



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
แบบขออนุมัติปิดโครงการวิจัย

Ver 01. 2018-04-20
สำนักงานวิจัย นวัตกรรมและพันธกิจ
แบบวิจัย 08
เลขที่: 1048
วันที่: 20/6/63
เวลา: 11:07

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ทุนวิจัย มจร. ทุนภายนอก จากแหล่งทุน

วันที่ 16 มีนาคม 2563

ส่วนที่ 1: รายละเอียดโครงการวิจัย

เรียน รองอธิการบดีอาวุโสฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม

ข้าพเจ้า ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์ สังกัด ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี

มีความประสงค์ขออนุมัติปิดโครงการวิจัยซึ่งได้รับการสนับสนุนประจำปีงบประมาณ 2562 รายละเอียดดังนี้

ชื่อโครงการวิจัย

(ภาษาไทย) การศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ

(ภาษาอังกฤษ) Study the properties of Geopolymer from Fly ash as Bioactive Materials

รหัสโครงการ (ถ้ามี) 62000233 หน่วยงานใน มจร. ที่รับผิดชอบโครงการ ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี

ระยะเวลาระหว่าง วันที่ 01 ต.ค. 61 ถึงวันที่ 30 ก.ย. 62 และมีการขยายระยะเวลาโครงการถึงวันที่ 31 มี.ค. 63

งบประมาณที่ได้รับการสนับสนุน 373,800 บาท งบประมาณคงเหลือของโครงการ บาท

การเปิดเผยไฟล์รายงานสู่สาธารณะ (เฉพาะแหล่งทุนภายนอก) เปิดเผยแพร่ ไม่เปิดเผยแพร่ โปรดชี้แจงเหตุผล

เนื่องจาก

(สำหรับโครงการงบประมาณแผ่นดิน เมื่อโครงการดำเนินการเสร็จสิ้น วช. จะส่งไฟล์รายงานไปเผยแพร่ที่ห้องสมุดดิจิทัลของ วช. และช่องทางการเผยแพร่อื่น)

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาอนุมัติ

(ผศ. ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์)

หัวหน้าโครงการ

(รศ. ดร.สมชาย จันทรชานา)

รองอธิการบดี มจร.ราชบุรี

หมายเหตุ

1. กรณีทุนงบประมาณแผ่นดิน
 - 1.1. หากมีเงินคงเหลือให้ออนเข้ามหาวิทยาลัยเพื่อใช้ในกิจการส่วนรวมด้านงานวิจัย โดยใช้แบบ กค.23-1
 - 1.2. เงินเหลือจ่ายจากรายการค่าครุภัณฑ์ห้ามโอนไปหมวดรายจ่ายอื่น ๆ โดยให้ถือปฏิบัติเช่นเดียวกับเงินงบประมาณงบลงทุนจากรัฐ เนื่องจากเป็นงบประมาณที่ได้จากรัฐ
2. กรณีทุนภายนอก
 - 2.1. หากมีเงินคงเหลือให้ดำเนินการเงื่อนไขที่แหล่งทุนกำหนด หรือระเบียบของมหาวิทยาลัย
3. กรณีทุนวิจัย มจร.
 - 3.1. หากมีเงินคงเหลือให้ออนเข้ามหาวิทยาลัย

เอกสารประกอบการพิจารณา :

- รายงานการเงินโครงการ (รายงาน PM012-2007 จากระบบ AXAPTA) - สำหรับทุนงบประมาณแผ่นดินที่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2555 เป็นต้นไป
- รายงานฉบับสมบูรณ์ 1 เล่ม และไฟล์รายงานฉบับสมบูรณ์ (.doc และ .pdf)
- รายงานการเงิน (เฉพาะทุนวิจัย มจร.)

ส่วนที่ 2: การตรวจสอบข้อมูลทางการเงิน สำนักงานคลัง (เฉพาะทุนงบประมาณแผ่นดิน)

(สำหรับโครงการที่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2555 เป็นต้นไป)

เรียน ผู้อำนวยการสำนักงานคลัง
เพื่อตรวจสอบ และรับรอง

Abt m.
.....
(น.ส.ญาติ นาแกมพลอย)
.....
สำนักงานวิจัย นวัตกรรมและพันธมิตร
วันที่ 20 มี.ค. 63

ตรวจสอบรายการบัญชีดังกล่าว ดังนี้		
	มี	ไม่มี
1. รายได้ค้างรับ	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2. เงินสำรองผลงาน	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3. เจ้าหนี้ค้างจ่าย	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4. ลูกหนี้ค้างจ่าย	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

ตรวจสอบเอกสารการเงิน

นางสาวกนิษฐา เขตพันธ์
.....
(นางสาวกนิษฐา เขตพันธ์)
.....
สำนักงานคลัง
วันที่ 24 ก.ย. 2563

ผู้รับรอง

นางสาวสำรวย แซ่เตียว
.....
(นางสาวสำรวย แซ่เตียว)
ผู้อำนวยการสำนักงานคลัง
วันที่ 24 กย 2563

ผู้รับรองรายงาน(เงิน-ค่า)เงินในร.บ.แม่ข่าย

นางสาววิภาดา กิ่งทอง
.....
(นางสาววิภาดา กิ่งทอง)
หัวหน้ากลุ่มงานตรวจสอบภายใน
วันที่ 28 ก.ย. 63

ส่วนที่ 3: เฉพาะสำนักงานวิจัย นวัตกรรมและพันธมิตร

เรียน รองอธิการบดีอาวุโสฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม

เพื่อโปรดพิจารณา อนุมัติปิดโครงการ ลงนามหนังสือนำเสนอแหล่งทุน อื่น ๆ.....

ตรวจสอบเอกสาร

น.ส.ญาติ นาแกมพลอย
.....
(น.ส.ญาติ นาแกมพลอย)
.....
สำนักงานวิจัย นวัตกรรมและพันธมิตร
วันที่ 28 ก.ย. 63

ทราบ/เพื่อโปรดพิจารณา

ดร.ภภาพิต ทิรัญศิริสวัสดิ์
.....
(ดร.ภภาพิต ทิรัญศิริสวัสดิ์)
รท.ผอ.สวนพ
วันที่ 28/9/63

เห็นสมควรอนุมัติ

ดร.วรินทร์ สงคศิริ
.....
(ดร.วรินทร์ สงคศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายยุทธศาสตร์วิจัย
วันที่ 29 10 63

อนุมัติ

รศ.ดร. สุวิทย์ แซ่เตียว
.....
(รศ.ดร. สุวิทย์ แซ่เตียว)
อธิการบดี
วันที่ 28/9/63

ตรวจสอบเอกสาร (เฉพาะเจ้าหน้าที่)

- เอกสารแนบครบ
- เอกสารแนบไม่ครบ ส่งเอกสารกลับคืนหน่วยงาน วันที่.....
- รับเอกสารกลับคืนจากหน่วยงาน วันที่.....



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1)

ประจำปีงบประมาณ 2562

เรื่อง การศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ
Study the properties of Geopolymer from Fly ash as Bioactive Materials

คณะผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายรุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์ หัวหน้าโครงการ
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี)

เดือนมีนาคม พ.ศ. 2563

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่ผสมสารฟอสเฟตที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.3 และทำการผสมสารโซเดียมฟอสเฟต (Na_3HPO_4) และสารแคลเซียมฟอสเฟต $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้าก้นเตา จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สังเคราะห์ และทำการลดความเป็นด่างและการชะละลายของสารประกอบในจีโอโพลิเมอร์ด้วยกระบวนการให้ความร้อนโดยเผาที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด และเมื่อนำจีโอโพลิเมอร์มาผสมสารโซเดียมฟอสเฟตและแคลเซียมฟอสเฟต พบว่า จีโอโพลิเมอร์ที่ใส่สารแคลเซียมฟอสเฟตมีกำลังอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมสารโซเดียมฟอสเฟต เมื่อทำการเผาจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ค่าความเป็นด่างและปริมาณความเข้มข้นของโซเดียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม และแคลเซียม ของน้ำชะจากก้อนจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น

Abstract

This senior project is the research of geopolymer from bottom ash, which is mixed with $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ at ratios of 0.20, 0.25 and 0.3 and also mixed with sodium phosphate (Na_3HPO_4) and calcium phosphate ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) at 5 % mass by weight. The compressive strength of synthetic geopolymer was investigated. Next, the alkalinity and leaching of the compounds from geopolymer were reduced by burning the geopolymer at 500, 600 and 700-degree Celsius for an hour. The results were found that the geopolymer from bottom ash using $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ at a ratio of 0.20 gave the highest compressive strength. After the geopolymer mixture having the highest compressive strength was mixed with the sodium phosphate and calcium phosphate, the geopolymer mixed with calcium phosphate generated the higher compressive strength than that mixed with sodium phosphate. When the geopolymer was burnt at 500, 600 and 700-degree Celsius for an hour, the alkalinity, and the concentration of sodium, silicon, aluminium, and calcium of the leaching water from a piece of geopolymer became lower when the burning temperature of geopolymer was higher.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยจากสำนักวิจัยงานวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2562 และขอขอบคุณศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี) ที่สนับสนุนเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดสอบและอำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ฉ – ซ
บทนำ	
- ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
- วัตถุประสงค์	2
- ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย	2
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2 – 3
ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย	3
วิธีการดำเนินการวิจัย	4 – 10
อภิปรายผล	11
สรุปและข้อเสนอแนะ	12 – 27
เอกสารอ้างอิง	28
ภาคผนวก	29
- ภาคผนวก ก	
- ภาคผนวก ข	30 – 36
- ภาคผนวก ค	37 – 42

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การจำแนกประเภทของเซรามิกส์ตามกลไกการยึดติดและตัวอย่าง	7
2	ความต้านแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุซีเมนต์และกระดูก	8
3	คุณสมบัติทางกายภาพของกระดูกซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ	8
4	ชนิดของจีโอพอลิเมอร์	10

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1	ผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลั่งอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ่า กั้นเตา	12
2	ค่ากำลั่งอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ่ากั้นเตาที่มีการผสมสารโซเดียมฟอสเฟต ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	13
3	ค่ากำลั่งอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ่ากั้นเตาที่มีการผสมสารแคลเซียม ฟอสเฟตในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	14
4	กำลั่งอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ่ากั้นเตาที่อายุการบ่ม 28 วัน	15
5	ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผ่านการเผา	16
6	ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศา เซลเซียส	17
7	ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส	17
8	ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศา เซลเซียส	18
9	ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุการแพร่ 8 ชั่วโมง	18
10	ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุการแพร่ 32 วัน	19
11	ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์	19
12	ค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์	20
13	ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์	20
14	ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟต	21
15	ค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟต	21
16	ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟต	22
17	ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟต	22
18	ค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟต เพิ่ม	23
19	ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียม ฟอสเฟต	23
20	ค่าความเข้มข้นสะสมของแคลเซียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟต	24
21	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา	25
22	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์ผสมโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5	26
23	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5 โดย น้ำหนักที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา	27

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

สัญลักษณ์

C	=	สัดส่วนผสมที่เป็นตัวควบคุม
CP	=	สัดส่วนผสมที่เพิ่มเติมสารแคลเซียมฟอสเฟต ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเท่ากับเตา
H	=	Hematite
L	=	Leonite
M	=	Mullite
M	=	ธาตุโลหะอัลคาไล
M30	=	เกรดคุณภาพรับรับกำลังของคอนกรีต
M35	=	เกรดคุณภาพรับรับกำลังของคอนกรีต
ND	=	ไม่สามารถหาค่าได้
Non heat	=	ไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน
NP	=	สัดส่วนผสมที่เพิ่มเติมสารโซเดียมฟอสเฟต ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเท่ากับเตา
N/S	=	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$
n	=	หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
Q	=	Quartz
W/ GBP	=	อัตราส่วนความชื้นเหลวของน้ำต่อวัสดุผสมจีโอโพลีเมอร์ที่เป็นของแข็ง
w	=	จำนวนโมเลกุลของน้ำ
z	=	จำนวนโมเลกุล
°C	=	องศาเซลเซียส
-	=	พันธะยึดเหนี่ยว
0.20	=	อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20
0.25	=	อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25
0.30	=	อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30
500	=	ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
600	=	ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส
700	=	ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ประมวลศัพท์และคำย่อ

ก.	=	กรัม
กก/ชม ²	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ชม.	=	เซนติเมตร
มก./ลิตร	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
มม.	=	มิลลิเมตร
มอก.	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
AAR	=	Alkali-Aggregate Reaction
AAS	=	Atomic Absorption spectroscopy
Al	=	อะลูมิเนียม
Al ³⁺	=	อะลูมิเนียมไอออน
Al ₂ (Al _{2.8} Si _{1.2})O ₂	=	สูตรทางเคมีของผลึกรูปแบบ Mullite
Al ₂ O ₃	=	อะลูมิเนียมออกไซด์
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
BA	=	Bottom Ash (ถ้ำก้นเตา)
Ca	=	แคลเซียม
Cl ⁻	=	คลอไรด์ไอออน
CaO	=	แคลเซียมออกไซด์
Ca ₃ (PO ₄) ₂	=	สารแคลเซียมฟอสเฟต
DI	=	Deionization Water (น้ำปราศจากไอออน)
Fe ₂ O ₃	=	สูตรทางเคมีของผลึกรูปแบบ Hematite
Fe ₂ O ₃	=	เหล็กออกไซด์
GGBS	=	Ground Granular Blast Furnace Slag
HA	=	ไฮดรอกซีแอปาทิต
H ₂ O	=	น้ำ
H ₂ SO ₄	=	กรดซัลฟิวริก
IGCC	=	Integrated Gasification Combined Cycle
K	=	โพแทสเซียม
K ⁺	=	โพแทสเซียมไอออน
K ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·H ₂ O	=	สูตรทางเคมีของผลึกรูปแบบ Leonite

ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

K_2O	=	โพแทสเซียมไดออกไซด์
KOH	=	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
kN	=	กิโลนิวตัน
Li	=	ลิเทียม
Li^+	=	ลิเทียมไอออน
LOI.	=	<i>Letter of Intent</i>
MgO	=	แมกนีเซียมออกไซด์
$MgSO_4$	=	แมกนีเซียมซัลเฟต
MnO	=	แมงกานีสออกไซด์
Na	=	โซเดียม
Na^+	=	โซเดียมไอออน
NaOH	=	สารโซเดียมไฮดรอกไซด์
Na_2O	=	โซเดียมไดออกไซด์
Na_3PO_4	=	สารโซเดียมฟอสเฟต
Na_2SiO_3	=	โซเดียมซิลิเกต
Na_2SO_4	=	โซเดียมซัลเฟต
P	=	ฟอสเฟต
P_2O_5	=	ไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์
pH	=	Potential of Hydrogen ion
ppm	=	หนึ่งในล้านในล้าน
Si	=	ซิลิกอน
SEM	=	Scanning Electron Microscope
Si^{4+}	=	ซิลิกอนไอออน
SiO_2	=	ซิลิกอนไดออกไซด์
SO_3	=	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์
TiO_2	=	ไททานเนียมไดออกไซด์
XRF	=	X-Ray Fluorescence Spectrometer
XRD	=	X-Ray Diffractometer

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันวิวัฒนาการทางการแพทย์มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี และการบูรณาการองค์ความรู้ในหลายสาขามาร่วมในการพัฒนาและช่วยเหลือในการพัฒนา และอำนวยความสะดวกในทางการแพทย์เพิ่มมากขึ้น เช่น การนำองค์ความรู้ทางด้านเครื่องกล ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และด้านคอมพิวเตอร์มาใช้ในการสร้างเครื่องมือในการผ่าตัด ยิงเลเซอร์ หรือใช้ในงานต่างๆ มากมาย ซึ่งทำให้ขนาดของแผลและระยะเวลาในการพักฟื้นของมนุษย์ลดลง ซึ่งรวมไปถึงการรักษาอาการที่เกิดขึ้นจากการเกิดอุบัติเหตุด้วย ซึ่งระดับความอันตรายของการเกิดอุบัติเหตุก็จะทำให้การรักษาพยาบาลมีความแตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุบัติเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่กระดูก โดยเฉพาะผู้ที่อยู่ในวัยสูงอายุ หรือวัยกลางคน การประสานของการแตกหักของกระดูกเป็นไปได้อย่างช้ามาก และยิ่งไปกว่านั้นการเกิดอุบัติเหตุที่ทำให้เกิดการแตกหักของกระดูกในขั้นที่ไม่สามารถต่อได้ ก็จะต้องมีการนำโลหะบาง ชนิดที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์มาตาม เพื่อให้เกิดการประสาน หรือใช้โลหะนั้นแทนกระดูกเป็นต้น ซึ่งจากวิวัฒนาการด้านการรักษานั้น จะใช้กระดูกเทียมมาใช้ทดแทน ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากโลหะประเภท ไทเทเนียมผสม แก๊ซเรียมิก ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นต้น

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นส่วนผสมของแร่ธาตุที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยมีสารประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นวัสดุพอลิไซลันที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (risk husk ash) ดินขาวเผา (calcined kaolin) เป็นต้น เมื่อวัสดุพอลิไซลันผสมกับสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูง และเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงทำให้ได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่มีสมบัติในการยึดประสานและมีสมบัติคล้ายซีเมนต์ ซึ่งสามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีความแข็งแรงอัด ทำให้จีโอพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ทดแทนหรือผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ [5] ในปัจจุบันจีโอพอลิเมอร์ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น วัสดุทนความร้อน และวัสดุทนไฟ เป็นต้น นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อเป็นวัสดุชีวภาพ (bioactive materials) ที่สามารถใช้แทนที่หรือซ่อมแซมกระดูกที่ได้รับบาดเจ็บ [9] [11] ซึ่งวัสดุที่มีลักษณะทางชีวภาพสามารถเกิดกระดูกที่มีองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyl apatite) โดยการทำปฏิกิริยากับน้ำเลือด (blood plasma) ในสิ่งมีชีวิต

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อจีโอพอลิเมอร์สัมผัสกับเซลล์สิ่งมีชีวิตคือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความเป็นด่างสูงสามารถทำให้เซลล์ตายได้ และอาจจะก่อให้เกิดการชะละลายของอลูมิเนียมออกมาบริเวณที่มีการฝังวัสดุชีวภาพ ซึ่งความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่มากกว่า 2 ppm อาจก่อให้เกิดโรคมองเสื่อมได้ แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของอลูมิเนียมในปริมาณต่ำจะมีประโยชน์ที่ช่วยกระตุ้นการงอกของเซลล์สร้างกระดูกและการเกิดกระดูกใหม่ [7] ซึ่งจากรายงานที่ผ่านมาพบว่าการนำจีโอพอลิเมอร์มาบำบัดด้วยความร้อนโดยการเผาที่อุณหภูมิ 500 – 600 องศาเซลเซียส สามารถช่วยลดพีเอชและลดการชะละลายของอลูมิเนียม นอกจากนี้การเผาจะช่วยเพิ่มความพรุนให้แก่วัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุชีวภาพเพื่อช่วยให้กระดูกใหม่สามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนและเกิดความมั่นคงเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งหมายในการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสำหรับเป็นวัสดุชีวภาพ โดยมีการเติมแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) บำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพื้นผิว รูพรุน การชะละลาย และความว่องไวทางชีวภาพของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่เหมาะสมต่อการนำไปงานทางการแพทย์
2. ศึกษาสมบัติทางชีวภาพของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยที่เหมาะสมต่อการนำไปงานทางการแพทย์
3. ศึกษาอัตราสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ขอบเขตของการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้มีขอบเขตโครงการวิจัยในปีงบประมาณ 2562 โดยทำการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยบีแอลซีพี (BLCP)

- ศึกษาผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.3 โดยโมล ที่มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด
- ศึกษาผลการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยบีแอลซีพีที่มีการผสมสารแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและความหนาแน่นที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน
- ศึกษาผลของอุณหภูมิในการปรับปรุงสมบัติจีโอพอลิเมอร์ ที่มีผลต่อการชะละลายของ Al, Si, Ca, P ในน้ำกลั่น (Deionized water, DI) โดย AAS และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปในน้ำกลั่น ที่ระยะเวลา 3, 6, 24, 48 ชั่วโมง และ 4, 7, 14, 28 วัน
- ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและความเป็นผลึกของตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM และ XRD

วิธีการดำเนินการวิจัยโดยสรุป

1. การเตรียมวัตถุดิบ

เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยมาจากกระบวนการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และโรงไฟฟ้า BLCP ซึ่งมีลักษณะผงละเอียด โดยเถ้าลอยจะถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF (X – ray fluorescence), วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD (X – ray diffractometer), วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าลอยด้วย SEM (Scanning electron microscope), วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS (Atomic absorption spectroscopy)

2. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นต่างที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยชั่งน้ำหนักสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 โดยโมล หลังจากนั้นนำมาละลายด้วยน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับการสังเคราะห์

3. การเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะต้องทำการหาสัดส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อวัสดุตั้งปฏิกิริยา โดยวิธีการหาความชื้นเหลือปกติของมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C 187 – 68 ด้วยชุดทดสอบไวแคต (Vicat apparatus) ทำการเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.0 มิลลิเมตร และสูง 76.0 มิลลิเมตร ทำการอัดวัสดุผสมให้แน่น และไล่ฟองอากาศโดยใช้โตะเขย่าทำการเขย่าประมาณ 1 นาที จากนั้นนำแบบหล่อมาหุ้มด้วยถุงพลาสติกเพื่อรักษาปริมาณน้ำในกระบวนการเกิดปฏิกิริยา นำแบบหล่อที่หุ้มด้วยพลาสติกไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 – 20 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบหล่อออกและหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกนำไปบ่มต่อที่ระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างที่ครบอายุการบ่มจะถูกนำมาวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D1633 - 07 และค่าความหนาแน่น

4. การบำบัดด้วยความร้อน

การนำก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มาบำบัดด้วยความร้อนเพื่อช่วยลดความเป็นต่าง โดยตัวอย่างที่ผ่านการบ่มแล้วจะถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิ 550 – 600 องศาเซลเซียส

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้จีโอพอลิเมอร์ชีวภาพจากถั่วลันเตาที่มีสมบัติในการยึดเกาะกับเซลล์หรือกระดูกได้ดี เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานทางการแพทย์
2. เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยทางด้านวัสดุชีวภาพจีโอพอลิเมอร์
3. ได้นักวิจัย บัณฑิต ที่มีความรู้ความสามารถ เชี่ยวชาญทางด้านวัสดุทางชีวภาพ

ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

วัสดุทางชีวภาพได้ถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์หลายชนิดซึ่งผลิตจากโลหะ เซรามิกส์ และพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ได้แก่ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบหลักในกระดูกและฟัน โดยแคลเซียมฟอสเฟตมีความสามารถในการตอบสนองทางชีวภาพที่สูง (Bioactivity)

1. โครงสร้างและหน้าที่ของกระดูก

กระดูกแบ่งเป็นสามชนิดใหญ่ๆ คือ กระดูกสัน กระดูกแบน และกระดูกยาว ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงระดับจุลภาคจะพบว่ากระดูกทั้งสามชนิดประกอบด้วยกระดูก 2 ประเภท คือ กระดูกเนื้อแน่น และกระดูกฟองน้ำ โดยกระดูกทั้งสองประเภทนี้จะกระจายอยู่บริเวณต่างๆ ของกระดูกทั่วร่างกายและมีเส้นเลือดที่มาเลี้ยงกระดูกจาก 2 แหล่งคือ เส้นเลือดที่แทงทะลุเปลือกกระดูกเข้าไปเลี้ยงเซลล์ภายในโพรงกระดูก (nutrient arteries) และเส้นเลือดที่เลี้ยงอยู่ส่วนนอกของเปลือกกระดูกโดยจะอยู่ใต้เยื่อหุ้มกระดูก (periosteal artery) โดยเส้นเลือดทั้งสองระบบนี้สามารถเชื่อมต่อกันได้ ทำให้กระดูกไม่ตายถึงแม้จะมีการทำลายเส้นเลือดส่วนใดส่วนหนึ่งไป

เซลล์กระดูกสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ เซลล์สร้างกระดูก และเซลล์สลายกระดูก โดยเซลล์สร้างกระดูกสามารถแบ่งย่อยอีกสามชนิดคือ เซลล์สร้างกระดูกที่ยังมีฤทธิ์อยู่ (active osteoblast) เซลล์สร้างกระดูกที่ไม่มีฤทธิ์ (inactive osteoblast หรือ bone lining cell) และเซลล์กระดูกแก่ (osteocyte) นอกจากนี้เนื้อพื้นของกระดูกประกอบด้วยสองชนิดคือ เนื้อพื้นที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยเส้นใยคอลลาเจนและที่เหลือเป็น noncollagen glycoproteins และ bone – specific proteoglycans อีกชนิดหนึ่งคือเนื้อพื้นของกระดูกที่เป็นสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ประกอบด้วยแคลเซียมและฟอสฟอรัส และแร่ธาตุอื่นๆ โดยหน้าที่ของกระดูกส่วนใหญ่คือเป็นโครงสร้างของร่างกาย ป้องกันอวัยวะที่สำคัญของร่างกาย เป็นแหล่งแลกเปลี่ยนและสะสมแร่ธาตุและเป็นแหล่งสร้างเม็ดเลือดที่สำคัญของร่างกาย [1]

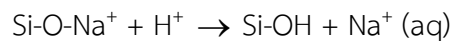
2. เนื้อพื้นของกระดูก (Bone matrix)

เนื้อพื้นของกระดูกประกอบด้วยสารประกอบที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยสารอนินทรีย์จะพบประมาณร้อยละ 65 ของน้ำหนักรวมกระดูก ส่วนสารอินทรีย์จะพบประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักรวมกระดูก และพบน้ำประมาณร้อยละ 10 ซึ่งส่วนของเนื้อพื้นกระดูกที่เป็นสารอินทรีย์ ประกอบด้วยเส้นใยคอลลาเจน ทำให้กระดูกมีความแข็งแรงทนต่อแรงดึง (tension) ได้ดี ขณะที่เนื้อพื้นของกระดูกที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic matrix) ทำให้กระดูกทนต่อแรงกดอัด (compression) ซึ่งเนื้อพื้นของกระดูกที่เป็นสารอนินทรีย์ มีหน้าที่ในการเก็บสะสมแร่ธาตุและเป็นตัวสร้างความแข็งแรงให้กับกระดูก โดยมีปริมาณแคลเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม และแมกนีเซียม ประมาณร้อยละ 99, 85, 40 และ 60 ตามลำดับ ของร่างกายจะพบที่กระดูก จากการศึกษาพบว่า Hydroxyapatite มักไม่ใช่ผลึกที่บริสุทธิ์ แต่จะมีส่วนผสมของ carbonate และ acid phosphate groups (HPO_4^{2-}) โดย acid phosphate ที่พบในผลึกกระดูก (bone crystal) จะมีลักษณะเฉพาะไม่เหมือนกับ acid phosphate ที่พบในผลึกแคลเซียมชนิดอื่นๆ เช่น brushite ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) นอกจากนี้ยังไม่เหมือนกับ Hydroxyapatite บริสุทธิ์ ซึ่งผลึกของกระดูกจะไม่มี OH – groups ดังนั้นผลึกของแร่ธาตุในกระดูก (bone mineral crystal) ควรจะเรียกว่า Apatite มากกว่า Hydroxyapatite นอกจากนี้ carbonate และ acid phosphate groups จำนวนมากมักจะสลายตัวได้ง่าย ซึ่งจะมิบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาระหว่างผลึกกับของเหลวนอกเซลล์ (extracellular fluid) ที่อยู่โดยรอบและกับองค์ประกอบทางอินทรีย์ของเนื้อพื้นกระดูก (organic components of the matrix) [2]

3. วัสดุชีวภาพ (Biomaterial)

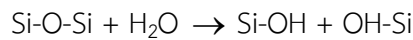
วัสดุชีวภาพคือวัสดุที่สามารถนำมาใช้แทนส่วนหนึ่งส่วนใดของเนื้อเยื่ออวัยวะหรือส่วนใดส่วนหนึ่งในร่างกายมนุษย์ได้ เสื่อมสลายได้ตามธรรมชาติ สามารถเข้ากันได้ดีกับร่างกายของสิ่งมีชีวิต ซึ่งวัสดุชีวภาพถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการรักษาและแทนที่กระดูกที่มีความผิดปกติจากโรคหรือการบาดเจ็บ [3] สิ่งที่เราควรระวังในการนำวัสดุชีวภาพที่เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์มาใช้งานคือการสัมผัสกับเซลล์สิ่งมีชีวิต เนื่องจากวัสดุที่มีความเป็นด่างสูงสามารถทำให้เซลล์ตายได้ นอกจากนี้ความสามารถในการชะละลายของ Al ภายใต้อิทธิพลของสารละลายภายนอกที่มากกว่า 2 ppm มีผลทำให้เกิดโรคสมองเสื่อม [7] โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผิวของวัสดุชีวภาพสัมผัสกับของเหลวในร่างกายสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน [4] ดังนี้

ขั้นที่ 1 เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na^+ , Ca^{2+} ที่ผิวของวัสดุกับ H^+ หรือ H_3O^+ ในสารละลายทำให้เกิดกลุ่มของ Silanol (Si-OH) บนผิววัสดุขึ้นดังสมการ



ดังนั้นค่า pH ของสารละลายจะสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ H^+

ขั้นที่ 2 ค่า pH เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการละลายของซิลิกา และกลายเป็น Silicic acid ($\text{Si}(\text{OH})_2$) ทำให้เกิด Si-OH groups บนผิววัสดุขึ้นดังสมการ



ขั้นที่ 3 เกิดการควบแน่น (condensation) และต่อกันเป็นสายยาว (polymerization) ของชั้นซิลิกา (Amorphous SiO_2 -rich layer) ที่มีความหนาประมาณ 1 – 2 ไมครอน บนผิวของวัสดุ

ขั้นที่ 4 เกิดการละลายต่อไปและเกิดการเคลื่อนย้ายไอออน Ca^{2+} และ $(\text{PO}_4)^{3-}$ ทำให้เกิดชั้นของแคลเซียมฟอสเฟต (Amorphous calcium phosphate (ACP) layer) บนชั้นของซิลิกา

ขั้นที่ 5 เกิดการละลายต่อไป และชั้น ACP รวมกับ $(\text{OH})^-$ และ $(\text{CO}_3)^{2-}$ ในสารละลายทำให้เกิดชั้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HCA)

ดังนั้นเมื่อเกิดชั้นของ HCA จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกับกระดูก เกิดการเกาะ และการเพิ่มจำนวนของเซลล์ เกิดการยึดเกาะของเนื้อเยื่อกระดูกและในขณะเดียวกันก็เกิดการสลายตัวของวัสดุชีวภาพ [4]

3.1 ชนิดของวัสดุชีวภาพ [3]

วัสดุชีวภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1) ชนิดที่ 1 ปฏิกิริยาผิวสัมผัสเกือบเฉื่อยชา พื้นผิวเรียบ (Nearly inert, smooth surface) ได้แก่ วัสดุชีวภาพทางการแพทย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน วัสดุในกลุ่มนี้สามารถเข้ากันได้ดีกับอวัยวะที่ทดแทนและอวัยวะข้างเคียง อย่างไรก็ตามก็ต้องมีปฏิกิริยาต่อวัสดุที่ใช้ โดยเกิดเป็นเนื้อเยื่อแผ่นบางๆ (fibrous capsule) หนาประมาณ 0.1 – 10 ไมครอน ขึ้นเสมอโดยแทรกกระหว่างวัสดุที่ใช้กับอวัยวะที่รองรับ ถึงแม้ว่าเนื้อเยื่อดังกล่าวจะแนบชิดติดกับวัสดุก็ตามแต่ไม่ได้ต่อกันสนิท จึงเกิดการเคลื่อนไหวยาระหว่างตัววัสดุที่ใช้กับอวัยวะที่รองรับ โดยเฉพาะเมื่อมีแรงมากระทำ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ความคงทนถาวรของวัสดุที่ใช้มีขีดจำกัด

2) ชนิดที่ 2 ปฏิกิริยาผิวสัมผัสเกือบเฉื่อยชา พื้นผิวมีรูเล็กๆ (Nearly inert, microporous surface) เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากการวิจัย เพื่อให้มีคุณภาพดีกว่าวัสดุชนิดที่ 1 ในแง่ของความมั่นคงที่ผิวสัมผัส (Interfacial stability) วัสดุในกลุ่มนี้มีรูตาข่ายที่กำหนดลักษณะได้ เพื่อให้เนื้อเยื่อสามารถเจริญเติบโตเข้าไปยังรูพรุนที่ผิววัสดุนี้

3) ชนิดที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิวควบคุมได้ (controlled reactive surface) เป็นวัสดุที่วิจัยขึ้นก่อให้เกิดปฏิกิริยา

เนื้อเยื่อตามที่ต้องการบริเวณผิววัสดุ เนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นสามารถประสานกันได้สนิทกับพื้นผิววัสดุเหมือนในธรรมชาติ

4) ปฏิกริยาดูดซึมได้ (Resorbable) เป็นวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้แทนหรือฝังในร่างกาย เมื่อถึงเวลาที่ทำหน้าที่ครบถ้วนสมบูรณ์แล้วจะเกิดการเสื่อมสลายของวัสดุ และไม่ปรากฏร่องรอยของปฏิกริยาระหว่างพื้นผิว วัสดุในกลุ่มนี้เป็นวัสดุที่ต้องการมากที่สุด แต่การผลิตทำได้ยากมากและในปัจจุบันมีน้อยชนิดมาก

3.2 ประเภทของวัสดุชีวภาพจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ในการผลิต

วัสดุชีวภาพสามารถแบ่งประเภทตามวัสดุที่ใช้ผลิต ได้ดังนี้

1) โลหะ (Metals) เช่น ไททาเนียมและโลหะผสม สแตนเลส ทองคำและเงิน เป็นต้น มีข้อดีคือ มีค่าความแข็งแรง แรงดึง และทนแรงกระแทกสูง ทนต่อการกัดกร่อนและมีความเหนียว แต่อาจเกิดการกัดกร่อนจากสารภายในร่างกายและปล่อยสารที่เป็นพิษต่อร่างกายได้ นอกจากนี้โลหะยังขึ้นรูปได้ยาก ตัวอย่างการนำไปใช้ในทางการแพทย์ เช่น ข้อต่อ รากฟันเทียม แผ่นโลหะยึดกระดูก เป็นต้น

2) พอลิเมอร์ (Polymer) เช่น ยาง ซิลิโคน เทฟลอน ไนลอน เป็นต้น โดยพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นดี ความหนาแน่นต่ำ และสามารถผลิตได้ง่าย แต่พอลิเมอร์ไม่แข็งแรงเกิดการเสียดสีสภาพเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ตัวอย่างการนำไปใช้งาน เช่น การเย็บตักแต่งบาดแผล ทำเส้นเลือดเทียม ข้อเทียม ข้อต่อมีเดือย จมูก และเนื้อเยื่ออ่อนต่างๆ เป็นต้น

3) เซรามิกส์ (ceramics) เช่น แคลเซียมฟอสเฟต ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นต้น วัสดุประเภทนี้เข้ากันได้กับร่างกาย ทนต่อการกัดกร่อนและมีความว่องไวทางชีวภาพ แต่เซรามิกส์มีความเปราะและไม่ยืดหยุ่น ตัวอย่างการใช้งานทางการแพทย์ เช่น ฟันปลอม ข้อต่อ หัวกระดูกเทียม เคลือบกระดูกและฟัน เป็นต้น

4) วัสดุผสม (composites) มีความแข็งแรงและมีสมบัติเชิงกลที่หลากหลายสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับส่วนต่างๆ ของร่างกายได้ แต่มีขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยากกว่าวัสดุประเภทอื่น ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ ข้อต่อส่วนที่รับน้ำหนักมาก หัวใจเทียม ก้านข้อต่อเทียม เป็นต้น

3.3 วัสดุชีวภาพจำแนกตามกลไกการยึดติดระหว่างพื้นผิวเนื้อเยื่อ [3]

วัสดุเซรามิกส์ชีวภาพสามารถแบ่งตามกลไกการยึดติดระหว่างเนื้อเยื่อกับเซรามิกส์ชีวภาพได้ 4 ประเภท ได้แก่

1) Inert crystalline ceramics

สมบัติความหนาแน่นสูงและความบริสุทธิ์ของ Al_2O_3 สูง (> 99.5%) จึงเป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นข้อสะโพกเทียมและฟันเทียมที่ต้านทานการสึกกร่อนได้ดีมาก เข้ากับเนื้อเยื่อร่างกายได้ดี ทนทานต่อการใช้ สึกหรอช้าและมีความแข็งแรง โดยนำมาใช้งานในลักษณะรูปผลึกเล็กๆ ซึ่งจะให้ strength, failure resistance and fracture toughness ที่ดี จากงานวิจัยพบว่า Al_2O_3 ที่มีขนาดเม็ดผลึกเล็กๆ (4 ไมโครเมตร และความบริสุทธิ์ 99.7%) จะให้ compressive strength 5,00 N/mm² แต่น้ำเกลือ Ringer's solution จะทำให้สมบัติดังกล่าวลดลงถึง 50%

2) Porous ceramics

ข้อได้เปรียบของวัสดุชนิดนี้คือ เป็นวัสดุที่มีความเฉื่อยและความมั่นคงเชิงกลดี เนื่องจากมีกระดูกใหม่งอกเข้าไปในรูพรุนของผิววัสดุ อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของวัสดุชนิดนี้ยังไม่เพียงพอที่จะใช้ประโยชน์ในการรับน้ำหนัก แต่เหมาะสำหรับทดแทนอวัยวะอื่นที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมาก จากการศึกษาพบว่าขนาดรูพรุนที่มากกว่า 100 ไมโครเมตรทำให้กระดูกใหม่สามารถงอกเข้าไปได้และทำให้เส้นเลือดใหม่ติดตามเข้าไปด้วย ความมั่นคงถาวรจึงอยู่ได้นาน

3) Surface active ceramics

คือวัสดุที่มีผิวเกิดปฏิกริยาชนิดพันธะเคมีกับเนื้อเยื่อโดยตรงเมื่อฝังวัสดุในร่างกาย ความสามารถในการรับแรงไม่เปลี่ยนแปลง เพราะมีปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างวัสดุและเนื้อเยื่อ และสามารถใช้วัสดุนี้เป็นตัวเคลือบวัสดุอื่นที่มีความแข็งแรงมาก จากการศึกษาวัสดุ bioglass – ceramics การเกิดปฏิกริยาพื้นผิวอย่างต่อเนื่องซ้ำๆ กันทำให้เกิด

ผลึก hydroxyapatite บริเวณผิววัสดุเมื่อสัมผัสกับ collagen matrix อีกประมาณ 2 – 3 สัปดาห์ต่อมาจะกลายเป็นกระดูกใหม่มีแร่ธาตุมาสะสม เกิดความมั่นคงแข็งแรงของการยึดติดกับกระดูกใหม่เป็นอย่างมาก

4) Resorbable ceramics

วัสดุเซรามิกส์ที่มีคุณค่าเทียบเท่ากับกระดูกร่างแหในคน เมื่อมองในแง่ของการนำมาใช้แทนส่วนกระดูกในร่างกายที่สูญหาย ทั้งนี้เพราะวัสดุประเภทนี้สามารถปรับตัวเป็นเนื้อเดียวกับกระดูกข้างเคียงได้จากสมบัติของเซลล์ทำลายกระดูกเอง แล้วมีเนื้อเยื่อกระดูกอ่อนเกิดขึ้นมาแทนที่และทำหน้าที่แทนกระดูกได้ จึงขจัดปัญหาเรื่องความทนทานจากการสึกกร่อนหรือปฏิกิริยาที่ผิดปกติของเนื้อเยื่อ แต่มีข้อเสียเปรียบคือ ระหว่างกระบวนการปรับสภาพประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของวัสดุชนิดนี้จะน้อยลง ทำให้หักได้ จึงจำเป็นต้องมีเครื่องช่วยรับน้ำหนักชั่วคราวร่วมด้วย และวัสดุชนิดนี้ต้องผลิตจากวัสดุที่ร่างกายยอมรับเท่านั้น ทั้งนี้เพราะในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (resorption process) จะมีการปล่อยไอออนออกมาในปริมาณสูง

ตารางที่ 1 การจำแนกประเภทของเซรามิกส์ตามกลไกการยึดติดและตัวอย่าง

ชนิดของวัสดุ	ชนิดของกลไกการยึดติด	ตัวอย่าง
Nearly inert	ยึดติดด้วยโครงสร้างทางกายภาพ	อลูมินา (Al_2O_3) เซอร์โคเนีย (ZrO_2)
Porous	ยึดติดด้วยการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อเข้าไปในรูพรุน	ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) โลหะที่มีรูพรุนเคลือบด้วย HA
Bioactive	ยึดติดด้วยพันธะเคมี	Bioactive glasses HA
Resorbable	ถูกแทนที่ด้วยเนื้อเยื่อ	Bioactive glasses Tricalcium phosphate

4. สมบัติของวัสดุชีวภาพ [3]

- 1) Biocompatibility หมายถึง ความสามารถที่เข้ากับเนื้อเยื่อกระดูกในร่างกายได้ ทำให้มีการเจริญของเนื้อเยื่อกระดูกผสมเข้าไปภายในสารทดแทนกระดูกจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาซึ่งส่งผลให้มีการสร้างเนื้อเยื่อรอบๆวัสดุที่ใส่ทดแทน
- 2) Biodegradability หมายถึง ความสามารถที่จะค่อยๆ ถูกย่อยสลายโดยกลไกต่างๆ ภายในร่างกาย ซึ่งจะช่วยให้วัสดุชีวภาพที่ใช้ค่อยๆ ถูกกำจัดออกไปจากตำแหน่งที่ใส่หลังจากมีการเจริญของเนื้อเยื่อกระดูกเข้าไปแทนที่แล้ว จนในที่สุดจะสลายตัวไป วัสดุชีวภาพที่ดีควรสามารถถูกร่างกายย่อยสลายและกำจัดออกไปได้หมด ซึ่งอัตราการสลายตัวของวัสดุชีวภาพที่ดีจะต้องสอดคล้องกับอัตราการเจริญของเนื้อเยื่อกระดูกที่เข้าไปแทนที่ เพราะถ้าการสลายตัวเกิดขึ้นเร็วไป จะทำให้บริเวณที่ใส่วัสดุชีวภาพขาดความแข็งแรงและเกิดการแตกหักได้ เมื่อได้รับแรงกระทำ เนื่องจากการเจริญของกระดูกยังเข้าไปไม่มากพอที่จะทำหน้าที่แทนได้ แต่ถ้าการสลายตัวเกิดช้าหรือไม่มีการสลายตัว วัสดุชีวภาพนั้นก็จะเป็นตัวขัดขวางการเจริญของเนื้อเยื่อกระดูก ทำให้เนื้อเยื่อกระดูกไม่สามารถเจริญเข้าไปแทนที่ได้ ซึ่งจะมีผลต่อชีวกลศาสตร์ของกระดูกส่วนนั้นในระยะยาว
- 3) ความแข็งแรง วัสดุชีวภาพส่วนใหญ่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาในส่วนของกระดูกที่บกร่อง การใช้วัสดุชีวภาพขนาดต่างๆ ใส่ทดแทนต้องพิจารณาถึงความแข็งแรงของวัสดุชีวภาพที่ใช้ ดังตารางที่ 2 โดยเฉพาะการใช้กับกระดูกที่ต้องรับน้ำหนักมาก วัสดุชีวภาพที่มีสมบัติอ่อนดีแต่มีความเปราะจะมีโอกาสนำไปใช้งานได้จำกัดเมื่อเทียบกับวัสดุชีวภาพที่มีความแข็งแรง
- 4) Osteoinductive capabilities หมายถึง ความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เนื้อเยื่อกระดูกโดยรอบตำแหน่งที่รับ (Recipient) มีการเจริญเข้าไปในรูพรุนของวัสดุชีวภาพที่ใช้ โดยความสามารถนี้เป็นจุดสำคัญจุดหนึ่ง

ต้องการและมีความพยายามในการพัฒนาให้วัสดุชีวภาพที่ได้มีสมบัติข้อนี้ ด้วยสมบัตินี้ทำให้กระดูก Autograft ดีกว่าวัสดุชีวภาพชนิดอื่นๆ ที่มีอยู่ ความพยายามที่จะทำให้วัสดุชีวภาพมีความสามารถในการเหนียวแน่นเนื้อเยื่อกระดูกยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร จึงเป็นเหตุให้ต้องมีการผสมสารหรือส่วนประกอบอื่นๆ เช่น การใช้ Bone morphogenetic protein (BMP) หรือการใช้ไขกระดูกหรือส่วนประกอบบางส่วนจากไขกระดูก หรือเลือดของผู้รับเอง เป็นต้น

- 5) Bioinert หมายถึง วัสดุชีวภาพที่ใช้ต้องเป็นสารที่มีความเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นโดยง่าย สมบัติข้อนี้ทำให้ทำให้สามารถนำวัสดุชีวภาพไปผสมกับสารอื่นที่จำเป็นได้โดยไม่ทำปฏิกิริยาต่อกัน เช่น ยาปฏิชีวนะ เป็นต้น
- 6) Bioactivity หมายถึง วัสดุชีวภาพที่ใช้ต้องสามารถตอบสนองทางชีวภาพได้ดีคือ ช่วยทำให้เนื้อเยื่อกระดูกสามารถเจริญภายในวัสดุชีวภาพได้และสามารถเชื่อมต่อกับกระดูกรอบๆได้ดี

ตารางที่ 2 ความต้านแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุชีวภาพและกระดูก [7]

Material	Tensile strength (MPa)
Bone	60 – 160
Cancellous bone	3
Hydroxyl apatite	80
Bioglass [®]	42
Bioglass [®]	5.54
Bioglass [®] /polyethylene	10.15
Bioglass [®] /polysulfone	1.5
Apatite-wollastonite glass-ceramic /polyethylene	14.87

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของกระดูกซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ [4]

ชนิดของซีเมนต์	Additive (%)	L/P ratio	เวลาการเซ็ตตัวเริ่มต้น (นาที)	เวลาการเซ็ตตัวสมบูรณ์ (นาที)	ความแข็งแรง (compressive strength, MPa)
ความต้องการทางแพทย์			$3 \leq I < 8$	$F \leq 15$	≥ 30
90% α -TCP+5%PHA+5%CaCO ₃	2.5%Na ₂ HPO ₄	0.32	7	14.5	36
	4%Na ₂ HPO ₄	0.32	6	11	35
		0.35	6.5	15	35
90% α -TCP+2%PHA+8%CaCO ₃	4%Na ₂ HPO ₄	0.32	7.5	15	38
95% α -TCP+5%DCPD	-	0.3	5	14	3
	Gelatin	0.3	4	10	14
58% α -TCP+8.5%PHA+25DCP+8.5%CaCO ₃	4%sodium dextran sulfate	0.35	5.3	14	36
58% α -TCP+8.5%PHA+25DCP+8.5%CaCO ₃	1% β -cyclodextrin	0.35	8	15	39

5. วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) [5]

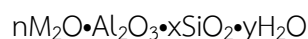
วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์วัสดุที่มีสารประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก หรือเรียกว่าวัสดุพอสโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว ดินขาวเผา เป็นต้น โดยเมื่อผสมกับสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูง และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา พอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีสมบัติในการยึดประสานและมีสมบัติคล้ายซีเมนต์ ซึ่งสามารถก่อตัวและแข็งตัวให้มีความรับแรงอัด โดยปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เกิดขึ้นจากการนำสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงมากระตุ้นวัสดุที่มีซิลิเกต (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ โดยใช้สารละลายต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต เป็นต้น ซึ่งจะทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain) ซึ่งอาจใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย แต่การสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องผ่านอุณหภูมิสูงได้เหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างซิลิกาและอลูมินาที่อยู่ในรูปสายโซ่พอลิเมอร์โครงสร้าง 3 มิติ ของ Si-O-Al-O โดยโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะจัดเรียงอยู่ในรูปแบบ 3 รูปแบบ คือ poly(sialate) (-Si-O-Al-O), Poly(sialate-siloxo) (Si-O-Al-O-Si-O) และ poly(sialate-disiloxo) (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O) โดยความแข็งแรงภายในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันของซิลิเกตและอลูมินา ซึ่งกลไกการเกิดมีทั้งหมด 5 ขั้นตอน คือ

- 1) ขั้นตอนการชะละลาย เป็นขั้นตอนที่สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะเข้าไปชะละลายแหล่งอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate source) ทำให้ซิลิเกตและอลูมินาหลุดออกจากผิววัตถุตั้งต้น
- 2) ขั้นตอนสภาวะสมดุลจำเพาะ เกิดหลังจากขั้นตอนการชะละลาย โดยซิลิเกตและอลูมินาจะถูกปลดปล่อยอยู่ในรูปมอนอเมอร์อย่างอิสระในสารละลายที่มีสภาวะสมดุล
- 3) ขั้นตอนการกลายเป็นเจล การละลายของสัณฐานอลูมิโนซิลิเกตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าพีเอชสูง และเกิดเป็นสารละลายอลูมิโนซิลิเกตอิ่มตัว (Supersaturated aluminosilicate solution) อยู่ในรูปของเจล (Gel) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ในรูปแบบสภาวะที่มีน้ำโครงสร้างใหญ่ โดยการควบแน่นโครงสร้างของเจลมี 2 เฟส คืออลูมิโนซิลิเกตและน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่เหลือในโพรงเจลออกมา
- 4) ขั้นตอนการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ และมีการปลดปล่อยน้ำ
- 5) ขั้นตอนการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยผ่านกระบวนการเกิดพอลิคอนเดนเซชัน เกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงของอลูมิโนซิลิเกตหนาแน่นมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง

6. โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ [5]

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิเกต (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) โดยเกิดการเชื่อมโยงของอลูมิโนซิลิเกตในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ และ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ โดยโมเลกุลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า sialate (Si-O-Al) โดยมีโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม (Na^+) หรือ โพแทสเซียม (K^+) ในการทำให้ประจุสมดุลที่ตำแหน่งของ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ นอกจากนี้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ในสารตั้งต้น โดยหน่วยโครงสร้างพื้นฐานโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์แสดงได้ดังสูตรโครงสร้างต่อไปนี้



โดย	M	คือ โลหะอัลคาไล (เช่น โซเดียม, โพแทสเซียม, แคลเซียม)
	n	คือ จำนวนของโมเลกุลลูกโซ่ (polycondensation)
	x	คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
	y	คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

วัสดุจีโอพอลิเมอร์จะมีการเรียกชื่อสายโซ่โมเลกุลตามโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอะตอม Si : Al ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ชนิดของจีโอพอลิเมอร์

Si : Al	หน่วยโมเลกุล	ชื่อเรียกโมเลกุล	ชื่อเรียกพอลิเมอร์
0	-Si-O-Si-O-	siloxo	poly (siloxo)
1	-Si-O-Al-O-	sialate	poly (sialate)
2	-Si-O-Al-O-Si-O-	sialate-siloxo	poly (sialate-siloxo)
3	-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	sialate-diiloxo	poly (sialate-disiloxo)
	-P-O-P-O-	phosphate	poly (phosphate)
	-P-O-Si-O-P-O-	Phospho-siloxo	poly (phospho-siloxo)
	-P-O-Si-O-Al-O-P-O-	Phospho-sialate	poly (phosphor-sialate)
	-(R)-Si-O-Si-O-(R)	Organo-siloxo	poly - silicone
	-Al-O-P-O-	Alumino-phospho	poly (alumino-phospho)
	-Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O-	Ferro-sialate	poly (ferro-sialate)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยมาจากกระบวนการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และโรงไฟฟ้า BLCP ซึ่งมีลักษณะผงละเอียด โดยเถ้าลอยจะถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF (X – ray fluorescence), วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD (X – ray diffractometer), วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าลอยด้วย SEM (Scanning electron microscope), วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS (Atomic absorption spectroscopy)

2. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นต่างที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยชั่งน้ำหนักสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 โดยโมล หลังจากนั้นนำมาละลายด้วยน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับการสังเคราะห์

3. การเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะต้องทำการหาสัดส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อวัสดุยึดประสาน โดยวิธีการหาความชื้นเหลือปกติของมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C 187 – 68 ด้วยชุดทดสอบไวแคต (Vicat apparatus) ทำการเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.0 มิลลิเมตร และสูง 76.0 มิลลิเมตร ทำการอัดวัสดุผสมให้แน่น และไล่ฟองอากาศโดยใช้โต๊ะเขย่าทำการเขย่าประมาณ 1 นาที จากนั้นนำแบบหล่อมาหุ้มด้วยถุงพลาสติกเพื่อรักษาปริมาณน้ำในกระบวนการเกิดปฏิกิริยา นำแบบหล่อที่หุ้มด้วยพลาสติกไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 – 20 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบหล่อออกและหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกนำไปบ่มต่อที่ระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างที่ครบอายุการบ่มจะถูกนำมาวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D1633 - 07 และค่าความหนาแน่น

4. การบำบัดด้วยความร้อน

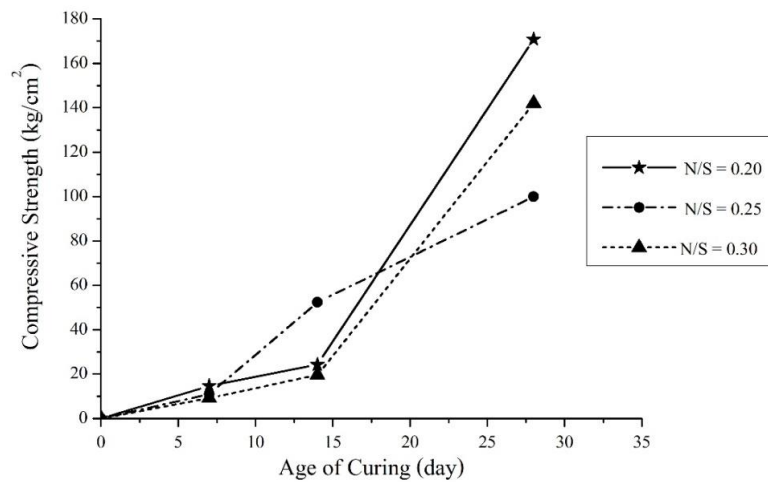
การนำก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มาบำบัดด้วยความร้อนเพื่อช่วยลดความเป็นต่าง โดยตัวอย่างที่ผ่านการบ่มแล้วจะถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิ 550 – 600 องศาเซลเซียส

อภิปรายผล

1. การศึกษาผลของอัตราส่วนสารโซเดียมไดออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์

1.1 ผลของกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตาและผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์

ผลการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นสารตั้งต้นโดยการร่อนผ่านน้ำด้วยตะแกรงเบอร์ 325 ให้มีคาร์บอนการค้ำบนตะแกรงอยู่ที่ไม่เกิน 34 จากนั้นนำมาผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์



รูปที่ 1 ผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าก้นเตา

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นค่าการพัฒนา กำลังอัดของวัสดุจีโอโพลีเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตาที่บ่มในอุณหภูมิห้อง ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 พบว่าวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีการพัฒนา กำลังอัดอย่างต่อเนื่อง โดยที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน เท่ากับ 14.65 กก./ซม.² เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมนี้มีค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาต่ำที่สุด เป็นผลให้การชะละลายไอออนของ Si^{4+} และ Al^{3+} ออกมาจากเถ้าก้นเตาในปริมาณน้อย นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันที่ลดลงและในช่วงแรกเกิดการพัฒนากำลังอัดที่ช้า และที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 170.82 กก./ซม.² ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 มีการพัฒนา กำลังอัดอย่างรวดเร็วเมื่ออายุบ่มมากกว่า 14 วัน สาเหตุมาจากปริมาณ Si^{4+} และ Al^{3+} มีการชะละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้มีกำลังอัดสูงในช่วงปลาย

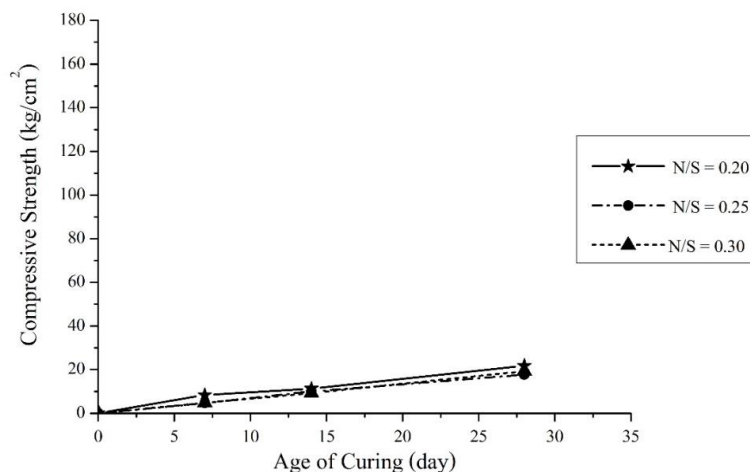
เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เป็น 0.25 พบว่าวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีการพัฒนา กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ โดยที่อายุบ่ม 7 วัน ได้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 10.95 กก./ซม.² และที่อายุบ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 99.99 กก./ซม.² เมื่อพิจารณาที่อายุบ่ม 7 วันแรก วัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีการพัฒนา กำลังอัดช้า และในช่วงอายุบ่มมากกว่า 7 วันจนถึง 28 วัน พบว่าวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีการพัฒนา กำลังอัดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาสูง จึงทำให้อัตราการชะละลายสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตออกมาเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันอย่างรวดเร็ว ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในก้อนจีโอโพลีเมอร์ จึงได้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าสัดส่วนผสมที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20

ส่วนการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 พบว่ามีการพัฒนา กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วง 14 วันแรกจีโอโพลีเมอร์มีการพัฒนา กำลังอัดเข้า โดยที่อายุบ่ม 14 วัน ได้ ค่ากำลังอัดเท่ากับ 19.56 กก./ซม.² เนื่องจากอัตราส่วนนี้มีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณสูง ทำให้มีความ เป็นด่างสูง ส่งผลให้การชะละลายสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น เกิดการอิมตัว ทำให้เกิดการตกตะกอน เมื่อ เวลาผ่านไปตะกอนมีจำนวนมากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างลง และที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 141.96 กก./ซม.² เป็นผลมาจากเมื่อระยะเวลาผ่านไป Si^{4+} และ Al^{3+} ที่ชะละลายออกมาจากเถ้ากันเตา แยกตัวออกมาจาก ตะกอน ทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์โรเซชันอีกครั้งหนึ่ง เป็นผลให้มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาเทียบกับ สัดส่วนผสมที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 พบว่าได้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า คาดว่าเกิดจากการตกตะกอนที่ เกิดขึ้นในช่วงแรกอาจทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างไม่เป็นระเบียบเท่ากับสัดส่วนผสมที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ขวัญเรือน จันทวงศ์ และคณะ (2557)

จากการทดสอบสัดส่วนผสมของวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.30 พบว่าวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดทุกอายุการบ่ม โดยที่ อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่มีอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ที่สูงขึ้น ทำให้แนวโน้มของกำลังอัดมี ค่าลดลง อาจเป็นผลมาจากปริมาณโซเดียมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเป็นด่างในวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิด เร่งการชะละลายของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต รวมทั้งเร่งการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์โรเซชันเช่นกัน ส่งผลให้การ จัดเรียงตัวในโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิเชียร ชาลี และกิตติกร เจริญพร้อม (2555) และในกรณีที่อัตราส่วนผสมของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ มีมากเกินไปจะทำให้เกิดการอิมตัว ส่งผลให้เกิด การตกตะกอนของโซเดียม และเมื่อเกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้าง คาดว่าตะกอนเหล่านั้นมีส่วนช่วยให้โครงสร้าง แข็งแรงมากขึ้น

1.2 ผลของกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์สังเคราะห์จากเถ้ากันเตาที่ผสมสารโซเดียมฟอสเฟต

ผลการศึกษา กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้ากันเตาผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โม ลาร์ และสารโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มเติมในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้ากันเตาที่มีการผสมสารโซเดียมฟอสเฟตในปริมาณร้อยละ 5 โดย น้ำหนัก

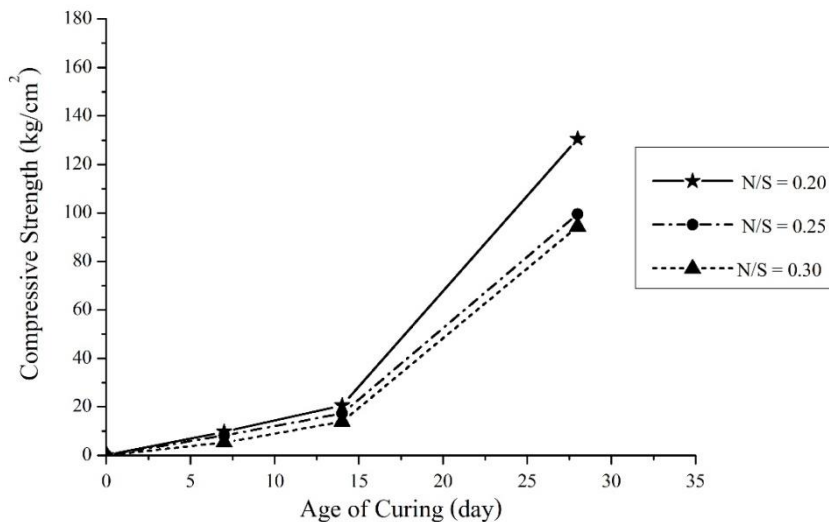
จากรูปที่ 2 ค่าการพัฒนา กำลังอัดของวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่มีการผสมสารโซเดียมฟอสเฟต พบว่าค่ากำลัง อัดมีค่าลดลง โดยมีค่าต่ำกว่าจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่มีการเติมสารโซเดียมฟอสเฟต โดยที่อายุบ่ม 28 วัน จีโอโพลีเมอร์ เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.30 มีค่ากำลังอัดไม่เกิน 30 กก./ซม.² คาดว่าเป็นเพราะเมื่อ

ผสมสารโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความเป็นด่างมากเกินไป เกิดการอิมตัวและตกตะกอน อีกทั้งการชะละลายของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตมีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duxon, et al. (2005) ส่งผลให้เกิดการหน่วงของปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน และการผสมสารโซเดียมฟอสเฟต ทำให้มีองค์ประกอบของฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันเช่นกัน

โดยที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 วัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีการพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งค่ากำลังอัดเท่ากับ 21.80 กก./ cm^2 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เป็น 0.25 และ 0.30 ได้ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 17.65 และ 19.24 กก./ cm^2 ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่มีการผสมสารโซเดียมฟอสเฟตมีค่ากำลังอัดที่ต่ำใกล้เคียงกันกับที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ G M Sadiqul Islam (2017) ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มฟอสเฟตในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้กำลังอัดที่ลดลง คาดว่าฟอสเฟตเข้าไปหน่วงปฏิกิริยาทำให้การพัฒนา กำลังอัดไม่ดีเท่าที่ควร

1.3 ผลของกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตาที่ผสมสารแคลเซียมฟอสเฟต

ผลการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าก้นเตาผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารแคลเซียมฟอสเฟตเพิ่มเติมในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงดัง รูปที่ 3

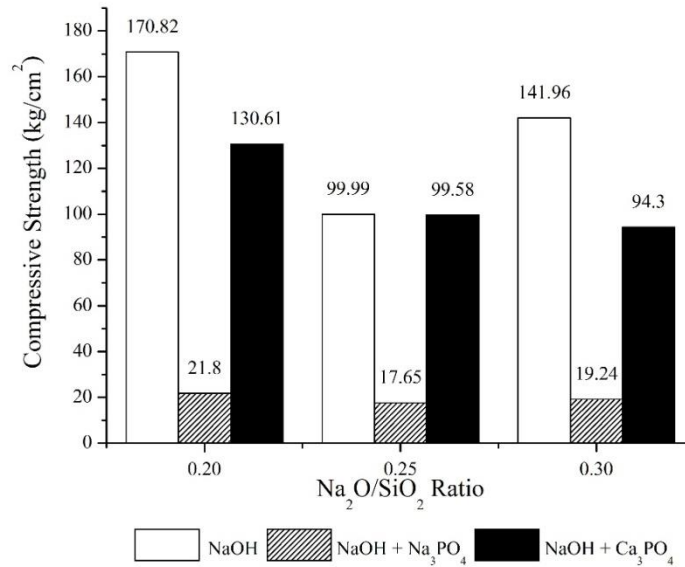


รูปที่ 3 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าก้นเตาที่มีการผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นการพัฒนา กำลังอัดของวัสดุจีโอโพลีเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตาที่ผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเถ้าก้นเตา พบว่า ในช่วง 1 ถึง 14 วัน การพัฒนา กำลังอัดเป็นไปอย่างช้า ๆ เพราะการเติมสารแคลเซียมฟอสเฟต ทำให้วัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีด่างเพิ่มมากขึ้น อาจเป็นไปได้ว่าเกิดการชะละลายของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตอย่างรวดเร็ว จนเกิดการตกตะกอน และในช่วงอายุบ่มที่ 14 ถึง 28 วัน เกิดการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสานกับสารเคมี ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันที่เกิดจากการที่ซิลิกอนไดออกไซด์กับอะลูมิเนียมออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจากอะลูมิเนียมกับซิลิกอนทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากแคลเซียมฟอสเฟต และปฏิกิริยาไฮดรอกซีแอปาทิตเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอสเฟต แคลเซียม และ $\text{OH} - \text{Base}$

จีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 มีการพัฒนากำลังอัดช่วง 14 ถึง 28 วัน จาก 20.65 กก./ cm^2 เป็น 130.61 กก./ cm^2 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เป็น 0.25 การพัฒนากำลังอัดช่วง 14 ถึง 28 วัน เพิ่มขึ้นจาก 17.22 กก./ cm^2 เป็น 99.58 กก./ cm^2 ส่วนการพัฒนากำลังอัดของวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 มีค่ากำลังอัดเพิ่มจาก 13.89 กก./ cm^2 เป็น 94.30 กก./ cm^2

เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดกับจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตพบว่ามีการเพิ่มกำลังอัดที่ต่ำกว่าจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผสมสารเพิ่ม คาดว่าเกิดจากการผสมสารแคลเซียมฟอสเฟต แล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซีแอลไพโทดที่ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงลดลง ทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผสมสารใด ๆ เพิ่มเติม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของปิยะพงษ์ ปานแก้วและภทริณี คลุมดวง (2559)



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าก้นเตาที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4 พบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน วัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน และเกิดการชะละลายไอออนของ Si^{4+} และ Al^{3+} ออกมาจากวัสดุจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันอย่างช้า ๆ เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้น ทำให้โครงสร้างของวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์เกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้แนวโน้มความสามารถรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่มีอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ที่สูงขึ้น มีแนวโน้มของกำลังอัดที่ลดลง อาจเพราะปริมาณของด่างในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีมากเกินไป

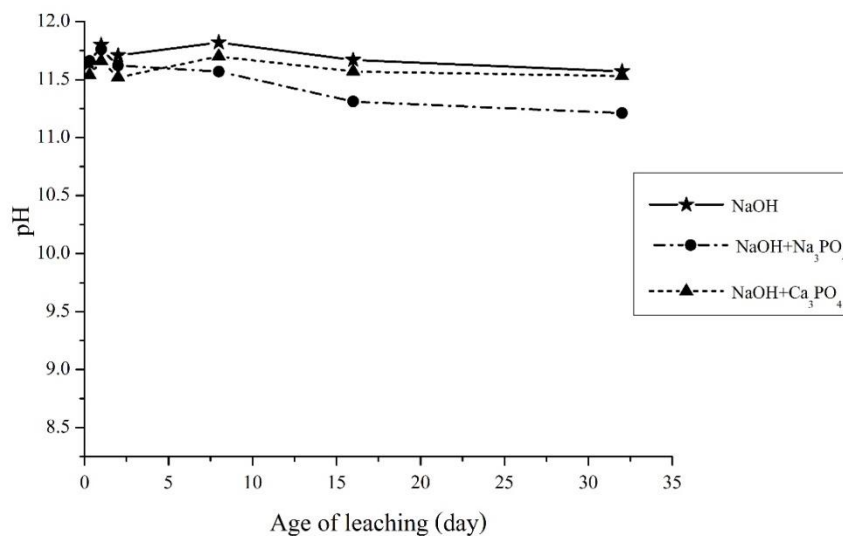
เมื่อมีการผสมสารโซเดียมฟอสเฟตในจีโอโพลีเมอร์เพสต์ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้าก้นเตาพบว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาหลัก และยังมี การผสมโซเดียมฟอสเฟต ทำให้มีปริมาณ Na_2O ที่มีอยู่ในวัสดุจีโอโพลีเมอร์สูง ทำให้มีปริมาณโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์เพสต์เกิดตกตะกอน ซึ่งแสดงจากการสังเกตพบผลึกขาวรอบก้อนตัวอย่างนอกจากนั้น PO_4 อาจจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์ ทำให้การพัฒนากำลังอัดต่ำ

ส่วนกำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้าก้นเตา พบว่า วัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีค่ากำลังอัดที่สูง แต่ต่ำกว่าวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่เติมสารใดเพิ่ม อาจเป็นผลมาจากการเกิดไฮดรอกซีแอลไพโทดในตัวอย่าง ซึ่งสมบัติของไฮดรอกซีแอลไพโทดจะเป็นวัสดุที่มีความพรุน ซึ่งอาจจะเป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

2. ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์

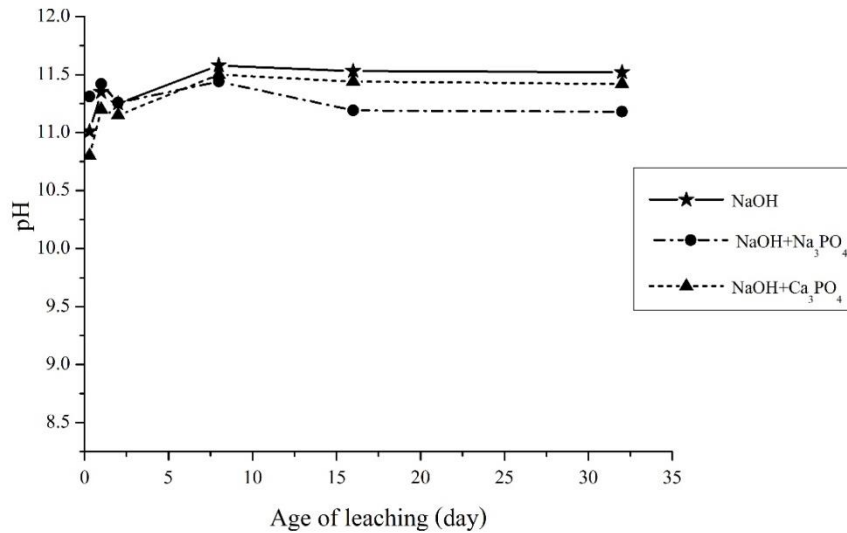
ค่าแสดงความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์เกิดขึ้นจากสารอัลคาไลที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยานั้นคือ NaOH มีความเป็นเบสสูงจึงส่งผลให้สารผลิตภัณฑ์หรือจีโอโพลีเมอร์ที่ได้ออกมามีความเป็นเบสสูง โดยปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อลดค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ โดยแบ่งเป็นจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผ่านการเผาให้ความร้อน ผ่านการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส การทดสอบเพื่อหาความเป็นกรด-ด่าง ใช้หลักการแพร่แบบออสโมซิส (Osmosis) ซึ่งเป็นแพร่จากของเหลวที่มีความเข้มข้นน้อยสู่ของเหลวที่มีความเข้มข้นมาก เพื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายในระบบที่มีการแพร่ให้มีความสมดุลกัน โดยนำก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์เพสต์แช่ในน้ำปราศจากไอออนแล้วปล่อยให้ความเป็นกรด-ด่างแพร่ออกมาแล้วทำการบันทึกผล การเปลี่ยนน้ำตามเวลาที่กำหนดได้แก่ 3 ชั่วโมง 1 2 8 16 และ 32 วัน เปรียบเสมือนการเริ่มต้นการออสโมซิสใหม่ จนกว่าความเป็นกรด-ด่างของก้อนตัวอย่างจะเจือจางลง

จากการทดสอบก้อนตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าที่ช่วงเวลา 8 ชั่วโมงพบว่า มีค่าแสดงความเป็นกรด-ด่างที่แพร่ออกมาอยู่ในช่วงมากกว่า 11.50 ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่า อาจเกิดการแพร่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความเข้มข้นของต่างในก้อนตัวอย่างกับน้ำปราศจากไอออนมีความเข้มข้นที่แตกต่างกันมาก ทำให้ความเป็นกรด-ด่างที่แพร่ออกมามากกว่าปกติ จากนั้นเมื่อทำการเก็บค่าที่ระยะเวลา 8 ถึง 32 วันพบว่า ค่าแสดงความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่อายุการชะละลายที่ 32 วันอยู่ในช่วง 11.21 ถึง 11.57 แต่ในช่วงระยะดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะสามารถชะละลายความเป็นต่างออกจากตัวอย่างไปได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มลดลง



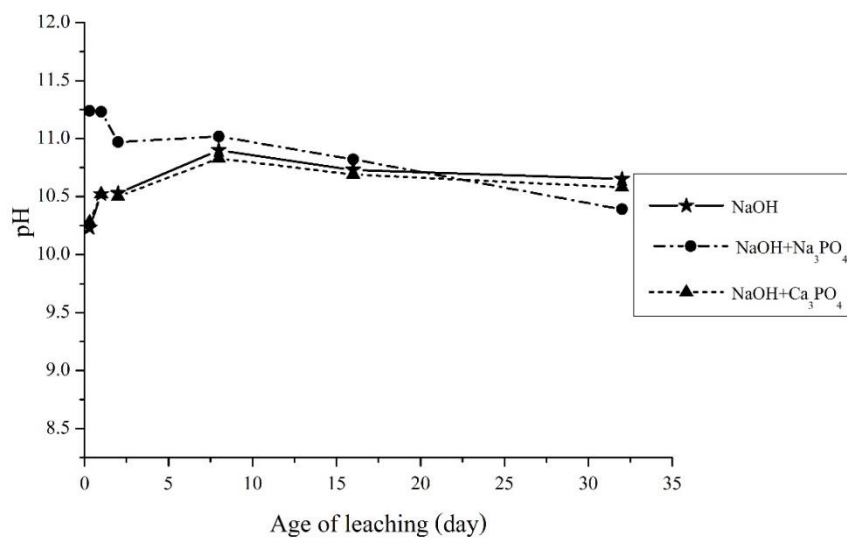
รูปที่ 5 ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผ่านการเผา

เมื่อนำจีโอโพลีเมอร์เพสต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มคล้ายกับจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผ่านการเผาแต่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่า โดยที่ 8 ชั่วโมงพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่แพร่ออกมาอยู่ในช่วง 10.8 ถึง 11.31 และที่ 32 วันพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่แพร่ออกมาอยู่ในช่วง 11.18 ถึง 11.52



รูปที่ 6 ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

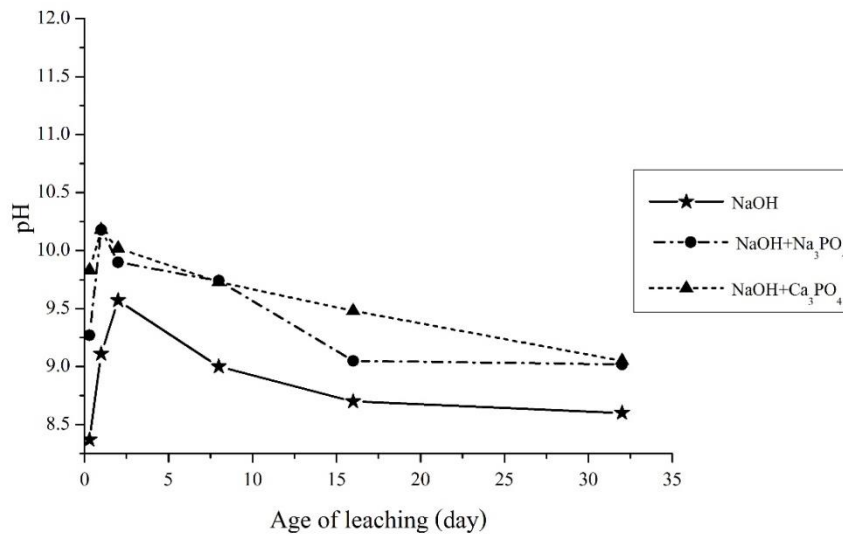
เมื่อนำจีโอโพลีเมอร์เพสต์ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มคล้ายกับจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่ผ่านการเผาและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แต่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่า โดยการชะละลายเริ่มต้นที่เวลา 8 ชั่วโมงมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 10.23 ถึง 11.24 และการชะละลายที่อายุ 32 วันมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 10.39 ถึง 10.65



รูปที่ 7 ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

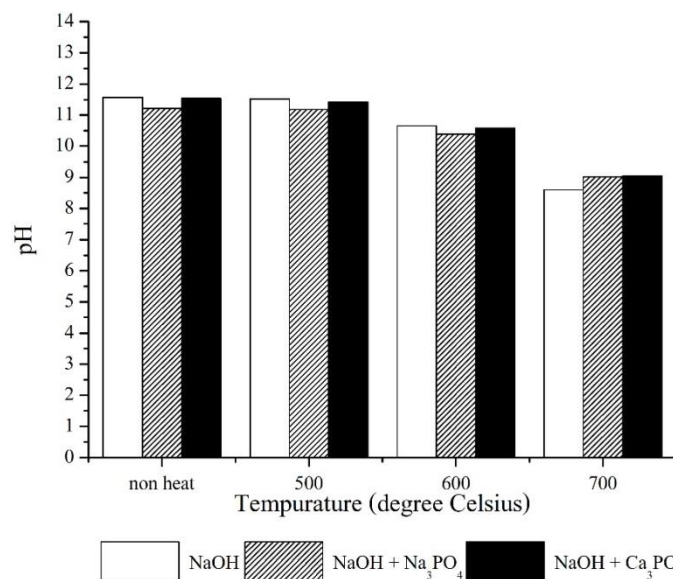
จากรูปที่ 8 มีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างจากกราฟอื่น ๆ โดยพบว่า การชะละลายที่เวลา 8 ชั่วโมงมีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อย เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการเผาทำให้ผิวบริเวณรอบ ๆ จีโอโพลีเมอร์เพสต์เปลี่ยนสภาพพลิกเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นกรด-ด่างลดลง การชะละลายที่เวลา 1 วันมีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น เนื่องจากน้ำที่ชะละลายแพร่เข้าสู่ภายในของก้อนจีโอโพลีเมอร์เพสต์ซึ่งเป็นส่วนที่โดนความร้อนน้อยที่สุด ทำให้มีความเป็นกรด-ด่างที่ยังคงตกค้างอยู่ในแพร่ออกมา และหลังจากการชะละลายที่เวลา 2 วันเป็นต้นไป

ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่มีแนวโน้มลดลงในระยะยาวเช่นเดียวกับตัวอย่างอื่น ๆ เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างที่หลงเหลืออยู่ถูกชะละลายออกมาในปริมาณที่น้อยลง

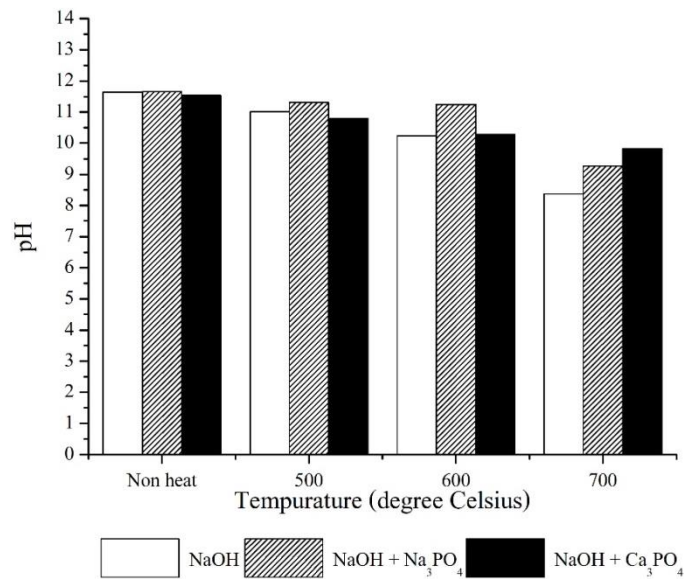


รูปที่ 8 ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบพบว่า จีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลง ซึ่งจากการทดลองจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการไม่ผ่านการเผามีค่าความเป็นกรด-ด่างมากที่สุด จีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียสมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำที่สุด ซึ่งจากผลการทดสอบนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Derrien (2004) และ Davidovits (2008) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากส่งผลให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์ผลึกใหม่ โดยที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป โครงสร้างและผลึกของจีโอโพลีเมอร์จะถูกปรับเปลี่ยนใหม่ให้มีความเป็นสัณฐานและมีความเป็นวัสดุเซรามิก และมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลง



รูปที่ 9 ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุการแพร่ 8 ชั่วโมง



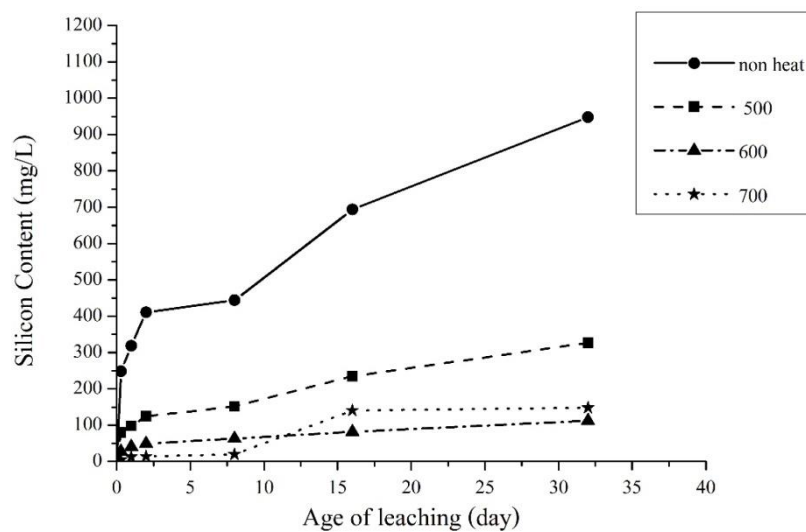
รูปที่ 10 ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุการแพร่ 32 วัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างที่ระยะเวลาการชะละลาย 8 ชั่วโมงและ 32 วันพบว่า การเผาจีโอโพลีเมอร์เพสต์ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ลดลง โดยการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสทำให้ค่าความเป็นด่างลดลงมากที่สุด

3. ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อการชะละลายของสารเคมีจากก้อนจีโอโพลีเมอร์ในน้ำปราศจากไอออน

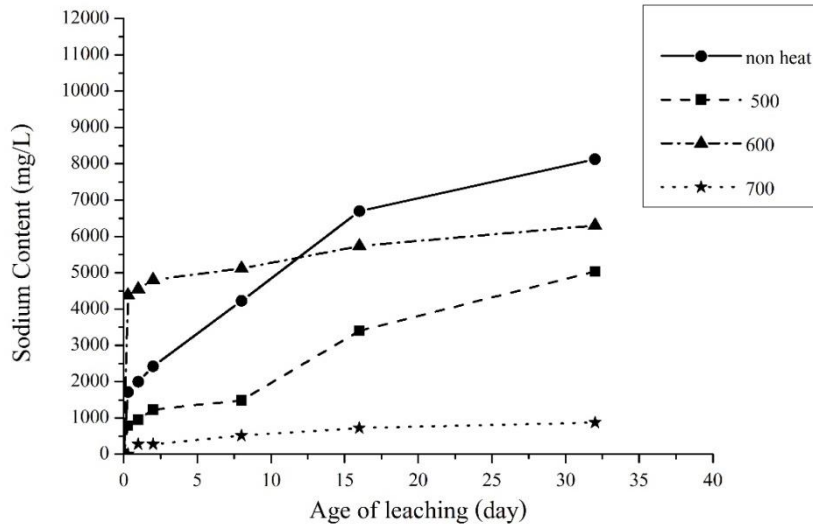
ในการศึกษาความเข้มข้นสะสมของก้อนจีโอโพลีเมอร์ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 ปมในอุณหภูมิห้อง และผ่านการเผาให้ความร้อน จากนั้นทำการชะละลายและวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS)

3.1 ความเข้มข้นสะสมของก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผ่านการเผาให้ความร้อนในอุณหภูมิต่าง ๆ



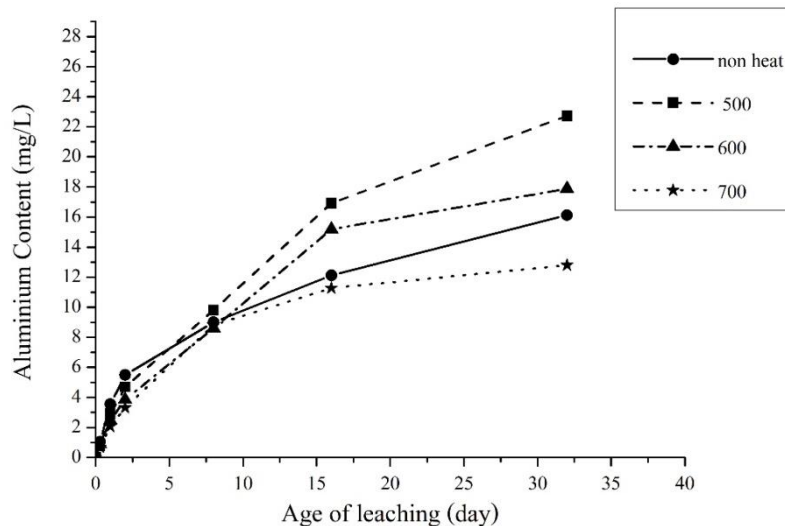
รูปที่ 11 ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์

จากรูปที่ 11 ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเผา มีค่าการชะละลายของซิลิกอนในน้ำชะสะสมที่ระยะเวลา 32 วัน เท่ากับ 947 มก./ลิตร และเมื่อทำการเผาก่อน จีโอโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนมีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนเท่ากับ 326 112 และ 147 มก./ลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 12 ค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์

จากรูปที่ 12 พบว่าค่าการชะละลายของอะลูมิเนียมมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องโดยก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่เผา และที่เผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 มีค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมเท่ากับ 16 22 17 และ 12 มก./ลิตร

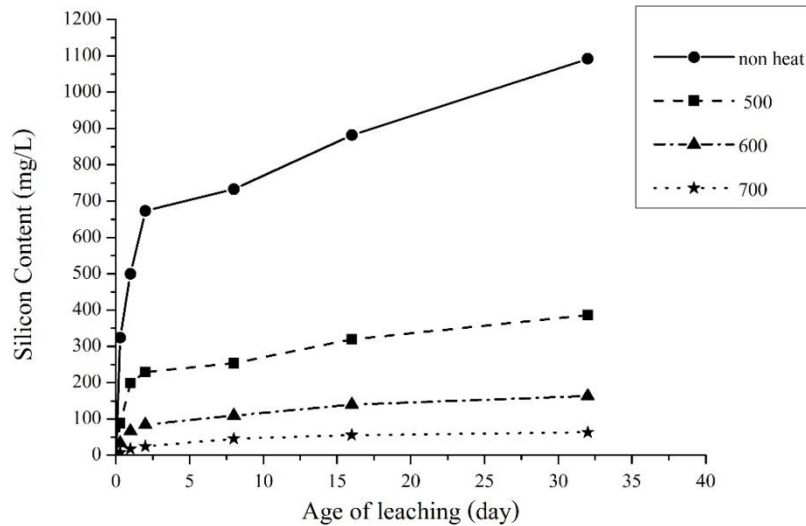


รูปที่ 13 ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในน้ำชะจากก้อนจีโอโพลีเมอร์พบว่า ก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเผามีการชะละลายของปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 32 วันเท่ากับ 8122 มก./ลิตร และที่การเผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 มีค่าเท่ากับ 5036 6302 และ 872 มก./ลิตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่าโซเดียมอาจจะไม่ถูกทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ หรือไม่อยู่ในรูปของสารประกอบที่ไม่

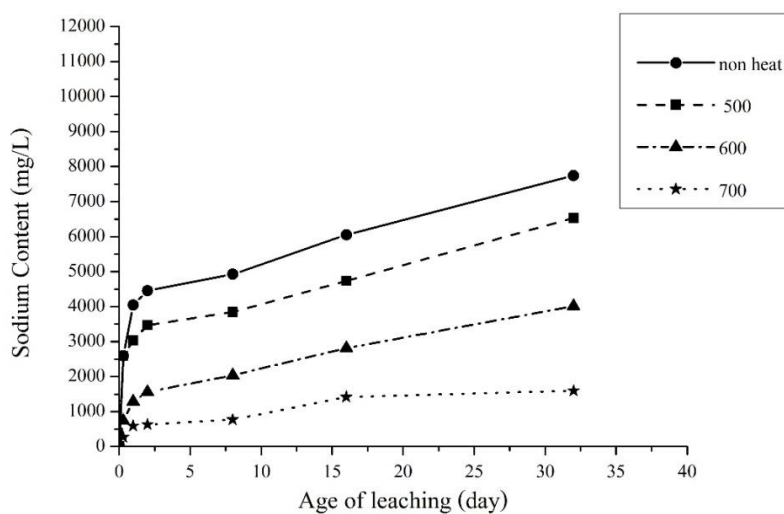
สามารถละลายได้ ทำให้เกิดการชะละลายความเข้มข้นออกมาได้จำนวนมาก ที่การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โซเดียมเปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ทำให้เกิดการชะละลายได้น้อย

3.2 ความเข้มข้นสะสมของก้อนจีโอโพลีเมอร์ ผสมสารโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5 และผ่านการเผาให้ความร้อนในอุณหภูมิต่าง ๆ



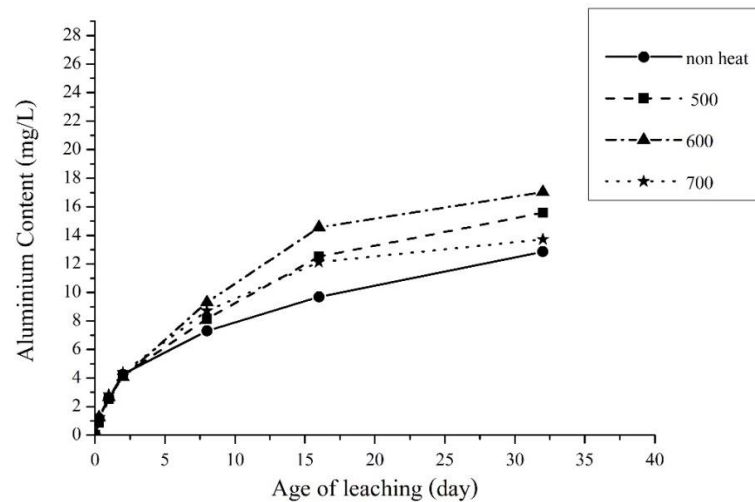
รูปที่ 14 ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟต

จากรูปที่ 14 ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมโซเดียมฟอสเฟตที่ไม่เผา มีค่าการชะละลายของซิลิกอนในน้ำชะสะสมที่เวลา 32 วันเท่ากับ 1091 มก./ลิตรและที่การเผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส เท่ากับ 386 162 และ 62 มก./ลิตร ตามลำดับ แนวโน้มที่เกิดขึ้นพบว่า ก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่เผาในช่วงเริ่มต้นถึง 2 วัน มีการแพร่ของซิลิกอนในปริมาณมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการแช่ในน้ำชะ และที่ก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่ผสมสารเพิ่ม กล่าวคือ มีแนวโน้มของความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนลดลง



รูปที่ 15 ค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟต

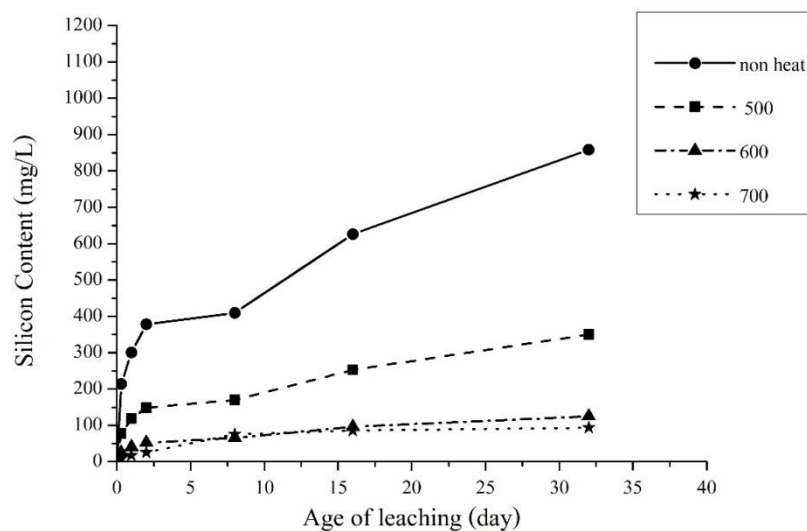
จากรูปที่ 15 ค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟตที่ไม่ผ่านการเผา มีค่าเท่ากับ 7741 มก./ลิตร และที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 6531 4012 และ 1594 มก./ลิตร เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มแล้วพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการเผาส่งผลให้ความเข้มข้นสะสมของโซเดียมลดลง ซึ่งที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสในช่วงแรกมีการชะละลายของโซเดียมในปริมาณมากและในช่วง 16 วันเป็นต้นไปมีการชะละลายของโซเดียมในปริมาณลดลง



รูปที่ 16 ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟต

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 16 ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมโซเดียมฟอสเฟตที่ไม่เผา มีค่าเท่ากับ 12 มก./ลิตร และที่เผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียสเท่ากับ 15 17 และ 13 มก./ลิตร ซึ่งมีแนวโน้มความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

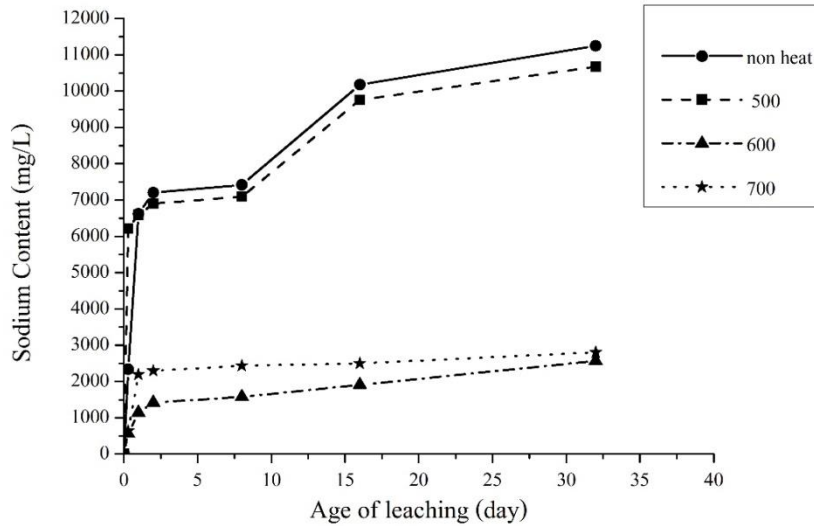
3.3 ความเข้มข้นสะสมของก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5 และผ่านการเผาให้ความร้อนในอุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 17 ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟต

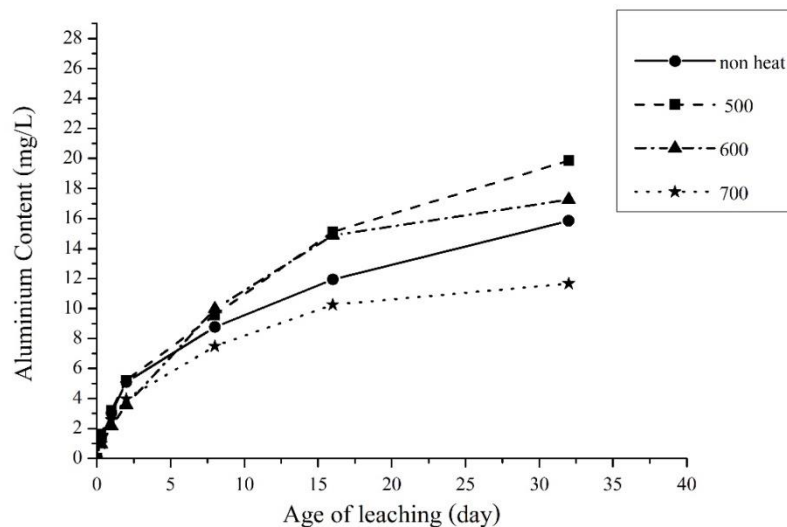
จากรูปที่ 17 ค่าความเข้มข้นสะสมของซิลิกอนในก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตที่ไม่เผา มีค่าเท่ากับ 858 มก./ลิตร และที่เผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียสเท่ากับ 349 125 และ 93 มก./ลิตร

ซึ่งแนวโน้มของก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตที่เผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีการแพร่ของซิลิกอนลดลงในช่วงเวลา 16 ถึง 32 วัน แต่ในกรณีที่ไม่เผายังคงมีปริมาณการแพร่ของซิลิกอนที่สูงขึ้นในช่วงเวลา 16 ถึง 32 วัน



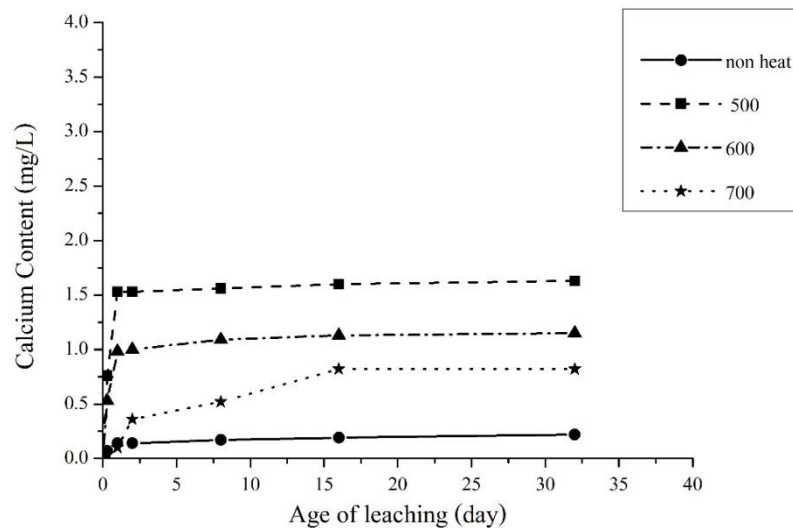
รูปที่ 18 ค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟตเพิ่ม

พิจารณาค่าความเข้มข้นสะสมของโซเดียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟตที่ไม่ผ่านการเผามีค่าเท่ากับ 11246 มก./ลิตร และที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 10674 2569 และ 2802 มก./ลิตร เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มแล้วพบว่า มีการแพร่ของโซเดียมอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นถึง 2 วัน ในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสยังคงมีการแพร่ของโซเดียมออกมาจากก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตและในการเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มความเข้มข้นสะสมของโซเดียมลดลงเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 19 ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟต

จากรูปที่ 19 ค่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตที่ไม่เผามีค่าเท่ากับ 15 มก./ลิตร และที่เผาในอุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียสเท่ากับ 19 17 และ 11 มก./ลิตร พิจารณาจากแนวโน้มพบว่าความเข้มข้นสะสมของอะลูมิเนียมลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

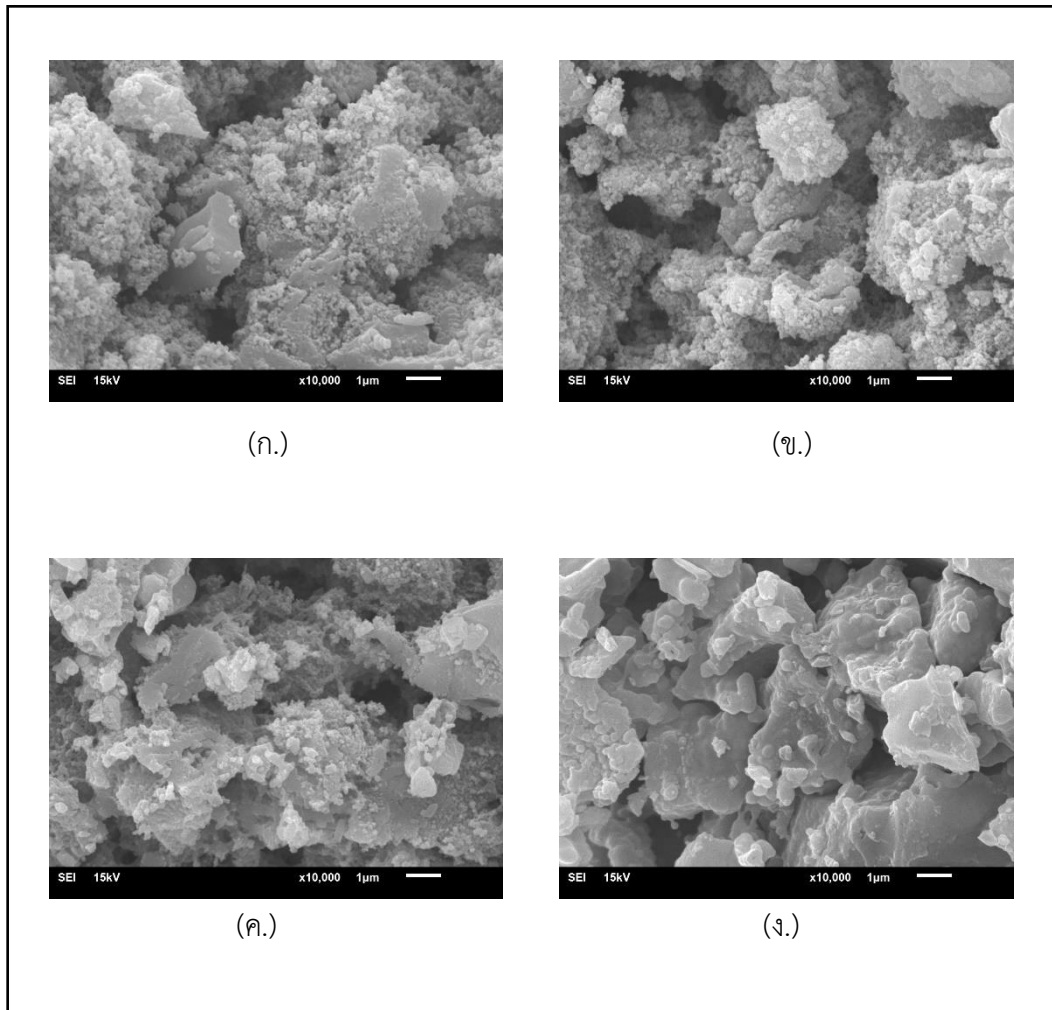


รูปที่ 20 ค่าความเข้มข้นสะสมของแคลเซียมในก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมแคลเซียมฟอสเฟต

เมื่อพิจารณารูปที่ 20 การรั่วไหลของแคลเซียมจากก้อนจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตสู่น้ำชะที่ทำการทดสอบพบว่า ในช่วง 8 ชั่วโมง ปริมาณแคลเซียมของก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส มีการรั่วไหลออกมาอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากเวลา 8 ชั่วโมง แทบจะไม่มี การรั่วไหลออกมา เนื่องจากการรั่วไหลของแคลเซียมในช่วงเวลา 8 ชั่วโมงแรกเป็นการชะแคลเซียมออกมาจากผิวของ ก้อนจีโอโพลีเมอร์เท่านั้น ทำให้เมื่อเวลาผ่านไปมีการแพร่ของแคลเซียมลดลงจนกระทั่งไม่มีการแพร่ออกมา คาดว่า เป็นเพราะการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้แคลเซียมเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกภายในโครงสร้าง ทำให้เมื่อเกิดการชะละลาย แคลเซียมจึงมีปริมาณน้อย

4. ผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำกั้นเตา

ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของก้อนจีโอโพลีเมอร์ จะใช้ตัวอย่างที่มีค่าการพัฒนากำลังสูงสุด ซึ่งใช้ จีโอโพลีเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.2 และบ่มที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาการบ่มนาน 28 วัน เพื่อดู โครงสร้างระดับจุลภาคหลังการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 21 โครงสร้างระดับจุลภาคของอีพอกซีโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา

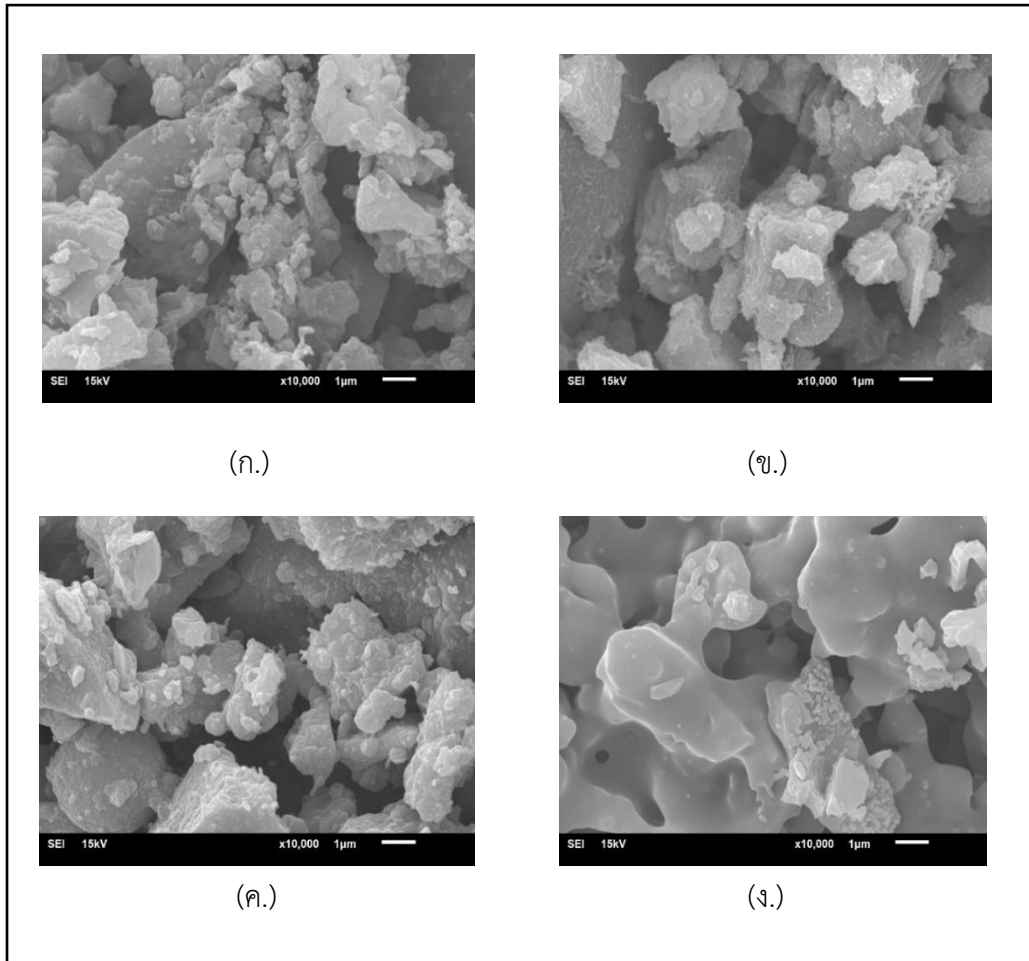
(ก) ไม่ผ่านการเผา

(ข) 500 องศาเซลเซียส

(ค) 600 องศาเซลเซียส

(ง) 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 21 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของอีพอกซีโพลีเมอร์สังเคราะห์จากถั่วลิสงผ่านการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่ามีการเกิดผลึกรูปทรงเหลี่ยมจับตัวกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายผลึกอีพอกซีโพลีเมอร์ซ้อนทับกัน และมีผลึกสีขาวล้อมรอบ พิจารณารูปที่ 21 (ก.) อีพอกซีโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเผาพบผลึกของอีพอกซีโพลีเมอร์กระจายทั่วทั้งโครงสร้าง และมีผลึกสีขาวครอบคลุมอยู่ทั้งผลึกของ อีพอกซีโพลีเมอร์ แสดงให้เห็นว่ายังคงโซ่เดี่ยวมตกค้างอยู่ในก้อนตัวอย่างและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาพบว่าลักษณะโครงสร้างของอีพอกซีโพลีเมอร์เปลี่ยนสภาพเป็นผลึกมากขึ้นและผลึกสีขาวที่ตกอยู่ตามผลึกอีพอกซีโพลีเมอร์ลดลง กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นทำให้สภาพความเป็นต่างของอีพอกซีโพลีเมอร์ลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลของการชะละลายและงานวิจัยของ วิเชียร ชาลี และกิริติกร เจริญพร้อม (2555)



รูปที่ 22 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์ผสมโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา

(ก) ไม่ผ่านการเผา

(ข) 500 องศาเซลเซียส

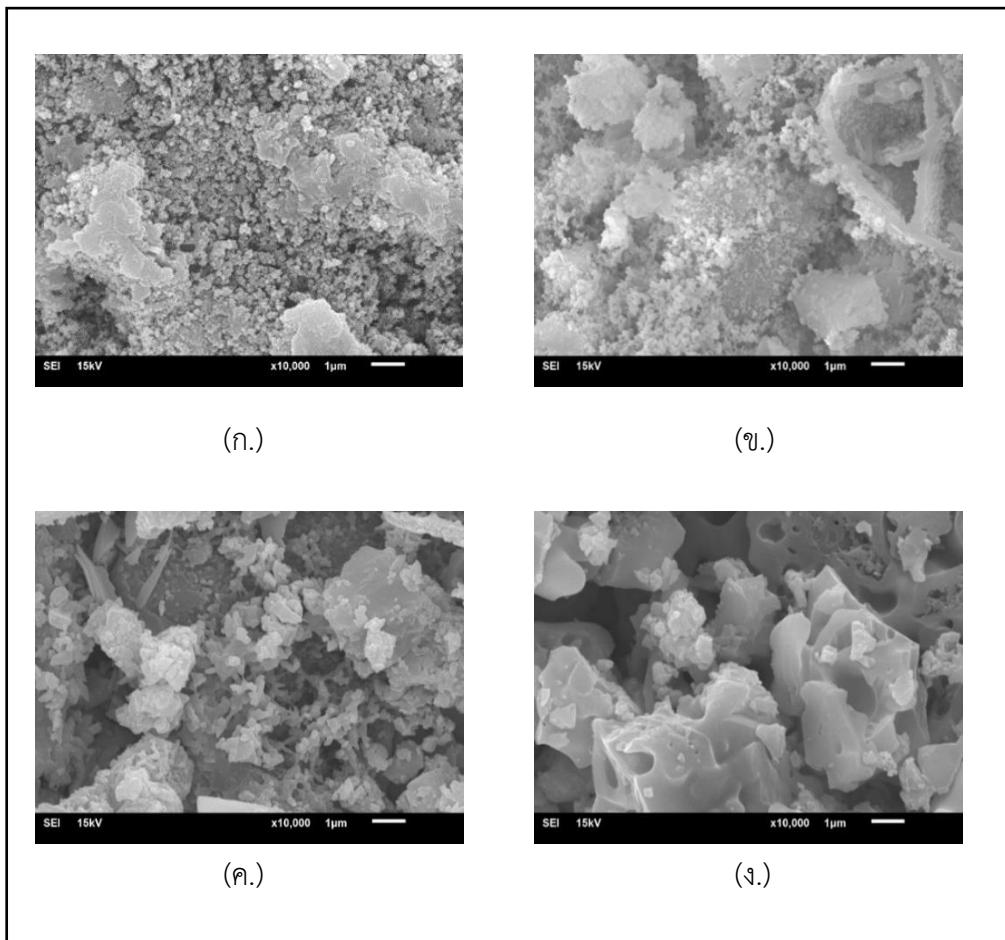
(ค) 600 องศาเซลเซียส

(ง) 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 22 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์ผสมโซเดียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดช่องว่างขนาดใหญ่และมีโครงสร้างลักษณะเจลโดยรอบเช่นเดียวกับรูปที่ 21 ซึ่งคาดว่าเกิดจากปริมาณของโซเดียมฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้น ความเป็นด่างที่มากขึ้นทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ เกิดโพรงภายในโครงสร้างทำให้กำลังอัดต่ำ

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว น้ำที่อยู่ภายในก้อนจีโอโพลีเมอร์เกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว สารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตที่ถูกชะออกมาควบแน่นไม่ทัน ปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์จึงเกิดขึ้นบางส่วน ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนและอาจจะเกิดรอยร้าวภายในก้อนจีโอโพลีเมอร์ได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ขวัญเรือน จันทพงษ์ (2557)

เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 21 แล้วพบว่า รูปที่ 22 มีช่องว่างในก้อนจีโอโพลีเมอร์มากกว่า ผลมาจากปริมาณโซเดียมฟอสเฟตที่ผสมเพิ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดโพรงภายในโครงสร้าง ส่งผลให้ กำลังอัดลดลง



รูปที่ 23 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา

(ก) ไม่ผ่านการเผา

(ข) 500 องศาเซลเซียส

(ค) 600 องศาเซลเซียส

(ง) 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 23 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์ผสมแคลเซียมฟอสเฟตเพิ่มร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์และปฏิกิริยาไฮดรอกซีแปปาไทต์ (Hydroxyapatite, HA) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Juraida et al.(2011) และ Tchakoute et al. (2017) พบรายงานภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคแสดงลักษณะพื้นผิวโครงสร้าง HA มีลักษณะเป็นผลึกพื้นผิวขรุขระซ้อนทับกันหนาแน่น เมื่อพิจารณารูปที่ 23 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิคิดว่าโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์และโครงสร้าง HA กลายเป็นเจลผลึกมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และอีกหนึ่งปัจจัยคือเนื่องจากมีโครงสร้าง HA ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างรูพรุน ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอโพลีเมอร์ชนิดนี้น้อยกว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ปราศจากการผสมสารเพิ่ม

อย่างไรก็ตามก้อนจีโอโพลีเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตาที่ปราศจากการผสมสารเพิ่ม มีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกจับตัวกันเป็นก้อนและมีช่องว่างหรือรูพรุนที่น้อยกว่าก้อนจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมโซเดียมฟอสเฟตและแคลเซียมฟอสเฟต ส่งผลให้มีความรับแรงอัดสูงสุด

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ของจีโอโพลีเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตา พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าก้นเตามีค่าลดลงที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 มีค่ากำลังอัดสูงสุด เมื่อมีการผสมสารโซเดียมฟอสเฟตและแคลเซียมฟอสเฟตพบว่าค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งมีค่าลดลงต่ำกว่าก่อนจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่เติมสารใด ๆ โดยที่ค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมสารโซเดียมฟอสเฟตมีค่าไม่เกิน 30 กก./ซม.² จีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่มีการผสมสารแคลเซียมฟอสเฟต พบว่ามีการพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าก่อนจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ไม่เติมสารแคลเซียมฟอสเฟตอยู่ที่ประมาณร้อยละ 24

ในการเผาที่อุณหภูมิที่ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นต่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ชะละลายออกมาอยู่ในน้ำจะมีค่าลดลง และค่าความเข้มข้นของ Si Na Al และ Ca ลดลงและเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าความเป็นต่างลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการชะละลายของก้อนจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ทำการศึกษา

จากผลการทดสอบข้างต้น สมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลีเมอร์ผสมสารฟอสเฟต ประเภทโซเดียมฟอสเฟต นั้นมีค่ากำลังอัดต่ำอาจจะสามารถนำไปเป็นวัสดุฉาบหรือยาแนวได้ ส่วนวัสดุจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตนั้น ค่ากำลังอัดที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตเป็นวัสดุทดแทนกระดูกบางชิ้นในโครงสร้างมนุษย์ และสัตว์ ส่วนการทดสอบการลดความเป็นต่างแสดงให้เห็นว่าความร้อนสามารถลดความเป็นต่างและลดการชะละลายของสารเคมีในจีโอโพลีเมอร์ได้ ซึ่งจะช่วยให้ไม่เกิดอันตรายต่อเซลล์ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก

2. ข้อเสนอแนะ

- 2.1 ศึกษาสมบัติด้านอื่น ๆ ของจีโอโพลีเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตา เช่น ระยะเวลาการก่อตัว ค่าการซึมผ่านของน้ำ ความสามารถในการทนความร้อนและเปรียบเทียบกับกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เมื่อนำไปให้ความร้อนในอุณหภูมิต่าง ๆ
- 2.2 ศึกษาค่าความเป็นต่างและการชะละลายของสารประกอบของก้อนจีโอโพลีเมอร์เพสต์ในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และในสารละลายที่จำลองมาจากของเหลวในร่างกายของมนุษย์

เอกสารอ้างอิง

- [1] “โครงสร้างและหน้าที่ของกระดูก”, 2560, ที่มา: <http://www.osteokku.com/>, วันที่สืบค้นข้อมูล 15 สิงหาคม 2560
- [2] “เนื้อพื้นของกระดูก”, 2560, ที่มา: <http://www.osteokku.com/>, วันที่สืบค้นข้อมูล 15 สิงหาคม 2560
- [3] เอกชัย บัวแก้ว, 2555, “เตรียมอนุภาคนาโนของแคลเซียม – เซอร์โคเนียมฟอสเฟตด้วยเทคนิคโซล – เจล และประเมินสมบัติทางกายภาพของโครงเลี้ยงเซลล์ที่เตรียมขึ้น”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [4] ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์, 2557, “โครงสร้างยึดเกาะชนิดแก้วไบโอแอคทีฟโดยกระบวนการโซลเจล สำหรับงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก”, สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [5] ธนันพร ญาวิลาศ, 2558, “สมบัติของก้อนของเสียหล่อแข็งจากจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยปิทมินัส”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] S. Pangdaeng, V. Sata, J.B. Aguir, F. Pacheco-Torgal and P.Chindaprasirt, 2015, “Apatite formation on calcined kaolin – white Portland cement geopolymer”, Materials Science and Engineer C 51, pp.1 -6.
- [7] Kenneth J.D. MacKenzie, Nils Rahner, Mark E. Smith and Alan Wong, 2010, “Calcium – containing inorganic polymers as potential bioactive materials”, J Mater Sci, vol. 45, pp. 999 – 1007.
- [8] M. Catauro, F. Bollino, F. Papale and G. Lamanna, 2014, “Investigation of the sample preparation and curing treatment effects on mechanical properties and bioactivity of silica rich metakaolin geopolymer”, Materials Science and Engineering C36, pp.20 – 24.
- [9] H. Oudadesse, A.C. Derrien, S. Martin, H. Chair and G. Cathelineau, 2008, “Surface and interface investigation of aluminosilicate biomaterial by the “in vivo” experiments”, Applied Surface Science, vol. 255, pp. 593 – 596.
- [10] Nils Rahner, 2009, “Inorganic polymers (geopolymer) as potential bioactive materials”, A thesis for the degree of Master of Science in Chemistry, Victoria University of Wellington.
- [11] S. Martin, A.C. Derrien, H. Oudadesse, D. Chauvel-Lebret and G. Cathelineau, 2005, “Implantation of aluminosilicate/calcium phosphate materials; influence on bone formation in rabbit tibias”, European Cells and Materials, vol.9, pp. 71 – 72

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและขั้นตอนการทดสอบกำลังอัด

ขั้นตอนการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

สามารถศึกษาได้จากการใช้มาตรฐาน ASTM C 187 หรือ มอก. 15 เล่ม 8 เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการใช้ผสมตัวอย่าง โดยการ

1. ชั่งน้ำหนักแก้วกันเตา 300 กรัม ตวงสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามที่คำนวณไว้ และสูบลำค่า Water to Geopolymer Binder ratio (W/GPB) ที่ต้องเติมเพิ่มอย่างน้อย 3 ค่า ซึ่งปริมาณน้ำที่กำหนดอาจเริ่มต้นเพื่อให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตกลงในจีโอโพลีเมอร์เพสต์อย่างอิสระและจมลงไปน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นเพิ่มปริมาณน้ำเรื่อย ๆ จนกระทั่งเข็มไวแคตมีระยะจมมากกว่า 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ก. 1



รูปที่ ก. 1 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ด้วยวิธีไวแคต

2. ขั้นตอนการผสมจีโอโพลีเมอร์เพสต์ คือเริ่มต้นจากการประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่องผสม
3. ใส่ น้ำและสารละลายที่จะผสมเข้าในหม้อผสมจนหมด
4. ใส่แก้วกันเตาลงในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับของเหลวที่ใส่ไปก่อนหน้านี้ แล้วปล่อยให้ของเหลวซึมเข้าสู่แก้วกันเตาเป็นเวลา 30 วินาที
5. เมื่อครบ 30 วินาทีจึงเดินเครื่องผสมให้ใบผสมกววนส่วนผสมอย่างช้า ๆ โดยใช้อัตราช้า (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างที่หยุดนี้ให้ปาดจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ติดข้างหม้อผสมลงยังกันหม้อ
7. เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง (285±10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที
8. ให้ผู้ทดสอบใส่ถุงมือพลาสติกหรือถุงมือยางทั้งสองข้าง จากนั้นนำจีโอโพลีเมอร์เพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสม จากนั้นปั้นเป็นลูกบอลกลม ๆ โยนสลัดมือในแนวราบเป็นระยะทางห่างกันประมาณ 15 เซนติเมตร จำนวน 6 ครั้ง ซึ่งขณะนี้จีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ได้ควรมีลักษณะค่อนข้างกลม และเป็นเนื้อเดียวกัน
9. นำจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ได้ใส่ไปยังแบบรูปกรวย โดยใส่จากด้านบน (ด้านที่เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า) เพื่อให้จีโอโพลีเมอร์เพสต์ออกไปอีกด้านหนึ่ง
10. ปาดจีโอโพลีเมอร์เพสต์ส่วนเกินออกจากแบบรูปกรวยด้วยเกรียงเหล็ก (โดยปาดเพียงครั้งเดียว) หลังจากทีปาดจีโอโพลีเมอร์เพสต์ส่วนเกินออกแล้ว หากผิวหน้ายังไม่เรียบให้ใช้เกรียงปาดเก็บผิวหน้าเบา ๆ และ

ระมัดระวังอย่าให้เกรียงเหล็กปาดตกลงบนผิวหน้าของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ จากนั้นนำกรวยที่มีจีโอโพลีเมอร์เพสต์ไปวางบนเครื่องทดสอบไวแคต



รูปที่ ก. 2 จีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ผ่านการปาดผิวเพื่อเตรียมสำหรับทดสอบไวแคต

11. เลื่อนก้านเข็มลงมา จนกระทั่งปลายเข็มสัมผัสกับผิวหน้าของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ จากนั้นยึดก้านเข็มให้แน่นด้วยสกรู



รูปที่ ก. 3 การเลื่อนเข็มไวแคตมาสัมผัสกับผิวหน้าของจีโอโพลีเมอร์เพสต์

12. ปรับสเกลบอกระยะให้อ่านค่าที่ 0
13. คลายสกรูเพื่อให้ก้านเข็มตกลงอย่างอิสระและจมเข้าไปในเนื้อจีโอโพลีเมอร์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบ 30 วินาที ให้หมุนสกรูเพื่อหยุดการตกแบบอิสระของก้านเข็ม อ่านค่าระยะจมของเข็มไวแคต



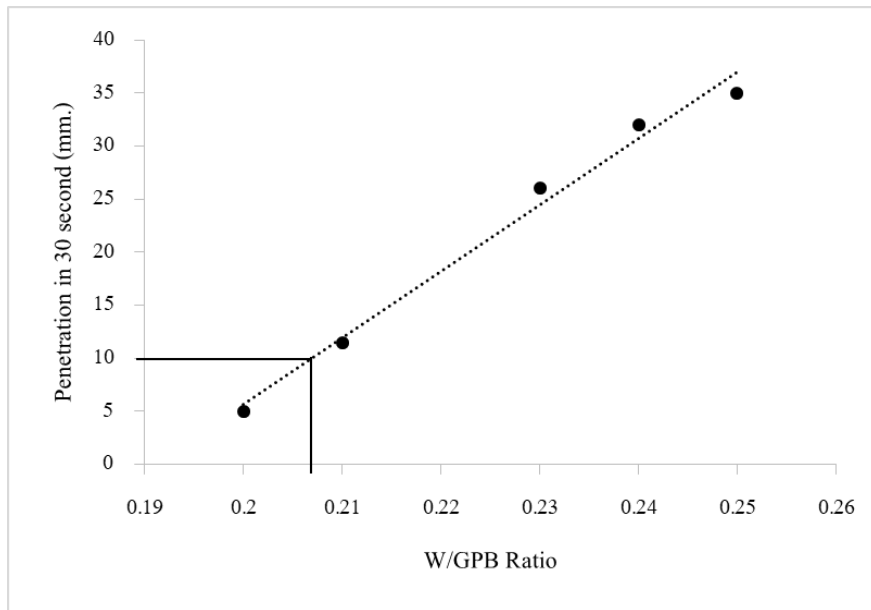
รูปที่ ก. 4 สเกลวัดระยะจมนของเข็มไวแคต

14. ปริมาณน้ำที่ความชันเหลวปกติ คือปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มไวแคตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จมลงในจีโอโพลีเมอร์เพสต์ 10 มิลลิเมตร เป็นเวลา 30 วินาที ดังนั้นหากผลการทดลองพบว่าเข็มไวแคตมีระยะจมนน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร แสดงว่าปริมาณน้ำน้อยเกินไป ให้เพิ่มปริมาณน้ำในการผสมครั้งต่อไป แต่ถ้าเข็มไวแคตจมนมากกว่า 10 มิลลิเมตร แสดงว่าปริมาณน้ำมากเกินไป ดังนั้นในการผสมครั้งต่อไปให้ใช้ปริมาณน้ำน้อยลง

ตารางที่ ก. 1 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของจีโอโพลีเมอร์เพสต์
ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.20$

ครั้งที่	ถ้ำกั้นเตา (กรัม)	อัตราส่วน W/GPB	ระยะจมนของเข็มไวแคต (มม.)
1	300	0.20	5.00
2	300	0.21	11.50
3	300	0.23	26.00
4	300	0.24	32.00
5	300	0.25	35.00

เมื่อนำค่าอัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ (W/GPB) และระยะจมนของเข็มไวแคต (มม.) ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ พบว่าอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ดังกล่าว คือ 0.206 ดังแสดงในรูปที่ ก. 5

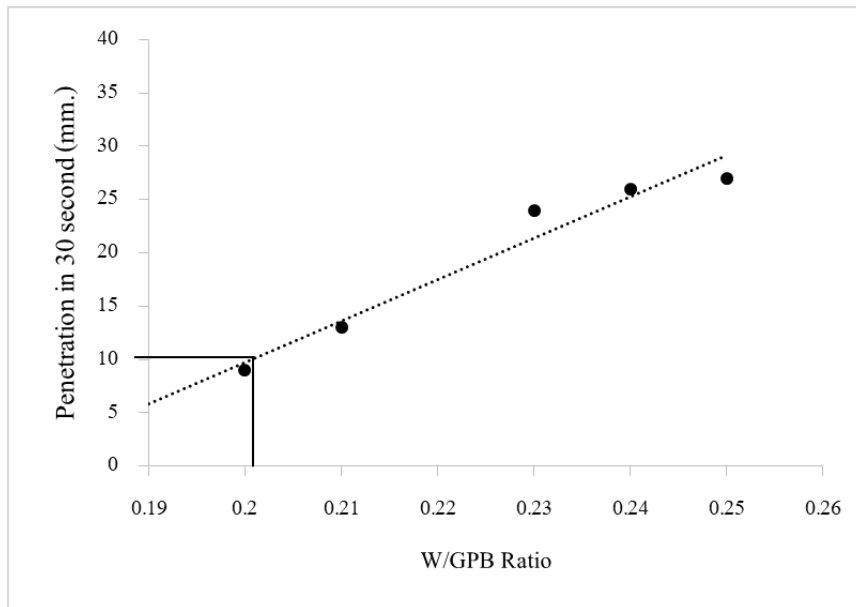


รูปที่ ก. 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ (W/GPB) และระยะจมของเข็มไวแคต (มม.) ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.20$

ตารางที่ ก. 2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.25$

ครั้งที่	ถ้ำก้นเตา (กรัม)	อัตราส่วน W/GPB	ระยะจมของเข็มไวแคต (มม.)
1	300	0.20	9.00
2	300	0.21	13.00
3	300	0.23	24.00
4	300	0.24	26.00
5	300	0.25	27.00

เมื่อนำค่าอัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ (W/GPB) และระยะจมของเข็มไวแคต (มม.) ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ พบว่าอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ดังกล่าว คือ 0.202 ดังแสดงในรูปที่ ก. 6

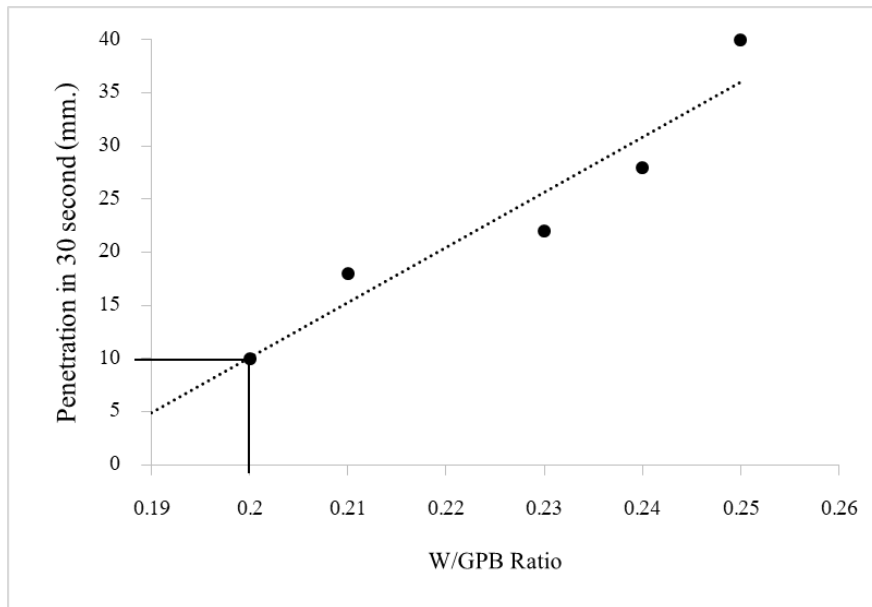


รูปที่ ก. 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ (W/GPB) และระยะจมของเข็มไวแคต (มม.) ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2 = 0.25$

ตารางที่ ก. 3 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2 = 0.30$

ครั้งที่	ถ้ำกั้นเตา (กรัม)	อัตราส่วน W/GPB	ระยะจมของเข็มไวแคต (มม.)
1	300	0.20	10.00
2	300	0.21	18.00
3	300	0.23	22.00
4	300	0.24	28.00
5	300	0.25	40.00

เมื่อนำค่าอัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ (W/GPB) และระยะจมของเข็มไวแคต (มม.) ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ พบว่าอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ดังกล่าว คือ 0.200 ดังแสดงในรูปที่ ก. 7



รูปที่ ก. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ (W/GPB) และระยะจมของเข็มไวแคต (มม.) ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2 = 0.30$

ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัด

ในการทดสอบกำลังอัด จะต้องใช้ตัวอย่าง 81 ตัวอย่าง จากส่วนผสมของเถ้าก้นเตาและสารเคมีทั้งสามชนิด (สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารโซเดียมฟอสเฟต และสารแคลเซียมฟอสเฟต) ที่อัตราส่วน 0.20 0.25 และ 0.30 ที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน แล้วจึงหาค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกำลังอัด โดยแบ่งการนับจำนวนตัวอย่างทดสอบดังตารางที่ ก. 4

ตารางที่ ก. 4 การคำนวณหาจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดของสารเคมี	อายุบ่ม 7 วัน (ตัวอย่าง)			อายุบ่ม 14 วัน (ตัวอย่าง)			อายุบ่ม 28 วัน (ตัวอย่าง)		
	อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$			อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$			อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$		
	0.20	0.25	0.30	0.20	0.25	0.30	0.20	0.25	0.30
โซเดียมไฮดรอกไซด์	3	3	3	3	3	3	3	3	3
โซเดียมฟอสเฟต	3	3	3	3	3	3	3	3	3
แคลเซียมฟอสเฟต	3	3	3	3	3	3	3	3	3

รวมทั้งหมด 81 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยกำหนดให้ค่ากำลังอัดของแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างไม่เกินจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดไม่เกินร้อยละ 10 ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ต้องการทดสอบกำลังอัดออกจากแบบหล่อ แล้วทำการวัดความกว้าง ความสูง และชั่งน้ำหนักตัวอย่าง เสร็จแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด Universal Testing Machine บริษัท Shimadzu รุ่น UH-F1000kNX ดังแสดงในรูปที่ 3.3

ภาคผนวก ข.

ตารางผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์

ตารางที่ ข. 1 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20

สัญลักษณ์: 0.20C			
ปริมาณแก้วกันเตา: 600 ก.	NaOH: 14.4 ก.	Na_2HPO_4 : -	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: -
ปริมาณน้ำ: 123.63 ก.	W/GPB: 0.206		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ชม ²)	เฉลี่ย (กก/ ชม ²)
7	4.80	5.20	5.00	24.96	124.80	238.00	3.40	13.87	14.65
	4.90	4.90	5.10	24.01	122.45	235.64	3.50	14.86	
	5.00	4.90	4.90	24.50	120.05	235.54	3.66	15.23	
14	5.00	4.80	5.00	24.00	120.00	231.16	5.56	23.62	24.46
	5.00	5.10	4.90	25.50	124.95	233.15	6.42	25.66	
	5.00	5.00	4.90	25.00	122.50	235.67	5.91	24.10	
28	5.00	4.80	4.90	24.00	117.60	224.57	41.60	176.69	170.82
	4.90	5.00	4.90	24.50	120.05	228.25	40.80	169.76	
	5.00	4.90	4.90	24.50	120.05	230.51	39.90	166.01	

ตารางที่ ข. 2 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25

สัญลักษณ์: 0.25C			
ปริมาณแก้วกันเตา: 600 ก.	NaOH: 18.00 ก.	Na_2HPO_4 : -	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: -
ปริมาณน้ำ: 121.19 ก.	W/GPB: 0.202		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ชม ²)	เฉลี่ย (กก/ ชม ²)
7	5.00	5.10	5.00	25.50	127.50	242.38	2.84	11.35	10.95
	4.90	5.00	5.00	24.50	122.50	233.22	2.89	12.02	
	5.10	5.20	5.00	26.52	132.60	248.50	2.47	9.47	
14	5.10	4.90	5.00	24.99	124.95	237.50	12.70	51.80	52.35
	4.90	4.90	5.10	24.01	122.45	233.00	12.20	51.80	
	4.90	5.10	4.90	24.99	122.45	234.00	13.10	53.44	
28	5.00	5.00	4.90	25.00	122.50	224.20	24.30	99.08	99.99
	4.90	5.00	4.80	24.50	117.60	226.00	24.65	102.56	
	4.80	5.00	4.90	24.00	117.60	225.00	23.15	98.33	

ตารางที่ ข. 3 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30

สัญลักษณ์: 0.30C			
ปริมาณเถ้ากั้นเตา: 600 ก.	NaOH: 21.60 ก.	Na_2HPO_4 : -	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: -
ปริมาณน้ำ: 120.04 ก.	W/GPB: 0.200		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ซม ²)	เฉลี่ย (กก/ ซม ²)
7	5.00	5.10	4.90	25.50	124.95	244.44	2.37	9.47	9.15
	5.00	5.10	4.90	25.50	124.95	240.90	2.57	10.27	
	5.10	5.20	4.90	26.52	129.95	252.40	2.00	7.69	
14	4.90	4.90	5.00	24.01	120.05	234.00	4.74	20.12	19.56
	4.90	5.00	5.10	24.50	124.95	239.00	5.14	21.39	
	4.80	5.10	4.90	24.48	119.95	236.50	4.12	17.16	
28	4.80	5.00	5.10	24.00	122.40	233.90	34.70	147.38	141.96
	5.00	5.00	4.90	25.00	122.50	241.60	33.10	134.96	
	5.00	5.00	4.90	25.00	122.50	240.50	35.20	143.53	

ตารางที่ ข. 4 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้ากั้นเตา

สัญลักษณ์: 0.20NP			
ปริมาณเถ้ากั้นเตา: 600 ก.	NaOH: 30 ก.	Na_2HPO_4 : 30 ก.	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: -
ปริมาณน้ำ: 178.62 ก.	W/GPB: 0.206		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ซม ²)	เฉลี่ย (กก/ ซม ²)
7	4.90	5.10	4.96	24.80	123.01	213.05	2.30	9.45	8.29
	4.90	5.00	4.92	24.90	122.50	218.40	1.73	7.08	
	5.10	4.90	5.00	24.25	121.25	220.60	1.98	8.32	
14	5.00	5.10	5.00	25.50	127.50	224.05	2.66	10.63	11.30
	4.90	5.10	5.10	24.99	127.45	222.14	2.82	11.50	
	5.00	5.10	5.10	25.50	130.05	229.63	2.94	11.75	
28	4.90	5.10	5.00	24.99	124.95	213.05	5.21	21.25	21.80
	4.90	5.00	4.90	24.50	120.05	218.40	4.97	20.68	
	5.10	4.90	5.10	24.99	127.45	220.60	5.75	23.45	

ตารางที่ ข. 5 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้ากั้นเตา

สัญลักษณ์: 0.25NP			
ปริมาณเถ้ากั้นเตา: 600 ก.	NaOH: 30 ก.	Na_2HPO_4 : 30 ก.	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: -
ปริมาณน้ำ: 181.20 ก.	W/GPB: 0.202		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ซม ²)	เฉลี่ย (กก/ ซม ²)
7	4.90	5.00	5.00	24.50	122.50	228.32	0.97	4.04	4.65
	4.90	4.90	5.00	24.01	120.05	226.31	1.14	4.84	
	4.90	5.00	5.00	24.50	122.50	229.14	1.22	5.08	
14	5.10	5.00	5.10	25.50	130.05	233.73	2.22	8.87	9.99
	5.10	5.00	5.00	25.50	127.50	228.98	2.36	9.43	
	5.00	5.10	5.00	25.50	127.50	226.21	2.92	11.67	
28	5.00	5.00	5.10	25.00	127.50	222.22	5.01	20.43	17.65
	5.00	5.00	5.10	25.00	127.50	226.80	4.22	17.21	
	5.10	5.00	5.10	25.50	130.05	229.17	3.83	15.31	

ตารางที่ ข. 6 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 และผสมสารโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้ากั้นเตา

สัญลักษณ์: 0.30NP			
ปริมาณเถ้ากั้นเตา: 600 ก.	NaOH: 30 ก.	Na_2HPO_4 : 30 ก.	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: -
ปริมาณน้ำ: 183.00 ก.	W/GPB: 0.200		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ซม ²)	เฉลี่ย (กก/ ซม ²)
7	4.90	4.90	5.00	24.01	120.05	227.14	1.09	4.63	4.79
	5.00	5.00	5.00	25.00	125.00	227.92	1.23	5.02	
	4.90	4.96	5.00	24.30	121.52	224.81	1.13	4.74	
14	5.10	5.00	5.10	25.50	130.05	239.52	2.02	8.07	9.29
	5.00	5.00	5.10	25.00	127.50	230.86	2.68	10.93	
	5.20	5.00	5.20	26.00	135.20	233.74	2.26	8.86	
28	5.00	5.10	5.10	25.50	130.05	220.22	4.63	18.51	19.24
	4.90	5.00	5.00	24.50	122.50	211.31	4.50	18.72	
	4.90	5.10	5.10	24.99	127.45	219.72	5.02	20.48	

ตารางที่ ข. 7 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เฟสท์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้ากั้นเตา

สัญลักษณ์: 0.20CP			
ปริมาณเถ้ากั้นเตา: 600 ก.	NaOH: 30 ก.	Na_2HPO_4 : -	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: 30 ก.
ปริมาณน้ำ: 129.8 ก.	W/GPB: 0.206		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ซม ²)	เฉลี่ย (กก/ ซม ²)
7	5.00	5.00	5.10	25.00	127.50	237.53	2.33	9.50	9.72
	4.90	5.10	5.00	24.99	124.95	237.27	2.57	10.48	
	5.10	4.90	5.00	24.99	124.95	238.95	2.25	9.18	
14	5.10	5.10	5.00	26.01	130.05	243.45	4.84	18.97	20.65
	5.10	5.10	5.20	26.01	135.25	246.33	5.37	21.05	
	4.90	5.10	5.20	24.99	129.95	239.34	5.38	21.95	
28	4.90	5.00	5.00	24.50	122.50	227.63	30.70	127.73	130.61
	5.00	5.00	5.00	25.00	125.00	223.83	35.19	143.49	
	5.00	4.80	5.00	24.00	120.00	219.87	28.40	120.62	

ตารางที่ ข. 8 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เฟสท์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 และผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้ากั้นเตา

สัญลักษณ์: 0.25CP			
ปริมาณเถ้ากั้นเตา: 600 ก.	NaOH: 30 ก.	Na_2HPO_4 : -	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: 30 ก.
ปริมาณน้ำ: 127.9 ก.	W/GPB: 0.202		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ซม ²)	เฉลี่ย (กก/ ซม ²)
7	4.90	5.00	5.10	24.50	124.95	240.41	29.79	121.52	8.24
	5.00	5.00	4.90	25.00	122.50	241.06	22.54	93.86	
	5.00	5.10	5.00	25.50	127.50	244.40	19.63	83.38	
14	5.10	5.00	5.20	25.50	132.60	246.88	4.53	18.11	17.22
	5.00	5.00	5.10	25.00	127.50	239.64	4.18	17.04	
	5.00	5.00	5.10	25.00	127.50	241.60	4.05	16.51	
28	4.90	5.10	5.00	24.99	124.95	234.99	1.81	7.53	99.58
	4.80	5.10	5.00	24.48	122.40	228.63	2.18	8.89	
	5.00	4.80	4.90	24.00	117.60	222.62	2.08	8.31	

ตารางที่ ข. 9 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.30 และผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเถ้ากั้นเตา

สัญลักษณ์: 0.30CP			
ปริมาณเถ้ากั้นเตา: 600 ก.	NaOH: 30 ก.	Na_2HPO_4 : -	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$: 30 ก.
ปริมาณน้ำ: 126.00 ก.	W/GPB: 0.200		

อายุ บ่ม	กว้าง (มม.)	ยาว (มม.)	สูง (มม.)	พื้นที่ (มม. ²)	ปริมาตร (มม. ³)	น้ำหนัก (ก.)	กำลัง (kN)	กำลัง (กก/ ซม ²)	เฉลี่ย (กก/ ซม ²)
7	4.90	5.10	5.00	24.99	124.95	242.09	1.30	5.30	5.27
	5.10	5.00	4.90	25.50	124.95	243.39	1.32	5.28	
	5.00	4.90	5.00	24.50	122.50	239.11	1.26	5.24	
14	5.20	5.00	5.00	26.00	130.00	246.64	3.46	13.57	13.89
	4.90	5.00	5.00	24.50	122.50	241.52	3.40	14.15	
	5.10	5.00	4.80	25.50	122.40	235.89	3.49	13.95	
28	5.00	4.80	5.10	24.00	122.40	232.71	25.44	108.05	94.30
	4.80	5.10	5.00	24.48	122.40	226.50	20.65	85.99	
	5.00	4.80	4.90	24.00	117.60	232.83	20.92	88.85	

ภาคผนวก ค.

ตารางผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลีเมอร์เพสต์

ตารางที่ ค. 1 ขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังทำการแช่เพื่อทดสอบการชะละลาย

สภาวะ ของ ตัวอย่าง	สัญลักษณ์	ตัวอย่าง ที่	ขนาดของตัวอย่าง ก่อนทดสอบ (ซม.)			ขนาดของตัวอย่าง หลังทดสอบ (ซม.)			น้ำหนัก ก่อน ทดสอบ (ก.)	น้ำหนัก หลัง ทดสอบ (ก.)
			ความ กว้าง	ความ ลึก	ความ สูง	ความ กว้าง	ความ ลึก	ความ สูง		
ไม่ผ่าน การเผา	0.20C	1	4.96	5.00	5.20	4.96	5.00	5.05	211.30	196.2
		2	5.00	5.19	5.00	4.88	5.02	4.92	208.80	193.7
	0.20NP	1	5.19	5.19	5.20	4.85	4.94	5.03	192.20	176.9
		2	5.19	5.20	5.00	5.00	5.00	4.92	192.20	176.8
	0.20CP	1	4.95	5.20	5.20	4.95	5.05	5.03	215.10	198.2
		2	5.09	5.03	5.00	5.08	5.01	5.00	212.00	200.8
ผ่านการ เผาที่ 500 °C	0.20C	1	5.00	4.99	5.00	5.00	4.88	4.88	195.90	193.30
		2	5.02	4.82	5.00	5.01	4.80	4.89	191.80	188.50
	0.20NP	1	5.05	5.02	4.93	5.05	4.86	4.85	183.90	175.70
		2	5.02	5.02	4.92	5.02	4.91	4.82	180.50	178.90
	0.20CP	1	4.96	5.02	4.92	4.96	5.02	4.91	197.80	195.20
		2	4.96	4.94	5.02	4.96	4.94	5.01	200.80	198.00
ผ่านการ เผาที่ 600 °C	0.20C	1	4.95	5.00	5.00	4.86	4.98	4.91	192.60	191.80
		2	4.93	4.90	5.02	4.93	4.90	5.02	195.70	194.40
	0.20NP	1	5.05	5.05	4.91	5.05	4.98	4.91	186.30	182.50
		2	5.00	4.95	4.90	5.00	4.93	4.90	184.70	180.50
	0.20CP	1	5.07	4.97	4.80	4.98	4.90	4.80	189.80	189.10
		2	4.91	4.91	4.97	4.91	4.91	4.96	191.40	190.30
ผ่านการ เผาที่ 700 °C	0.20C	1	4.87	4.90	5.00	4.87	4.90	4.96	192.60	193.70
		2	4.85	4.91	5.02	4.85	4.90	5.00	193.90	192.50
	0.20NP	1	4.95	4.96	4.88	4.94	4.96	4.88	194.00	193.90
		2	5.08	5.08	4.96	5.07	4.95	4.88	188.80	187.40
	0.20CP	1	5.00	5.00	4.90	4.97	4.90	4.89	194.40	194.30
		2	4.99	5.00	4.88	4.89	5.00	4.88	181.50	180.50

ตารางที่ ค. 2 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20
ที่ไม่ได้ทำการเผา

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20C	8 ชั่วโมง	1	11.70	2403.51	ND	247.86	1.10
		2	11.57	1023.71	ND	249.10	0.99
	1 วัน	1	11.82	382.43	ND	96.26	2.63
		2	11.78	181.81	ND	43.91	2.37
	2 วัน	1	11.72	383.23	ND	88.58	1.95
		2	11.70	470.52	ND	96.73	1.94
	8 วัน	1	11.80	3184.53	ND	35.15	2.48
		2	11.84	421.54	ND	30.74	4.53
	16 วัน	1	11.66	1816.21	ND	247.16	1.38
		2	11.68	3114.82	ND	251.54	4.86
	32 วัน	1	11.55	619.82	ND	255.28	1.40
		2	11.58	2241.88	ND	253.44	6.61

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 3 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 ที่ผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20C	8 ชั่วโมง	1	10.86	1019.89	ND	67.46	0.70
		2	11.15	548.32	ND	91.89	0.83
	1 วัน	1	11.27	170.45	ND	15.70	1.88
		2	11.43	163.36	ND	20.35	2.38
	2 วัน	1	11.21	330.92	ND	25.33	2.17
		2	11.28	224.87	ND	28.30	1.43
	8 วัน	1	11.46	256.58	ND	21.22	6.65
		2	11.70	258.74	ND	32.68	3.56
	16 วัน	1	11.45	631.54	ND	74.65	7.34
		2	11.60	3198.72	ND	91.92	6.89
	32 วัน	1	11.51	637.34	ND	83.77	8.74
		2	11.63	2631.77	ND	99.51	2.89

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 4 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 ที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20C	8 ชั่วโมง	1	10.10	7717.65	ND	22.79	0.90
		2	10.36	1043.83	ND	31.68	0.88
	1 วัน	1	10.36	88.34	ND	6.45	1.23
		2	10.68	246.09	ND	19.71	1.94
	2 วัน	1	10.46	208.27	ND	6.95	1.51
		2	10.59	307.53	ND	10.16	1.26
	8 วัน	1	10.78	362.25	ND	11.93	3.88
		2	11.02	256.14	ND	16.17	5.61
	16 วัน	1	10.66	559.92	ND	26.96	9.00
		2	10.79	678.49	ND	10.36	4.18
	32 วัน	1	10.47	542.76	ND	24.99	3.90
		2	10.82	592.92	ND	36.52	1.47

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 5 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 ที่ผ่านการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20C	8 ชั่วโมง	1	7.77	8.43	ND	6.55	0.72
		2	8.97	5.24	ND	3.14	0.65
	1 วัน	1	8.56	448.75	ND	6.32	1.51
		2	9.65	90.26	ND	7.75	1.25
	2 วัน	1	9.92	2.74	ND	2.67	1.18
		2	9.22	1.51	ND	1.80	1.34
	8 วัน	1	9.60	161.69	ND	5.15	9.32
		2	8.39	308.64	ND	6.48	1.66
	16 วัน	1	9.21	402.23	ND	7.35	3.74
		2	8.18	11.62	ND	233.29	1.16
	32 วัน	1	9.05	11.03	ND	8.19	1.45
		2	8.61	292.23	ND	6.92	1.60

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 6 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะ ที่ไม่ได้ทำการเผา

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20NP	8 ชั่วโมง	1	11.63	936.24	ND	305.17	1.11
		2	11.68	4250.57	ND	342.19	1.25
	1 วัน	1	11.78	551.65	ND	183.81	1.43
		2	11.74	2357.25	ND	167.23	1.44
	2 วัน	1	11.62	233.13	ND	176.16	1.37
		2	11.61	568.37	ND	171.51	1.93
	8 วัน	1	11.58	400.19	ND	51.32	1.68
		2	11.56	557.14	ND	68.50	4.43
	16 วัน	1	11.31	1174.86	ND	237.60	1.20
		2	11.31	1070.85	ND	59.44	3.56
	32 วัน	1	11.19	2808.83	ND	208.13	1.73
		2	11.23	573.92	ND	212.88	4.58

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 7 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะที่ผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20NP	8 ชั่วโมง	1	11.30	587.80	ND	71.84	0.91
		2	11.32	4589.87	ND	104.65	0.88
	1 วัน	1	11.41	383.72	ND	173.15	1.66
		2	11.42	510.93	ND	47.58	1.60
	2 วัน	1	11.24	604.09	ND	28.00	1.68
		2	11.28	257.25	ND	33.01	1.61
	8 วัน	1	11.39	417.28	ND	26.00	3.82
		2	11.49	337.64	ND	23.02	4.16
	16 วัน	1	11.15	913.04	ND	65.42	2.58
		2	11.23	861.46	ND	65.22	6.09
	32 วัน	1	11.19	606.12	ND	60.24	3.60
		2	11.19	2994.52	ND	74.55	2.58

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 8 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะ ที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20NP	8 ชั่วโมง	1	11.24	511.06	ND	29.54	1.18
		2	11.24	973.62	ND	37.66	1.31
	1 วัน	1	11.17	530.98	ND	30.81	1.65
		2	11.28	558.56	ND	35.45	1.17
	2 วัน	1	10.92	296.18	ND	16.44	1.64
		2	11.02	252.44	ND	19.28	1.20
	8 วัน	1	10.92	587.24	ND	25.13	4.22
		2	11.12	355.34	ND	24.49	6.24
	16 วัน	1	10.68	981.76	ND	25.13	6.43
		2	10.95	584.35	ND	35.59	4.07
	32 วัน	1	10.24	2064.83	ND	18.95	3.46
		2	10.53	328.45	ND	27.30	1.51

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 9 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะที่ผ่านการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20NP	8 ชั่วโมง	1	7.55	6.15	0.02	4.01	1.54
		2	10.98	539.19	0.01	11.16	0.96
	1 วัน	1	9.51	287.48	0.07	6.15	1.43
		2	10.84	350.84	0.06	13.77	1.74
	2 วัน	1	9.34	1.88	0.04	4.51	1.36
		2	10.46	73.85	0.02	8.82	1.73
	8 วัน	1	9.50	106.79	0.12	6.78	6.02
		2	9.98	171.07	0.06	36.45	2.66
	16 วัน	1	8.81	511.18	0.30	8.12	4.38
		2	9.29	784.97	0.16	10.69	2.42
	32 วัน	1	8.74	10.64	1.75	7.38	1.57
		2	9.29	344.92	1.47	7.95	1.65

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 10 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะ ที่ไม่ได้ทำการเผา

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20CP	8 ชั่วโมง	1	11.53	783.36	0.10	209.90	1.18
		2	11.55	3889.05	0.04	217.35	1.48
	1 วัน	1	11.65	4431.94	0.08	85.14	1.78
		2	11.67	4134.59	0.05	89.08	1.62
	2 วัน	1	11.50	523.46	ND	75.48	1.69
		2	11.54	646.10	0.02	78.89	2.44
	8 วัน	1	11.67	193.53	0.03	40.03	2.80
		2	11.72	232.08	0.03	22.99	4.52
	16 วัน	1	11.56	729.32	0.02	212.41	1.81
		2	11.58	4799.62	0.03	220.83	4.56
	32 วัน	1	11.53	1159.44	0.03	236.77	1.68
		2	11.53	970.17	0.03	227.45	6.11

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 11 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะที่ผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20CP	8 ชั่วโมง	1	10.66	485.39	0.85	72.77	2.15
		2	10.94	11938.60	0.67	80.53	1.09
	1 วัน	1	11.13	311.24	0.87	37.89	1.86
		2	11.27	452.20	0.67	45.24	1.32
	2 วัน	1	11.08	523.46	ND	75.48	1.69
		2	11.22	646.10	0.02	78.89	2.44
	8 วัน	1	11.46	193.53	0.03	40.03	2.80
		2	11.54	232.08	0.03	22.99	4.52
	16 วัน	1	11.38	729.32	0.02	212.41	1.81
		2	11.50	4799.62	0.03	220.83	4.56
	32 วัน	1	11.49	1159.44	0.03	236.77	1.68
		2	11.57	970.17	0.03	227.45	6.11

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 12 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะ ที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20CP	8 ชั่วโมง	1	10.10	360.03	0.03	21.55	0.92
		2	10.45	762.02	1.02	28.87	0.98
	1 วัน	1	10.41	540.54	0.07	14.80	1.26
		2	10.63	616.67	0.84	15.70	1.18
	2 วัน	1	10.40	11.07	0.02	10.83	1.67
		2	10.60	544.68	0.02	12.40	1.15
	8 วัน	1	10.69	235.29	0.15	15.67	7.20
		2	10.97	85.13	0.03	10.86	5.58
	16 วัน	1	10.58	324.87	0.05	27.10	5.85
		2	10.79	337.70	0.04	34.32	3.96
	32 วัน	1	10.47	766.95	0.10	25.23	3.32
		2	10.69	553.75	0.06	32.91	1.44

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ

ตารางที่ ค. 13 ผลการทดสอบการชะละลายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และผสมสารแคลเซียมฟอสเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแก้วกันตะ ที่ผ่านการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส

สัญลักษณ์	เวลา	ตัวอย่าง ที่	pH	องค์ประกอบทางเคมี (หนึ่งส่วนในล้านส่วน, ppm)			
				Na	Ca	Si	Al
0.20CP	8 ชั่วโมง	1	10.58	1270.11	0.04	12.10	1.00
		2	9.07	5.89	0.04	3.64	0.97
	1 วัน	1	10.72	2674.96	0.07	13.57	1.15
		2	9.63	431.60	0.06	5.75	2.03
	2 วัน	1	10.34	202.78	0.29	9.92	0.43
		2	9.69	2.21	0.23	5.65	2.37
	8 วัน	1	10.04	146.46	0.04	6.72	5.63
		2	9.42	127.58	0.27	92.46	1.39
	16 วัน	1	9.49	9.33	0.49	8.35	4.11
		2	9.47	121.29	0.12	12.73	1.41
	32 วัน	1	8.81	601.13	2.64	7.12	1.40
		2	9.28	12.52	1.06	9.16	1.43

หมายเหตุ: ND คือ ไม่พบธาตุ