรวมอยู่กับน้ำที่ไม่สามารถอยู่ในรูปอิสระได้โดยจะอยู่ในรูป $Al(H_2O)_6^{3+}$ เรียกไอออนที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำว่า Aquametal Ion เรียกโมเลกุลของน้ำว่า Ligand เนื่องจาก Al^{3+} มีอำนาจเป็นกรดที่สามารถให้ H^+ จึงพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดังนี้



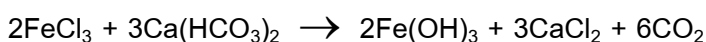
(2.17)



ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นต่อเนื่อง โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ประจุบวกจะลดลงเรื่อย ๆ จนหมดและกลายเป็นประจุลบ แต่ไอออนที่เป็นประจุลบจะไม่ ช่วยให้เกิด โคแอกกูเลชันเพราะมีประจุลบเช่นเดียวกับอนุภาคคอลลอยด์ จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้ H⁺ เพิ่มขึ้น จึงทำให้ pH ของน้ำลดลง ดังนั้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นได้ต่อไปเมื่อ น้ำ ต้องมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) อย่างเพียงพอ เพื่อมาจับตัวกับ H⁺ ที่เกิดขึ้น ปฏิกิริยาเคมี ในการ ละลายของสารส้มในน้ำธรรมชาติแสดงดังสมการที่ 19 จะเห็นว่าการทำปฏิกิริยาของ สารส้มกับ HCO₃⁻ ในน้ำธรรมชาติ จะเกิดแก๊สของ Al(OH)₃ และเกิด CaSO₄ ซึ่งเป็นความ กระด้างถาวร รวมทั้ง CO₂ ที่เกิดขึ้นจะทำให้ น้ำมีสภาพกรดมีค่า pH ลดลงเล็กน้อย มีฤทธิ์กัดกร่อนได้ ดังนั้น ใน กรณีที่น้ำดิบมีความเป็นด่างต่ำอาจต้องเติมความเป็นด่าง (เช่น ปูนขาว) ลงไปในน้ำก่อนการเติม สารส้ม



การทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มให้กับน้ำธรรมชาติควรมี pH เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย เพื่อให้มีผลึกของ Al(OH)₃ น้ำไม่ควรมี pH ต่ำ เนื่องจาก Al³⁺ ไม่ดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์น้ำไม่ ควรมี pH สูงเนื่องจากจะได้ไอออนที่มีประจุลบซึ่งไม่มีประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชันให้ปฏิกิริยา ในน้ำจะเกิดผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ [(Fe(OH)₃)] เกิดขึ้นดังสมการ



(2.20)



(2.21)

2.5.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างแก๊สของ

การกำจัดความขุ่นออกจากน้ำโดยกระบวนการสร้างแก๊สของจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

- ชนิดของคอลลอยด์คอลลอยด์ชนิดไม่ชอบน้ำจะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์ ชนิดชอบน้ำ

- อุณหภูมิของน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนืดต่ำกว่าน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำและจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

- pH ปฏิกิริยาเคมีของโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดจะเกิดขึ้นในช่วง pH ที่แตกต่างกัน เช่น สารส้ม จะเกิดปฏิกิริยาเคมีในช่วง pH ระหว่าง 6.5-8.0 และเฟอร์ริกคลอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีใน ช่วง pH ระหว่าง 5.0-11.0 ซึ่งเป็นช่วงที่กว้างกว่าสารส้ม เป็นต้น

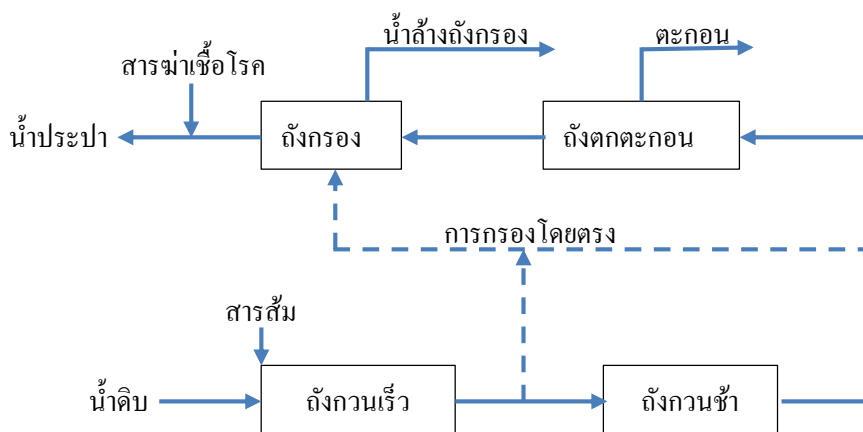
- ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำ น้ำควรมีความเป็นต่างเพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยากับโคแอกกูแลนต์ ถ้าน้ำมีความเป็นต่างต่ำอาจต้องเติมปูนขาวหรือสารอื่นเพื่อปรับสภาพน้ำด้วย
- ประเภทของโคแอกกูแลนต์ และอัตราการใช้สารแต่ละชนิดจะแตกต่างกันจำเป็นต้องทราบสถานะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาของสารนั้น ๆ ด้วย
- เวลาและความแรงในการผสมเพื่อให้สารเคมีกระจายตัวในน้ำ การสร้างแกนตะกอนต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยแต่ต้องการความปั่นป่วนของน้ำสูง

2.5.1.5 การตกตะกอน (Sedimentation)

เมื่อเม็ดตะกอนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากพอที่จะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ โดยการตกตะกอน ในถังตกตะกอน ซึ่งทำได้โดยการควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำในถัง เม็ดตะกอนที่มีน้ำหนักมากน้ำจะค่อยๆ ตกลงสู่ก้นถังตามแรงโน้มถ่วงของโลก เม็ดตะกอนขนาดใหญ่ทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากน้ำในขั้นตอนนี้ สังเกตได้จากน้ำที่ไหลออกจากถังตกตะกอนจะมีความใส แต่ก็ยังมีตะกอนขนาดเล็ก หลุดลอดออกไปในบางส่วน

2.5.1.6 การกรอง (Filtration)

น้ำที่ไหลออกจากถังตกตะกอนจะยังมีตะกอนขนาดเล็กหลุดลอดมาบ้าง การกรองจึงเป็นด่านสุดท้ายที่จะดักจับตะกอนแขวนลอยที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำออกไป พร้อมทั้งจะถูกส่งไปกระบวนการฆ่าเชื้อโรคซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้ายของกระบวนการผลิตน้ำประปา วิธีการกรองน้ำทำได้โดยการปล่อยน้ำให้ไหลซึมผ่านสารกรอง โดยทั่วไปแล้วจะใช้ทราย นอกจากนั้นยังมีชั้นกรวดรองรับชั้นทราย และอาจใช้ถ่านหรือวัสดุอื่นๆ เป็นสารกรองร่วมด้วยเพื่อช่วยในการกำจัดกลิ่นและรสที่อยู่ในน้ำ



รูปที่ 2.4 ระบบการผลิตน้ำประปาพื้นฐาน

2.5.1.7 การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection)

ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิตน้ำประปา คือการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้แก๊สคลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ แก๊สโอโซน แสงอัลตราไวโอเลต การใช้ความร้อน

เป็นต้น โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดที่ต่างกัน ในส่วนของระบบประปานิยมใช้คลอรีนเนื่องจากมีประสิทธิภาพคงตัวนาน ซึ่งค่าคลอรีนในน้ำจะอยู่ระหว่าง 0.7-1.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5.2 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์

1. การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ น้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำของการประปานครหลวงมาจากเขื่อนแม่กลอง ถูกส่งผ่านมาทางน้ำเปิดระยะทางประมาณ 106 กิโลเมตร โดยมีเครื่องสูบน้ำเข้าสู่กระบวนการผลิต

2. การเติมสารเคมี ก่อนที่น้ำดิบจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนจะมีการเติมสารเคมี ได้แก่ สารส้ม (Alum) ปูนขาว (lime) จุนสี (Copper Sulphate) คลอรีน (Chlorine) ผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และสารช่วยตกตะกอน (Polymer) ในอัตราที่เหมาะสมขึ้นกับคุณภาพน้ำดิบ

3. Clarification เมื่อเติมสารเคมี น้ำดิบจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ในถังตกตะกอน ซึ่งมีระบบการตกตะกอน 2 แบบคือ Pulsator (ถังตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยม) และถังตกตะกอนแบบกลม (Clarifier) ที่มีเครื่องกวนน้ำ ตะกอนหนักจะตกสู่พื้นล่างและน้ำใสที่อยู่ด้านบนจะไหลเข้ารางรับน้ำไปยังบ่อกรอง ส่วนตะกอนขนาดใหญ่ที่อยู่ส่วนล่าง จะถูกระบายออกไปเก็บไว้ในบ่อพักตะกอน เพื่อรอการกำจัด

4. Filtration น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว ยังคงมีสารแขวนลอยอยู่บางส่วนจะไหลเข้าบ่อกรองน้ำ ซึ่งมีทรายและผงถ่านแอนทราไซต์เป็นสารกรองเพื่อกำจัดตะกอนอีกครั้งหนึ่งโดยน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองแล้วจะมีความขุ่นไม่เกิน 1 PPM บ่อกรองเมื่อใช้งานได้ประมาณ 24-36 ชั่วโมง จะต้องมีการ Backwash เพื่อให้ทรายขนาดตัวแล้วตะกอนที่ติดค้างหลุดร่อนออกไปตามน้ำล้าง น้ำล้างจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้ง ซึ่งการล้างบ่อกรองจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที

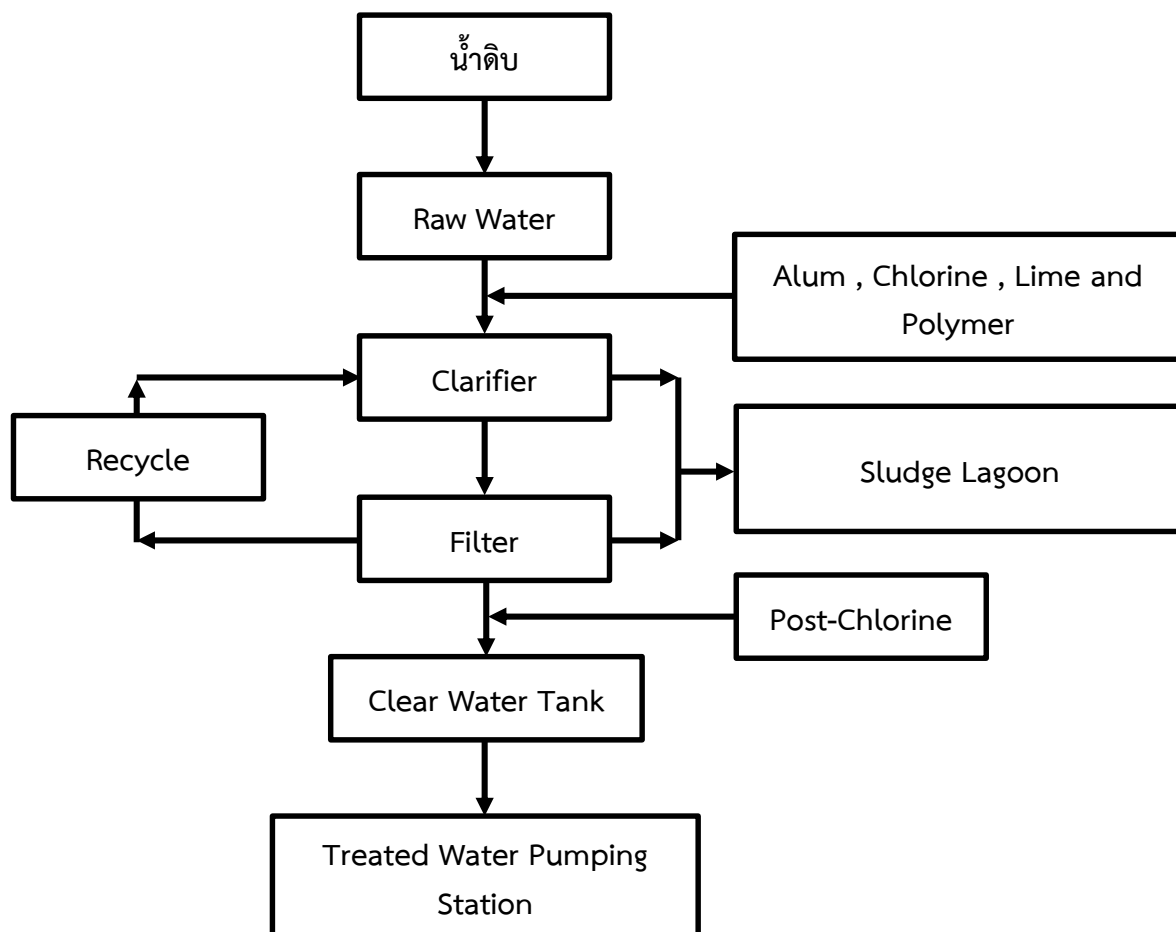
5. การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำที่เรียกว่า Reservoir ซึ่งอาจมีแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการฆ่าเชื้อโรค โดยใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรค และควบคุมค่าคลอรีนให้เหลืออยู่ประมาณ 0.6 PPM

6. การควบคุมคุณภาพน้ำ น้ำในระบบตั้งแต่ น้ำดิบจนถึงน้ำประปาจะได้รับการวิเคราะห์คุณภาพจากนักวิทยาศาสตร์อย่างละเอียดสม่ำเสมอ ทั้งทางกายภาพ เคมี และแบคทีเรีย เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำให้ได้ตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO)

7. Transmission and Distribution โรงงานสูบน้ำมหาสวัสดิ์ ทำหน้าที่จ่ายน้ำให้ประชาชนบริเวณพื้นที่อำเภอ บางกรวย บางใหญ่ บางบัวทอง และไทรน้อย ของจังหวัดนนทบุรี รวมถึงบางพื้นที่ของเขตตลิ่งชันและทวีวัฒนาของกรุงเทพมหานคร รวมปริมาณน้ำสูบน้ำวันละ 400,000 - 500,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โรงสูบน้ำมหาสวัสดิ์ ทำหน้าที่สูบน้ำไปยังโรง

จ่ายน้ำเพชรเกษม ท่าพระ และราษฎร์บูรณะ รวม 3 โรงสูบน้ำวันละประมาณ 1,000,000 ลูกบาศก์เมตร ต่อวัน

8. Sludge Lagoon เป็นส่วนของน้ำตะกอนดินที่ตกตะกอนจาก กระบวนการ Clarification และน้ำที่ใช้ล้าง Filter ซึ่งจะถูกปั๊มสู่ Sludge Lagoon จากนั้นจะเข้าสู่ กระบวนการตากตะกอน เพื่อให้ ตะกอนแห้ง พอที่จะขนย้ายต่อไป



รูปที่ 2.5 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำ โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์

2.5.3 คุณสมบัติทางกายและทางเคมีของตะกอนประปา

ลักษณะทั่วไปของตะกอนประปามีลักษณะคล้ายกับตะกอนดินเหนียว เบียวขึ้น มีลักษณะคล้ายดินตะกอนทั่วไปเมื่อตากให้แห้ง ดังนั้นก่อนนำไปใช้งานต้องทำให้แห้งก่อนและบดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นให้ เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุเป็นประสานต่อไป

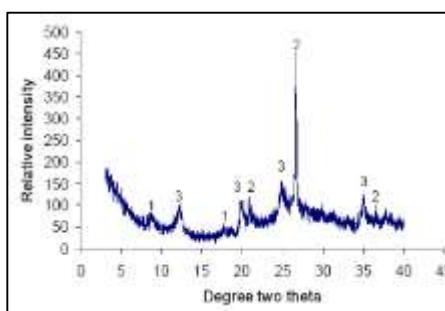


รูปที่ 2.6 ลักษณะของตะกอนดินประปก่อนนำไปปรับปรุงคุณภาพ

จากองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปก ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า มีซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณสูงซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลาน มีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุประสานในงานก่อสร้างได้ และเมื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของตะกอนประปก ดังรูปที่ 2 พบว่าโครงสร้างโดยทั่วไปของตะกอนประปกมีทั้งเป็นผลึกและไม่เป็นผลึก โดยมีผลึกของ Quartz, kaolinite และ illite หากนำไปเผาจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบจะช่วยเพื่อคุณสมบัติที่ดี จากงานวิจัยของ Naprarath Waijarean et.al. (2014) แสดงดังรูปที่ 3 เห็นได้ว่าเฟสของสารประกอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค XRD แต่เมื่อนำไปเป็นวัสดุประสานพบว่าทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปก (เกียรติสุตา สมนา,2559)

Composition(%)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	SO_3	Lol
ตะกอนประปก	56.76	20.33	6.03	0.7	4.63	1.51	-	0.47	6.95



หมายเหตุ 1 คือ illite 2 คือ Quartz และ 3 คือ kaolinite
รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปก (เกียรติสุตา สมนา,2559)

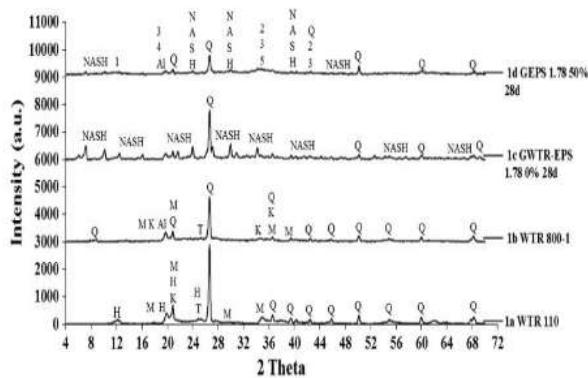


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of geopolymer synthesized from WTR and cured for 28 days, (1a): non-calcined WTR, (1b): calcined WTR at 800 °C, (1c): synthetic geopolymer without EPS and (1d): synthetic geopolymer with 50%EPS. H = Halloysite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Q = Quartz (SiO_2), Al = Aluminum Silicate Oxide (Al_2SiO_5), M = Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), K = potassium Aluminum Silicate ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{11}$), T = Anatase (TiO_2), NASH = Sodium Aluminum Silicate Hydrate ($\text{Na}_{10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{38}\cdot 216\text{H}_2\text{O}$), 1 = Sodium Aluminum Iron Hydrate Silicate, 2 = Zinc Chromium Oxide, 3 = Zinc Oxide, 4 = Sodium Iron Oxide, 5 = Andalusite.

รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของตะกอนน้ำประปาเมื่อมีการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (เกียรติสุดา สมณา, 2559)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิมณฑนา ถนอมกิจนุรักษ์ (2556) ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำ พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกต ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ให้กำลังอัดที่ดีกว่าและ มีความเหมาะสมในการนำมาใช้มากกว่า สารละลายโซเดียมซิลิเกต ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนสารละลายต่างที่แตกต่างกัน จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนร้อยละ 40 ของถ้ำลอย และจีโอโพลิเมอร์ซึ่งผสมตะกอนร่วมกับทรายผลกำลังอัดเป็นไปทางเดียวกันเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่างสูงขึ้นจาก 0.45 เป็น 0.7 และ 1 ได้ค่ากำลังอัดลดลง และศึกษาอัตราส่วนผสม ถ้ำลอย:สารละลาย:(ดินตะกอน:ทราย) ในอัตราส่วน 1:0.45:1.35 โดยใช้อัตราส่วน ร้อยละดินตะกอน:ทราย 10:90 20:80 30:70 ได้กำลังอัด 485 549 573 ksc. ตามลำดับ ของการบ่ม 28 วัน 65 องศาเซลเซียส

พิมศิลป์ จันท์ประเสริฐ (2556) ได้ศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอย จีโอโพลิเมอร์ พบว่าการพัฒนากำลังอัดแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เพื่อที่จะให้เกิดปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เท่ากับ 80:20 จะให้กำลังอัดสูงที่สุด

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และวิเชียรชาติ (2549) ศึกษาการชะล้างถ่านหินลิกไนท์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากถ่านหิน พบว่าการชะละลายของถ้ำถ่านหินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการชะล้าง สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นปานกลาง 10 โมลาร์ และการชะล้าง 10 นาทีให้ค่ากำลังอัดที่สูง

นภรัตน์ ไวยเจริญ (2553) ศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ กากตะกอนประปา ของ โรงผลิตน้ำบางเลน จังหวัดนครปฐม โดยทำการหาค่าประกอบทางกายภาพและเคมี พบว่า ออกไซด์ในรูปของ SiO_2 และ Al_2O_3 อยู่ในช่วง ร้อยละ 38.05-40.79 และ ร้อยละ 44.91-45.25 อัตราส่วน Si/Al น้อยกว่า 1.0 โดยใช้สารละลายต่าง NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ปมที่ อุณหภูมิห้อง และทดสอบกำลังอัดที่ 8 และ 28 วัน พบว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงที่สุดได้ที่ระยะเวลาปม 8 วัน เท่ากับ 1.19 กก./ซม.² และระยะเวลาปมที่ 28 วัน เท่ากับ 10.43 กก./ซม.²

เทวรินทร์ ทองหยาด (2553) ศึกษาสมบัติของตะกอนดินประปาที่ได้จากกระบวนการผลิต น้ำประปา โดยนำตะกอนมาทำการบดให้มีร้อยละคงค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 17 ± 3 และ นำตะกอนที่ได้มา ทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ ทางเคมีของตัวอย่างตะกอนประปาที่ผ่านและไม่ผ่านการเผาด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์เกินร้อยละ 70 และมีค่า LOI ของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการ เผา เผาที่ 600 และ เผาที่ 800 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 2.4 0.1 และ 0.1 ตามลำดับ จากนั้นนำ ตะกอนประปาที่ผ่านและไม่ผ่านการเผามากระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH และ KOH โดยควบคุม อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.3 และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 0.37 และ 0.45 พบว่า กำลังอัดที่อายุตัวอย่าง 60 วัน ของตะกอนดินประปาที่ผ่านการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส เมื่อทำปฏิกิริยากับ KOH และ NaOH ที่อัตราส่วน $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.37 และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 89.4 และ 105.4 กก./ซม.² ตามลำดับ

ฐิติพงษ์ ศรีชูชาติ และอรรคพล พุ่มพวง (2553) ศึกษา กำลังอัดตามแนวแกนของผนังอิฐดิน ดิบ ดินที่นำมาเป็นดินประเภทดินร่วนปนตะกอนทราย (Silt Loam) ก้อนอิฐดินดิบที่ผสมดินต่อ แกลบในอัตราส่วน 5:1 พบว่า สามารถรับกำลังแรงอัดของก้อนอิฐดินดิบได้ค่าเฉลี่ยที่ 5.2 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร

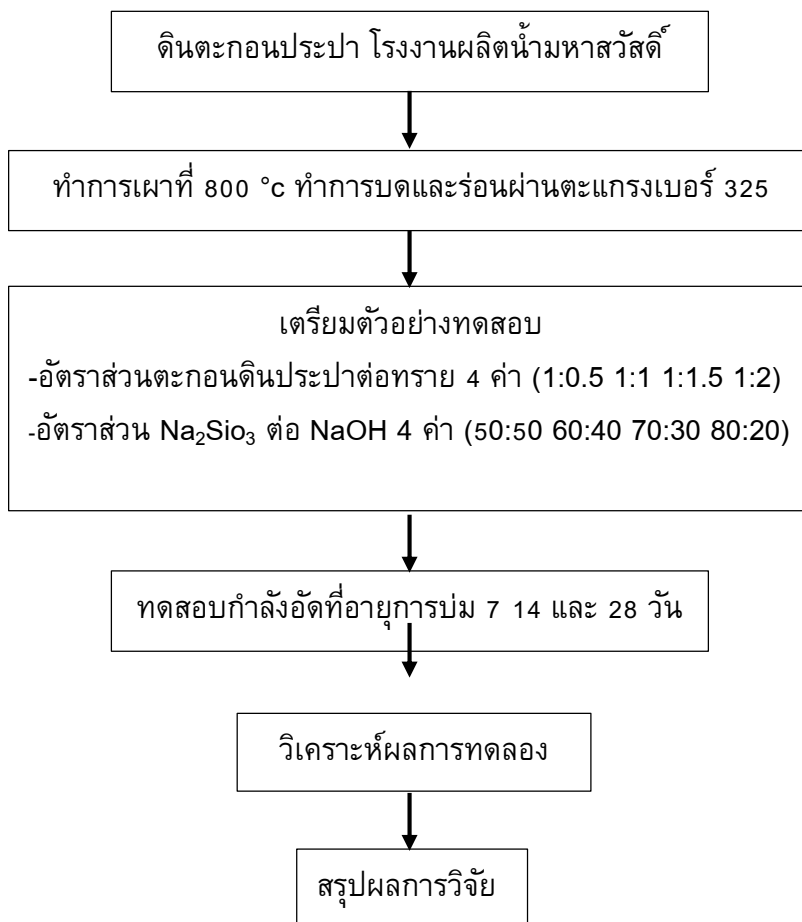
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ผู้ทำการศึกษามีแนวคิดที่นำตะกอนดินประปามาเป็นวัสดุ ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียม ออกไซด์ความเข้มข้นของสารกระตุ้น รวมทั้งอุณหภูมิระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ จีโอพอลิ เมอร์ เพื่อพัฒนา กำลังอัดให้ดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการการศึกษาของโครงการนำตะกอนดินประปามาใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยการผสมตะกอนดินประปากับทรายแล้วเติมสารละลายต่าง ผสมให้เข้ากันและเทใส่แบบหล่อ บ่มให้ได้ระยะเวลาตามต้องการ จากนั้นไปทดสอบหาค่ากำลังเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาโดย โดยแบ่งขั้นตอนในการศึกษา ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการ

3.2 จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 ตะกอนดินประปา เป็นตัวอย่างตะกอนดินประปาจากโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ จังหวัด นนทบุรี นำตะกอนดินประปาจากบ่อตากตะกอนไปตากแดดให้แห้ง นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปให้ดินแตกตัวเป็นผง นำดินที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรง เบอร์ 325



รูปที่ 3.2 ตะกอนดินประปา

3.2.2 ทราย มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ร่อนผ่านตะแกรง ตาม มาตรฐาน ASTM C227



รูปที่ 3.3 ทราย

3.2.3 สารละลายต่าง เป็นตัวที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาในจีโอพอลิเมอร์ในงานวิจัยเลือกสารดังนี้

3.2.3.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

จะใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยเริ่มจากชั่งสาร NaOH น้ำหนัก 400 กรัม ละลายกับน้ำกลั่นแล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 ml เขย่าให้เข้ากันหลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นใส่ขวดวัดปริมาตรจนถึงระดับ 1000 ml แล้วเขย่าให้สารละลายผสมกันอีกครั้ง



รูปที่ 3.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH)

3.2.3.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาโดย Na_2SiO_3 จะนำไปผสมกับ NaOH ในอัตราส่วน 50:50 60:40 70:30 และ 80:20

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการศึกษา

Property	Precent by weight
โซเดียมออกไซด์(Na_2O)	9.58
ซิลิกอนไดออกไซด์(SiO_2)	28.75
น้ำ(H_2O)	61.67



รูปที่ 3.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

3.3 การทดสอบจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา

3.3.1 การผสมจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา

3.3.1.1 ใส่ตะกอนดินประปา ทราาย และสารละลายต่าง NaOH ลงในหม้อผสม จากนั้นปั่นด้วยความเร็ว 285 ± 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที

3.3.1.2 เทสารละลาย Na_2SiO_3 ลงในหม้อผสมให้ทั่วแล้วปั่นต่ออีก 1 นาที

3.3.1.3 ค่อยๆเทน้ำลงไปให้หม้อผสมใช้เวลาปั่นเพิ่มอีก 1 นาที

3.3.1.4 นำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบสอบค่าการไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัวต่อไป

3.3.2 ทดสอบค่าการไหลแผ่

เป็นการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่อยู่ในสภาพที่ปั่นได้ ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบด้วยวิธีโต๊ะการไหล (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีที่ศึกษาความชื้นเหลว ตามมาตรฐาน ASTM 109 กำหนดให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 105-115% จะมีวิธีการทำโดยการตักจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาใส่ใน Flow Mold เป็น 2 ชั้นเท่าๆ กันแล้วกระทุ้งชั้นละ 20 ครั้ง จากนั้นปาดให้เรียบยก Flow Mold ขึ้นตรง ๆ และหมุน Flow table สูงขึ้น 1.27 เซนติเมตร ให้กระทบกับฐานจำนวน 25 ครั้งในเวลา 15 วินาที

3.4 การเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา

3.5.1.1 ใส่ตะกอนดินประปา ทราาย และสารละลายต่าง NaOH ลงในหม้อผสม จากนั้นปั่นด้วยความเร็ว 285 ± 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที

3.5.1.2 เทสารละลาย Na_2SiO_3 ลงในหม้อผสมให้ทั่วแล้วปั่นต่ออีก 1 นาที

3.5.1.3 ค่อยๆเทน้ำลงไปให้หม้อผสมใช้เวลาปั่นเพิ่มอีก 1 นาที

3.5.1.4 นำจีโอพอลิเมอร์ที่ได้ไปทดสอบสอบค่าการไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัวต่อไป

3.4.1 ทดสอบค่าการไหลแผ่

เป็นการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่อยู่ในสภาพที่ปั่นได้ ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบด้วยวิธีโต๊ะการไหล (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีที่ศึกษาความชื้นเหลว ตามมาตรฐาน ASTM 109 กำหนดให้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 105-115% จะมีวิธีการทำโดยการตักจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดิน

ประปาใส่ใน Flow Mold เป็น 2 ชั้นเท่าๆ กันแล้วกระทุ้งชั้นละ 20 ครั้ง จากนั้นปาดให้เรียบ ยก Flow Mold ขึ้นตรง ๆ และหมุน Flow table สูงขึ้น 1.27 เซนติเมตร ให้กระแทกกับฐานจำนวน 25 ครั้งในเวลา 15 วินาที



รูปที่ 3.6 ทดสอบการไหลแผ่

3.5 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของจีโอพอลิเมอร์ตะกอนดินประปา

ทำการทดสอบโดยการนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาขนาด 5x5x5 ซม. หลังจากการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 14 วัน และ 28 วัน มาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตหาค่าการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาด้วยเครื่อง (Compression Testing Machine) โดยทำการเปิดเครื่อง (Compression Testing Machine) แล้วนำก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่ได้จากการบ่มนำมาวางไว้บนเครื่อง (Compression Testing Machine) ทำการเดินเครื่องช้า ๆ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาแตกจึงอ่านค่าการทดสอบการรับของ จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาด้วยเครื่องทดสอบ บันทึกค่าแรงอัดที่ให้ก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาแตกนำค่าแรงอัดที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังอัด



รูปที่ 3.7 ทดสอบการรับกำลังอัด

3.6 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย	สารละลายร้อยละ ละ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$	จำนวนตัวอย่าง (การบ่ม)		
		7 วัน	14 วัน	28 วัน
1.00:0.45:0.50	50:50	3	3	3
	60:40	3	3	3
	70:30	3	3	3
	80:20	3	3	3
1.00:0.45:1.00	50:50	3	3	3
	60:40	3	3	3
	70:30	3	3	3
	80:20	3	3	3
1.00:0.45:1.50	50:50	3	3	3
	60:40	3	3	3
	70:30	3	3	3
	80:20	3	3	3

3.6 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง (ต่อ)

ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย	สารละลายร้อยละ ละ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$	จำนวนตัวอย่าง (การบ่ม)		
		7 วัน	14 วัน	28 วัน
1.00:0.45:2.00	50:50	3	3	3
	60:40	3	3	3
	70:30	3	3	3
	80:20	3	3	3
รวม		48	48	48
รวมทั้งหมด		144		

การวิเคราะห์

จากการทดลองอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 1.00:0.45:1.00 1.00:0.45:1.50 และ 1.00:0.45:2.00 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 60:40 70:30 และ 80:20 โดยใช้ NaOH 10 โมลาร์ เพื่อดูว่าก่อน ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาจะแข็งตัวหรือไม่แข็งตัว และ นำไปทดสอบกำลังอัด 7 14 และ 28 วัน จากนั้นทำการสรุปผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การไหลแผ่

เป็นการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ สำหรับการนำไปเทลงแบบ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (ASTM V.04.01, 2001) ซึ่งกำหนดให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 105 ถึง 115 จากการทดสอบจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา ได้ผลทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1

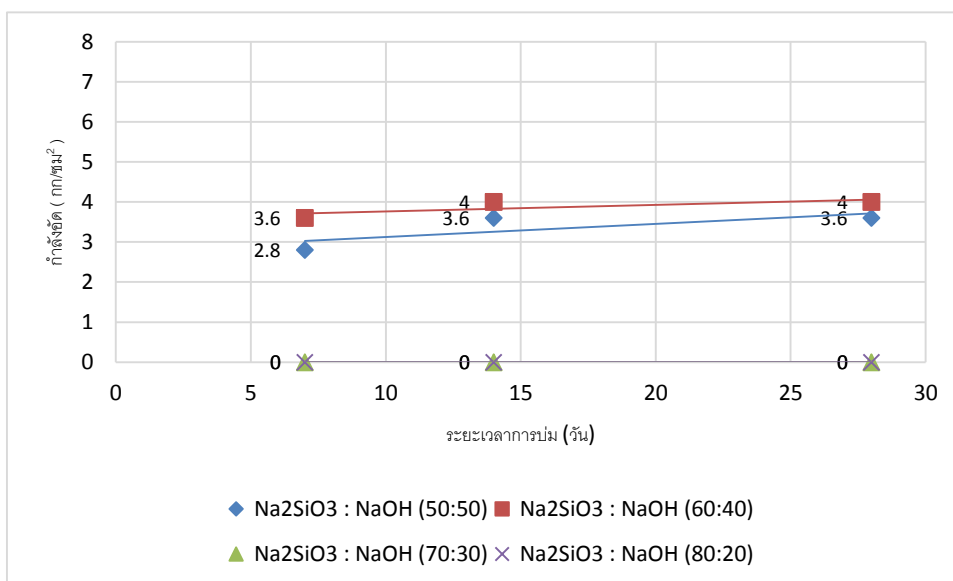
ตารางที่ 4.1 ร้อยละปริมาณน้ำการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา

อัตราส่วนผสม ดิน : ทราย โดยน้ำหนัก	อัตราส่วนสารละลาย			
	50:50	60:40	70:30	80:20
	ร้อยละปริมาณน้ำ			
1:0.5	0.68	0.70	0.72	0.76
1:1.0	0.74	0.74	0.77	0.81
1:1.5	0.75	0.83	0.92	0.97
1:2.0	0.83	0.94	0.98	1.07
ซีเมนต์มอร์ตาร์	0.484			

จากตารางที่ 4.1 ร้อยละปริมาณน้ำการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำพบว่าจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปามีความต้องการน้ำมากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนดินประปามีค่าการดูดซึมน้ำสูงและการผสมจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปา ต้องใช้สารละลายต่าง 2 ชนิด (Na_2SiO_3 และ NaOH) เพื่อทำละลาย ซึ่งในสารละลายดังกล่าว มีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย จึงเป็นเหตุให้อัตราความต้องการน้ำผสมสูงกว่าซีเมนต์ มอร์ตาร์ในอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน

4.2 การพัฒนากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์

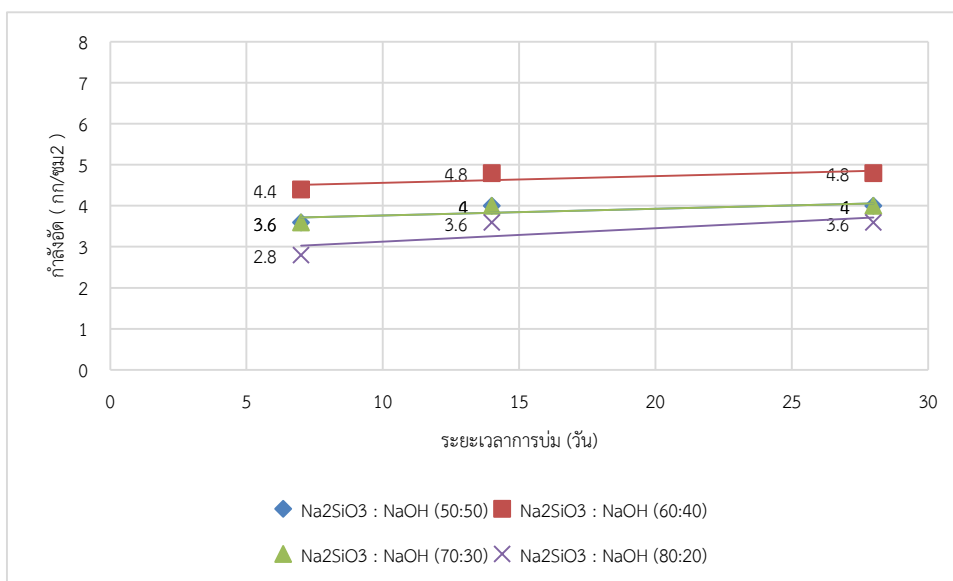
4.2.1 อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50



รูปที่ 4.1 การพัฒนาก้ำล้งอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:0.50

จากรูปที่ 4.1 พบว่าในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำล้งอัดเท่ากับ 3.6 4 และ 4 กก/ซม² ซึ่งมีค่าก้ำล้งอัดมากที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากดินประปาผสมกับสารเคมีละลายต่างสูงทำให้เกิดปฏิกิริยา โพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้เกิดการพัฒนาก้ำล้งอัด เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น รองลงมาในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 มีที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำล้งอัดเท่ากับ 2.8 3.6 และ 3.6 กก/ซม² และ อัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70:30 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน ไม่สามารถทดสอบก้ำล้งอัดได้เนื่องจากก้อนจีโอพอลิเมอร์ไม่จับตัวกัน และเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ มอก. 2595-2556 พบว่า ในอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 โดยน้ำหนัก มีค่าก้ำล้งน้อยกว่ามาตรฐาน

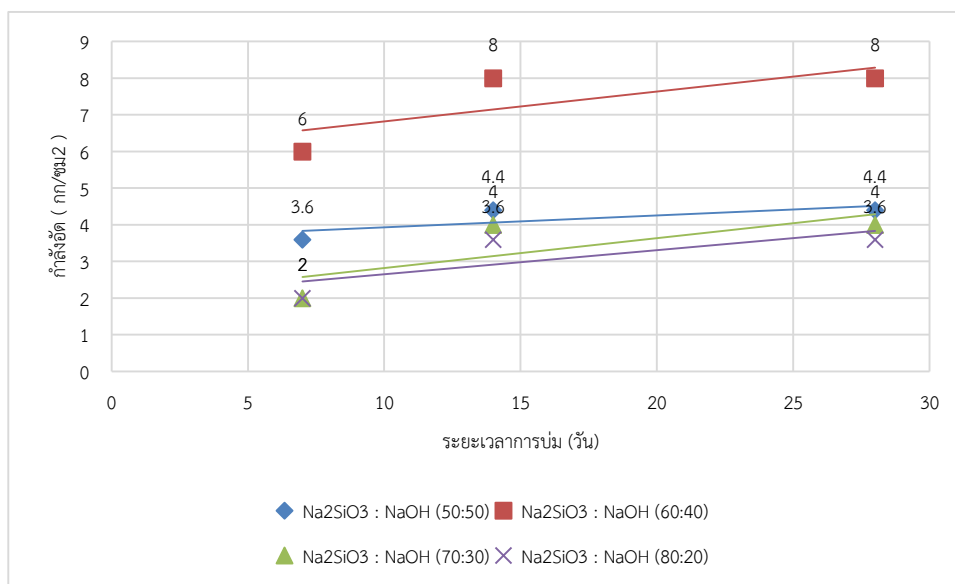
4.2.2 อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราาย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00



รูปที่ 4.2 การพัฒนากำลั้งอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:1.00

จากรูปที่ 4.2 พบว่าในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่ากำลั้งอัดเท่ากับ 4.4 4.8 และ 4.8 กก/ชม² ซึ่งมีค่ากำลั้งอัดมากที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากดินประปาผสมกับสารเคมีละลายต่างสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้เกิดการพัฒนากำลั้งอัด เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น รองลงมาในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 70:30 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่ากำลั้งอัดเท่ากับ 3.6 4 และ 4 กก/ชม² 3.6 4 และ 4 กก/ชม² และ 2.8 3.6 และ 3.6 กก/ชม² ตามลำดับและเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ มอก.2595-2556 พบว่า ในอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราาย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลั้งน้อยกว่ามาตรฐาน

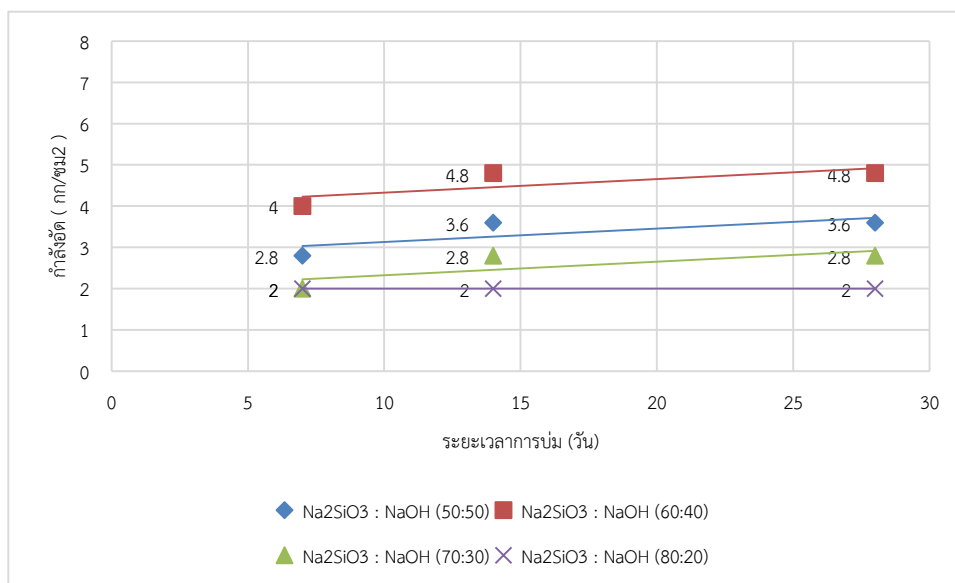
4.2.3 อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50



รูปที่ 4.3 การพัฒนากำลั้งอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:1.50

จากรูปที่ 4.3 พบว่าในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่ากำลั้งอัดเท่ากับ 6 8 และ 8 กก/ชม² ซึ่งมีค่ากำลั้งอัดมากที่สุดโดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากดินประปาผสมกับสารเคมีละลายต่างสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้เกิดการพัฒนากำลั้งอัดเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น รองลงมาในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 70:30 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่ากำลั้งอัดเท่ากับ 3.6 4.4 และ 4.4 กก/ชม² 2 4 และ 4 กก/ชม² และ 2 3.6 และ 3.6 กก/ชม² ตามลำดับและเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ มอก.2595-2556 พบว่าในอัตราส่วนผสมตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลั้งน้อยกว่ามาตรฐาน

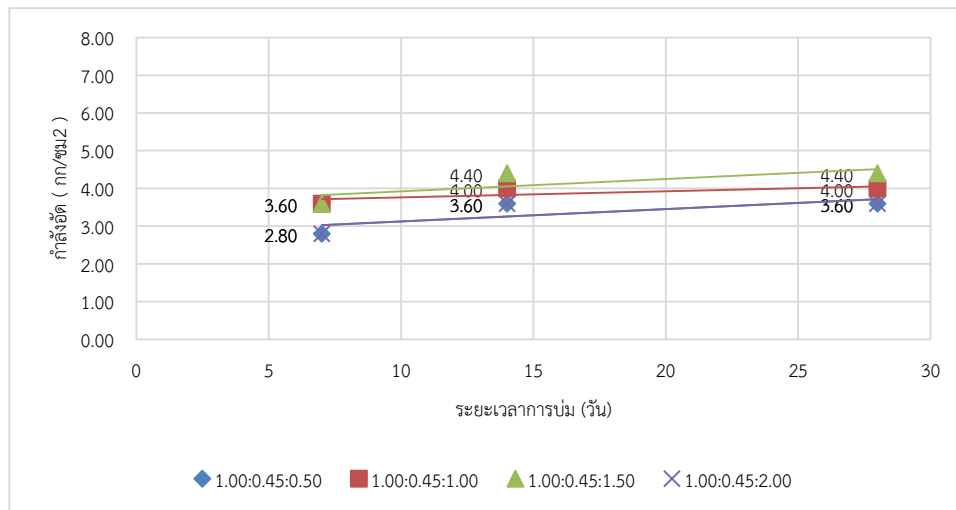
4.2.4 อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราาย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00



รูปที่ 4.4 การพัฒนาก้ำล้งอัดอัตราส่วนผสม 1.00:0.45:2.00

จากรูปที่ 4.4 พบว่าในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำล้งอัดเท่ากับ 4 4.8 และ 4.8 กก/ซม² ซึ่งมีค่าก้ำล้งอัดมากที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากดินประปาผสมกับสารเคมีละลายต่างสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้เกิดการพัฒนาก้ำล้งอัดเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น รองลงมาในอัตราส่วนผสมร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 70:30 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำล้งอัดเท่ากับ 2.8 3.6 และ 3.6 กก/ซม² 2 2.8 และ 2.8 กก/ซม² และ 2 และ 2 กก/ซม² ตามลำดับและเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอร์ตาร์สำหรับงานก่อและงานฉาบ มอก.2595-2556 พบว่า ในอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราาย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 โดยน้ำหนัก มีค่าก้ำล้งน้อยกว่ามาตรฐาน

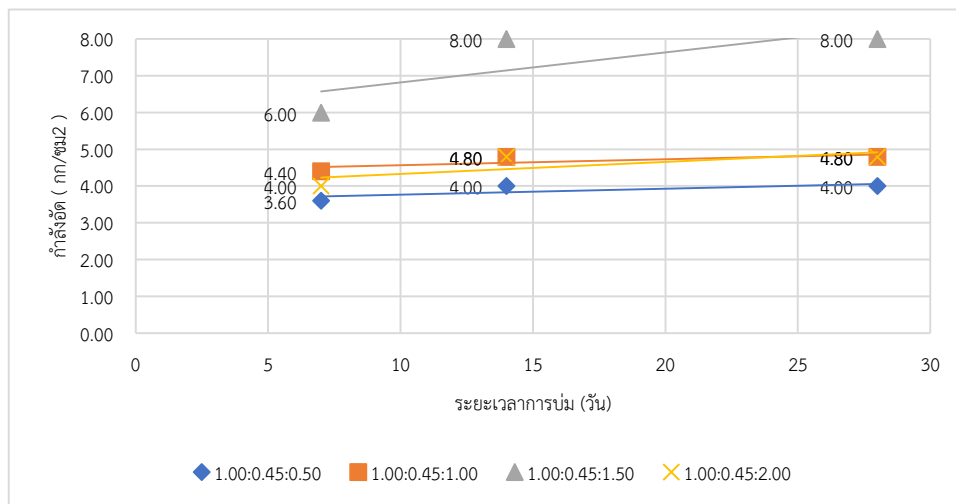
4.2.5 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50 : 50



รูปที่ 4.5 การพัฒนาก้ำลึงอัดอัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50 : 50

จากรูปที่ 4.5 พบว่าอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำลึงอัดเท่ากับ 2.8 3.6 และ 3.6 กก/ซม² โดยมีก้ำลึงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนทราย อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำลึงอัดเท่ากับ 3.6 4 และ 4 กก/ซม² และอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำลึงอัดเท่ากับ 3.6 4.4 และ 4.4 กก/ซม² ซึ่งมีค่าก้ำลึงอัดมากที่สุด และค่าก้ำลึงอัดจะลดลงที่ อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้ำลึงอัดเท่ากับ 2.8 3.6 และ 3.6 กก/ซม² เมื่อนำค่ามาพิจารณาจะพบว่าค่าก้ำลึงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00

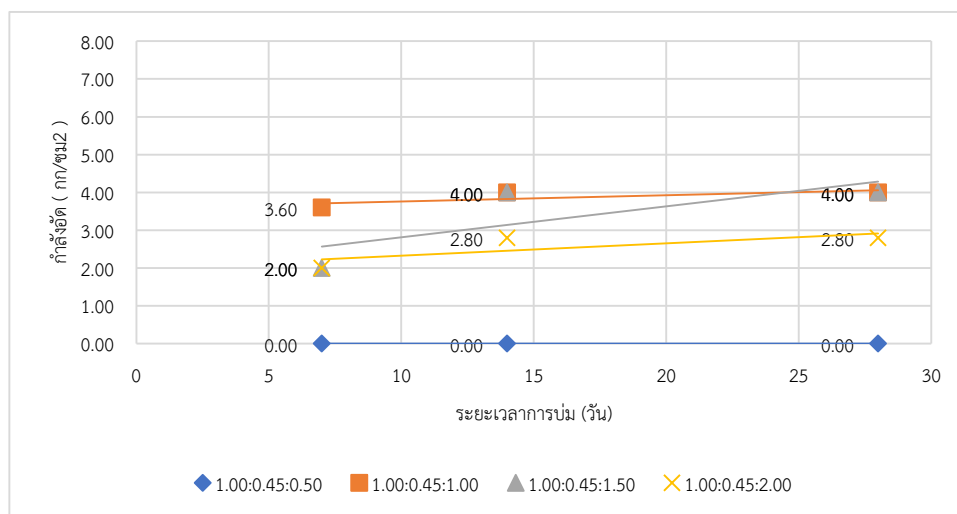
4.2.6 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60 : 40



รูปที่ 4.6 การพัฒนาการกักน้ำของอัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60 : 40

จากรูปที่ 4.6 พบว่าอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราเย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าการกักน้ำเท่ากับ 3.6 4 และ 4 กก/ชม² โดยมีการกักน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนทราเย อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราเย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าการกักน้ำเท่ากับ 4.4 4.8 และ 4.8 กก/ชม² และอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราเย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าการกักน้ำเท่ากับ 6 8 และ 8 กก/ชม² ซึ่งมีการกักน้ำมากที่สุด และค่าการกักน้ำจะลดลง ที่อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราเย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าการกักน้ำเท่ากับ 4.4 4.8 และ 4.8 กก/ชม² เมื่อนำค่ามาพิจารณาจะพบว่าค่าการกักน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราเย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00

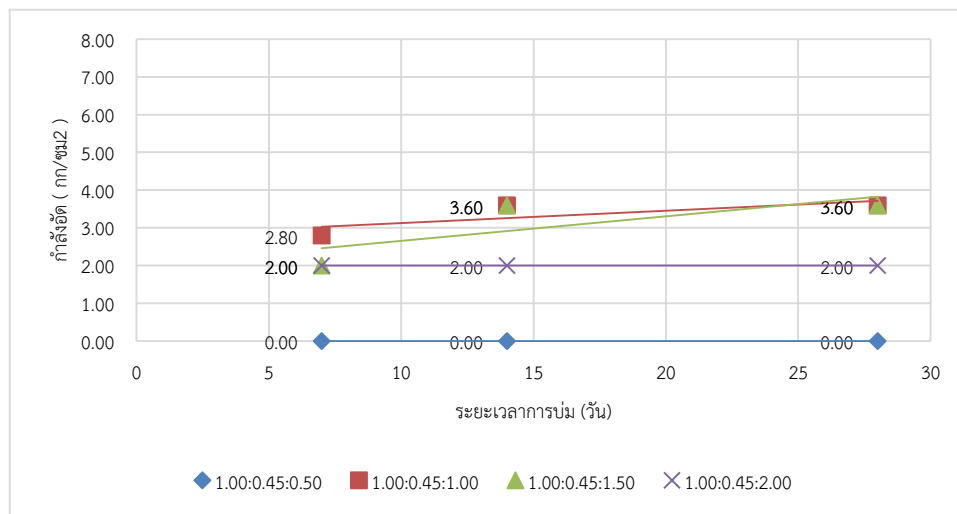
4.2.7 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70 : 30



รูปที่ 4.7 การพัฒนาก้างัดอัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70 : 30

จากรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน ไม่สามารถทดสอบก้างัดได้ แต่จะมีก้างัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนทราย อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้างัดเท่ากับ 3.6 4 และ 4 กก/ชม² และอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้างัดเท่ากับ 2 4 และ 4 กก/ชม² ซึ่งมีค่าก้างัดมากที่สุด และค่าก้างัดจะลดลงที่อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่าก้างัดเท่ากับ 2 2.8 และ 2.8 กก/ชม² เมื่อนำค่ามาพิจารณาจะพบว่าค่าก้างัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสม และ จะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00

4.2.8 อัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80 : 20



รูปที่ 4.8 การพัฒนากำลังอัดอัตราส่วนผสมสารละลาย Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80 : 20

จากรูปที่ 4.8 พบว่าอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ททราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน ไม่สามารถทดสอบกำลังอัดได้ แต่จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนทราย อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ททราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 2.8 3.6 และ 3.6 กก/ซม² และอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ททราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 2 3.6 และ 3.6 กก/ซม² ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากที่สุด และค่ากำลังอัดจะลดลงที่อัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ททราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 2 2 และ 2 กก/ซม² เมื่อนำค่ามาพิจารณาจะพบว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ททราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา ในอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 1.00:0.45:1.00 1.00:0.45:1.50 และ 1.00:0.45:2.00 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 60:40 70:30 และ 80:20 โดยน้ำหนัก สรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ ในอัตราส่วนผสม ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 1.00:0.45:1.00 1.00:0.45:1.50 และ 1.00:0.45:2.00 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 60:40 70:30 และ 80:20 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ดังนี้

1. เมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นพบว่ากำลังอัดมากขึ้นตาม เนื่องจากดินประปาผสมกับสารเคมีละลายต่างสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้เกิดการพัฒนากำลังอัด

2. จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ดินตะกอนประปามีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 8 ksc ที่เวลาบ่ม 28 วัน

3. ทรายมีผลต่อกำลังอัด ถ้าทรายมีปริมาณน้อยจะให้ความหนาแน่นต่ำ และถ้าทรายมากเกินไป จะทำให้เกิดโพรงอากาศกำลังอัดจึงลดลง โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือ ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50

4. สารละลายของการผสมจีโอพอลิเมอร์ อัตราส่วนร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH มีผลต่อกำลังอัด เมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละของ Na_2SiO_3 จะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มไปในอัตราส่วนเกินร้อยละ 60 จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง อัตราส่วนร้อยละของ Na_2SiO_3 : NaOH ในการทดลองนี้คือ 60:40

5. ภายใต้เงื่อนไขของงานวิจัยนี้ จีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปาไม่สามารถนำไปใช้ในการทดแทนปูนซีเมนต์ได้เนื่องจากค่าการรับกำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนแค่อัตราส่วนทราย และอัตราส่วนของสารละลาย ควรที่จะทดสอบแบบอื่นเพิ่มเติมได้แก่ ระยะเวลาก่อนบ่ม อุณหภูมิในการบ่ม เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็นต้น หรืออาจจะนำไปศึกษาความเป็นไปได้ ในกรณีทำอิฐดินดิบซึ่งไม่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูง แต่ทั้งนี้ควรศึกษาต้นทุน และกรรมวิธีต่าง ๆ ในการผลิตอิฐดินดิบจากจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิมลชนา ถนอมกิจนุรักษ์ (2556) ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [2] พิมพ์ศิลป์ จันทร์ประเสริฐ (2556) ได้ศึกษาพฤติกรรมต้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [3] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และวิเชียรชาติ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และวิเชียน ชาติ, 2549, “การศึกษาการชะงักถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำถ่านหิน”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่29 ฉบับที่4, หน้า 437 -446
- [4] ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549, ถ้ำลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง), พิมพ์ครั้งที่3, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 119.
- [5] จิตติพงษ์ ศรีชูชาติ และอรรรคพล พุ่มพวง (2553) ศึกษากำลังอัดตามแนวแกนของผนังอิฐดินดิบโครงการทางวิศวกรรมศาสตร์. เชียงใหม่ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [6] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์งานก่อและงานฉาบ มอก.2595-2556 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4529 (พ.ศ. 2556)
- [7] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีต
- [8] ทวีศักดิ์ วังไพศาล. (2551). วิศวกรรมการประปา. 1.กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำนักพิมพ์แห่งชาติ
- [9] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2551). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน(Cement and applications). พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัทเอสซีซีซีเมนต์
- [10] เกียรติสุดา สมณา. (2559) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนประปา. การใช้ตะกอนประปาเป็นวัสดุประสาน, (28), 1-9
- [11] Davaisisovits, J. , “ Geopolymer Chemistry & Applications 2nd” Institut Geopolymere, France, 2008
- [12] American Society for Testing and Materials, Aunul book of ASTM Standards, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959
- [13] American Society for Testing and Materials, Aunul book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 83-88
- [14] American Society for Testing and Materials, Aunul book of ASTM Standards, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428

7	50:50	1	5.0	5.0	70	2.8	2.8
		2	5.1	5.0	70	2.7	
		3	5.0	5.0	70	2.8	
	60:40	1	5.0	4.9	90	3.7	3.6
		2	4.9	5.0	90	3.7	
		3	4.9	4.8	80	3.4	
	70:30	1	5.0	5.1	0	0	0
		2	5.1	4.9	0	0	
		3	5.0	5.0	0	0	
	80:20	1	5.2	5.1	0	0	0
		2	5.0	5.1	0	0	
		3	5.1	5.0	0	0	

ตารางที่ ก-1 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:0.50 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
14	50:50	1	5.0	5.1	100	3.9	3.6
		2	5.1	5.0	90	3.5	
		3	5.1	5.1	90	3.5	
	60:40	1	5.2	5.1	100	3.8	4.0
		2	5.0	5.0	110	4.4	
		3	5.1	5.0	100	3.9	
	70:30	1	5.0	5.0	0	0	0
		2	5.1	5.0	0	0	
		3	4.9	5.1	0	0	
	80:20	1	5.1	5.1	0	0	0
		2	4.9	4.9	0	0	
		3	5.1	5.0	0	0	

ตารางที่ ก-1 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:0.50 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
28	50:50	1	5.0	5.0	90	3.6	3.6
		2	5.1	5.1	90	3.5	
		3	5.1	5.1	100	3.8	
	60:40	1	5.2	5.1	110	4.1	4.0
		2	5.2	5.2	100	3.7	
		3	5.1	5.2	110	4.1	
	70:30	1	5.0	5.0	0	0	0
		2	5.1	5.0	0	0	
		3	5.1	5.1	0	0	
	80:20	1	5.1	5.1	0	0	0
		2	5.0	5.2	0	0	
		3	5.1	5.1	0	0	

ตารางที่ ก-2 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:1.00

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
7	50:50	1	5.0	5.0	100	4.0	3.6
		2	4.9	5.0	80	3.3	
		3	5.1	5.0	90	3.5	
	60:40	1	5.0	5.0	110	4.4	4.4
		2	5.1	5.1	120	4.6	
		3	4.9	4.9	100	4.2	
	70:30	1	5.0	5.0	90	3.6	3.6
		2	4.8	4.9	90	3.8	
		3	5.2	5.1	90	3.4	
	80:20	1	5.1	5.0	70	2.7	2.8
		2	4.9	5.0	70	2.9	
		3	5.0	5.0	70	2.8	

ตารางที่ ก-2 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:1.00 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
14	50:50	1	5.1	5.1	110	4.2	4.0
		2	5.1	5.1	100	3.8	
		3	5.2	5.2	110	4.1	
	60:40	1	5.0	5.0	120	4.8	4.8
		2	5.2	5.1	120	4.5	
		3	5.1	5.0	130	5.1	
	70:30	1	5.2	5.2	110	4.1	4.0
		2	5.1	5.1	110	4.2	
		3	5.1	5.1	100	3.8	
	80:20	1	5.0	5.0	90	3.6	3.6
		2	5.1	5.1	100	3.8	
		3	5.1	5.2	90	3.4	

ตารางที่ ก-2 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:1.00 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
28	50:50	1	5.1	5.1	110	4.2	4.0
		2	5.1	5.2	100	3.8	
		3	5.2	5.1	110	4.1	
	60:40	1	5.1	5.0	130	5.1	4.8
		2	5.2	5.1	120	4.5	
		3	5.1	5.2	130	4.9	
	70:30	1	5.2	5.2	100	3.7	4.0
		2	5.1	5.0	100	3.9	
		3	5.1	4.9	110	4.4	
	80:20	1	5.1	5.1	100	3.8	3.6
		2	5.1	5.1	90	3.5	
		3	5.0	5.0	90	3.6	

ตารางที่ ก-3 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:1.50

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
7	50:50	1	5.0	5.0	80	3.2	3.6
		2	5.1	5.0	100	3.9	
		3	4.9	5.0	90	3.7	
	60:40	1	5.1	5.1	150	5.8	6.0
		2	5.0	5.1	160	6.3	
		3	5.1	5.0	150	5.9	
	70:30	1	4.9	4.9	50	2.1	2.0
		2	5.1	5.1	50	1.9	
		3	5.2	5.1	50	1.9	
	80:20	1	5.1	5.1	50	1.9	2.0
		2	4.9	5.0	50	2.0	
		3	5.1	5.0	50	2.0	

ตารางที่ ก-3 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:1.50 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
14	50:50	1	5.1	5.1	110	4.2	4.4
		2	4.9	4.9	110	4.6	
		3	5.0	5.0	110	4.4	
	60:40	1	5.1	5.0	200	7.8	8.0
		2	5.1	5.1	210	8.1	
		3	5.0	5.0	200	8.0	
	70:30	1	5.0	5.0	100	4.0	4.0
		2	5.2	5.1	110	4.1	
		3	5.0	5.1	100	3.9	
	80:20	1	5.0	4.9	90	3.7	3.6
		2	5.1	5.0	90	3.5	
		3	4.9	5.0	90	3.7	

ตารางที่ ก-3 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:1.50 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
28	50:50	1	5.0	5.0	110	4.4	4.4
		2	5.0	5.1	110	4.3	
		3	5.2	5.1	120	4.5	
	60:40	1	5.0	5.1	200	7.8	8.0
		2	5.0	5.1	210	8.3	
		3	5.0	5.0	200	7.9	
	70:30	1	5.1	5.1	100	3.9	4.0
		2	5.0	4.9	100	4.1	
		3	5.0	5.0	100	4.0	
	80:20	1	5.1	5.1	90	3.4	3.6
		2	5.0	5.0	90	3.6	
		3	4.9	5.0	90	3.6	

ตารางที่ ก-4 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:2.00

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
7	50:50	1	5.0	5.0	70	2.8	2.8
		2	5.1	5.0	70	2.7	
		3	4.9	5.0	70	2.9	
	60:40	1	5.1	5.1	110	4.2	4.0
		2	5.1	5.1	100	3.8	
		3	5.0	4.9	100	4.0	
	70:30	1	5.1	5.1	50	1.9	2.0
		2	4.9	4.9	50	2.1	
		3	5.0	5.0	50	2.0	
	80:20	1	5.1	5.1	50	1.9	2.0
		2	4.9	5.0	50	2.0	
		3	4.9	4.9	50	2.1	

ตารางที่ ก-4 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:2.00 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
14	50:50	1	5.0	5.0	90	3.6	3.6
		2	5.1	5.1	90	3.5	
		3	4.9	4.9	90	3.7	
	60:40	1	5.1	5.0	130	5.1	4.8
		2	5.1	5.1	120	4.5	
		3	5.0	5.0	120	4.8	
	70:30	1	5.0	5.0	70	2.8	2.9
		2	5.2	5.1	80	3.0	
		3	5.0	5.0	70	2.8	
	80:20	1	4.9	4.9	50	2.1	2.0
		2	5.1	5.1	50	1.9	
		3	4.9	5.0	50	2.0	

ตารางที่ ก-4 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาที่อัตราส่วน 1.00:0.45:2.00 (ต่อ)

อายุ (day)	สารละลาย	ตัวอย่าง	ขนาด (cm)		แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)	ค่าเฉลี่ย
	Na ₂ SiO ₃ :NaOH		wide	length			
28	50:50	1	5.1	5.1	100	3.8	3.6
		2	5.0	5.1	90	3.5	
		3	5.0	5.0	90	3.6	
	60:40	1	5.0	5.0	120	4.8	4.8
		2	5.0	4.9	110	4.5	
		3	5.1	5.0	130	5.1	
	70:30	1	5.0	4.9	70	2.9	2.8
		2	5.0	5.0	70	2.8	
		3	5.1	5.0	70	2.7	
	80:20	1	4.9	5.0	50	2.0	2.0
		2	5.2	5.2	60	2.2	
		3	5.2	5.2	50	1.8	

ตารางที่ ก-5 ทดสอบการไหลผ่านอัตราส่วนผสมดินตะกอน : ททราย เท่ากับ 1:0.5

อัตราส่วน หสาร ลาย	ตัวอย่าง ง	ปริมาณน้ำ	D ₁	D ₂	D ₃	D _{avg}	% FLOW
		(g)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
50:50	1	270	21.0	20.7	20.6	20.8	108
	2	275	21.1	21.3	21.3	21.2	112
	3	275	21.0	20.9	21.0	21.0	110
60:40	1	280	20.5	20.7	20.5	20.6	106
	2	280	20.9	20.9	21.0	20.9	109
	3	284	21.1	21.0	21.1	21.1	111
70:30	1	285	20.6	20.9	20.8	20.8	108
	2	290	20.9	21.1	21.1	21.0	110
	3	290	20.9	20.8	21.1	20.9	109
80:20	1	300	20.5	20.4	20.7	20.5	105
	2	303	20.7	20.5	20.6	20.6	106
	3	305	21.0	20.9	21.1	21.0	110

ตารางที่ ก-5 ทดสอบการไหลผ่านอัตราส่วนผสมดินตะกอน : ทราบ เท่ากับ 1:1.0

อัตราส่วน หสาร ลาย	ตัวอย่าง ง	ปริมาณน้ำ	D ₁	D ₂	D ₃	D _{avg}	% FLOW
		(g)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
50:50	1	225	20.4	20.5	20.8	20.6	106
	2	230	20.7	20.6	20.9	20.7	107
	3	230	20.6	20.6	20.8	20.7	107
60:40	1	230	20.5	20.6	20.5	20.5	105
	2	230	20.6	20.7	20.8	20.7	107
	3	230	20.7	20.4	20.6	20.6	106
70:30	1	235	20.9	21.0	21.0	21.0	110
	2	240	21.1	21.2	21.1	21.1	111
	3	240	20.9	21.2	21.1	21.1	111
80:20	1	250	20.8	20.6	20.6	20.7	107
	2	250	20.7	20.5	20.5	20.6	106
	3	255	21.0	21.1	21.2	21.1	111

ตารางที่ ก-5 ทดสอบการไหลผ่านอัตราส่วนผสมดินตะกอน : ทราย เท่ากับ 1:1.5

อัตราส่วน ทราย ลาย	ตัวอย่าง ง	ปริมาณน้ำ	D_1	D_2	D_3	D_{avg}	% FLOW
		(g)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
50:50	1	190	21.0	21.5	21.3	21.3	113
	2	187	20.7	21.0	20.8	20.8	108
	3	189	21.5	21.3	21.7	21.5	115
60:40	1	205	20.5	20.7	20.4	20.5	105
	2	210	20.9	20.8	20.9	20.9	109
	3	210	20.8	20.5	20.9	20.7	107
70:30	1	225	20.7	20.6	20.7	20.7	107
	2	233	20.9	21.0	21.2	21.0	110
	3	230	20.6	20.9	20.7	20.7	107
80:20	1	240	21.0	21.2	21.3	21.2	112
	2	242	21.2	21.1	21.1	21.1	111
	3	242	21.2	21.0	21.0	21.1	111

ตารางที่ ก-5 ทดสอบการไหลผ่านอัตราส่วนผสมดินตะกอน : ทราย เท่ากับ 1:2.0

อัตราส่วน ทราย ลายน	ตัวอย่าง ง	ปริมาณน้ำ (g)	D_1	D_2	D_3	D_{avg}	% FLOW
			(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
50:50	1	165	21.0	21.5	21.3	21.3	113
	2	165	20.8	20.9	20.9	20.9	109
	3	167	21.1	21.0	21.0	21.0	110
60:40	1	185	20.4	20.6	20.6	20.5	105
	2	187	20.7	20.8	20.7	20.7	107
	3	190	20.7	20.6	20.8	20.7	107
70:30	1	195	20.6	20.9	20.7	20.7	107
	2	195	20.9	21.0	21.1	21.0	110
	3	198	21.1	21.0	20.9	21.0	110
80:20	1	215	21.3	21.4	21.4	21.4	114
	2	212	20.9	21.1	21.0	21.0	110
	3	212	20.8	20.9	20.8	20.8	108

ตารางที่ ก-6 ทดสอบ SETTING TIME

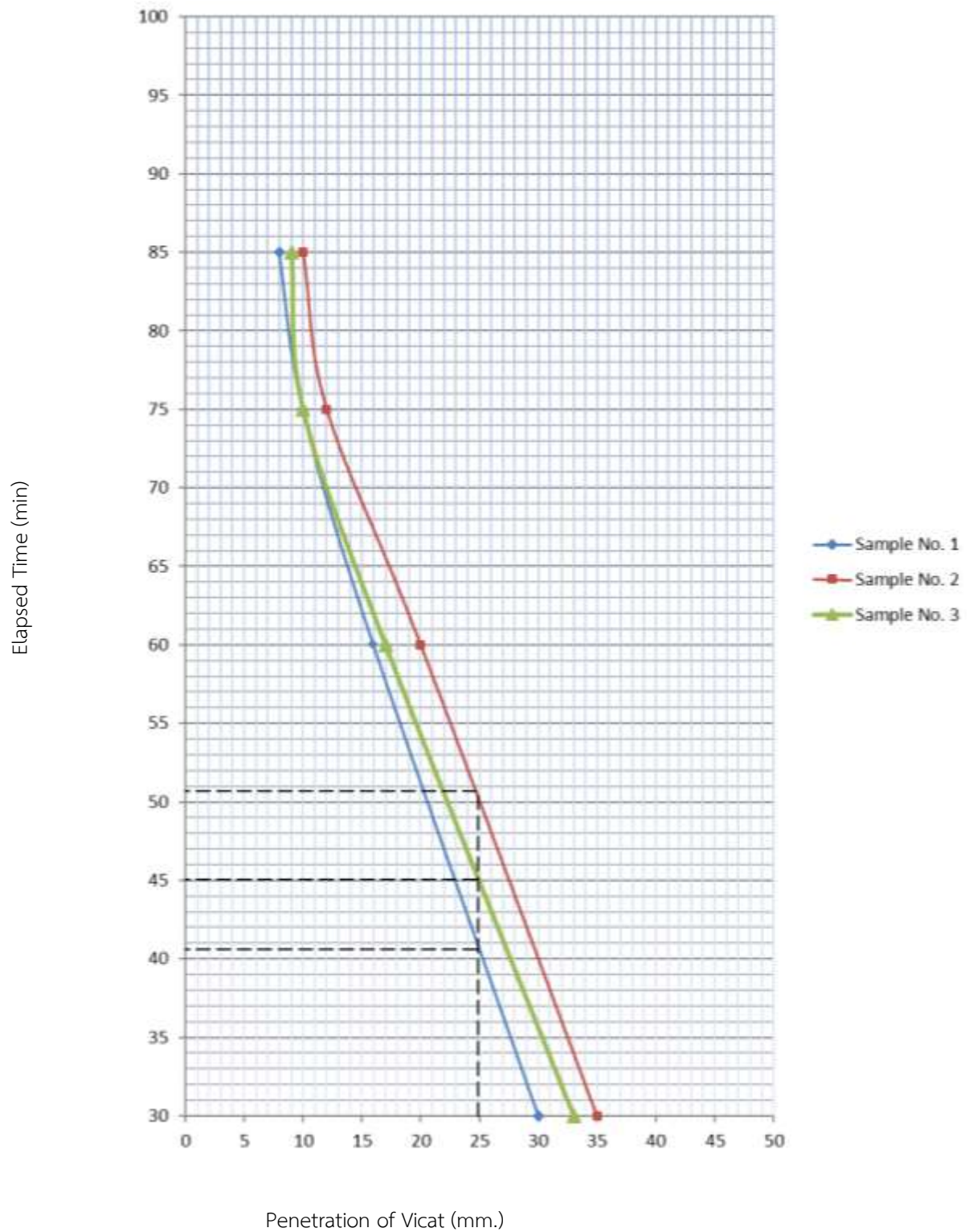
SAMPLE	sluge	TEST DATE	20/04/2562
Amount of sluge (Each Batch)	500 g	Room Temperature	28 °C
Start Test Time	13.00 pm	Normal Consistency	36.5%

Time	Elapsed Time (mins)	Penetration of Vicat Needle Ø10 mm. (mm.)		
		Sample No. 1	Sample No. 2	Sample No. 3
13.30	30	30	35	33
14.00	60	16	20	17
14.15	75	10	12	10
14.25	85	8	10	9

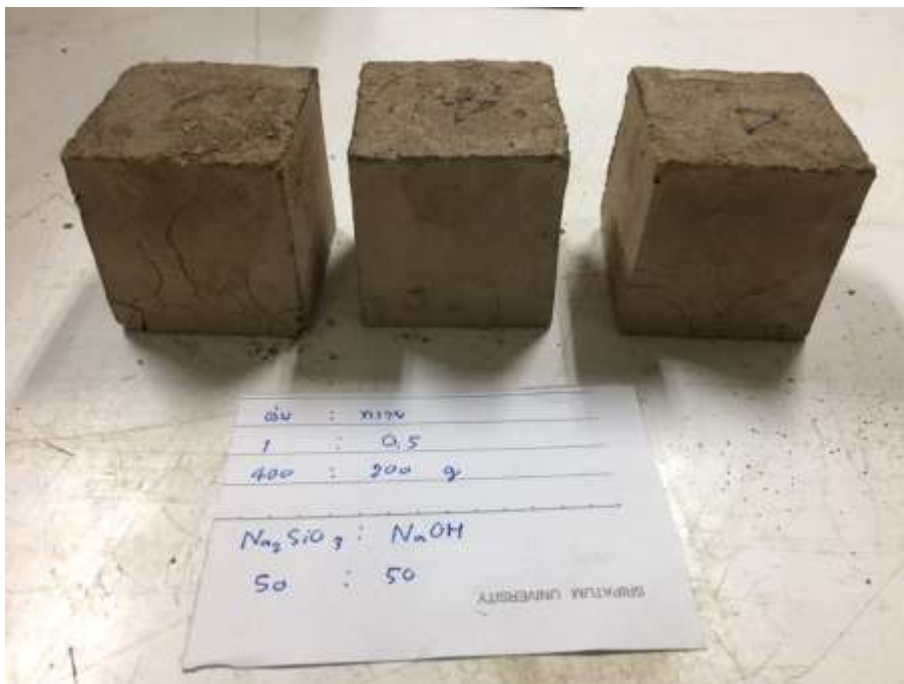
From Graph

Initial Setting Time	(mins)	41	45	52
Final Setting	(mins)	196	225	217
Average Initial Setting Time	(mins)	46		
Average Final Setting	(mins)	213		

Graph SETTING TIME OF SLUGE TEST



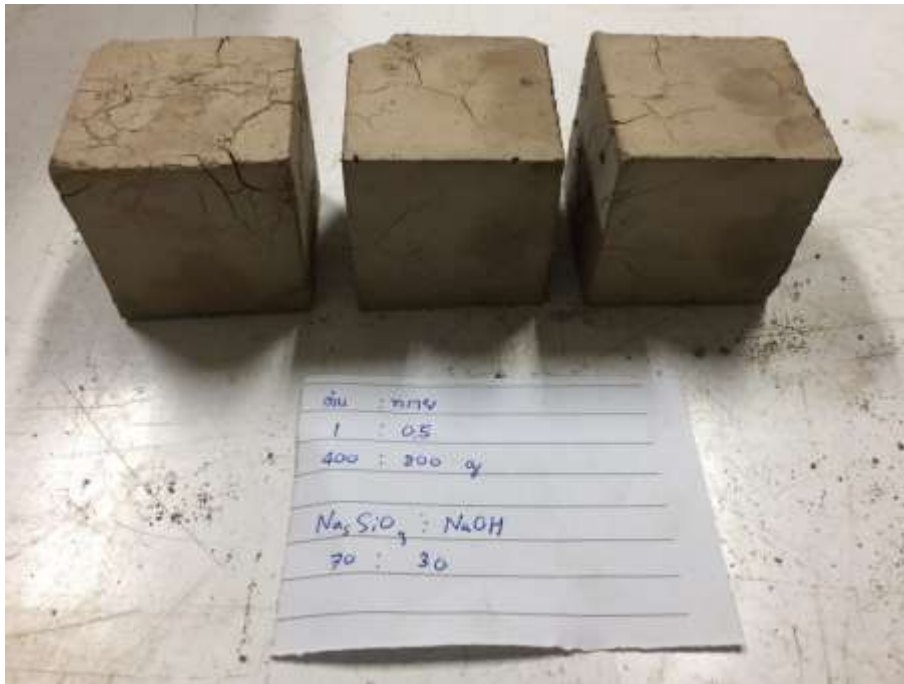
ภาคผนวก ข
รูปตัวอย่างที่อัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ ก.1 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราว เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50
 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.2 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราว เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40
 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.3 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70:30
 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.4 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:0.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20
 โดยน้ำหนัก



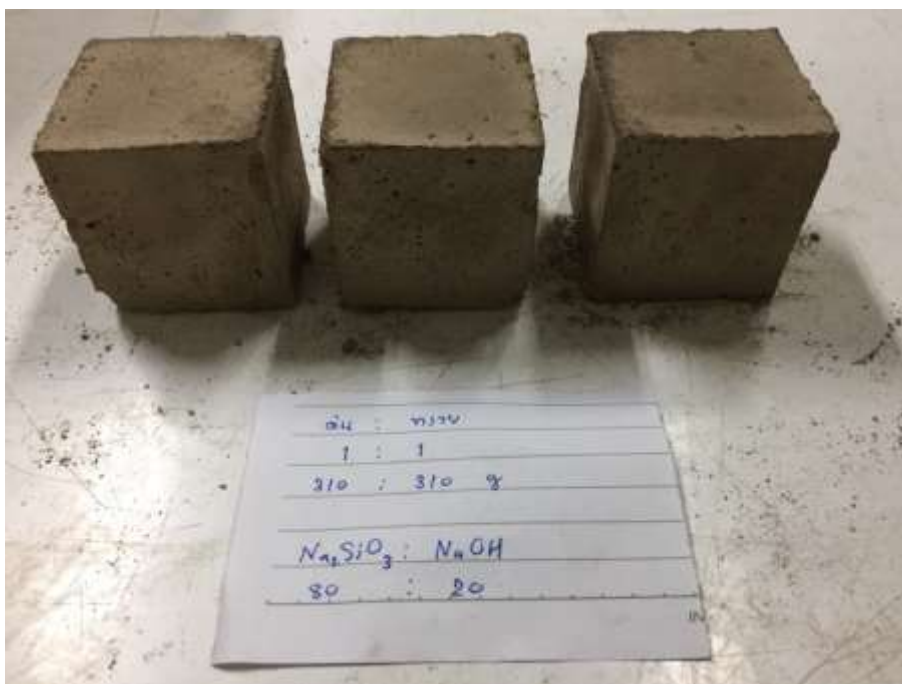
รูปที่ ก.5 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50
โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.6 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.10 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40
โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.7 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70:30
 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.8 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.00 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20
 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.9 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50
 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.10 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
 ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40
 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.11 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70:30
โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.12 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:1.50 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20
โดยน้ำหนัก



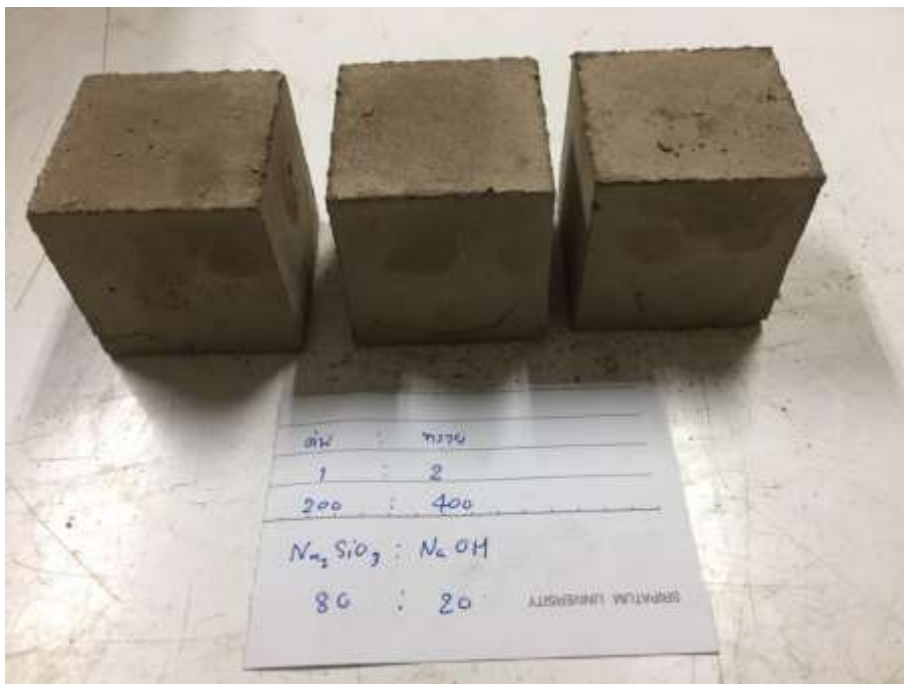
รูปที่ ก.13 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50
โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.14 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราย เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 60:40
โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.15 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราช เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70:30
โดยน้ำหนัก



รูปที่ ก.16 ลักษณะทางกายภาพของการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วน
ตะกอนดินประปา : สารละลาย : ทราช เท่ากับ 1.00:0.45:2.00 Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20
โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ค
ประวัติผู้ศึกษา

ประวัติผู้ศึกษา

1. ชื่อและนามสกุล

นายเอกรัฐ ตั้งศรีวงศ์

2. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. ข้อมูลในการติดต่อ

169/40 หมู่ที่ 2 ซอยวัดศรีประวัติ ถนนกาญจนาภิเษก ตำบลปลายบาง อำเภอบางกรวย
จังหวัดนนทบุรี 11130 เบอร์โทร 088-0138852 e-mail : eaktang@hotmail.com

ประวัติผู้ศึกษา**1. ชื่อและนามสกุล**

นายสิทธิศักดิ์ บัวโคม

2. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. ข้อมูลในการติดต่อ

41/369 ซอยเจริญกรุง 80 ถนนเจริญกรุง เขตบางคอแหลม แขวงบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร
10120

เบอร์โทร 087-3233623 e-mail : s.buachom@gmail.com

ประวัติผู้ศึกษา

1. ชื่อและนามสกุล

นายดนุพล ทาบุญ

2. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. ข้อมูลในการติดต่อ

79 หมู่ที่ 8 ตำบลบ้านเวียง อำเภอธัญกวาง จังหวัดแพร่ 54140
เบอร์โทร 091-4129187 e-mail : keng_cte@hotmail.com