



การศึกษาปริมาณของเถ้าลอยและผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ
และทางกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

EFFECTS OF AMOUNT OF FLY ASH AND ALUMINIUM POWDER ON
PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GEOPOLYMER MATERIALS

นางสาวณัฐภัทร	พลพันธ์	รหัส 60361156
นายธัญพิสิษฐ์	นพภาค	รหัส 60362115
นางสาวสุภัทสรดา	ศรีหาวงค์	รหัส 60365345

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2563



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาปริมาณของเถ้าลอยและผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวณัฐภัทร พลจันทร์ รหัส 60361156
นายธัญพิสิษฐ์ นพภาค รหัส 60362115
นางสาวสุภัทสรดา ศรีทาวงศ์ รหัส 60365345

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์


สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

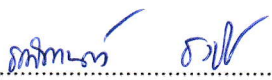
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)


.....กรรมการ
(ดร. ชุติพร ป่าไร่)


.....กรรมการ
(ดร. ธณิกานต์ ชงชัย)

บทคัดย่อ

MISSING



กิตติกรรมประกาศ

MISSING



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ.....	2
1.4 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 จีโอพอลิเมอร์.....	4
2.2 เถ้าลอย.....	6
2.3 ผงอะลูมิเนียม.....	10
2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	11
2.5 โซเดียมซิลิเกต.....	12
2.6 การเตรียมวัตถุดิบ.....	14
2.7 การบ่ม.....	15
2.8 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	16
2.9 การทดสอบความแข็งแรงอัด.....	18
2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	27
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	27
3.3 การทดสอบชิ้นงาน	34
3.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	36
4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน	36
4.2 ลักษณะภายนอกของจีโอพอลิเมอร์	40
4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัด.....	42
4.4 ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ความหนาแน่น	43
4.5 ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ร้อยละการดูดซึมน้ำ.....	45
4.6 ผลการตรวจสอบลักษณะการแตกหัก.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	48
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	48
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก ก.....	54
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	64
ภาคผนวก ง	69
ภาคผนวก จ.....	74
ประวัติผู้จัดทำโครงการ	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	7
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	8
2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C 618 – 97	8
2.4 สมบัติของผงอะลูมิเนียมตามทฤษฎี.....	10
2.5 สมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว.....	13
3.1 อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอย สารละลายอัลคาไลน์ ผงอะลูมิเนียม	33
3.2 ตารางแสดงจำนวนชิ้นงานในการบ่มเพื่อนำไปทดสอบค่าต่างๆ.....	34
4.1 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานขนาด 25×25×25 mm ³ ที่ผ่านการบ่มในเวลาต่างๆ	40
4.2 ลักษณะภายนอกของชิ้นงานขนาด 25×25×25 mm ³ ที่ผ่านการบ่มในเวลาต่างๆ.....	41



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซีเซลลูโลส 5	5
2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) ทั่วรอย (ขยาย 1,000 เท่า)..... 9	9
2.3 สภาพความชื้นของมวลรวม 17	17
2.4 ภาพแสดงลักษณะแตกหักแบบกิ่งก้านที่แรงกระทำต่างกัน 21	21
2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) 21	21
2.6 ภาพเสมือนหัวกลับขนาดขยาย 22	22
3.1 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 1 ก. เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เหมาะสม 28	28
3.2 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 1 ข. เพื่อหาปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่เหมาะสม..... 29	29
3.3 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 1 ค. เพื่อหาปริมาณของผงอะลูมิเนียมที่เหมาะสม..... 30	30
3.4 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 2..... 32	32
4.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับระยะเวลาในการแข็งตัว..... 36	36
4.2 เปรียบเทียบปริมาณโซเดียมซิลิเกตกับระยะเวลาในการแข็งตัว..... 37	37
4.3 เปรียบเทียบปริมาณผงอะลูมิเนียมกับระยะเวลาในการแข็งตัว..... 38	38
4.4 แผนภูมิผลการทดสอบความแข็งแรงอัด เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม..... 42	42
4.5 แผนภูมิการทดสอบความหนาแน่น เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม..... 44	44
4.6 แผนภูมิการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม..... 45	45
4.7 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน อัตราส่วน 1:1:1 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 46	46
4.8 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน อัตราส่วน 1:1:1 + Al 0.2 % ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน..... 46	46
4.9 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน อัตราส่วน 1:1:1 + Al 0.3 % ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน..... 47	47

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

ASTM	American Society for Testing and Materials
PSI	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
Al ₂ O ₃	อะลูมินา
SiO ₂	ซิลิกา
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
Na ₂ SiO ₃	โซเดียมซิลิเกต
OM	Optical Microscope
Pa	ปาสคาล
μm	ไมครอน หรือ ไมโครเมตร
mm ³	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
cm ³	ลูกบาศก์เซนติเมตร
kg/m ³	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
g/cm ³	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
°C	องศาเซลเซียส
°F	องศาฟาเรนไฮต์
K	เคลวิน
%wt	ร้อยละโดยน้ำหนัก
pH	Potential of Hydrogen ion
SEM	Scanning Electron Microscope
Si	ซิลิกอน
Al	อะลูมิเนียม
W/cm K	วัตต์ต่อเซนติเมตรเคลวิน
σ	ความเค้น
M	Molar
g	กรัม
ρ	ความหนาแน่น
W.A.%	ร้อยละการดูดซึมน้ำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันผู้คนทั่วโลกให้ความสำคัญกับปัญหาสิ่งแวดล้อม และปัญหาสภาวะโลกร้อนกันมากขึ้น รวมถึงในอุตสาหกรรม ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างมีมูลค่าประมาณหนึ่งพันล้านบาทต่อปี และมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดปัญหาทางมลพิษ เนื่องจากการก่อสร้างส่วนใหญ่มีการใช้พวกซีเมนต์และคอนกรีต ซึ่งมีกระบวนการผลิตก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุหลักในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ พลังงานที่ผลิตได้มากที่สุดในประเทศไทยมาจากโรงงานอุตสาหกรรมไฟฟ้า กระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินทำให้เกิดเถ้าลอย (Fly Ash) โดยทุกปีจะมีเถ้าลอยปริมาณมากถึง 25 ล้านตัน/ปี ก่อให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ และความผิดปกติทางประสาท ดังนั้นเถ้าลอยขยะจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่ามาผลิตเป็นวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยลดมลพิษทางอากาศ [1] ทั้งนี้ข้อมูลจากสถาบันสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553 ได้รายงานไว้ว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยมาจากอุตสาหกรรมก่อสร้างมากเป็นอันดับหนึ่ง คิดเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 75 ซึ่งหมายความว่า ถ้าลดการผลิตซีเมนต์ได้บางส่วน จะสามารถช่วยลดปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุหลักในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ [2] โดยอุตสาหกรรมก่อสร้างก็ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ คิดค้นหาวัสดุทดแทนที่สามารถนำมาแทนที่การผลิตปูนซีเมนต์ได้ หนึ่งในวัสดุที่มีการคิดค้นขึ้นมาเพื่อการนี้คือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ผลิตได้จากการนำวัสดุที่มีซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักมาทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [3] จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติเด่นคือ ค่าความแข็งแรงอัดสูงในช่วงอายุต้น ความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ การหดตัวต่ำ สามารถก่อตัว และแข็งตัวรับแรงอัดในเวลาอันรวดเร็ว [4] ขั้นตอนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือไม่ใช้พลังงานในการผลิตที่สูง และไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอยจากผลพลอยได้จากโรงงานซึ่งหาได้ง่าย ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมลดต้นทุนในการผลิตจีโอพอลิเมอร์สามารถนำไปใช้ได้หลากหลาย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง งานคอนกรีตและมอร์ตาร์ อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอิฐทนไฟ อุตสาหกรรมไฟฟ้า งานตกแต่ง เป็นต้น [5] และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านฉนวนความร้อนจึงเติมสารก่อฟองในจีโอพอลิเมอร์ เพื่อให้ได้จีโอพอลิเมอร์พูน งานวิจัยนี้ได้เติมผงอะลูมิเนียมที่เป็น-

สารก่อฟองอินทรีย์ เมื่อผงอะลูมิเนียมเจอกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดฟองก๊าซ จึงใส่เพื่อให้เกิดโพรงอากาศ เกิดรูพรุนภายในเนื้อชิ้นงาน โดยมีเป้าหมายเพื่อใช้เป็นวัสดุรูพรุนที่สามารถดูดซับน้ำได้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น และปรับเปลี่ยนปริมาณผงอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นสารก่อฟอง เพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ คือ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และสมบัติทางกล คือ ความแข็งแรงอัด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาปริมาณผงอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อความแข็งแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.2.2 ศึกษาปริมาณผงอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อความหนาแน่นของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.2.3 ศึกษาปริมาณผงอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ

1.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเถ้าลอย และผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความแข็งแรงอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเถ้าลอย และผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.3.3 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการบ่มที่ส่งผลต่อความแข็งแรงอัด

1.3.4 ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงอัด ที่มีผลต่อความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ

1.4 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 6 โมลาร์ต่อโซเดียมซิลิเกต ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยน้ำหนัก

1.4.2 ปรับอัตราส่วนผสมผงอะลูมิเนียมเป็นร้อยละ 0, 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย

1.4.3 ระยะเวลาในการบ่ม 14, 21 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

1.4.4 ทดสอบความแข็งแรงอัดด้วยเครื่อง Universal testing machine

1.4.5 ทดสอบความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ

1.4.6 ตรวจสอบลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน

1.5 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

มิถุนายน 2563 – มีนาคม 2564

1.7 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน

ลำดับ ที่	การดำเนินงาน	2563							2564			
		มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
1	ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวางแผนการดำเนินงาน	←————→										
2	ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุดิบ และขั้นตอนการทดลอง		←————→									
3	จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง					←—→						
4	ทำการขึ้นรูปชิ้นงาน						↔					
5	ทำการบ่มชิ้นงาน							←—→				
6	ทดสอบความแข็งแรงอัด ความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน								←—→			
7	วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง								←————→			

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มีโครงสร้างเป็น 3 มิติแบบอสัณฐาน สารตั้งต้นจะมีซิลิกา (Silica, SiO_2) และอะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก หรือวัสดุปอซโซลาน เช่น ถ้ำลอย ดินขาว และซิลิกาฟุ่ม เป็นต้น โดยต้องทำให้แตกตัวด้วยสารละลายอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง เช่น สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เพื่อเป็นตัวประสานให้เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้าง สามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง หรือใช้ความร้อนเป็นตัวช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้จีโอพอลิเมอร์สามารถเกิดการก่อตัวแข็งแรง และให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์ แสดงได้ดังสมการที่ 2.1 [6]



โดยที่ M คือ ธาตุอัลคาไลน์
- คือ การยึดเกาะพันธะ
Z คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2
N คือ จำนวนหน่วยของโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่
W คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

จีโอพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ ที่เกิดจากการที่ซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสาน มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ และ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ มีโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na^+) หรือ โพแทสเซียม (K^+) เป็นตัวทำให้ประจุสมดุล ณ ตำแหน่งของ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากเหมือนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงเป็นการช่วยลดพลังงานและต้นทุนในการผลิต [6]

2.1.1 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต หรือสารกึ่งผลึก (Semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์เป็นสารประกอบที่มีอะลูมินา และซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสม

สารละลายอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าอุณหภูมิปกติ และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี โดยปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

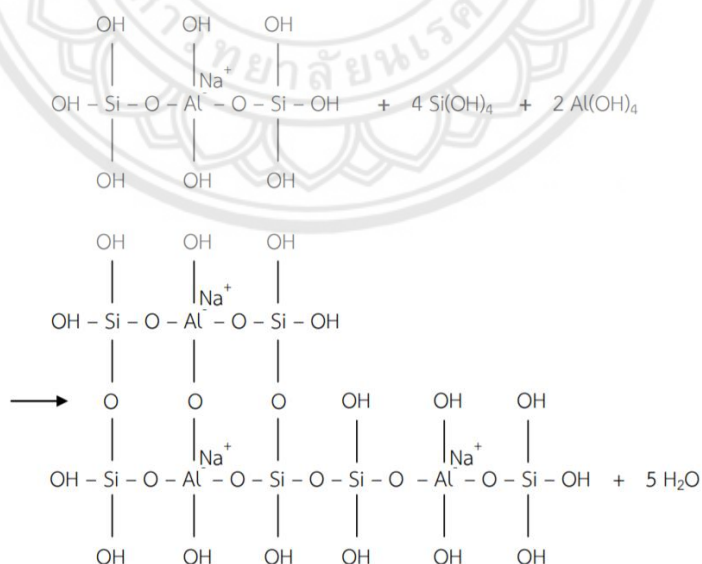
2.1.1.1 การชะละลาย (Dissolution)

เมื่อสารประกอบที่มีซิลิกาและอะลูมินาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำให้เกิดการชะละลายของซิลิกอนไอออน (Si^{4+}) และอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จากสารตั้งต้น เมื่อระบบมีไอออนพอที่จะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออน และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างใหม่ [6]

2.1.1.2 การทำปฏิกิริยาควบนแน่นและลู่โซ่ (Condensation-polymerization)

เกิดจากการเติมสารอัลคาไลน์ซิลิเกต เช่น สารละลายโซเดียมซิลิเกต เพื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไอออนที่พร้อมเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ และทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้เกิดการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง ในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาจะได้โครงสร้างกึ่งเสถียร (Meta-stable) ที่มีองค์ประกอบของอะลูมินามาก

เมื่อเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโครงสร้างจะมีซิลิกาเพิ่มขึ้น อะลูมินามีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับซิลิกา ทำให้ช่วงแรกของปฏิกิริยามีองค์ประกอบของอะลูมินามากกว่าซิลิกา เพราะพันธะของ Al-O มีความแข็งแรงน้อยกว่า Si-O ทำให้พันธะถูกทำลายด้วยสารละลายต่างได้ง่ายกว่า โดยแต่ละโมเลกุลจะทำปฏิกิริยาลู่โซ่ต่อเนื่องกัน ทำให้ได้โมเลกุลที่มีการเชื่อมขวางกันมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลหลังทำปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้นและสามารถรับแรงได้มากขึ้น [6]



รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

2.1.2.1 วัสดุตั้งต้น การเลือกวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์วัสดุนั้นจะต้องมีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักควรมีส่วนที่เป็นอสังฐาน จากการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งโครงสร้างหลักของจีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากซิลิเกตมอนอเมอร์ และมีอะลูมิเนียมมอนอเมอร์ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่ม (Precursor) ให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยช่วยให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างซิลิเกตมอนอเมอร์เป็นโครงสร้างสามมิติของจีโอพอลิเมอร์ [6]

2.1.2.2 ความเข้มข้นสารละลายอัลคาไลน์ เป็นตัวช่วยในการชะละลายซิลิกอน และอะลูมิเนียมไอออนจากวัสดุตั้งต้นซึ่งถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์สูง จะทำให้การชะละลายไอออนของวัสดุตั้งต้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์มากขึ้น นอกจากนี้การที่มีความเข้มข้นสารละลายสูงยังทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้น [6]

2.1.2.3 อุณหภูมิในการบ่ม อุณหภูมิเป็นตัวช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้เร็วขึ้น ทำให้จีโอพอลิเมอร์รับความแข็งแรงอัดได้เร็วขึ้นในระยะเวลาการบ่มที่สั้น โดยการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงในระยะเวลาการบ่มที่สั้น จะทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงอัดใกล้เคียงกับการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลานาน [6]

2.2 เถ้าลอย

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) เป็นผลพลอยได้ (by Product) จากการเผาถ่านหินในโรงงานอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นตัวให้พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตาเรียกว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะถูกพัด ออกมาตามอากาศร้อนเรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งจะถูกดักจับโดยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitation) แล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เพื่อไม่ให้หลุดออกไปเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เถ้าลอยมีลักษณะเป็นสีเทา สีเทาดำหรือสีน้ำตาล เถ้าลอยมีสมบัติ เป็นปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่ง ซึ่งมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่นจะไม่มีสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำที่ภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious Substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาในการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่าน [6]

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติของถ่านหิน มีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลน์ และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (Loss On Ignition : LOI) มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดปริมาณผลรวมของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กของเถ้าลอยไว้ต่ำกว่าร้อยละ 50 ถึงอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.2.2 ชนิดของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.2.2.1 เถ้าลอยชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีสมบัติอื่นตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงทำให้เถ้าลอยมีซิลิกา โดยปกติเถ้าลอยชนิด F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำจึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ

2.2.2.1 เถ้าลอยชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่มีปริมาณผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 50 และมีสมบัติอื่นตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 โดยปกติจะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง นอกจากนี้ลิกไนต์ประกอบด้วยดินเหนียวที่มีอะลูมินาต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C มีซิลิกาและอะลูมินาต่ำ [6]

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกา, อะลูมินา และเหล็กออกไซด์อย่างต่ำ ร้อยละ	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์อย่างมาก ร้อยละ	5	5
ปริมาณความชื้นสูงสุด ร้อยละ	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก ร้อยละ	6	6
ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) สูงสุด ร้อยละ	1.5	1.5

เถ้าลอยชนิด F และชนิด C สามารถพบได้ในประเทศไทย ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและลักษณะการเผาถ่านหิน เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ

เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
แม่เมาะ	41.16	2.30	1.51	5.27	2.70	1.43	2.93	1.66
ระยอง	45.24	8.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72

2.2.3 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

สมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอยจะแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Fly Ash Concrete) แต่สมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาไหม้ เช่น มีน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบสมบัติต่างๆของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C 618 [7] แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C 618 – 97

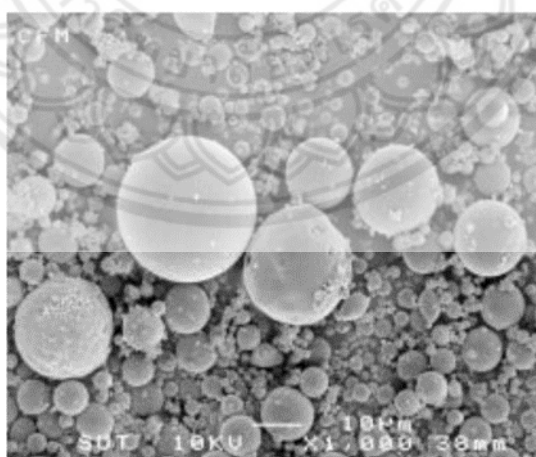
ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก, Max %	34	34
ดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน , น้อยที่สุดร้อยละ (เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	75	75
28 วัน , น้อยที่สุดร้อยละ (เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	75	75
ความต้องการน้ำ : มากที่สุดร้อยละ (เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave, Max %	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity Requirement)		
- ความหนาแน่น, Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
- ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325, Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C 618 – 97

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง % LOI กับ % ของปริมาณที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ตาร์ที่ 28 วัน Max % ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

2.2.3.1 รูปร่างของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีลักษณะเบาลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผา ถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนจะเผาและชนิดของถ่านหิน จากการศึกษาเถ้าลอยจากแหล่งผลิตต่างๆ ประกอบด้วยเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เถ้าลอยถ่านหินชนิดซับพิทูบินัส จาก จ.ระยอง จ.สมุทรสาคร เถ้าลอยถ่านหินแอนทราไซต์จาก จ.กาญจนบุรี และจากการนำเข้าจากต่างประเทศ เมื่อเปรียบเทียบรูปร่างและขนาดของอนุภาคโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) [7] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย 1,000 เท่า)

จุดเด่นทางด้านรูปร่างของเถ้าลอยที่มีทรงกลมหลังจากทดแทนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีต แล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบหรือในการเทคอนกรีตในที่แคบๆ ที่ต้องการให้ลื่นไหลได้ซึ่งคอนกรีตบางชนิดจำเป็นต้องอาศัยสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจจะมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ มีผลให้ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ [7]

2.2.3.2 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งจะใช้ในการทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 μm) โดยวิธีร่อนแบบเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่เล็กกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังบอกขนาดอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine Specific Surface-area Technique) ตามมาตรฐาน ASTM C 204 หรือวิธี Particle-size Analysis หรือ วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ นั้น การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าวไม่ค่อยสัมพันธ์กันนัก [7]

2.3 ผงอะลูมิเนียม

เป็นสารก่อฟองอินทรีย์ เมื่อผงอะลูมิเนียมเจอกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดฟองก๊าซ จึงใส่เพื่อให้เกิดโพรงอากาศในเนื้อชิ้นงาน ทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักเบา สมบัติที่เด่นชัดของผงอะลูมิเนียม คือ การต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี มีความมันวาว ไม่เป็นแม่เหล็กและไม่เกิดประกายไฟ มีการใช้งานในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย สมบัติของผงอะลูมิเนียม [8] แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของผงอะลูมิเนียม

น้ำหนักโมเลกุล	26.98
จุดหลอมเหลว	660.37 °C
จุดเดือด	2,467 °C
ความหนาแน่น	2,700 kg/m ³
ความต้านทานไฟฟ้า	2.6548 microhm - cm ที่ 0°C
ความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอน	1.5 Paulings
อัตราส่วนปัวซอง	0.35

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) สมบัติของผงอะลูมิเนียม

ความแข็งแรงแบบวิกเกอร์	167 MPa
มอดุลัสของยัง	70 GPa
ความทนต่อแรงดึง	6,800 psi Coldroled 16,000 psi
การนำความร้อน	2.37 W/cm/ K ที่ 298.2 K

2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

เป็นตัวช่วยในการชะละลายซิลิกอน และอะลูมิเนียมไอออนจากวัสดุตั้งต้นซึ่งถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์สูง จะทำให้การชะละลายไอออนของวัสดุตั้งต้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์มากขึ้น

2.4.1 ชนิดของโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.4.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง เป็นสถานะปกติของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีขาว มีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ซึ่งสามารถนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการได้ ใช้มากในภาคอุตสาหกรรมและมีใช้บ้างในครัวเรือน และการเกษตร [9]

2.4.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว อยู่ในรูปของสารละลายโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่สามารถเกิดไอระเหยได้ เมื่อสัมผัสจะลื่นเหมือนสบู่ ใช้มากในภาคอุตสาหกรรม [10]

2.4.2 ข้อควรระวังในการใช้งาน

2.4.2.1 ละอองของโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟทำให้เกิดการอักเสบที่เยื่อระบบทางเดินหายใจ หากสูดเอาไอหรือฝุ่นโซดาไฟเข้าไป และอาจมีผลให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ปอด

2.4.2.2 การสัมผัสกับผิวหนังที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้เกิดเป็นแผลพุพองและเป็นแผลเป็นได้ หรือการสัมผัสกับไอของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลานานจะทำให้ผิวหนังแห้งแตกสะเก็ดเป็นแผลได้ ระวังอย่าให้โซดาไฟถูกผิวหนัง

2.4.2.3 เมื่อสัมผัสกับตาจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง ทำลายเนื้อเยื่อแผลพุพองเป็นต้อหินหรือต้อกระจก และอาจตาบอดได้

2.4.2.4 เมื่อเข้าสู่ปาก และทางเดินอาหารจะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงต่อเนื้อเยื่อทางเดินอาหาร ทำให้เป็นแผลที่ช่องปาก และลำคอไหม้ ปวดท้อง ท้องเสีย อาเจียน วิงเวียน จนถึงตายได้และอาจกลายเป็นมะเร็งในระยะเวลา 10-20 ปี ได้

2.4.2.5 ขณะใช้งาน ควรสวมผ้าปิดจมูก สวมถุงเท้า ถุงยางมือ แวนตากันสารเคมี และสวมชุดป้องกันสารเคมีให้เรียบร้อย [11]

2.4.3 การปฐมพยาบาลเบื้องต้น

2.4.3.1 การสูดดม นำตัวไปที่อากาศถ่ายเท หากไม่หายใจควรทำ CPR (ผายปอด) และรีบนำส่งแพทย์

2.4.3.2 การกลืนกิน ห้ามทำให้เกิดการอาเจียน โดยให้ดื่มนมและน้ำสะอาด และรีบนำส่งแพทย์ ไม่ควรให้อะไรทางปากตอนหมดสติ

2.4.3.3 ทางผิวหนัง ล้างผิวหนัง โดยให้น้ำสะอาดผ่าน 15 นาที ถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนออก และพบแพทย์

2.4.3.4 ทางดวงตา ล้างดวงตาด้วยน้ำสะอาด 15 นาที มั่นผลัดเปลี่ยนน้ำ กะพริบตาเป็นครั้งคราวและรีบนำส่งแพทย์ [12]

2.4.4 ประโยชน์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์หรืออีกชื่อหนึ่งคือโซดาไฟ สามารถใช้ในรูปของชนิดแข็งและชนิดเหลว ในด้านต่างๆ คือ

2.4.4.1 เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารละลายโซดาไฟเหลว

2.4.4.2 ใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตสบู่ ด้วยการทำปฏิกิริยากับไขมันเปลี่ยนเป็นสบู่

2.4.4.3 ใช้สำหรับขจัดคราบสกปรก และสิ่งอุดตันในท่อระบายน้ำด้วยก้อนหรือละลายน้ำเทราดบริเวณที่มีการอุดตันของท่อ

2.4.4.4 ใช้สำหรับปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำให้เป็นด่าง โดยเฉพาะในระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำ

2.4.4.5 ใช้สำหรับการตกตะกอนของแร่ธาตุหรือโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.4.4.6 ใช้ฟื้นฟูสภาพของเรซินของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ

2.4.4.7 ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมไหม โดยเฉพาะขั้นตอนการลอกกาวยไหมที่ต้องต้มละลายกาวยไหมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการฟอกไหมในระดับครัวเรือน ชาวบ้านเรียกโซดาไฟว่า ผงมัน ซึ่งหาซื้อได้ตามร้านขายเคมีฟอกไหม [10]

2.5 โซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีลักษณะไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน สามารถละลายได้ในน้ำและมีฤทธิ์เป็นด่าง เกิดจากการหลอมส่วนผสมระหว่างโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) หรือโซดาแอสกับทรายแก้ว เมื่อหลอมเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วจะได้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามากเป็น 3 ชนิด [6] แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:1.97 ถึง 1:2.17	1:2.34 ถึง 1:2.58	1:3.18 ถึง 1:3.59
เหล็ก ไม่เกินร้อยละ	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ไม่เกินร้อยละ	0.21	0.21	0.2

2.5.1 ประโยชน์ของโซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกตใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆที่สำคัญ ได้แก่

2.5.1.1 อุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก ด้วยสมบัติเฉพาะในสูตรการผลิตผงซักฟอกที่สำคัญคือ ช่วยป้องกันการกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะในเครื่องซักผ้า ป้องกันการกัดกร่อน เครื่องแก้วและเซรามิก หากใช้วิธีล้างจานด้วยเครื่อง โซเดียมซิลิเกตมีความสามารถในการเป็นสารช่วยควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่สำคัญในช่วง pH 9-12 ความเป็นด่างจะปรับสภาพสิ่งสกปรก ที่เป็นกรดให้เป็นกลางได้เป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา Emulsification และ Saponification ทำให้น้ำมันแตกตัวผสมกับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สิ่งสกปรกกระจายตัวออกจากกันไม่เกาะเป็นก้อน

2.5.1.2 อุตสาหกรรมการฟอกย้อมใช้ในกระบวนการฟอกสีด้วย Hydrogen Peroxide ทั้งในอุตสาหกรรมกระดาษและเส้นใยเพื่อปรับปรุงความขาวสว่าง ใช้เป็นตัวช่วยในการย้อมผ้าและป้องกันสีผ้าตก การทำผ้าบาติก และเป็นสารฟอกสีเพอร์ออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพ โดยจะสร้างพันธะหรือจับไอออนของโลหะแทรนซิชันซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดสี เช่น เหล็ก แมงกานีส และทองแดง เป็นต้น

2.5.1.3 อุตสาหกรรมก่อสร้าง ใช้โซเดียมซิลิเกตในการกระจายตัวของส่วนผสมวัตถุดิบประเภทปูนขาวและน้ำดินในกระบวนการผลิตซีเมนต์พอร์ตแลนด์แบบเปียก (Wet Process) เพื่อเพิ่มสมบัติการแห้งเร็ว และการทนกรด ใช้ในการทำให้ดินแข็งตัว ใช้ทำวัสดุที่สามารถรักษารูปแบบเดิมไว้ได้เมื่อถูกความร้อนสูง ใช้เป็นน้ำยาบ่มคอนกรีตชนิดโซเดียมซิลิเกต สามารถแทรกซึมบนพื้นผิวของคอนกรีตและปูนฉาบได้เป็นอย่างดี และทำปฏิกิริยากับหินปูนที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง จะทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตแข็งขึ้น ลดรูพรุนที่เกิดจากน้ำในคอนกรีตที่ระเหยออกมาได้

2.5.1.4 อุตสาหกรรมน้ำมันใช้ในการผลิต Si-Al Catalyst ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดการแตกตัวนอกจากนี้ ใช้ในการบำบัดน้ำโดยเกลือของกรดจะถูกดึงประจุออกไปพร้อมกับซิลิเกตให้เป็นกลางและจะเกิดสารละลายประจุบวกขึ้น ซึ่งเป็นตัวเพิ่มการรวมตัวของตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ร่วมกับอะลูมิเนียมซัลเฟตและใช้ในกระบวนการลอยแร่ซึ่งเป็นการแยกแร่หรือแต่งแร่วิธีหนึ่ง ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่างๆ ใช้เป็นสารดูดความชื้นสำหรับก๊าซแห้งเป็น

ตัวเติมในยาสีฟันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารขัดฟัน ปัจจุบันโซเดียมซิลิเกตกำลังมีบทบาทในฐานะเป็นตัวเชื่อม และทำให้เกิดโครงสร้างของพวก Geopolymer ที่ไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนในการเผาสูงเหมือนการผลิตเซรามิก ซึ่งโซเดียมซิลิเกตในอุตสาหกรรมเซรามิกยังถือว่าสัดส่วนการใช้ยังมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ ใช้สำหรับเป็นตัวช่วยกระจายการลอยตัว เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการก่ออิฐเตาเผา เป็นตัวเคลือบใสสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความมันไม่มากนัก หรือใช้ปิดผิวจางๆ เท่านั้น [13]

2.5.2 ข้อควรระวังในการใช้งาน

2.5.2.1 สารจะปล่อยควีนพิษออกมาภายใต้สภาวะที่เกิดไฟ

2.5.2.2 การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตมากเกินไปจะทำให้เกิด Over Deflocculant ได้ และจะทำให้ชิ้นงานร้าวได้ง่าย เนื่องจากน้ำแก้วจะฟอร์มตัวเป็นแก้วได้หลังแห้งหรืออบแห้งทำให้ไม่ยืดหยุ่นและเปราะ [14]

2.5.2.3 ถ้าสูดดมเข้าไป ให้ย้ายผู้ป่วยไปที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าไม่หายใจให้การช่วยหายใจ

2.5.2.4 ในกรณีที่ถูกผิวหนัง ให้ล้างออกด้วยน้ำปริมาณมากเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที ถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่เปื้อนสาร

2.5.2.5 ในกรณีที่เข้าตาให้ล้างด้วยน้ำปริมาณมากเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที ต้องแน่ใจว่าได้ล้างตาอย่างเพียงพอ โดยใช้นิ้วมือแยกเปลือกตาออกจากกันระหว่างล้าง

2.5.2.6 เมื่อกินกิน ให้ใช้น้ำบ้วนปากในกรณีที่ผู้ป่วยที่ยังมีสติอยู่ ไปพบแพทย์ทันที ห้ามทำให้อาเจียน [13]

2.6 การเตรียมวัตถุดิบ

2.6.1 การคัดแยกขนาด

เป็นการคัดแยกขนาด โดยอาศัยความแตกต่างของความละเอียดระหว่างอนุภาค ในการแยกอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่

การใช้ตะแกรงร่อน (Screening or Sieving) เป็นกระบวนการที่จะให้ขนาดของอนุภาคที่สามารถผ่านรูตะแกรงที่ใช้เป็นเครื่องมือในการคัดอนุภาคที่ผ่านได้จะเรียกว่า Undersize ส่วนอนุภาคที่ไม่สามารถผ่านได้จะเรียกว่า Oversize โดยเครื่องมือจะมีลักษณะเป็นตะแกรงแบบอยู่กับที่ หรือมีการสั่น โดยมีช่องเปิดหรือแผ่นที่เจาะรูเป็นวงกลมให้มีเส้นรอบวงเท่ากับเส้นรอบวงของวัตถุดิบตามขนาดที่ต้องการเรียกว่า Mesh No. ลักษณะของตะแกรงจะเป็นแผ่นแบนที่เรียงเป็นชุดต่อเนื่องกัน หรือเรียงซ้อนกันเป็นชั้นมีรูเปิดไล่ขนาดกันมาเพื่อให้คัดได้หลายขนาด การคัดแยกด้วยตะแกรงจะมีการใช้แรงทางกลมาช่วย เช่น ใช้แรงให้เกิดการเขย่า หรือการหมุน เป็นต้น [15]

2.6.2 กระบวนการผสม

เครื่องกวนสารแม่เหล็กหรือเครื่องผสมแม่เหล็ก เป็นอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการที่ใช้สนามแม่เหล็กหมุนเพื่อทำให้แท่งกวน (หรือ Flea) ที่แช่อยู่ในของเหลวเกิดการหมุนวนเร็วมากจนเกิดการกวน สนามหมุนอาจถูกสร้างขึ้นโดยแม่เหล็กหมุนหรือชุดแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่กับที่ ซึ่งวางไว้ได้ภาชนะพร้อม กับของเหลว โดยทั่วไปแล้วแท่งกวนจะเคลือบด้วย PTFE หรือเคลือบด้วยแก้ว การเคลือบสารนี้มีจุดประสงค์ให้ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับของเหลวที่ต้องการกวน ลักษณะเป็นรูปแท่งแปดเหลี่ยม (บางครั้งก็เป็นวงกลม) แม้ว่าเพื่อการกวนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น มักใช้ในทางเคมีและชีววิทยา ซึ่งสามารถใช้ภายในภาชนะหรือระบบที่ปิดสนิทโดยไม่ต้องใช้ซีลแบบหมุนที่ซับซ้อน เป็นที่ต้องการมากกว่าเครื่องกวนแบบใช้เกียร์ เพราะเสียบกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่า และไม่มีชิ้นส่วนภายนอกที่เคลื่อนไหวให้แตกหักหรือสึกหรอได้ (นอกเหนือจากแม่เหล็กแท่งธรรมดาเอง) แท่งแม่เหล็กทำงานได้ดีในภาชนะแก้วที่ใช้กันทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากแก้วไม่ส่งผลกระทบต่อสนามแม่เหล็ก ขนาดที่จำกัดของแท่งหมายความว่าสามารถใช้เครื่องกวนแม่เหล็กสำหรับการทดลองที่ค่อนข้างเล็กเพียง 4 ลิตรหรือน้อยกว่า แท่งกวนยังมีปัญหาในการกวนกับของเหลวหนืดหรือสารแขวนลอยที่หนา เนื่องจากแท่งกวนมีขนาดเล็กจึงทำความสะอาดและฆ่าเชื้อได้ง่ายกว่าอุปกรณ์กวนอื่นๆ โดยที่ไม่ต้องการน้ำมันหล่อลื่นที่อาจปนเปื้อนในภาชนะและผลิตภัณฑ์ เครื่องกวนแม่เหล็กอาจรวมถึงจานร่อนหรือวิธีอื่นในการให้ความร้อนกับของเหลว [16]

2.7 การบ่ม

เป็นวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ของจีโอพอลิเมอร์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การพัฒนาความแข็งแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิในการบ่มเป็นตัวช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้เร็วขึ้น ทำให้จีโอพอลิเมอร์รับความแข็งแรงอัดได้เร็วขึ้น ในระยะเวลาการบ่มที่สั้น โดยการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงในระยะเวลาการบ่มที่สั้น จะทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงอัดใกล้เคียงกับการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน

การที่ความแข็งแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังสูงขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เป็นการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของซิลิกาและอะลูมินาในแก้วลอย ทำให้เกิดสมบัติในการยึดประสานกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์และมวลรวมมากขึ้น เพิ่มความแข็งแรงคล้ายกับการก่อตัวและแข็งตัว ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงอัดสูงขึ้นตามอายุที่บ่ม

การบ่มที่อุณหภูมิห้องนี้เป็นผลจากค่าที่มีความเข้มข้นสูง สามารถชะละลายเอาซิลิกาและอะลูมินาจากแก้วลอยได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ได้ดีขึ้น และส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงอัด และความตึบน้ำ (การกักน้ำ) มากขึ้น ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่สูง มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์เป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น นอกจากนี้อาจมีผลมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่าง

แคลเซียมในเถ้าลอยและต่างที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์ เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาบางส่วนที่ถูกชะละลายออกมา ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ซึ่งเป็นสารที่มีกำลังต่ำ และละลายน้ำได้ ส่งผลทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความตึบน้ำ (การกักน้ำ) มากขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากจะลดสารประกอบที่ไม่เป็นประโยชน์ลงแล้ว ยังได้สารแคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย [17]

2.8 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.8.1 การทดสอบความหนาแน่น

คืออัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของสสาร โดยวัตถุ ที่มีมวลในหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่กำหนดมากเท่าไร ยิ่งแสดงให้เห็นว่าวัตถุดังกล่าวมีความหนาแน่นมากเท่านั้น นอกจากนี้ ความหนาแน่นยังแปรผันตามมวลอะตอม (Atomic Mass) ของธาตุหรือมวลโมเลกุลของสารประกอบอีกด้วย

โดยหน่วยของความหนาแน่นที่ผู้คนนิยมใช้กันคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) และกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) และจากสูตรการคำนวณหาความหนาแน่นข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นนั้นเป็นอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตร ที่ไม่ได้คำนึงถึงปริมาณของวัตถุหรือสารตั้งต้นทั้งหมดที่มีอยู่ในขณะนั้น

สูตรการคำนวณหาความหนาแน่นของสสารจึงเป็นการคำนวณหาความหนาแน่นเฉลี่ยของสารโดยทั่วไป ดังนั้น ความหนาแน่นจึงเป็นสมบัติที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของสสาร (Intensive Property) ความหนาแน่นของสสารยังแปรผันตามมวลอะตอม (Atomic Mass) ของธาตุหรือมวลโมเลกุลของสารประกอบ รวมไปถึงปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมอีกด้วย เช่น อุณหภูมิ (Temperature) และความดัน (Pressure) โดยเฉพาะความหนาแน่นของก๊าซที่มักจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความดันได้ง่ายกว่าสสารในสถานะอื่นซึ่งโดยทั่วไป วัตถุจำนวนมากจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน และจากการที่วัตถุขยายตัวขึ้นนั้น ส่งผลให้ปริมาตรของวัตถุเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อปริมาตรเพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นของวัตถุดังกล่าวจึงลดลง ซึ่งปรากฏการณ์ทางธรรมชาตินี้สามารถเกิดขึ้นได้ในสสารทุกสถานะ ทั้งที่เป็นของแข็งของเหลวและก๊าซ [18]

2.8.1.1 วิธีการทดสอบ

ก. อบชิ้นงานทดสอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อให้น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบคงที่ นำชิ้นงานทดสอบออก ทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบทันที บันทึกค่าน้ำหนักแห้ง (D) ด้วยทศนิยม 2 ตำแหน่ง

ข. ใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดขนาดหน้าตัด ความสูง และบันทึกค่าปริมาตร

(V) ด้วยทศนิยม 2 ตำแหน่ง

2.8.1.2 การคำนวณ

$$\rho = D / V \quad (2.2)$$

- เมื่อ ρ หมายถึง ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 D หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานทดสอบแห้ง (กรัม)
 V หมายถึง ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.8.2 การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ

คือปริมาณที่น้ำถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ (Capillary Pore) ของมวลรวม แต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิวนอกของมวลรวม (Free Water) แสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่อยู่ในช่องว่างต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอบแห้ง [20]



รูปที่ 2.3 สภาพความชื้นของมวลรวม

การทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดำเนินการเพื่อตรวจสอบสมบัติความทนทานของอิฐ เช่น ระดับการเผา คุณภาพ และลักษณะการทำงานของอิฐในสภาพอากาศต่างๆ โดยอิฐที่มีอัตราการดูดซึมน้ำที่มากกว่าร้อยละ 20 จะทำให้ความร้อนผ่านเข้าสู่ผนังเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แต่ถ้าอิฐที่มีการดูดซึมน้ำน้อยกว่าร้อยละ 7 จะต้านทานความเสียหายจากการถูกแช่แข็งได้ดี (ในอุณหภูมิ 32 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 0 องศาเซลเซียส) ในขณะที่อิฐมีสภาพที่แห้ง แต่เมื่อนำไปใช้งานจริง จะมีความชื้นและน้ำเข้ามาภายในอิฐ จึงทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมาก สำหรับอิฐที่มีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี จะต้องมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำ [21]

2.8.2.1 วิธีการทดสอบ

ก. อบชิ้นงานทดสอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อให้น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบคงที่ นำชิ้นงานทดสอบออก ทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบทันที บันทึกค่าน้ำหนักแห้ง (W_d) ด้วยทศนิยม 2 ตำแหน่ง

ข. วางชิ้นงานทดสอบทั้งหมดลงในหม้อต้มที่มีตะแกรงอยู่ภายใน เพื่อไม่ให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับกันและขอบหม้อต้ม เติมน้ำให้ท่วมชิ้นงานอยู่เสมอในระหว่างการต้ม ต้มในน้ำเดือดนาน 5 ชั่วโมง จากนั้นแช่ชิ้นงานทดสอบไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง

ค. หลังการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบในน้ำ ให้ซับชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น เบา ๆ บนผ้าลินิน หรือผ้าฝ้ายที่เหมาะสม เพื่อซับน้ำส่วนเกินที่ผิวของชิ้นงานทดสอบออก อย่าเช็ดมากเกินไป เพราะจะทำให้น้ำในรูพรุนของชิ้นงานทดสอบออกมาด้วย ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบเปียก (W_w) ในหน่วยกรัม ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ทันทีหลังจากซับน้ำออก ขั้นตอนนี้จะควรทำอย่างรวดเร็วเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดจากการระเหยของน้ำออกจากชิ้นทดสอบ จากนั้นบีบน้ำที่อยู่ในผ้าเปียกบางส่วนออก เพื่อเช็ดชิ้นงานทดสอบต่อไป [19]

2.8.2.2 การคำนวณ

$$W.A.\% = [(W_w - W_d) / W_d] \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ W_w หมายถึง น้ำหนักของชิ้นงานหลังต้ม (กรัม)

W_d หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานที่แห้ง (กรัม)

2.9 การทดสอบความแข็งแรงอัด

เป็นการทดสอบการตอบสนองของวัสดุเมื่อมีแรงกด (Compression Force) มากระทำ การทดสอบแรงกดเป็นการใช้แรงกด หรือแรงอัดในแนวตรง ทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ความยาวหดสั้นเข้าตามทิศทางของแรงที่กระทำ จะใช้หลักการเพิ่มแรง (Force, N) หรือความเค้นกดอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอแล้ววัดค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง วัสดุที่นำมาทดสอบหากเป็นวัสดุที่มีความเหนียวจะมีความโปร่งออกด้านข้าง วัสดุที่มีความอ่อนจะถูกอัดแบนโดยไม่แตกหัก แต่ถ้าวัสดุมีความเปราะจะเกิดการแตกหัก [21]

2.9.1 ลักษณะของการทดสอบความแข็งแรงอัด

2.9.1.1 การทดสอบโดยการอัด นิยมใช้ทดสอบวัสดุที่มีคุณสมบัติเปราะ เช่น เหล็กหล่อ หรือคอนกรีต เพราะจะให้ผลการทดสอบถูกต้องแน่นอนกว่าการทดสอบกับโลหะเหนียว

2.9.1.2 การทดสอบเริ่มจากเพิ่มแรงอัดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ จนกระทั่งชิ้นงานเสียรูปและแตก

2.9.1.3 รูปร่างของชิ้นงานจะเป็นทรงกระบอกหรือลูกบาศก์

2.9.1.4 การเสียรูปอาจจะมีลักษณะพองออกเหมือนรูปถัง (Barrel) ซึ่งจะไม่เกิดคอคอดเหมือนกับการทดสอบโดยการดึง [22]

2.9.2 พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงอัด

2.9.2.1 วัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อ และ คอนกรีต เมื่อได้รับแรงอัดสูงเกินกว่าความสามารถที่จะรับไว้ได้ ก็เกิดการแตกทันที โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่าง ทั้งนี้เพราะว่าวัสดุเปราะ มีค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดต่ำกว่าค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด และความแข็งแรงดึงสูงสุด

2.9.2.2 โลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้า และ อะลูมิเนียม เมื่อได้รับแรงอัดสูงเกินกว่าความแข็งแรงที่จุดคราก ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขยายโตขึ้น พองออกเหมือนถัง (Barrel Shape) ซึ่งทำให้มีพื้นที่รองรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น [22]

2.9.3 วิธีการทดสอบ

2.9.3.1 นำก้อนตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด

2.9.3.2 เปิดเครื่องทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราเร็วสม่ำเสมอ

2.9.3.3 กดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าแรงที่ได้

2.9.3.4 นำค่าแรงและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่าความแข็งแรงอัด [23]

2.9.4 การคำนวณค่าความแข็งแรงอัด

$$\sigma = F_{\max} / A \quad (2.4)$$

เมื่อ σ หมายถึง ความเค้น มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pa)

F_{\max} หมายถึง แรงที่มากกระทำต่อวัสดุ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

2.9.5 ข้อควรระวังในการทดสอบ

2.9.5.1 ส่วนปลายชิ้นทดสอบ จะต้องตกแต่งหรือเตรียมให้พื้นผิวราบและตั้งฉากกับแกนชิ้นทดสอบ เพราะจะทำให้แรงอัดสามารถกระทำได้ตามแนวแกนชิ้นทดสอบ

2.9.5.2 ขณะทดสอบมักจะเกิด การโก่งงอได้ ซึ่งเรียกว่า Buckling หรือเกิดการดัด เนื่องจาก มีความเค้นดัด (Bending Stress) เนื่องจากชิ้นทดสอบมีความสูงเกินไป เมื่อเทียบกับ พื้นที่หน้าตัด

2.9.5.3 เนื่องจากการขยายตัวออกทางด้านข้างของชิ้นทดสอบ ส่งผลให้เกิดความเสียหายบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแท่นรองรับ (Bearing Block) กับปลายชิ้นทดสอบ จะเป็นผลทำให้เกิดระบบความเค้นที่ซับซ้อน ซึ่งก่อให้เกิดความยุ่งยากมากในการคำนวณหาความเค้นที่ถูกต้อง

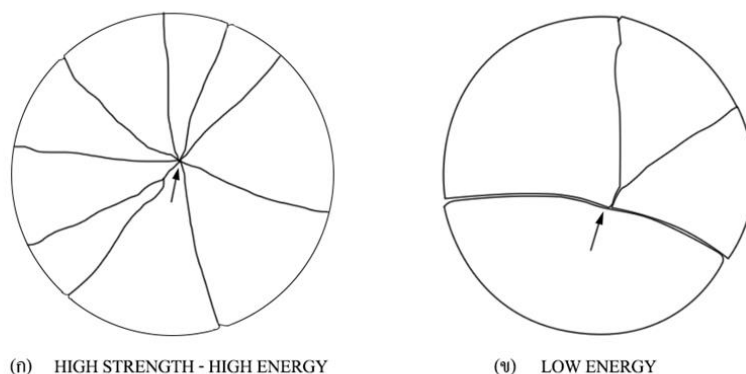
2.9.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนสูงและพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ จะต้องมีอัตราส่วนตามมาตรฐานและเหมาะสมกับเครื่องทดสอบ

2.9.6 การแตกเปราะของเซรามิก (brittle fracture of ceramics)

การแตกแบบเปราะของวัสดุเกิดขึ้นเมื่อการกระทำของแรงทางกลมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ทำให้วัสดุแตกออกจากกันเป็นสองชิ้นหรือมากกว่า โดยปรากฏให้เห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) ปัจจัยที่จะแสดงตัวเป็นจุดเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวและนำไปสู่การแตกแบบเปราะได้แก่ลักษณะเฉพาะของวัสดุและจุดบกพร่อง เช่น ร่องหลุม, ช่องว่างขนาดเล็ก, สิ่งเจือปน, รอยร้าว

ในการแตกหักวัสดุเปราะประเภทเซรามิก จะมีจุดกำเนิดรอยแตกของวัสดุเปราะมักจะประกอบด้วยความไม่ปกติ (Irregularity) ซึ่งในที่นี้หมายถึง รอยตำหนิ (Flaws) และข้อบกพร่อง (Defects) หรือจุดซิงกูลาริตี (Singularity) ในเนื้อวัสดุ ที่จะเป็นแหล่งกำเนิดของตัวขยายความเค้น (Stress Concentrator)

ลักษณะของกิ่งก้านรอยแตกมีความสัมพันธ์กับขนาดของความเค้นที่มากทำให้เกิดการแตกหัก ถ้าความเค้นมีค่ามากพอที่กระทำให้เกิดการแตกหักนั้น รอยร้าว หรือรอยแตกจะยืดยาวออกเป็นกิ่งก้าน (Branch) และมีการรวมกันของกิ่งก้าน (Rebranch) โดยทั่วไปรอยแตกจะแตกออกเป็นกิ่งก้าน บางครั้งหลังจากรอยแตกวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด และความยาวที่กิ่งก้านของรอยแตกมาบรรจบกัน จะประมาณอย่างหยาบๆได้เป็นจำนวนเท่าของความยาวกิ่งก้านที่จะจุดกำเนิด (Original Branching Length) ลักษณะการแตกหักที่แตกต่างในวัสดุซึ่งได้รับการกระทำจากความเค้นที่ต่างกันจะสอดคล้องกับการพิจารณาจากพลังงาน (Energy Consideration) กล่าวคือสำหรับชิ้นงานที่มีความเค้นสูงพลังงานจากงานที่กระทำ (Work Energy) วัสดุที่แตกหักเนื่องจากการกระทำด้วยความเค้นสูง จะมีลักษณะการแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆและแหลมเป็นจำนวนมาก (รูปที่ 2.4 ก)) พลังงานจากงานที่กระทำจะสูงจึงจำเป็นต้องปล่อยพลังงานออกมาเป็นจำนวนมากซึ่งรวมทั้งการปลดปล่อยในรูปของพลังงานผิว (Total Material Surface Energy) ในขณะที่วัสดุที่แตกหักเป็นชิ้นใหญ่ๆจะมีจำนวนชิ้นน้อยกว่า มักเกิดจากความเค้นต่ำที่มากกระทำเนื่องจากมีพลังงานน้อย (รูปที่ 2.4 ข))



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงลักษณะแตกหักแบบกิ่งก้านที่แรงกระทำต่างกัน

(ก) ความเค้นสูง

(ข) ความเค้นต่ำ

2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นกล้องรูปแบบหนึ่งที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ และมีการส่องไปที่วัตถุ ก่อนที่แสงจะส่องผ่านเข้าสู่สายตาเรา ซึ่งแสงที่อยู่ภายในระบบที่สะท้อนกลับเข้าสู่สายตาเรา จะทำให้เราเห็นภาพได้โดยการมองผ่านเลนส์ Eyepiece กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีหลายชนิดซึ่งส่วนใหญ่จะถูกแบ่งไปตามลักษณะการใช้งาน ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น Biological Microscope สำหรับงานทางด้านชีววิทยา Metallogical Microscope สำหรับงานทางด้านโลหะ Stereo Microscope สำหรับงานอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งจากการที่เราสามารถมองเห็นวัตถุจากแสงที่วิ่งสู่สายตาเรา ทำให้สามารถใช้กล้องต่างๆ มาช่วยในการถ่ายภาพได้ ซึ่งกล้องส่วนใหญ่ที่นำมาใช้จะเป็น กล้อง CCD หรือ กล้อง Digital [24]

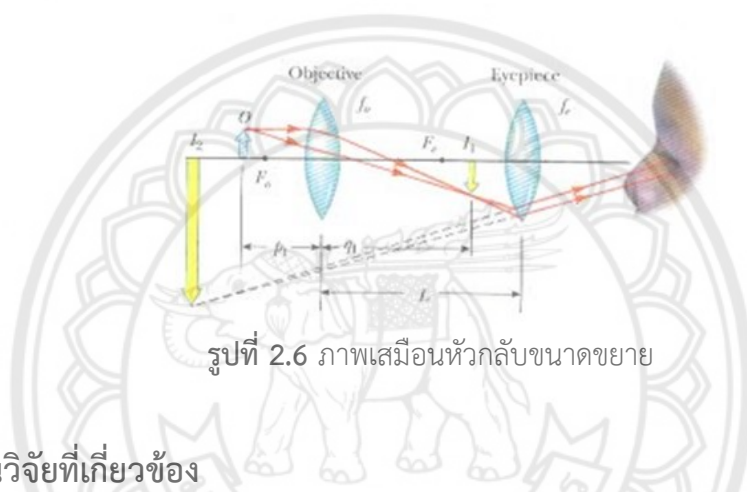


รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

2.10.1 ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดสอบ : ชิ้นงานมีขนาดเล็กพอที่จะวางลงบนแท่นวางวัตถุได้ โดยชิ้นงานจะไม่ผ่านการเจียรระไน (Grinding), การขัดเงา (Polishing) และการกัดกร่อน (Etching) [25]

2.10.2 หลักการขยายภาพ

เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) เป็นเลนส์แรกที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ใหญ่ขึ้นและเป็นเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสสั้น ดังนั้นวัตถุที่จะศึกษาจะต้องอยู่ห่างจากเลนส์วัตถุมากกว่าทางยาวโฟกัสเล็กน้อย เลนส์ใกล้วัตถุจะสร้างภาพแรกขึ้นมาเป็นภาพจริงหัวกลับขนาดขยาย โดยที่ตำแหน่งของภาพจะไปตกใกล้เลนส์ใกล้ตา (Ocular lens หรือ Eyepiece) ซึ่งใกล้เลนส์มากกว่าทางยาวโฟกัสของเลนส์ ทำให้เกิดภาพเสมือนหัวกลับขนาดขยาย [25] แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพเสมือนหัวกลับขนาดขยาย

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภัทรกมล ไชยภูมิ [5] ศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้แก้วลอย แก้วเคลือบ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซลิเกตเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อเปรียบเทียบสมบัติโดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณโซเดียมออกไซด์ แก้วเคลือบ (ซิลิกา) และน้ำที่แตกต่างกันออกไป โดยกระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เริ่มจากเตรียมวัตถุดิบตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ เติมสารละลายโซเดียมซลิเกตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในน้ำกลั่น ผสมในเข้ากันแล้วรอให้สารละลายเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมผงแก้วลอยหรือแก้วเคลือบลงในสารละลายที่เตรียมไว้ แล้วจึงเทลงในแม่แบบปิดฝาแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องหรือ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจาก 7 วันแล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ ผลการทดสอบพบว่า ชิ้นงานที่ใช้แก้วลอยและสารละลายโซเดียมซลิเกตเป็นสารตั้งต้น เมื่อผสมเข้าด้วยกันแล้วจะเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถเทลงในแม่แบบได้ ดังนั้นชิ้นงานนี้จึงไม่สามารถทดสอบได้ ชิ้นงานที่ใช้แก้วลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นพบว่า เมื่อผสมแล้วสามารถไหลตัวได้ดี เมื่อนำไปทดสอบสมบัติพบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.5 เป็น 1.0 โมลาร์ ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1.5 โมลาร์ ผลคือความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ

ถ้าแก่ลบส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์แข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของน้ำมากขึ้น ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์จะลดลง และเมื่อปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการบ่มจากอุณหภูมิห้องไปเป็น 60 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าสามารถสังเกตเห็นผลของซิลิกา โซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ได้ชัดเจน

ธิติสุดา เรือนใจมัน [6] ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยแก้วและเส้นใยพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างรูพรุนในงานจีโอพอลิเมอร์พูนตัว ได้เสนอวิธีการทำจีโอพอลิเมอร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นั่นคือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในอุตสาหกรรมกระดาษมาใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์พูน โดยนำมาผสมกับสารละลายอัลคาไลน์แอคทีเวเตอร์ระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โดยทดลองในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ 1:1, 1:2 และ 1:3 จากนั้นจึงนำมาผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยพอลิโพรพิลีน (PP) ที่ปริมาณร้อยละ 2.5, 3.3 และ 4.2 โดยน้ำหนัก และได้ขึ้นรูปด้วยการเทแบบ หลังจากนั้นจะนำมาบ่มขึ้นงานไว้ระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน เพื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์การเกิดรูพรุน, ความหนาแน่น, สมบัติเชิงกล, สมบัติเชิงความร้อน นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบโครงสร้างเฟสและโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค XRD และ SEM จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต 1:3 มีสมบัติที่ดีที่สุดคือมีรูพรุนลดลงและมีกำลังอัดและกำลังดัดสูง ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่นำมาผสมเส้นใยแก้วและเส้นใยพอลิโพรพิลีนนั้น พบว่ายังมีปริมาณเส้นใยแก้วและเส้นใยพอลิโพรพิลีนมาก จะส่งผลให้ความหนาแน่น กำลังอัดและกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมเส้นใยแก้วทำให้ได้สมบัติการนำความร้อนต่ำลง ดังนั้นการศึกษาวิจัยสรุปได้ว่า สัดส่วนผสมของสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยในสถานะสดและแข็งตัว ทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และการเกิดรูพรุนโดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:3 ซึ่งผลจากการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการนำจีโอพอลิเมอร์ไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างให้ได้ประโยชน์สูงสุดต่อไป

R.B. Kejkar, S.P. Wanjari, D. Sharma และ R. Rajankar [26] ได้ทำการศึกษากการทดสอบประสิทธิภาพทางกายภาพของอิฐจีโอพอลิเมอร์ฐานเถ้าลอย โดยนำเถ้าลอยที่ได้จากการเผ่าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ Sipat ประเทศอินเดีย ผสมกับซีเมนต์ ซิลิกาฟุ้ง และสารละลายอัลคาไลน์ 2 โมลาร์ ทำการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่สัดส่วนระหว่างเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ให้แตกต่างกัน โดยเริ่มจากให้ความร้อนเถ้าลอยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดความชื้น ซีเมนต์และซิลิกาฟุ้งผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของจีโอพอลิเมอร์ เมื่อผสมได้ที่แล้วให้เทลงแม่พิมพ์ขนาด 200 มม. x 100 มม. x 90 มม. และให้แรงกดอัดด้วยเครื่องทำอิฐไฮดรอลิกคอมแพคชัน อิฐเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เหล่านี้ต้องบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะทำการบ่มด้วยความร้อนโดยให้ความความด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าการบ่มด้วยความร้อนจะช่วยปรับปรุง

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันให้เพิ่มขึ้นในระยะเวลาอันสั้น ความแข็งแรงของอิฐจีโอพอลิเมอร์ฐานเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจนถึงขีดจำกัดแล้วจึงค่อยๆลดลง อิฐจีโอพอลิเมอร์ฐานเถ้าลอยที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 นั้นมีสมบัติที่ดีที่สุด สามารถรับแรงอัดได้ 12.13 MPa และความต้านทานแรงดึงดัดอยู่ที่ 2.64 MPa การดูดซับน้ำของอิฐและการออกดอกซึ้เกลือปูนของอิฐนั้นมีปริมาณเล็กน้อยอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐาน IS1077: 1992 และอาจเกิดจากสารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ในการเตรียมอิฐเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

U.S. Agrawal ,S.P. Wanjari ,D.N. Naresh [27] ได้ทำการศึกษาการทดสอบสมบัติความแข็งแรงของคอนกรีตที่วัสดุเชื่อมประสานคือจีโอพอลิเมอร์ฐานเถ้าลอย เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป โดยนำทรายจากแม่น้ำในเมืองมาดูไรในประเทศอินเดีย ผสมกับซีเมนต์พอร์ตแลนด์และหินกรวดทำเป็นคอนกรีต ส่วนจีโอพอลิเมอร์จะใช้เถ้าลอยผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ โดยสารละลายเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเม็ด (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 90) ผสมกับน้ำ ให้มีความเข้มข้น 4 โมลาร์ จากนั้นเติมโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เตรียมในสัดส่วน $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} : 1:2$ โดยน้ำหนัก แล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วผสมกับเถ้าลอยในอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลาย 3:1 แล้วนำไปผสมกับซีเมนต์เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นคอนกรีต โดยคอนกรีตจากทรายและคอนกรีตจากจีโอพอลิเมอร์จะบ่มที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 7, 28, 56, 90 วัน แล้วนำไปทดสอบสมบัติความแข็งแรง พบว่า คอนกรีตที่มาจากจีโอพอลิเมอร์มีการต้านทานแรงอัด การต้านทานแรงดัดโค้ง และการต้านทานแรงดึงประมาณ 28.94 MPa, 2.35 MPa และ 2.42 MPa ตามลำดับ ซึ่งด้อยกว่าเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตจากทรายแม่น้ำที่อยู่ประมาณ 34.22 MPa, 2.61 MPa และ 2.59 MPa และเมื่อตรวจโครงสร้างจาก SEM พบว่าคอนกรีตจากจีโอพอลิเมอร์มีความพรุนมากกว่าคอนกรีตจากทราย แต่สมบัติความคงทนจำพวกการซึมผ่านของคลอไรด์ การแทรกของคลอไรด์ และปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตจากทรายแม่น้ำ สรุป คอนกรีตจากจีโอพอลิเมอร์สามารถใช้แทนคอนกรีตจากทราย แต่จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพในการใช้งาน

ทิวากร ศรีจำปา [28] ได้ศึกษาอิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คือ อัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย (Fly Ash, FA) และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ (Liquid Alkaline Activator, L) อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ พลังงานการบดอัด และอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วน L/FA (Liquid alkaline activator/Fly Ash) ที่เหมาะสมมีค่าลดลงเมื่อพลังงานการบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า L/FA ที่เหมาะสมของพลังงานบดอัดที่ 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 1.5, 1.4 และ 1.3 ตามลำดับ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดสำหรับทุกพลังงานการบดอัด

กำลังอัดของตะกอนดินประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาที่บ่มในตู้อบเท่ากับ 72 ชั่วโมง เมื่อระยะเวลาที่บ่มในตู้อบนานกว่า 72 ชั่วโมง กำลังอัดมีค่าเกือบจะคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัด กำลังอัดสูงสุดของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 20, 18 และ 16 MPa ที่ระยะเวลาบ่มในตู้อบ 72 ชั่วโมง และอุณหภูมิเท่ากับ 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส สำหรับพลังงานบดอัด 2693.3, 1346.6 และ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

อาณัติ สายกระสุน [29] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์พูนโดยใช้สารก่อฟองอินทรีย์ ได้แก่ ซิลิกาฟุ่ม ตะกรันอะลูมิเนียม และผงอะลูมิเนียม โดยขั้นแรกจะนำดินขาวนราธิวาส ไปบดแห้งด้วยเครื่องบดความเร็วสูงเป็นเวลา 10 นาทีเผาด้วยการบดลดขนาดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 150 เมช แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ดินขาวเผา จากนั้นเตรียมตะกรันอะลูมิเนียมจากบริษัทเมืองทองอะลูมิเนียม จังหวัดสมุทรปราการ ไปบดลดขนาดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เมช จากนั้นเตรียมสารละลายอัลคาไลน์ที่ประกอบไปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดปริมาณ 6.34 กรัม ละลายน้ำปริมาณ 15.84 กรัม จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต 77.64 กรัม แล้วนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง การทดลองแบบแรกผสมด้วยซิลิกาฟุ่ม โดยถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะใช้สัดส่วนดินขาวเผาซิลิกาฟุ่มต่อ 60:40 และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 10 และ 14 โมลาร์ เพื่อจะดูความแตกต่างที่ได้เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ และส่วนที่สองจะศึกษาผลของสัดส่วนดินขาวต่อซิลิกาฟุ่มต่อสมบัติของพอลิเมอร์พูน โดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของดินขาวเผาต่อซิลิกาฟุ่มเป็น 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ทดลองการทดลอง บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน พบว่าชิ้นงานที่ได้จะมีการนำความร้อนต่ำ และมีความไม่เสถียรเมื่ออยู่ในน้ำเนื่องจากซิลิกาฟุ่มเป็น Micro-filler สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างในชิ้นงาน แต่ถ้ามีมากเกินไป จะทำให้ชิ้นงานมีการดูดซับน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดต่ำลง สำหรับการทดลองแบบที่สองผสมด้วยตะกรันอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ศึกษาผลของปริมาณตะกรันอะลูมิเนียมในปริมาณต่างๆต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์พูนโดยเติมผงตะกรันอะลูมิเนียมร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ส่วนที่สองศึกษาผลของสัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ 1.5 และ 2.5 และส่วนที่สามจะศึกษาผลของสัดส่วนของแข็งต่อของเหลว โดยทั้งสามส่วนนี้จะทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและบ่มต่อเป็นเวลา 7, 14, 21, และ 28 วัน ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์พูนคือชิ้นงานที่มีปริมาณตะกรันอะลูมิเนียมร้อยละ 1.5 โดยใช้สัดส่วนสารละลายอัลคาไลน์ 2.5 และสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 0.86 เมื่อนำไปทดสอบกำลังอัดจะได้เท่ากับ 11.76 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ความหนาแน่น 1.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่านำความร้อนอยู่ที่ 0.27

วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอิฐมอญ นอกจากนี้ผลการศึกษาปริมาณของผงอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นสารก่อฟอง พบว่าขึ้นงานที่เหมาะสมคือต้องใช้ปริมาณผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.7 จะได้กำลังอัดเท่ากับ 15.27 เมกะพาสคาล ความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าการนำความร้อนที่ 0.27 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

เจริญชัย ฤทธิรุทธ, พิชรพล โพธิ์ศรี, บวร พิมพา [30] ได้ทำการศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อจีโอพอลิเมอร์มวลเบา หากนำผงอะลูมิเนียมมาผสมทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดเล็กแทรกในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ ทำให้มีความหนาแน่นลดลง ความเข้มข้นของสารละลายต่างอาจส่งผลต่อการเกิดฟองก๊าซที่มีผลกับสมบัติทางกล การเตรียมวัสดุ ใช้ถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ พบว่าเป็นถ้ำลอยชนิด Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 นำไปผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ แล้วเติมทรายละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใส่ผงอะลูมิเนียมและโซเดียมซิลิเกต แล้วเทลงแม่พิมพ์ $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ห่อด้วยพลาสติกแล้วบ่มที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากการทดลองพบว่าสัดส่วนสารละลายที่มากเกินไป ไม่ส่งผลอย่างชัดเจนในช่วงอายุต้นของจีโอพอลิเมอร์ ในจีโอพอลิเมอร์บ่ม 28 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำลงอย่างมาก เนื่องจากการตกค้างของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนที่เหมาะสมตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 คือ อัตราส่วนสารละลายต่อถ้ำลอย 0.55 ความเข้มข้นสารละลายที่มากจะเกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่ขึ้น เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นรวมลดลง และการใช้อัตราส่วนสารละลายต่อถ้ำลอยที่มากขึ้นจะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดที่มากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินโครงการ จะกล่าวถึง ขั้นตอนในการดำเนินงาน โดยศึกษาปริมาณของ ผงอะลูมิเนียม และระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อความแข็งแรงอัด ความหนาแน่น และร้อยละ การดูดซึมน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงาน

3.2.1.1 เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล

3.2.1.2 ผงอะลูมิเนียม (Aluminium Powder)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

3.2.2.1 ตะแกรงคัดขนาด

3.2.2.2 แม่พิมพ์ขนาด 25×25×25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

3.2.2.3 แม่พิมพ์ขนาด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินงาน

3.2.3.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 โมลาร์

3.2.3.2 โซเดียมซิลิเกต

3.1.4 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

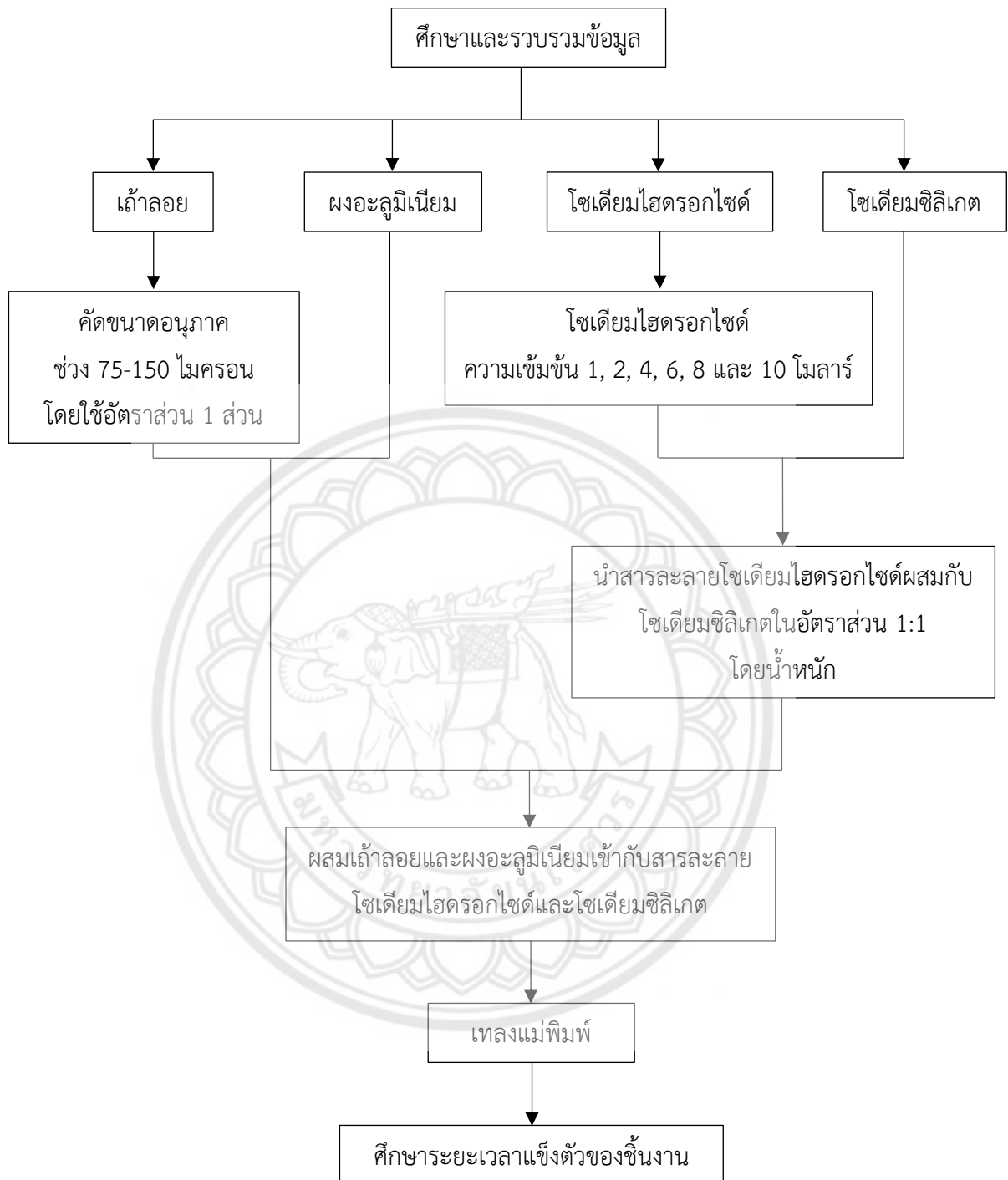
3.2.4.1 เครื่องกวนสารละลาย (Hot Plate Stirrer)

3.2.4.2 เครื่อง Universal testing machine

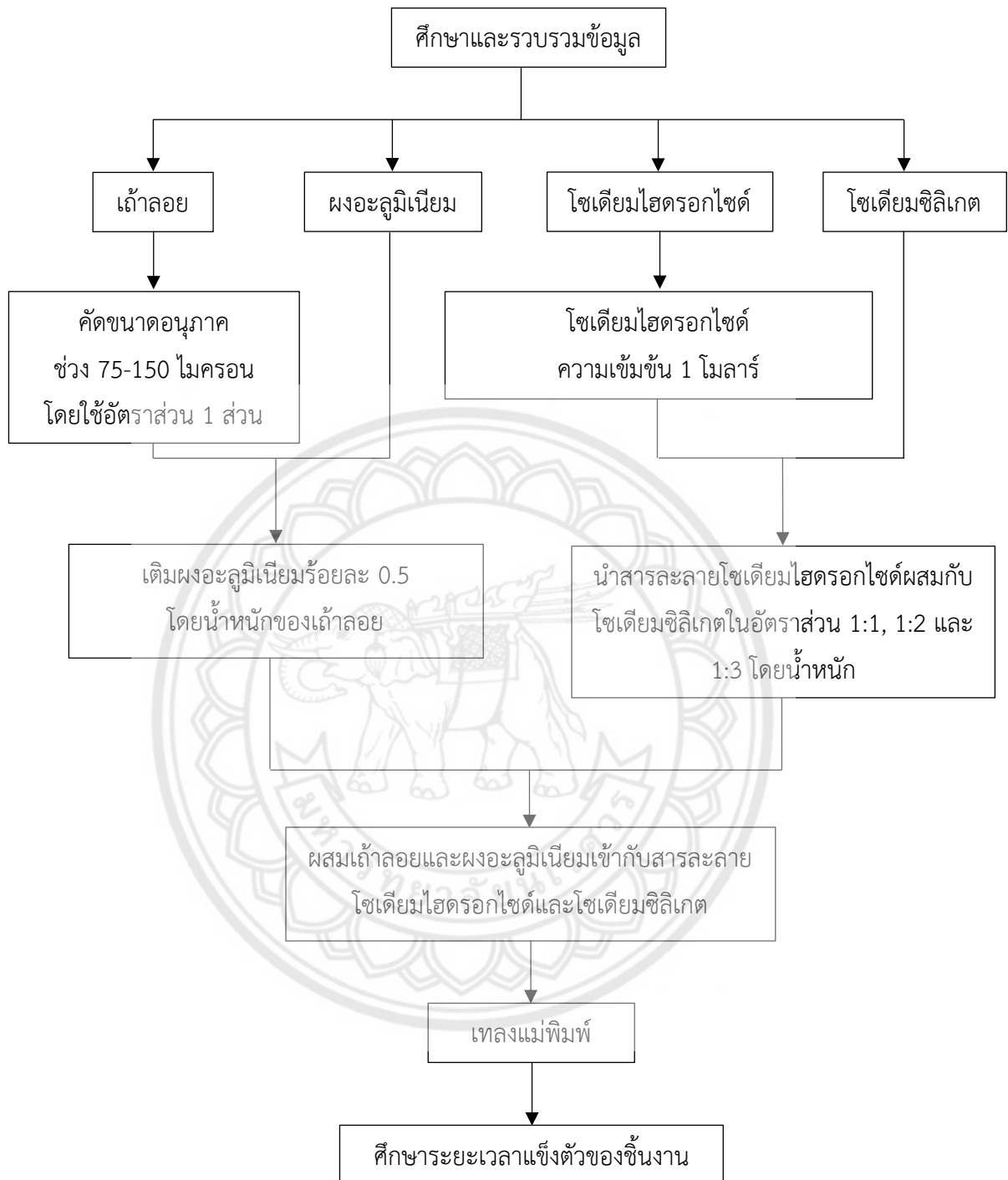
3.2.4.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

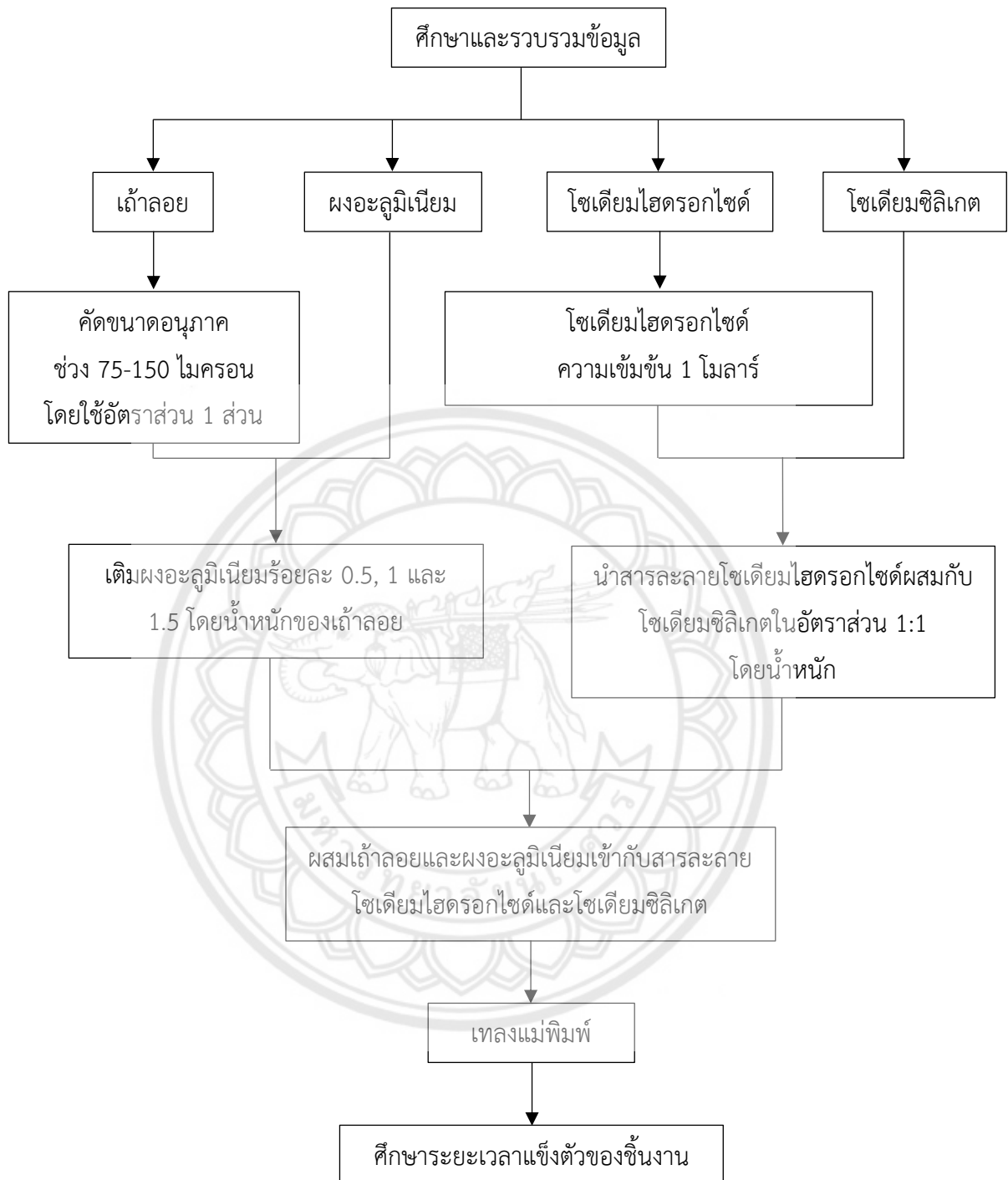
แบ่งออกเป็น 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 3.1, 3.2, 3.3, และ 3.4



รูปที่ 3.1 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 1 ก. เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เหมาะสม



รูปที่ 3.2 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 1 ข. เพื่อหาปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่เหมาะสม



รูปที่ 3.3 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 1 ค. เพื่อหาปริมาณของผงอะลูมิเนียมที่เหมาะสม

3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาระยะเวลาการแข็งตัวของชิ้นงาน

3.2.1.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับเถ้าลอย ผงอะลูมิเนียม โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต รวมถึงขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุจีโอพอลิเมอร์ การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบ ร้อยละการดูดซึมน้ำ การทดสอบความแข็งแรงอัด การตรวจสอบลักษณะการแตกหัก และศึกษา ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มชิ้นงาน

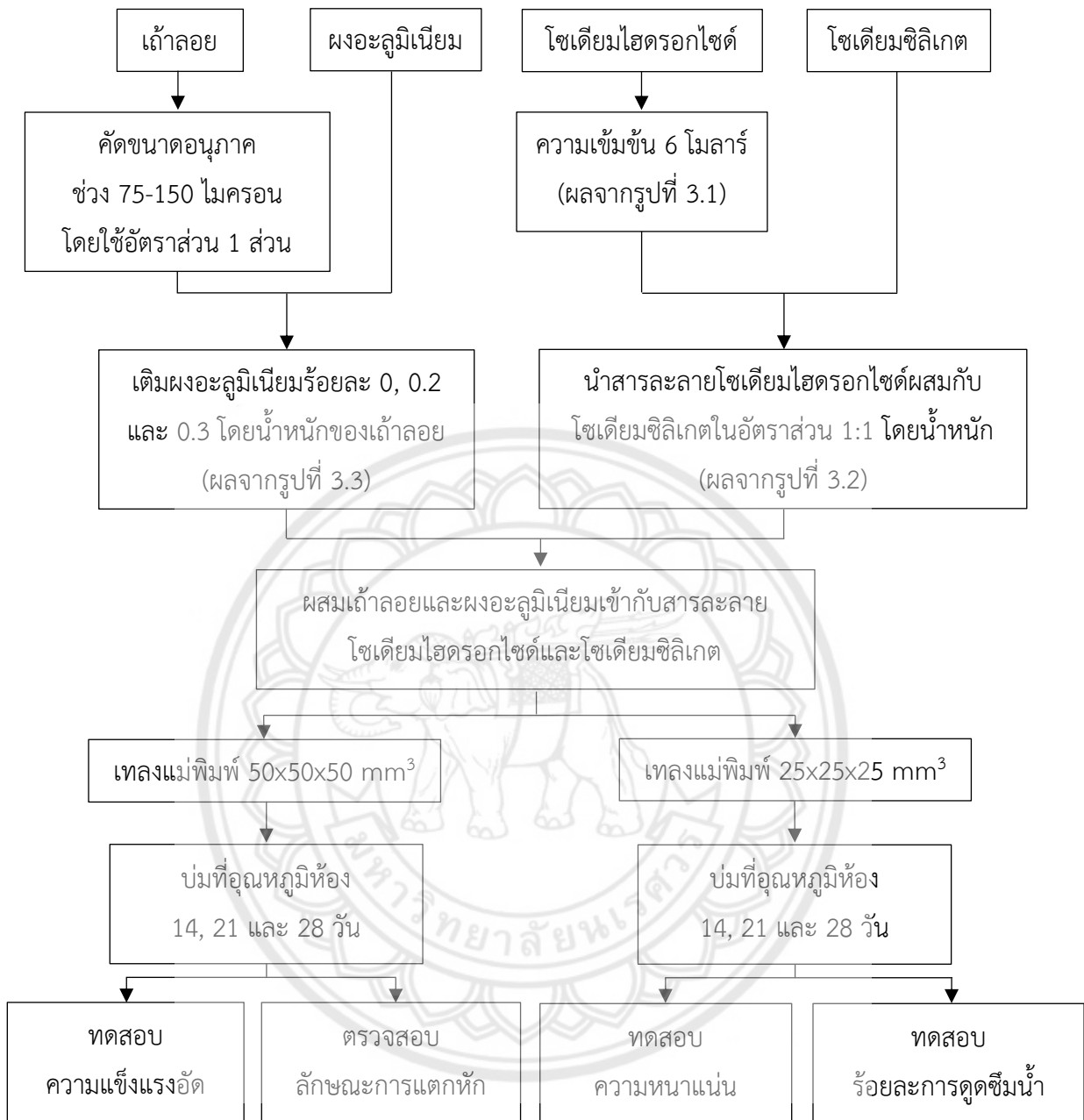
3.2.1.2 เตรียมส่วนประกอบที่เป็นของแข็ง โดยนำเถ้าลอยไปคัดแยกขนาด ใช้ตะแกรงร่อน (Sieve) โดยทำการเรียงตะแกรงร่อนเป็นชั้นๆ ตามลำดับของความหยาบถึงความละเอียดของช่องเปิด คือใช้ Mesh No. ระหว่างช่วง 100-200 โดยขนาดของ Mesh No. จะให้ขนาดของอนุภาคอยู่ระหว่าง ช่วง 75-150 ไมครอน

3.2.1.3 ผสมผงอะลูมิเนียมลงในเถ้าลอย ในปริมาณ ร้อยละ 0.5, 1 และ 1.5 โดยน้ำหนัก ของเถ้าลอย

3.2.1.4 เตรียมสารละลายอัลคาไลน์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายกับน้ำ ให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 โมลาร์ ลงในโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก

3.2.1.5 นำส่วนประกอบที่เป็นของแข็งมาเติมลงในสารละลายอัลคาไลน์ที่เตรียมไว้ โดยใช้ เครื่องกวนสารละลาย (Hot Plate Stirrer)

3.2.1.6 เกล็งในแม่พิมพ์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยทำการทดลองหาความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณโซเดียมซิลิเกต และปริมาณผงอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อระยะเวลา การแข็งตัว



รูปที่ 3.4 แผนขั้นตอนการดำเนินโครงการ ส่วนที่ 2

3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2

3.2.2.1 เตรียมส่วนประกอบที่เป็นของแข็ง โดยนำถ้ำล่อยไปคัดแยกขนาด ใช้ตะแกรงร่อน (Sieve) โดยทำการเรียงตะแกรงร่อนเป็นชั้นๆ ตามลำดับของความหยาบถึงความละเอียดของช่องเปิด คือใช้ Mesh No. ระหว่างช่วง 100-200 โดยขนาดของ Mesh No. จะให้ขนาดของอนุภาคอยู่ระหว่าง ช่วง 75-150 ไมครอน

3.2.2.2 ผสมผงอะลูมิเนียมลงในถ้ำล่อย ในปริมาณ ร้อยละ 0, 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนัก ของถ้ำล่อย (ปรับปริมาณผงอะลูมิเนียมลง จากรูปที่ 3.3) เพื่อใช้เป็นของผสมในสูตรที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

3.2.2.3 เตรียมสารละลายอัลคาไลน์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายกับน้ำ ให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 6 โมลาร์ ลงในโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก

3.2.2.4 นำส่วนประกอบที่เป็นของแข็งมาเติมลงในสารละลายอัลคาไลน์ที่เตรียมไว้ โดยใช้ เครื่องกวนสารละลาย (Hot Plate Stirrer) ในอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนระหว่างถ้ำล่อย สารละลายอัลคาไลน์ และผงอะลูมิเนียม

สูตร	ถ้ำล่อย (โดยน้ำหนัก)	ผงอะลูมิเนียม (ร้อยละโดยน้ำหนักของ ถ้ำล่อย)	สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โดยน้ำหนัก)	โซเดียมซิลิเกต (โดยน้ำหนัก)
1	1	0	1	1
2	1	0.2	1	1
3	1	0.3	1	1

3.2.2.5 เทลงในแม่พิมพ์ขนาด 50x50x50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบ ความแข็งแรงอัด และแม่พิมพ์ขนาด 25x25x25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อนำไปทดสอบความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ

3.2.2.6 จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลาในการบ่ม 14, 21 และ 28 วัน แบ่งได้ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงจำนวนชิ้นงานในการบ่มเพื่อนำไปทดสอบค่าต่างๆ

สูตร	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	จำนวนชิ้นงาน	
		ทดสอบความแข็งแรงอัด (ขนาด 50×50×50 mm ³)	ทดสอบความหนาแน่น + ร้อยละการดูดซึมน้ำ (ขนาด 25×25×25 mm ³)
1	14	3	3
	21	3	3
	28	3	3
2	14	3	3
	21	3	3
	28	3	3
3	14	3	3
	21	3	3
	28	3	3

3.3 การทดสอบชิ้นงาน

3.3.1 ทดสอบความแข็งแรงอัด

ทดสอบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานขนาด 50×50×50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ทดสอบความแข็งแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ใช้ Load Cell ขนาด 10 kN และอัตราเร็ว 5 มิลลิเมตร/นาที

3.3.2 ทดสอบความหนาแน่น (Density Test)

3.3.2.1 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานทดสอบออก ทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า D ซึ่งเป็นน้ำของชิ้นงานที่แห้งก่อนนำไปต้ม

3.3.2.2 ใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดขนาดหน้าตัด ความสูง และบันทึกค่าปริมาตร (V) ด้วยทศนิยม 2 ตำแหน่ง ซึ่งความหนาแน่นสามารถคำนวณได้ แสดงดังสมการที่ 2.2

3.3.3 ทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

3.3.3.1 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานทดสอบออก ทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกเป็นค่า W_d ซึ่งเป็นน้ำของชิ้นงานที่แห้งก่อนนำไปต้ม

3.3.3.2 ต้มชิ้นงานในน้ำกลั่นที่เดือดนาน 5 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกเป็นค่า W_w

3.3.3.3 จากชั่งน้ำหนักได้ทั้งสองค่า แล้วนำมาคำนวณในสมการ แสดงดังสมการที่ 2.3

3.3.4 ตรวจสอบลักษณะการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

นำชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงอัดนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อตรวจสอบลักษณะการแตกหัก

3.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรงอัด ความหนาแน่น ร้อยละการดูดซึมน้ำ และตรวจสอบลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ จากนั้นทำการสรุปผลการทดลอง



บทที่ 4

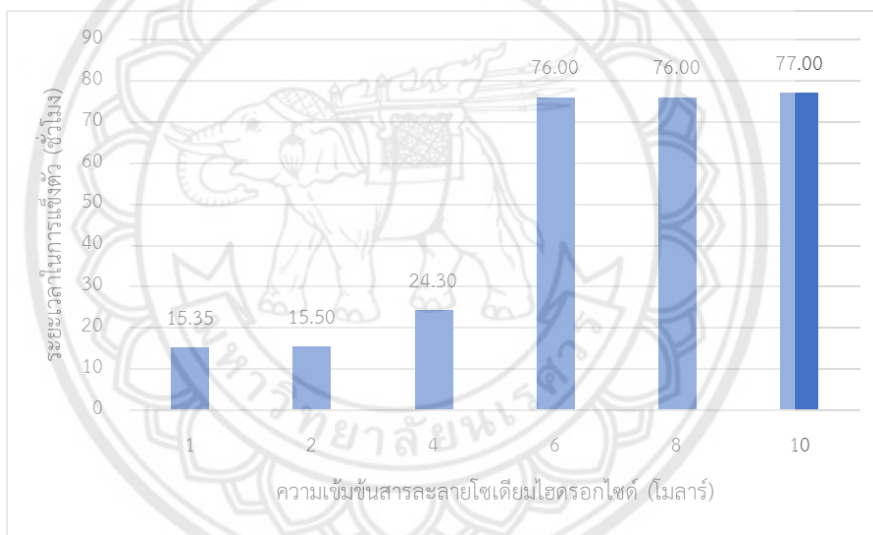
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยศึกษาปริมาณของผงอะลูมิเนียม และระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน

หาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยทำการทดลองหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณโซเดียมซิลิเกต และปริมาณผงอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อระยะเวลาการแข็งตัว

4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อระยะเวลาในการแข็งตัว

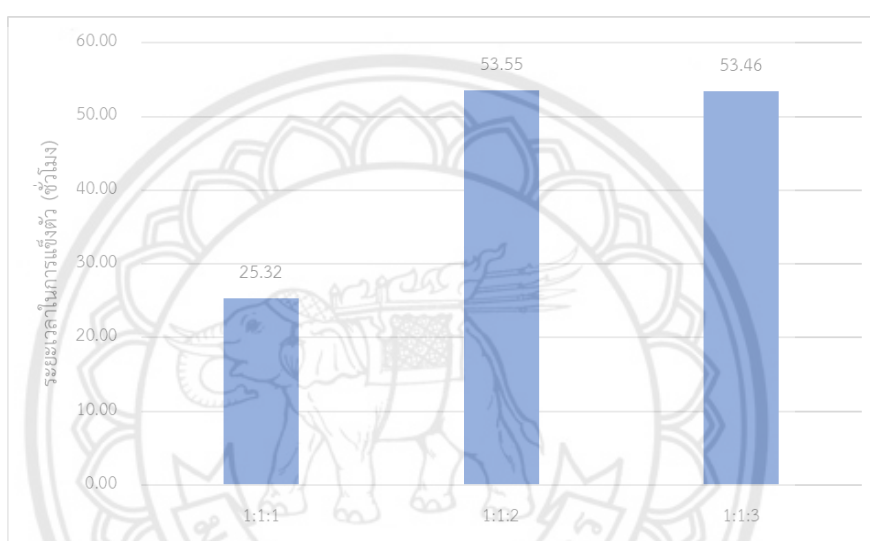


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับระยะเวลาในการแข็งตัว

จากรูปที่ 4.1 อัตราส่วนถ้อย : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ : โซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วน 1:1:1 โดยมีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 โมลาร์ พบว่า ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 และ 2 โมลาร์ ระยะเวลาในการแข็งตัวค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 4 โมลาร์ ระยะเวลาในการแข็งตัวจะเริ่มสูงขึ้น และที่ความเข้มข้นของสารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6, 8 และ 10 โมลาร์ สังเกตได้ว่า ระยะเวลาในการแข็งตัวมีแนวโน้มคงที่

เนื่องจากแก้วลอยมีซิลิกา และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก [6] โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวชะละลายซิลิกา และอะลูมินา จึงได้เป็นซิลิกอนไอออน และอะลูมิเนียมไอออน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้เกิดการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง โดยจะทำปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ ที่เรียงตัวเป็นโครงสร้างใหม่ จึงได้โมเลกุลที่เกิดการเชื่อมขวางกันมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง จะทำให้มีการชะละลายซิลิกอนไอออนและอะลูมิเนียมไอออนจำนวนมาก เกิดการประสานตัวเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างข้างลง และยังทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการแข็งตัวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

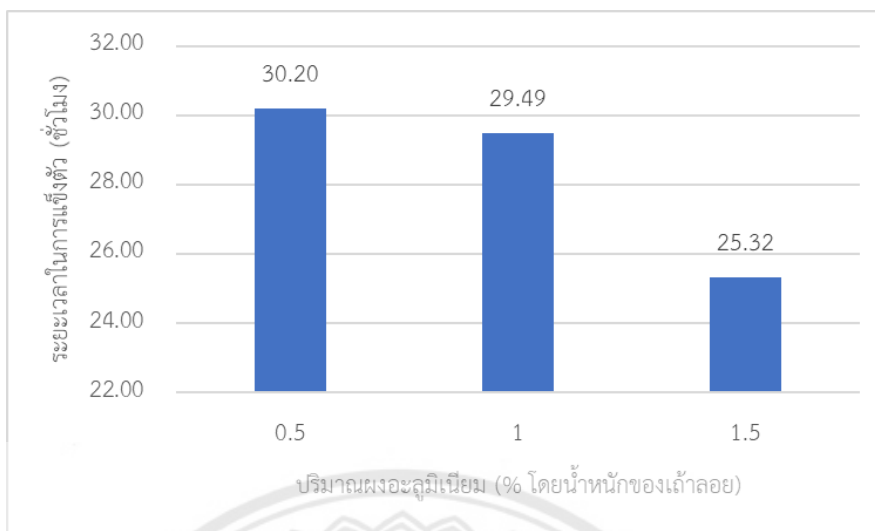
4.1.2 ผลของปริมาณปริมาณโซเดียมซิลิเกตต่อระยะเวลาในการแข็งตัว



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบปริมาณโซเดียมซิลิเกตกับระยะเวลาในการแข็งตัว

จากรูปที่ 4.2 อัตราส่วนแก้วลอย : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ : โซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วน 1:1:1, 1:1:2 และ 1:1:3 เติมน้ำอะลูมิเนียมร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของแก้วลอย พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกตจาก 1:1:1 เป็น 1:1:2 ขึ้นงานมีแนวโน้มใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวประสานให้เกิดปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ และเป็นของเหลวที่มีความหนืดมาก การเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกตจึงทำให้เกิดการประสานตัวเข้าระยะเวลาในการแข็งตัวเพิ่มมากขึ้น แต่ที่อัตราส่วน 1:1:3 พบว่า ระยะเวลาในการแข็งตัวมีค่าคงที่

4.1.3 ผลของปริมาณผงอะลูมิเนียมต่อระยะเวลาในการแข็งตัว



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณผงอะลูมิเนียมกับระยะเวลาในการแข็งตัว

จากรูปที่ 4.3 อัตราส่วนเถ้าลอย : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ : โซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วน 1:1:1 เติมผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.5, 1 และ 1.5 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย เมื่อเพิ่มปริมาณของผงอะลูมิเนียม พบว่า ชีงงานมีแนวโน้มใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวลดลง เนื่องจากผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองอินทรีย์ เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงจะทำให้ชีงงานเกิดฟองอากาศภายในและภายนอกมาก ชีงงานก่อนการแข็งตัวจึงล้นออกมาจากแม่พิมพ์ และเมื่อเวลาผ่านไปชีงงานจะเกิดการยุบตัว ทำให้ปริมาตรของชีงงานมีค่าต่ำลง ส่งผลให้ระยะเวลาในการแข็งตัวมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

จากการทดลอง โดยเริ่มจากการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6, 8 และ 10 โมลาร์ พบว่าระยะเวลาในการแข็งตัวของชีงงานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้เวลามากกว่า 70 ชั่วโมง จากนั้นได้ทำการลดความเข้มข้นลงเพื่อหาระยะเวลาในการแข็งตัวที่สั้นลง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1, 2 และ 4 โมลาร์ พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวมีค่าลดลงตามเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำลง

แต่เมื่อทดลองใส่ผงอะลูมิเนียม จะเห็นได้ว่าลักษณะของชีงงานที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1, 2 และ 4 โมลาร์ ไม่สามารถมองเห็นรูพรุนในชีงงานได้ แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ สามารถมองเห็นรูพรุนได้อย่างชัดเจน

ต่อมาได้ทำการทดลองหาปริมาณผงอะลูมิเนียม โดยเติมผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.5, 1 และ 1.5 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย พบว่า เกิดฟองอากาศมาก เนื่องจากผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองอินทรีย์ เมื่อผงอะลูมิเนียมเจอกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดฟองก๊าซ จึงใส่เพื่อให้เกิด-

โพรงอากาศในเนื้อชิ้นงาน แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงจะทำให้ชิ้นงานเกิดฟองอากาศภายในมาก มีฟองอากาศเยอะ ทำให้ชิ้นงานก่อนการแข็งตัวล้นออกมา จึงได้ทำการลดปริมาณผงอะลูมิเนียมลง พบว่า ชิ้นงานเกิดฟองอากาศแต่สามารถคงรูปร่างได้ค่อนข้างสมบูรณ์

จากการทดลอง ได้ข้อสรุปว่า ทางคณะผู้จัดทำทำการทดลองเลือกใช้ความเข้มข้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่ผงอะลูมิเนียมเกิดการก่อฟอง ทำให้สามารถมองเห็นรูพรุนได้ชัด เพื่อนำมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานต่อไป

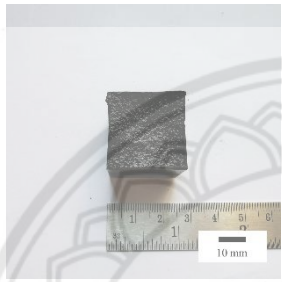
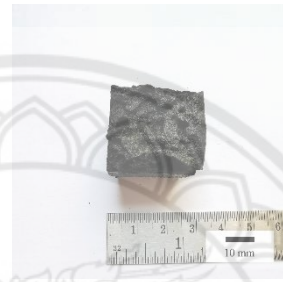
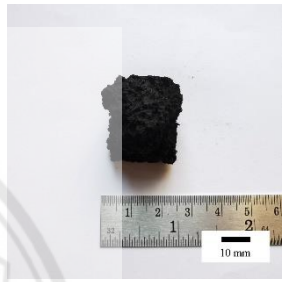



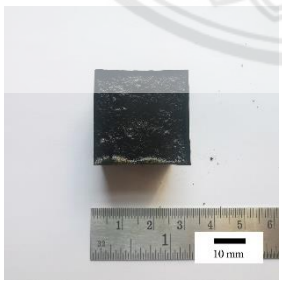

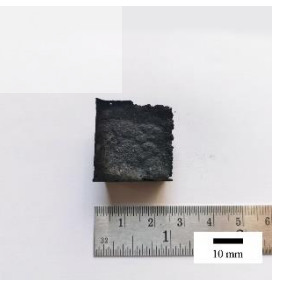
เนื่องจากผลของปริมาณโซเดียมซิลิเกตส่งผลต่อระยะเวลาการแข็งตัว จากรูปที่ 4.2 เมื่อเพิ่มโซเดียมซิลิเกต ชิ้นงานมีแนวโน้มใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเพิ่มมากขึ้น ทางคณะผู้จัดทำทำการทดลองจึงเลือกใช้ เถ้าลอย : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ : โซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วน 1:1:1 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวสั้นที่สุด เพื่อลดระยะเวลาในการแข็งตัวของ ชิ้นงาน

ใช้ผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.2 และ 0.3 ของเถ้าลอย เนื่องจากผงอะลูมิเนียมเป็นสาร ก่อฟองอินทรีย์ เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงแล้วจะทำให้ชิ้นงานเกิดฟองอากาศมากเกินไป ทำให้เกิดการฟู ล้น ออกมาด้านนอก ชิ้นงานที่ได้เกิดการเสียรูป ดังนั้น อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วย เถ้าลอย : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ : โซเดียมซิลิเกต เติมผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0, 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย แบ่งเป็น 3 สูตร คืออัตราส่วน 1:1:1 ไม่เติมผงอะลูมิเนียม, 1:1:1 เติมผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย และ 1:1:1 เติมผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.3 โดย น้ำหนักของเถ้าลอย

4.2 ลักษณะภายนอกของจีโอพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นผิว และตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะภายนอก ของชิ้นงานสูตรที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 3.1 ขนาด $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$ ที่ผ่านการบ่มในระยะเวลา 14, 21 และ 28 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณผงอะลูมิเนียม และระยะเวลาในการบ่มที่ส่งผลต่อลักษณะภายนอก

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานขนาด $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$ ที่ผ่านการบ่มในระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาในการบ่ม	สูตร		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
14 วัน			
	- ผิวชิ้นงานมีความเรียบ	- ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ	- ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ
21 วัน			
	- ผิวชิ้นงานมีความเรียบ	- ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ	- ผิวชิ้นงานมีความขรุขระ
28 วัน			
	- ผิวชิ้นงานมีความเรียบ	- ผิวชิ้นงานมีความขรุขระและหยาบ	- ผิวชิ้นงานมีความขรุขระและหยาบ

ตารางที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของชิ้นงานขนาด 25×25×25 mm³ ที่ผ่านการบ่มในระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาในการบ่ม	สูตร		
14 วัน			
	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานไม่เสียรูป - มีความชื้นเล็กน้อย - ค่อนข้างนิ่มเล็กน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานมีการยุบตัวมาก เนื่องจากมีฟองอากาศเยอะ ทำให้ชิ้นงานก่อนแข็งตัวล้นออกมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานเสียรูปร่างเพราะฟองอากาศที่ฟูไม่ล้นออกจากแม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานมีฟองอากาศภายในมาก
21 วัน			
	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานไม่เสียรูป - ชิ้นงานยุบตัวเล็กน้อย - แข็งมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานมีการยุบตัวมาก เนื่องจากมีฟองอากาศเยอะ ทำให้ชิ้นงานก่อนแข็งตัวล้นออกมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานมีการยุบตัวมาก เนื่องจากมีฟองอากาศเยอะ ทำให้ชิ้นงานก่อนแข็งตัวล้นออกมาก
28 วัน			
	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานไม่เสียรูป - ชิ้นงานยุบตัวเล็กน้อย - แข็งมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานมีการยุบตัวมาก และเสียรูป เนื่องจากมีฟองอากาศเยอะ ทำให้ชิ้นงานก่อนแข็งตัวล้นออกมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานมีการยุบตัวมาก เนื่องจากมีฟองอากาศเยอะ ทำให้ชิ้นงานก่อนแข็งตัวล้นออกมาก

4.2.1 ผลของปริมาณผงอะลูมิเนียมต่อลักษณะภายนอก

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะชิ้นงาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณผงอะลูมิเนียม โดยไม่เติมผงอะลูมิเนียม, เติมผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ในอัตราส่วนผสมเถ้าลอย : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ : โซเดียมซิลิเกต ที่ 1 : 1 : 1

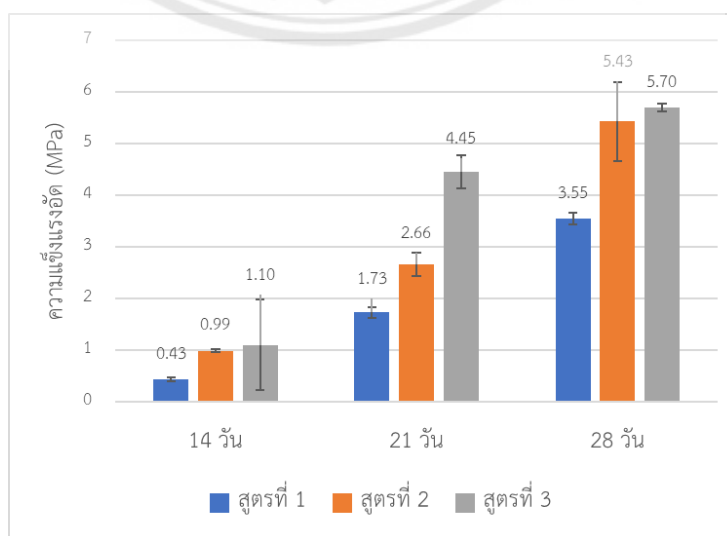
พบว่า เมื่อเติมผงอะลูมิเนียมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ลักษณะของชิ้นงานจะมีผิวขรุขระ หยาบ มีรูพรุน แสดงดังตารางที่ 4.1 มีการยุบตัวและค่อนข้างเสียรูป แสดงดังตารางที่ 4.2 เนื่องมาจากผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองอินทรีย์ เมื่อผงอะลูมิเนียมเจอกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดฟองก๊าซ จึงใส่เพื่อให้เกิดโพรงอากาศในเนื้อชิ้นงาน แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงจะทำให้ชิ้นงานเกิดฟองอากาศภายในมาก มีฟองอากาศเยอะ ทำให้ชิ้นงานก่อนการแข็งตัวล้นออกมา

4.2.2 ผลของระยะเวลาในการบ่มต่อลักษณะภายนอก

จากระยะเวลาในการบ่ม 14, 21 และ 28 วัน พบว่าระยะเวลาในการบ่มไม่ส่งผลต่อลักษณะภายนอกของชิ้นงาน เนื่องจากระยะเวลาในการบ่มเป็นการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาควมแน่นและลูกโซ่ของจีโอพอลิเมอร์ดำเนินการต่อไปได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาควมแน่นและลูกโซ่เป็นการเกิดภายในโครงสร้างโมเลกุล ดังนั้น ระยะเวลาในการบ่มจึงไม่ส่งผลต่อลักษณะภายนอก

4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัด

แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานสูตรที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในการบ่ม 14, 21 และ 28 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณผงอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการบ่มที่ส่งผลต่อความแข็งแรงอัด โดยสูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 5.70 MPa และสูตรที่ 1 ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดต่ำที่สุดเท่ากับ 0.43 MPa แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภูมิผลการทดสอบความแข็งแรงอัด เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม

4.3.1 ปริมาณผงอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงอัด

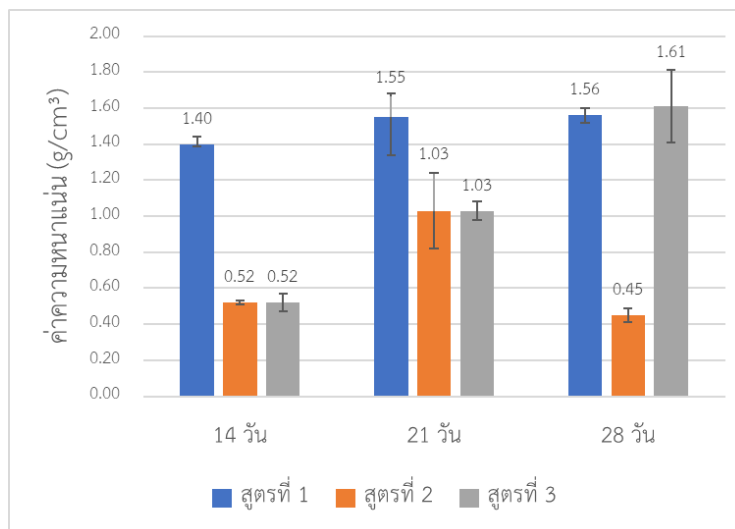
เนื่องจากผงอะลูมิเนียมเป็นสารก่อฟองอินทรีย์ เมื่อผงอะลูมิเนียมเจอกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดฟองก๊าซ จึงใส่เพื่อให้เกิดโพรงอากาศในเนื้อชิ้นงาน แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงจะทำให้ชิ้นงานเกิดฟองอากาศภายในมาก ส่งผลให้สามารถรับความแข็งแรงอัดได้ต่ำลง จากรูปที่ 4.1 แสดงแผนภูมิผลการทดสอบความแข็งแรงอัดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของผงอะลูมิเนียม ชิ้นงานมีแนวโน้มรับความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งไม่ตรงตามทฤษฎีข้างต้น เนื่องจากชิ้นงานสูตรที่ 2 และ 3 เกิดรูพรุนทั้งภายนอกและภายในชิ้นงาน จึงทำให้ชิ้นงานแห้งและแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม โดยชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียมเมื่อสัมผัสชิ้นงานพบว่ายังมีความชื้นอยู่เล็กน้อย เนื่องจากไม่มีผงอะลูมิเนียมที่ทำให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน อากาศจึงไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในชิ้นงานได้ ทำให้ชิ้นงานยังมีความชื้นหลงเหลืออยู่ ดังนั้น ค่าความแข็งแรงอัดที่เติมผงอะลูมิเนียมจึงมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม

4.3.2 ระยะเวลาในการบ่มที่ส่งผลต่อความแข็งแรงอัด

ระยะเวลาในการบ่มชิ้นงานเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ของจีโอพอลิเมอร์ดำเนินต่อไปได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีแนวโน้มรับความแข็งแรงอัดสูง

4.4 ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ความหนาแน่น

แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในการบ่ม 14, 21 และ 28 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณผงอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการบ่มที่ส่งผลต่อความหนาแน่น โดยสูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 1.61 g/cm^3 และสูตรที่ 2 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด เท่ากับ 0.45 g/cm^3 แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภูมิการทดสอบความหนาแน่น เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม

4.4.1 ปริมาณผงอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อความหนาแน่น

เมื่อเพิ่มปริมาณของผงอะลูมิเนียม ความหนาแน่นของชิ้นงานจะมีค่าต่ำลง ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดมีค่าต่ำลงไปด้วย จากรูปที่ 4.2 แสดงแผนภูมิการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานขนาด $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียม ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง และคงที่ เนื่องจากการเติมผงอะลูมิเนียมที่เป็นสารก่อฟองอินทรีย์ ทำให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน ส่งผลให้ความหนาแน่นต่ำ ค่าความแข็งแรงอัดจึงมีค่าต่ำตามไปด้วย ยกเว้น ชิ้นงานสูตรที่ 3 บ่มที่ 28 วัน ชิ้นงานมีการยุบตัว เนื่องจากมีฟองอากาศมาก ทำให้ชิ้นงานก่อนแข็งตัวล้นออกมาด้านนอก ปริมาตรชิ้นงานต่ำ ส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าสูง นอกจากนี้ ผลการทดสอบความหนาแน่นจากรูปที่ 4.5 นั้น ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงอัดจากรูปที่ 4.4 เนื่องจากชิ้นที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดที่ต่างกัน โดยการทดสอบความแข็งแรงอัด ชิ้นงานมีขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ส่วนการทดสอบความหนาแน่น ชิ้นงานมีขนาด $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$ ดังนั้น ผลการทดสอบของความหนาแน่นจึงไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงอัด

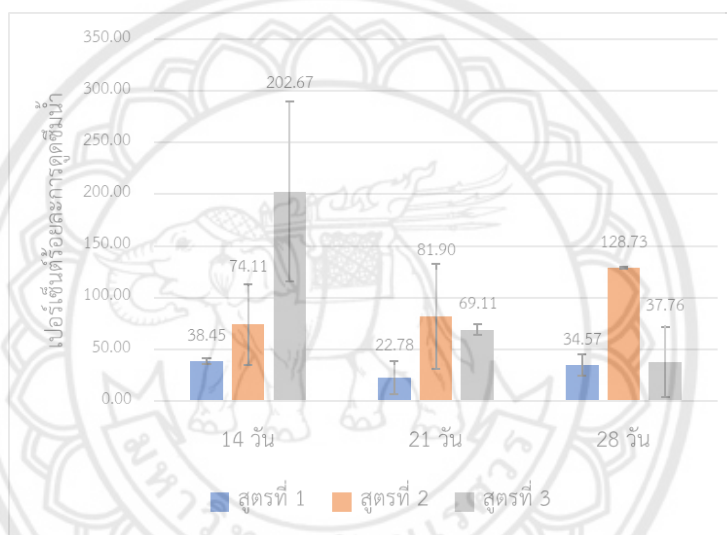
4.4.2 ระยะเวลาในการบ่มที่ส่งผลต่อความหนาแน่น

ระยะเวลาในการบ่มชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น พบว่า ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ของจีโอพอลิเมอร์ดำเนินต่อไปได้อย่างสมบูรณ์ โดยแต่ละโมเลกุลจะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่องกัน ทำให้ได้โมเลกุลที่มีการเชื่อมขวางกันมากขึ้น โครงสร้างโมเลกุลหลังทำปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ส่งผลให้สามารถรับแรงได้มากขึ้นตามไปด้วย ยกเว้น ชิ้นงานสูตรที่ 2 บ่มที่ 28 วัน ชิ้นงานยุบตัวมาก และเสียรูป

เนื่องจากมีฟองอากาศเยอะ ชิ้นงานก่อนแข็งตัวฟูขึ้นขึ้นมาด้านบน จึงทำให้ปริมาตรชิ้นงานสูง ส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำ

4.5 ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ร้อยละการดูดซึมน้ำ

แสดงผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตรที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 3.1 ขนาด $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$ ระยะเวลาในการบ่ม 14, 21 และ 28 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณผงอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการบ่ม ที่ส่งผลต่อร้อยละการดูดซึมน้ำ โดยสูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 202.67 และสูตรที่ 1 ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 22.78 แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภูมิการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม

4.5.1 ปริมาณผงอะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อร้อยละการดูดซึมน้ำ

เมื่อเพิ่มปริมาณของผงอะลูมิเนียม จะมีค่าความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานขนาด $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของผงอะลูมิเนียม ชิ้นงานมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มสูงขึ้นและลดลงตามลำดับ เนื่องจากการผงอะลูมิเนียมที่เป็นสารก่อกอง ทำให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน ชิ้นงานจึงเกิดยุบตัวมาก และเสียรูป การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ ได้จากการนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบและหลังทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยจะต้องนำชิ้นงานที่ผ่านการต้ม 5 ชั่วโมง และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักหลังต้ม พบว่ามีชิ้นงานบางส่วนที่ยังคงรูปร่างค่อนข้างสมบูรณ์, บางส่วนที่ไม่สามารถคงรูปร่างและได้แตกกระจายหายไประหว่างการต้ม ยกเว้น ชิ้นงานสูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาก เนื่องจาก

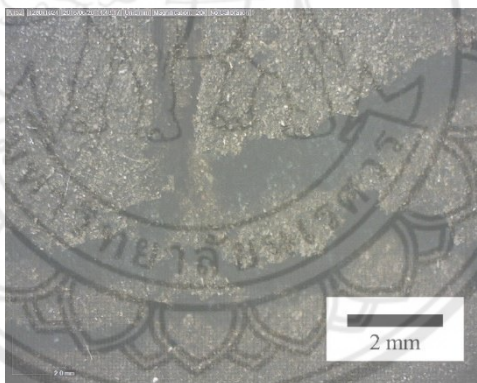
ระหว่างการต้มชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบ ชิ้นงานเกิดการติดกัน ทำให้ชิ้นงานมีน้ำหนักหลังต้มสูง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาก แสดงดังตารางที่ ง.1 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจึงสูงขึ้นตามไปด้วย

4.5.2 ระยะเวลาในการต้มที่ส่งผลต่อร้อยละการดูดซึมน้ำ

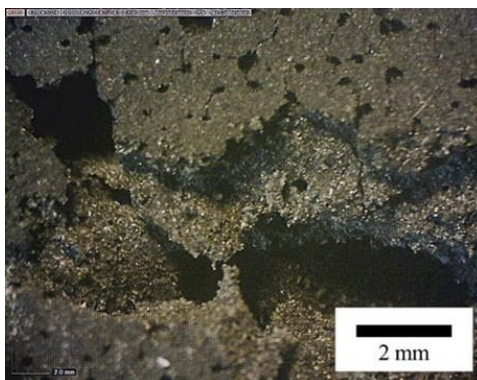
ระยะเวลาในการต้มชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น พบว่า ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ชิ้นงานสูตรที่ 2 จะสังเกตได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการต้มชิ้นงาน ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจะเพิ่มมากขึ้น และสูตรที่ 3 เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการต้มชิ้นงาน ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจะลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าสูง ส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำ

4.6 ผลการตรวจสอบลักษณะการแตกหัก

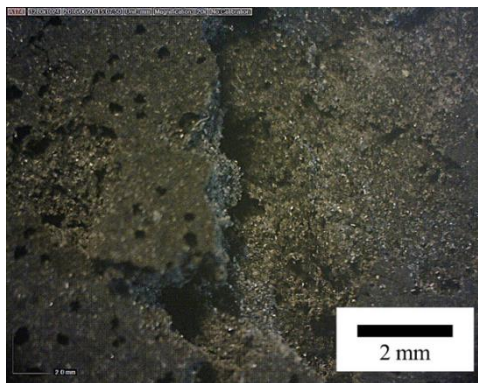
การตรวจสอบลักษณะการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) เพื่อตรวจสอบลักษณะการแตกหักชิ้นงานที่ต้มระยะเวลา 28 วัน เนื่องจากการต้มที่เกิดการยึดประสานตัวกันระหว่างโมเลกุลจากปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ของจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงอัดสูงขึ้นตามระยะเวลาในการต้ม ดังนั้นจึงเลือกชิ้นงานขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ระยะเวลาในการต้ม 28 วัน ที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรงอัด โดยใช้กำลังขยาย 0.75 เท่า



รูปที่ 4.7 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน สูตรที่ 1 ระยะเวลาการต้ม 28 วัน



รูปที่ 4.8 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน สูตรที่ 2 ระยะเวลาการต้ม 28 วัน



รูปที่ 4.9 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน สูตรที่ 3 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.7–4.9 แสดงถึงลักษณะการแตกแบบเปราะในกลุ่มเซรามิก เนื่องจากวัสดุแตกออกจากกันเป็นสองชิ้นหรือมากกว่า โดยปรากฏให้เห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) มีรอยร้าว ร่องหลุม และช่องว่าง ที่เป็นจุดเริ่มของการแตกหัก โดยที่ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณกอดัด ร่องรอยของการแตกหักที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรอยร้าวที่เป็นเส้นยาวแตกออกเป็นกิ่งก้าน (Branch) และมีการรวมตัวของกิ่งก้าน (Rebranch) ซึ่งเป็นความยาวที่กิ่งก้านรอยแตกมาบรรจบกัน ส่วนชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียมมีรอยแตกหักบริเวณพื้นผิว โดยชิ้นงานที่ไม่เติมหรือเติมผงอะลูมิเนียมมีลักษณะแตกเป็นแผ่น ที่เป็นบริเวณเรียบรอบๆรอยที่แตกหัก ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานจึงไม่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้เป็น การศึกษาปริมาณของเถ้าลอยและผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความแข็งแรงอัด ความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบ อัตราส่วนของผงอะลูมิเนียมและระยะเวลาในการบ่ม สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

5.1.1 ค่าความแข็งแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงอะลูมิเนียม และระยะเวลาในการบ่ม ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น สูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน จะมีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 5.70 MPa

5.1.2 ค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณของผงอะลูมิเนียม และระยะเวลาในการบ่ม ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น สูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน จะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด เท่ากับ 1.61 g/cm³

5.1.3 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงอะลูมิเนียม และระยะเวลาในการบ่ม ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้น สูตรที่ 3 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ดังนั้น สูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 202.67

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ชิ้นงานที่ทดสอบความแข็งแรงอัด ความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ ควรเป็น ชิ้นงานเดียวกัน

5.2.2 ควรทดลองชิ้นงานแต่ละสูตร อย่างน้อย 5 ชิ้น เพื่อดูแนวโน้มของกราฟที่ส่งผลต่อปัจจัย ในการศึกษา

5.2.3 การคัดขนาดเถ้าลอยควรใช้เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนและใส่หน้ากากอนามัย เนื่องจาก เถ้าลอยมีอนุภาคที่เล็ก อาจส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจได้

5.2.4 เมื่อผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ทิ้งไว้เป็นเวลาหลายวัน จะเกิดตะกอนที่มีลักษณะสีเทา จึงควรใช้ตะแกรงเพื่อกรองตะกอนออกก่อนนำไปใช้งาน

5.2.5 ในการผสมจีโอพอลิเมอร์ไม่ควรใช้เวลานานเกินไป เพราะจะทำให้เกิดฟองอากาศ พูขึ้นมามาก ส่งผลให้ยากต่อการเทลงแม่พิมพ์

5.2.6 ปรับเปลี่ยนผงอะลูมิเนียมลดลง เพราะผงอะลูมิเนียม ทำให้ฟองอากาศฟูล้นออกมา ด้านนอก ส่งผลให้ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์และเสียรูปชิ้นงาน

5.2.7 เมื่อใช้เวอร์เนียบคาลิปเปอร์แบบอ่านสเกลด้วยตนเอง อาจจะมีการคลาดเคลื่อนบ้าง จึงควรใช้เวอร์เนียบคาลิปเปอร์แบบดิจิทัล เพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] นิชชา บุรณสิงห์. (กุมภาพันธ์ 2560). **ประโยชน์ของถ้ำลอยจากการผลิตกระแสไฟฟ้า:วัสดุทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม**. สืบค้นเมื่อ 1 กรกฎาคม 2563, จาก <https://library2.parliament.go.th/ebook/content-issue/2560/hi2560-008.pdf>
- [1] ศักรินทร์ เหลืองกำจร. (11 พฤศจิกายน 2553). **วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer Material)**. สืบค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2563, จาก http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=80:-geopolymer-material-&catid=44:journal03&Itemid=55
- [2] สมประวิณ มั่นประเสริฐ. (มิถุนายน 2562). **ธุรกิจรับเหมาก่อสร้าง**. สืบค้นเมื่อ 31 กรกฎาคม 2563, จาก https://www.krungsri.com/bank/getmedia/7fe1e975-13f4-4040-a276-0d40841e504b/IO_Construction_Contractor_190606_TH_EX.aspx
- [3] พัชราภรณ์ ธรรมบำรุง. (2558). **การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาวเก่าปาล์ม และของเสียกากซีเมนต์**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สืบค้นเมื่อ 31 กรกฎาคม 2563, จาก <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/10169/1/404666.pdf>
- [4] พีรัช ธเนศฐิติวัชร. (2558). **คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมปูนอิฐฉนวนทนไฟ**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. สืบค้นเมื่อ 31 กรกฎาคม 2563, จาก http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2015/TU_2015_5610031030_3990_2571.pdf
- [5] ภัทรกมล ไชยภูมิ. (2554). **ผลของ Na_2O SiO_2 และ H_2O ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ฐานถ้ำลอย**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร. สืบค้นเมื่อ 6 กรกฎาคม 2563, จาก https://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/479492/43ce2706c1529f6bceee1674daf6ee40?Resolve_DOI=10.14414/CU.the.2011.496
- [6] อติสุดา เรือนใจมั่น.(2559).**อิทธิพลของเส้นใยแก้วและเส้นใยพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างรูพรุนในงานจีโอพอลิเมอร์พูนตัว**.วิทยานิพนธ์ วท.บ.,มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [7] อำนาจ ศรีมรกตกาญจน์.(2544).การศึกษาและทดสอบคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตราส่วน 40 -60 % โดยน้ำหนัก.วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา.มหาวิทยาลัยกำแพงแสน. นครปฐม.สืบค้นเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2563, http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Irrigation_Engineering/2544/Bs/AmnartSk/
- [8] American Elements. Aluminum Powder . (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อ 5 กันยายน 2563,จาก <https://www.americanelements.com/aluminum-powder-7429-90-5>
- [9] Sodium Hydroxide (โซดาไฟ).(2561). สืบค้นเมื่อ 3 กันยายน 2563,จาก <https://xinglongchemi.com/ดูบทความ-16601-sodium-hydroxide-โซดาไฟ.html>
- [10] โซดาไฟเกล็ด (Sodium hydroxide). (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อ 3 กันยายน 2563,จาก <http://worldchemical.co.th/th/product-detail-111-โซดาไฟเกล็ด-sodium-hydroxide.html>
- [11] Admin.(2563). ข้อควรระวังในการใช้งานโซดาไฟ.สืบค้นเมื่อ 5 กันยายน,จาก <https://www.thaimetallic.com/2020/01/10/ข้อควรระวังในการใช้งาน/>
- [12] SIGMA-ALDRICH เอกสารข้อมูลความปลอดภัย.(2547). SODIUM METASILICATE ANHYDROUS PURUM. สืบค้นเมื่อ 27 สิงหาคม 2563,จาก <http://www.chemtrack.org/MSDSSG/Trf/msdst/msdst6834-92-0.html>
- [13] นางสาวมยุรี ปาลวงค์.(2560). กพร.เศรษฐกิจปริทรรศน์. โซเดียมซิลิเกต : สารเคมีจากทรายแก้ว.สืบค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2563, จาก <http://www.dpim.go.th/service/download?articleid=8175&F=17451>
- [14] ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์.(2552). โซเดียมซิลิเกต.สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กันยายน 2563, จาก http://www.thaiceramicsociety.com/topic_view.php?id=72
- [15] ตะแกรงคัดแยกขนาด. (ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อวันที่ 3 กันยายน 2563,จาก <http://dthtechlab.com/Bo-sang-cot-lieu/Bo-sang-cap-phoi-da-dam-TCVN-8859-1647.html>
- [16] Magnetic stirrer.(2563). สืบค้นเมื่อ 23 กันยายน 2563,จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_stirrer
- [17] CPAC. (ม.ป.ป.). บทที่ 14 การบ่มและการถอดแบบหล่อคอนกรีต. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2563, จาก https://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/E-CEMENTAPP%20U14.pdf

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [18] กรมวิทยาศาสตร์บริการ.(2562).วิธีทดสอบการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นบัลค์ ความพรุนตัวปรากฏ. สืบค้นเมื่อวันที่20 สิงหาคม 2563, จาก <http://ceramic.dss.go.th/files/pdf/tm-5.pdf>
- [19] CPAC. (ม.ป.ป.). บทที่ 3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และค่าความชื้นของผิว มวลรวม (Specific Gravity, Absorption and Surface Moisture of Aggregate). สืบค้นเมื่อวันที่20 สิงหาคม 2563,จาก <http://www.ntec.co.th/ntec/lcm-document/category/concrete-technology-by-cpac.html?download=5%3Acpac-3>
- [20] เพราะเหตุใดการดูดซึมน้ำของอิฐมวลเบาจึงสำคัญ.(ม.ป.ป.). สืบค้นเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม 2563,จาก <https://www.k-block.com/th/why-concrete-low-absorption-important>
- [21] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์ และ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์. การทดสอบแรงกด (compression test). (ม.ป.ป.).สืบค้นเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2563,จาก<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0525/compression-test>
- [22] Sukangkana Lee. บทที่ 7 การทดสอบแรงอัด Compression Test. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2563,จาก <https://www.scicron.co.th/media/wysiwyg/7.pdf>
- [23] CPAC. บทที่ 15 กำลั้งอัด. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2563,จาก https://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/E-CEMENTAPP%20U15.pdf
- [24] Light Microscope หรือ Optical Microscope คือ.(2554).สืบค้นเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2563,จาก<http://www.microscopes.in.th/20/light-microscope-optical-microscope.html>
- [25] aomsupaporn. (ม.ป.ป.). หน่วยที่ 3 กล้องจุลทรรศน์ขยายภาพได้อย่างไร. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2563,จาก <https://sites.google.com/site/aomsupaporn2535/hnwythi3?fbclid=IwAR2DfB4urhn-DvXV5Ue-oXNt9OixKpRz8vW6WraOjeWYnp6Plrn08yfaQq8>
- [26] Kejkar,R.B., Wanjari,S.P., Sharma,D., & Rajankar,R. (2018). **Experiment Investigation and Physical Performance of Geopolymer Fly Ash Bricks**. Retrieved 20 July 2020, From <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/431/9/092005/meta>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [27] Agrawal,U.S., Wanjari, S.P., & Naresh,D.N. (2019). **Impact of Replacement of Natural River Sand with Geopolymer Fly ash sand on Hardened Properties of Concrete.**
Retrieved 20 July 2020, From <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.13>
- [28] นายทิวากร ศรีจำปา.(2556).**อิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาแล้วลอยจีโอพอลิเมอร์.**วิทยานิพนธ์ วศ.บ.,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,นครราชสีมา.สืบค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2563, จาก
http://eng.sut.ac.th/ce/ce_course/download/project/7-1-55/42TIWAKORN%20SRIJUMPA.pdf
- [29] อาณัติ สายกระสุน.(2557).**การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พูนโดยใช้สารก่อฟองอินทรีย์.**วิทยานิพนธ์ วท.บ.,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,กรุงเทพมหานคร.สืบค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2563, จาก <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/46519>
- [30] เจริญชัย ฤทธิรุทธ ,พัชรพล โพธิ์ศรี และ บวร พิมพา.**ผลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อจีโอพอลิเมอร์มวลเบา.**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น,ขอนแก่น.สืบค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2563, จาก
http://cheqa.rmuti.ac.th/rmuti_admin/2557/ขก%20คณะวิศวกรรมฯ/2.3/2.3-02.pdf

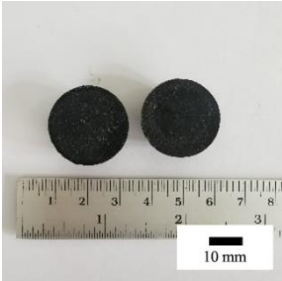
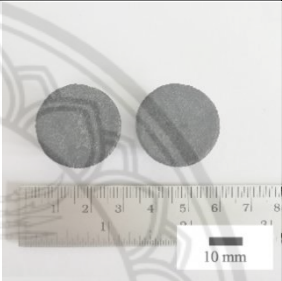
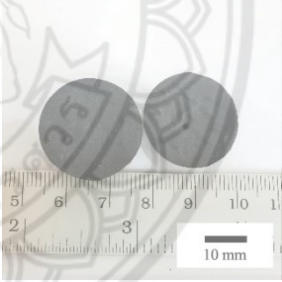



ภาคผนวก ก

ระยะเวลาในการแข่งตัวของชิ้นงาน

มหาวิทยาลัยนเรศวร




ตารางที่ ก.1 แสดงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อระยะเวลาในการแข็งตัว โดยใช้ อัตราส่วนถ้ำลอย : โซเดียมไฮดรอกไซด์ : โซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วน 1 : 1 : 1

เข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ระยะเวลาในการแข็งตัว (ชั่วโมง)
1	 <p data-bbox="1023 719 1091 752">15.35</p>
2	 <p data-bbox="1023 1059 1091 1093">15.50</p>
4	 <p data-bbox="1023 1402 1091 1435">24.30</p>
6	 <p data-bbox="1023 1744 1091 1778">16.00</p>



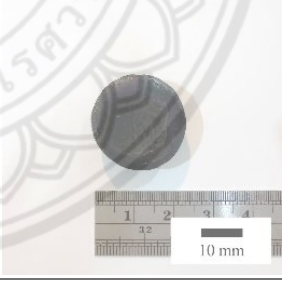
ตารางที่ ก.1 (ต่อ) แสดงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อระยะเวลาในการแข็งตัว โดยใช้อัตราส่วนถ้ำลอย : โซเดียมไฮดรอกไซด์ : โซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วน 1 : 1 : 1

เข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ระยะเวลาในการแข็งตัว (ชั่วโมง)
8	 <p data-bbox="1023 719 1091 752">76.00</p>
10	 <p data-bbox="1023 1059 1091 1093">77.00</p>

ตารางที่ ก.2 แสดงปริมาณโซเดียมซิลิเกตต่อระยะเวลาในการแข็งตัว ที่ความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ และเติมปริมาณผงอะลูมิเนียมร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของแก้วลอย

แก้วลอย : NaOH : Na ₂ SiO ₃	ระยะเวลาในการแข็งตัว (ชั่วโมง)
1 : 1 : 1	
	25.32
	มีการยุบตัวเกิดขึ้น และมีผิวที่หยาบ
1 : 1 : 2	
	53.55
	เกิดรอยยุบตรงกลาง ผิวมันวาว
1 : 1 : 3	
	53.46
	เกิดรอยยุบตรงกลาง ผิวมันวาว

ตารางที่ ก.3 แสดงปริมาณผงอะลูมิเนียมต่อระยะเวลาในการแข็งตัว โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอย : โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ : โซเดียมซิลิเกต ที่อัตราส่วน 1 : 1 : 1

ปริมาณผงอะลูมิเนียม (ร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้าลอย)	ระยะเวลาในการแข็งตัว (ชั่วโมง)
0.5	
	30.20 ชั่วโมง
	เกิดรอยยุบเล็กน้อย ผิวหยาบ ขรุขระ รูปร่างสมบูรณ์
1	
	29.49 ชั่วโมง
	มีรอยยุบตัวเล็กน้อย มีรอยแตกเกิดขึ้นเล็กน้อย
1.5	
	25.32 ชั่วโมง
	มีการยุบตัวเกิดขึ้น และมีผิวที่หยาบ



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบความแข็งแรงอัด

ตารางที่ ข.1 ค่าทดสอบความแข็งแรงอัด ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน

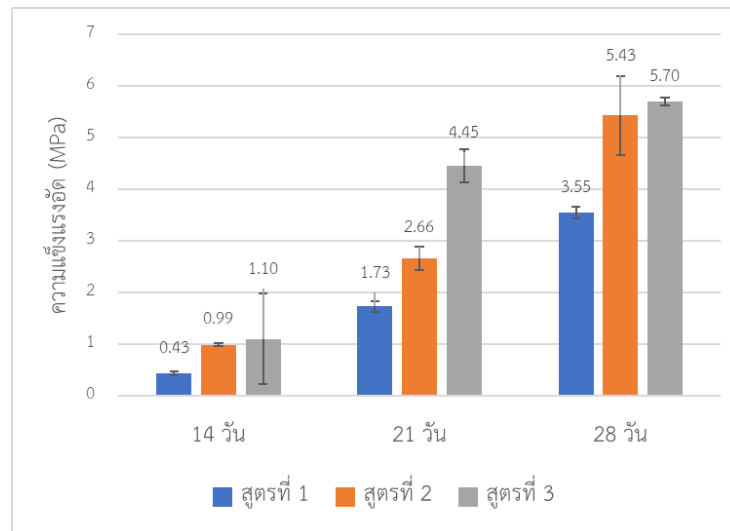
สูตร	ชั้นงาน	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	Max Load (N)	Area (mm ²)	Stress (MPa)
1	1	48.80	48.80	951.27	2,381.44	0.40
	2	49.40	49.40	1,028.50	2,465.06	0.42
	3	49.00	49.00	1,137.90	2,401.00	0.47
ค่าเฉลี่ย						0.43
S.D.						0.04
2	1	47.60	47.60	1,959.10	2,265.76	0.86
	2	46.70	46.70	2,312.10	2,180.89	1.06
	3	47.00	47.00	2,290.10	2,209.00	1.04
ค่าเฉลี่ย						0.99
S.D.						0.11
3	1	46.00	46.00	2,107.20	2,116.00	1.00
	2	46.00	46.00	2,303.00	2,116.00	1.09
	3	45.80	45.80	2,548.30	2,097.64	1.21
ค่าเฉลี่ย						1.10
S.D.						0.11

ตารางที่ ข.2 ค่าทดสอบความแข็งแรงอัด ที่ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน

สูตร	ชั้นงาน	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	Max Load (N)	Area (mm ²)	Stress (MPa)
1	1	43.20	43.20	3,169.70	1,866.24	1.70
	2	43.70	43.70	3,334.30	1,909.69	1.75
	3	44.30	44.30	3,440.00	1,962.49	1.75
ค่าเฉลี่ย						1.73
S.D.						0.03
2	1	45.60	31.20	3,647.80	1,422.72	2.56
	2	49.50	30.60	3,788.50	1,514.70	2.50
	3	46.70	26.60	3,636.2	1,242.22	2.93
ค่าเฉลี่ย						2.66
S.D.						0.23
3	1	44.40	21.50	4,467.00	954.60	4.68
	2	44.30	20.70	4,661.00	917.01	5.08
	3	45.20	22.00	3,571.40	994.40	3.59
ค่าเฉลี่ย						4.45
S.D.						0.77

ตารางที่ ข.3 ค่าทดสอบความแข็งแรงอัด ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

สูตร	ชั้นงาน	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	Max Load (N)	Area (mm ²)	Stress (MPa)
1	1	44.40	44.40	5,125.70	1,971.36	2.60
	2	44.40	44.40	8,560.40	1,971.36	4.34
	3	44.80	44.80	7,468.50	2,007.04	3.72
ค่าเฉลี่ย						3.55
S.D.						0.88
2	1	42.90	42.90	10,272.00	1,840.41	5.58
	2	43.00	43.00	9,360.90	1,849.00	5.06
	3	42.70	42.70	10,272.00	1,823.29	5.63
ค่าเฉลี่ย						5.43
S.D.						0.32
3	1	42.20	42.20	10,284.00	1,780.84	5.77
	2	42.70	42.70	10,294.00	1,823.29	5.65
	3	42.30	42.30	10,138.00	1,789.29	5.67
ค่าเฉลี่ย						5.70
S.D.						0.07



รูปที่ ข.1 แผนภูมิการทดสอบความแข็งแรงอัด เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม





ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความหนาแน่น

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ ค.1 ค่าทดสอบความหนาแน่น ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน

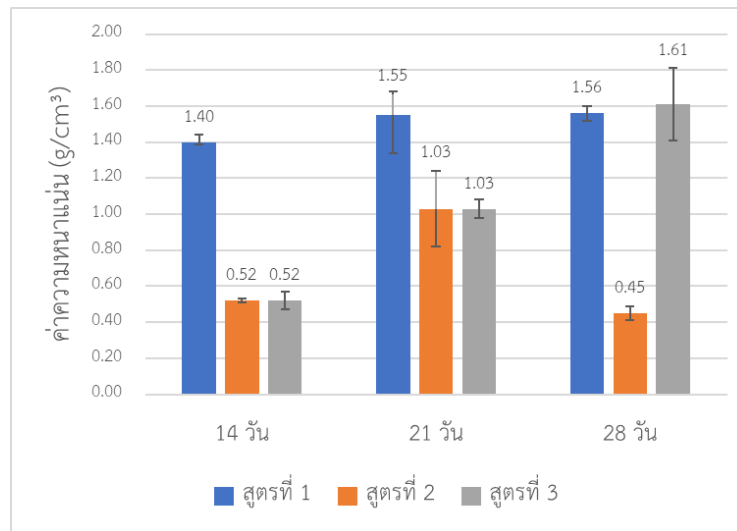
สูตร	ชั้นงาน	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก ก่อนต้ม (g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1	2.25	2.25	2.05	10.38	15.00	1.45
	2	2.23	2.24	2.13	10.64	14.71	1.38
	3	2.24	2.25	2.15	10.84	14.80	1.37
เฉลี่ย							1.40
S.D.							0.04
2	1	2.12	2.26	3.06	14.66	8.99	0.61
	2	2.12	2.21	3.03	14.20	5.18	0.36
	3	2.10	2.24	3.00	14.11	8.18	0.58
เฉลี่ย							0.52
S.D.							0.13
3	1	1.88	1.88	2.74	9.68	4.69	0.48
	2	2.08	2.08	3.31	14.32	8.06	0.56
	3	2.18	2.18	3.06	14.54	7.58	0.52
เฉลี่ย							0.52
S.D.							0.04

ตารางที่ ค.2 ค่าทดสอบความหนาแน่น ที่ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน

สูตร	ชั้นงาน	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก ก่อนต้ม (g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1	2.25	2.30	2.07	10.71	16.42	1.53
	2	2.19	2.31	2.10	10.62	16.52	1.56
	3	2.22	2.29	2.12	10.78	16.77	1.56
เฉลี่ย							1.55
S.D.							0.01
2	1	2.07	2.07	1.31	5.61	4.41	0.79
	2	2.03	2.11	0.70	3.00	3.40	1.13
	3	2.02	2.03	0.70	2.87	3.33	1.16
เฉลี่ย							1.03
S.D.							0.21
3	1	2.02	2.01	2.35	9.54	9.37	0.98
	2	2.02	2.09	2.17	9.16	9.62	1.05
	3	2.11	2.19	2.24	10.35	10.96	1.06
เฉลี่ย							1.03
S.D.							0.04

ตารางที่ ค.3 ค่าทดสอบความหนาแน่น ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

สูตร	ชั้นงาน	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก ก่อนต้ม (g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1	2.25	2.25	2.05	10.38	15.69	1.51
	2	2.23	2.24	2.01	10.04	16.23	1.62
	3	2.24	2.25	2.04	10.28	16.03	1.56
เฉลี่ย							1.56
S.D.							0.05
2	1	2.39	2.46	3.04	17.87	9.14	0.51
	2	2.37	2.40	3.05	17.35	7.24	0.42
	3	2.27	2.22	3.05	15.37	6.58	0.43
เฉลี่ย							0.45
S.D.							0.05
3	1	2.14	2.14	1.47	6.73	10.14	1.51
	2	2.14	2.14	1.48	6.78	9.98	1.47
	3	2.06	2.06	1.32	5.60	10.31	1.84
เฉลี่ย							1.61
S.D.							0.20



รูปที่ ค.1 แผนภูมิการทดสอบความหนาแน่น เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม



ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ



ตารางที่ ง.1 ค่าทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน

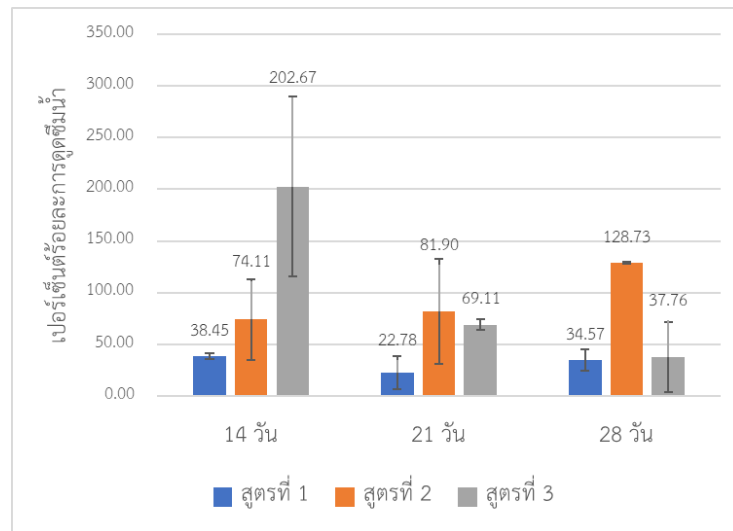
สูตร	น้ำหนัก (g)		ร้อยละการดูดซึมน้ำ
	ก่อนต้ม	หลังต้ม	
1	15.00	20.63	37.48
	14.71	20.00	35.93
	14.80	21.00	41.94
เฉลี่ย			38.45
S.D.			3.12
2	8.99	18.90	110.22
	5.18	6.88	32.80
	8.18	14.67	79.30
เฉลี่ย			74.11
S.D.			38.97
3	4.69	17.07	263.97
	8.06	37.75	141.37
	7.58		
เฉลี่ย			202.67
S.D.			86.69

ตารางที่ ง.2 ค่าทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ ที่ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน

สูตร	น้ำหนัก (g)		ร้อยละการดูดซึมน้ำ
	ก่อนต้ม	หลังต้ม	
1	16.42	20.61	25.57
	16.52	17.41	5.39
	16.77	23.04	37.37
เฉลี่ย			22.78
S.D.			16.17
2	4.41	5.60	26.87
	3.40	7.70	126.40
	3.33	6.40	92.42
เฉลี่ย			81.90
S.D.			50.60
3	9.37	16.40	74.95
	9.62	16.00	66.32
	10.96	18.20	66.06
เฉลี่ย			69.11
S.D.			5.06

ตารางที่ ง.3 ค่าทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

สูตร	น้ำหนัก (g)		ร้อยละการดูดซึมน้ำ
	ก่อนต้ม	หลังต้ม	
1	15.69	22.08	40.74
	16.23	19.92	22.73
	16.03	22.48	40.24
เฉลี่ย			34.57
S.D.			10.26
2	9.14	20.90	128.72
	7.24	16.50	127.84
	6.58	15.10	129.62
เฉลี่ย			128.73
S.D.			0.89
3	9.98	11.37	13.93
	10.31	16.66	61.59
เฉลี่ย			37.76
S.D.			33.70

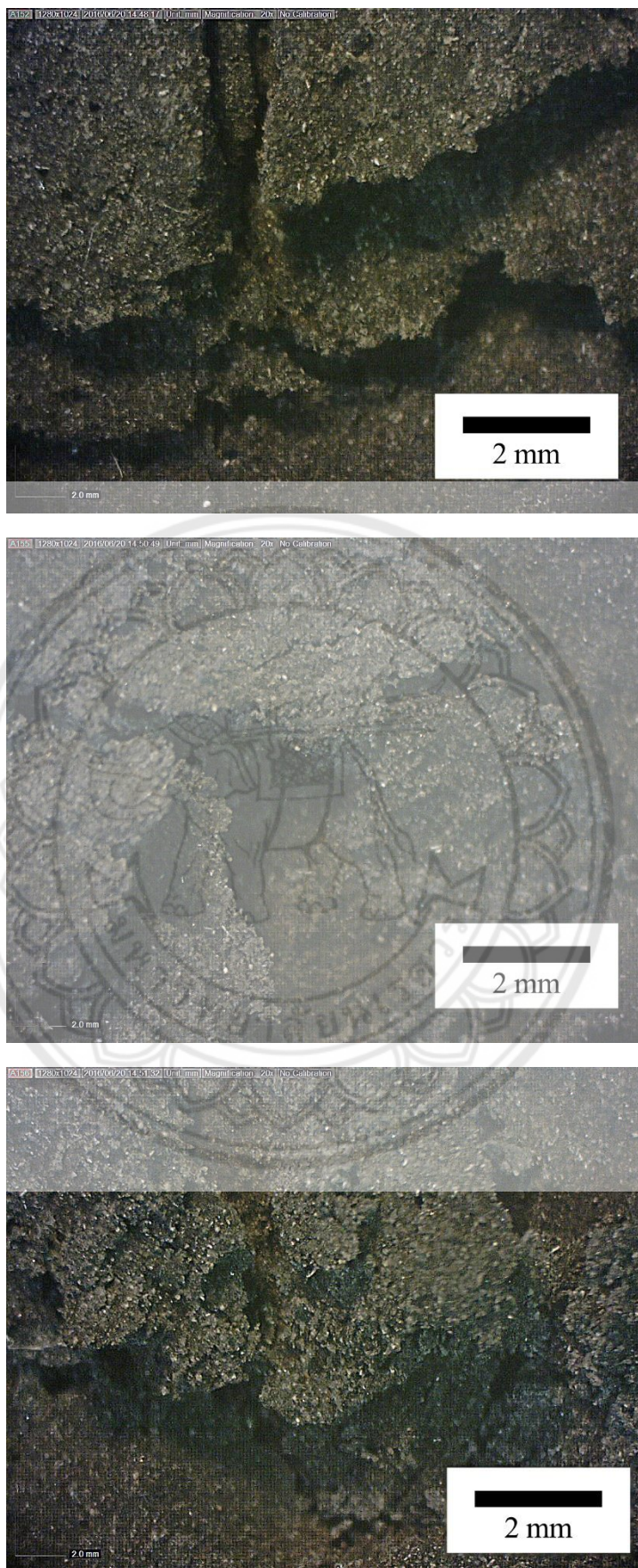


รูปที่ ง.1 แผนภูมิการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ เทียบกับระยะเวลาในการบ่ม

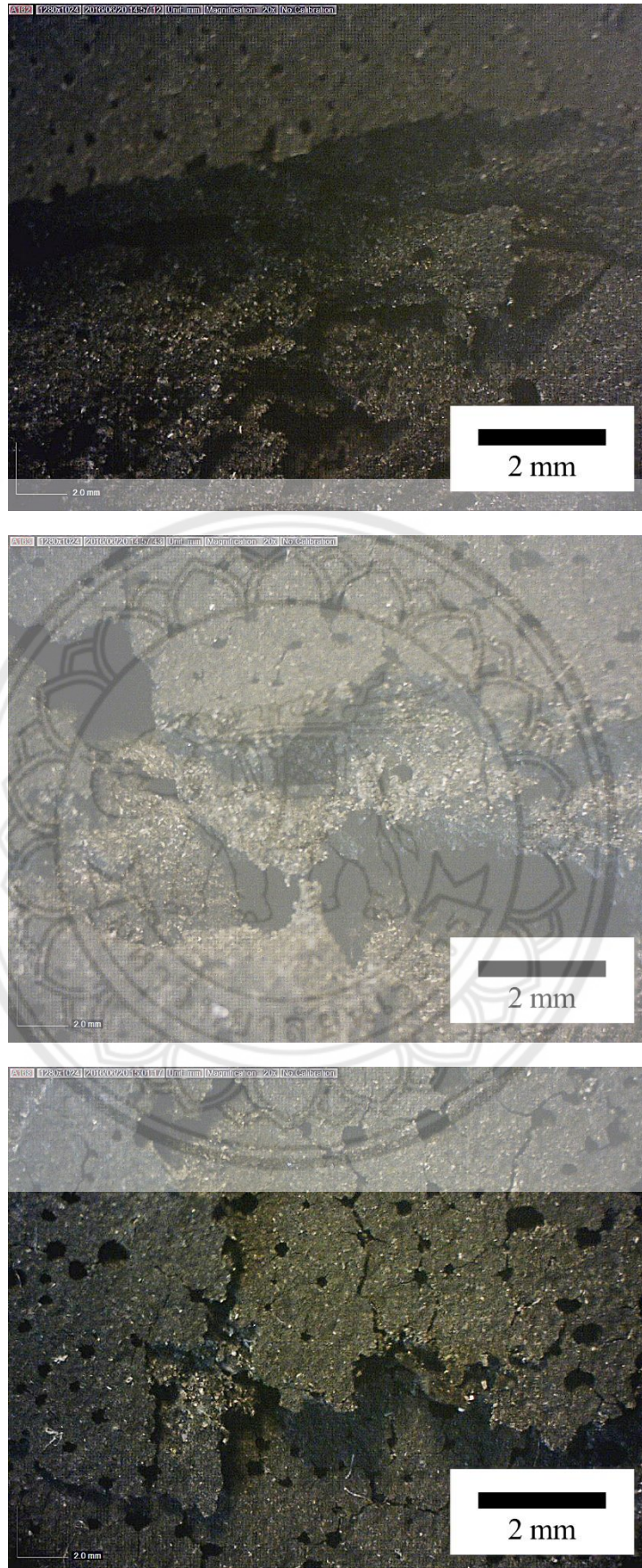


ภาคผนวก จ
ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน

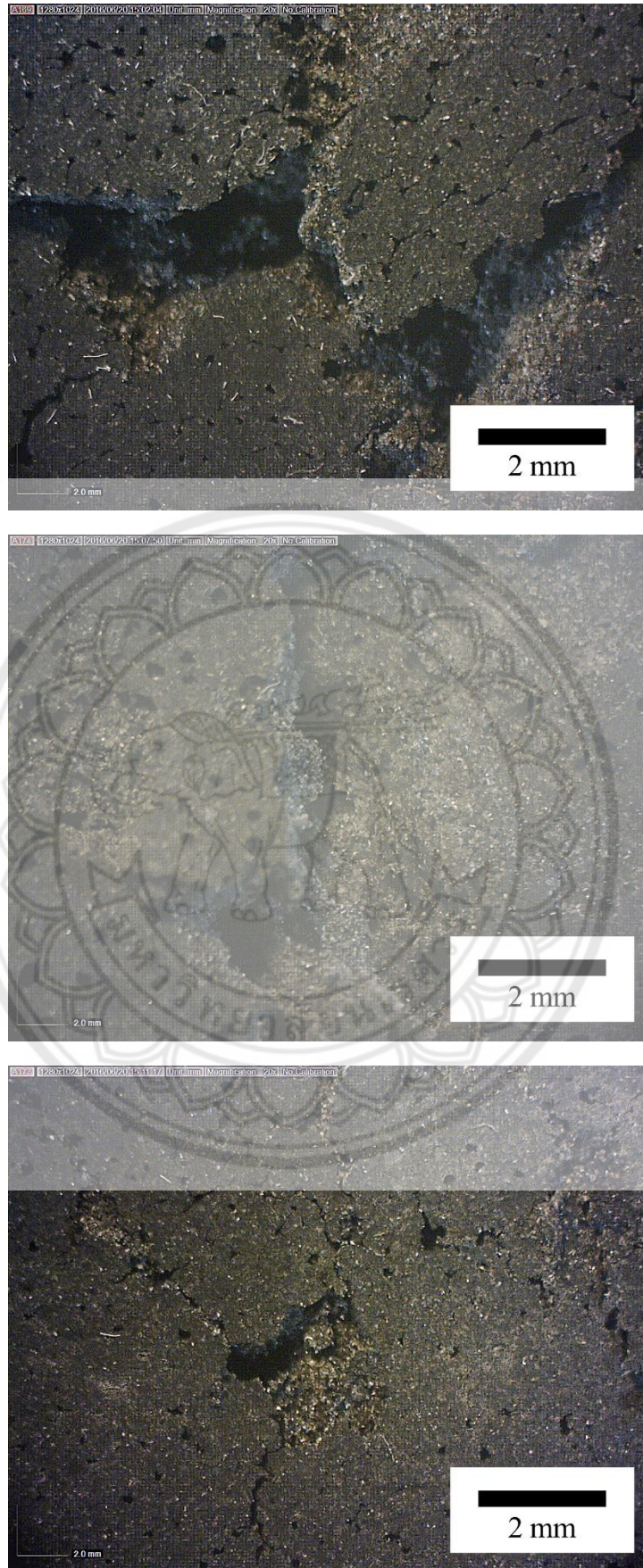




รูปที่ จ.1 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานสูตรที่ 1 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน



รูปที่ จ.2 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานสูตรที่ 2 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน



รูปที่ จ.3 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานสูตรที่ 3 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน