

การพัฒนาบล็อกคอนกรีตปูพื้นจากกากของเสียในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2566

DEVELOPMENT OF CONCRETE PAVING BLOCK FROM SOLID WASTE IN FLUIDIZED BED  
COMBUSTION PROCESS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Science for Industry  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาบล็อกคอนกรีตปูพื้นจากกากของเสียใน กระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด
โดย	น.ส.ณัฐวรรณ ดวงแก้ว
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์ ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โภธิยะราช)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (ศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์)
.....	กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

ณัฐวรรณ ดวงแก้ว : การพัฒนาบล็อกคอนกรีตปูพื้นจากกากของเสียในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด. ( DEVELOPMENT OF CONCRETE PAVING BLOCK FROM SOLID WASTE IN FLUIDIZED BED COMBUSTION PROCESS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อภิรัฐ ธีรภาพพิเศษพงษ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.วันทนี พุกกะคุปต์,ดร.นิริวัชร นวอัครฐานันท์

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าลอย และทรายของเสีย (ขนาดละเอียดและหยาบ) จากกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดเพื่อนำความร้อนมาใช้ในการอบแห้งในกระบวนการผลิตกระดุมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมบล็อกคอนกรีต 2 ประเภทวัสดุ คือ คอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ สำหรับการเตรียมคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้ศึกษาผลของการใช้เถ้าลอยทดแทนส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วัสดุประสาน) และศึกษาอัตราส่วนของทรายของเสีย (มวลรวม) ต่อวัสดุประสาน ที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด บ่มชิ้นงานเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน พบว่าตัวอย่างที่มีเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนของ มวลรวมต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังอัด 45 MPa เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.827-2531 นอกจากนี้ยังได้นำส่วนผสมดังกล่าวมาเตรียมบล็อกประสานปูพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีขนาดและรูปทรงตามมาตรฐานดังกล่าวด้วยเครื่องผลิตบล็อกคอนกรีต พบว่าสามารถเตรียมบล็อกประสานปูพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีเถ้าลอยทดแทนส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ในส่วนของการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตบล็อกฐานจีโอพอลิเมอร์เป็นการทดลองเตรียมจีโอพอลิเมอร์แบบส่วนตัว โดยใช้เถ้าลอยร่วมกับสารอัลคาไลซึ่งประกอบด้วย โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (วัสดุประสาน) และผสมกับมวลรวมในสัดส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวมเท่ากับ 1:1 เช่นเดียวกับการเตรียมบล็อกคอนกรีตฐานซีเมนต์ ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.31 ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด โดยศึกษาผลของสัดส่วนของเถ้าลอยต่อสารอัลคาไล และสัดส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต พบว่าชิ้นงานที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้สารอัลคาไล (โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 60:40 โดยน้ำหนัก) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 28 วัน มีกำลังอัด 5.45 MPa ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าตามมาตรฐาน มอก.827-2531 จึงไม่สามารถใช้ทำบล็อกประสานปูพื้นได้ แต่ค่ากำลังอัดของบล็อกฐานจีโอพอลิเมอร์ก็สูงมากพอสำหรับผลิตบล็อกวางไม่รับน้ำหนักตาม มอก.58-2560

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2566	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6472028623 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: Geopolymer concrete, Concrete paving blocks, Sand waste, Fly ash

Natthawan Duangkaew : DEVELOPMENT OF CONCRETE PAVING BLOCK FROM SOLID WASTE IN FLUIDIZED BED COMBUSTION PROCESS. Advisor: Asst. Prof. Dr. Apirat Theerapapvisetpong, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Wantanee Buggakupta, Ph.D., Dr. Nithiwach Nawaukkaratharnant, Ph.D.

The utilization of by-products; fly ash and waste sands (both fine and coarse particles) derived from paper drying process using a fluidized bed coal, as raw materials for concrete paving blocks and geopolymer concrete was studied. The work was divided into 2 parts: Portland cement-based blocks and geopolymer-based blocks. For the cement-based concrete, the replacement of Portland cement with fly ash (binder), and the ratio of binder to aggregate (mixed waste sand) were studied. The samples were formed by pressing method and cured for 1, 7, and 28 days. The results indicated that the optimum mix was 15 wt% replacement of cement with fly ash and 1:1 by weight of binder to aggregate ratio. It was found that the compressive strength of the samples achieved 45 MPa after 7 curing days which was qualified Thai industrial standard (TIS) 827-2531. The selected mixture could be shaped into paving blocks using a block pressing machine. Meanwhile, the other part concerned one-part geopolymer-based concrete process using fly ash and alkali activator, consisted of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), as binders. The mixture with binder to aggregate ratio of 1:1 was prepared similar to the previous cement-based concrete work, but the water to binder ratio yielded 0.31 for pressing. The fly ash to alkali activator ratios and sodium silicate to sodium hydroxide ratio in alkali activator were studied. The experiments suggested that the specimen with 80 wt% fly ash and 20 wt% alkali activator (60 wt% NaOH: 40 wt%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) provided the compressive strength value of 5.45 MPa after 28 days. Such value was still lower than TIS 827-2531. Thus, the geopolymer could not be used as paving blocks whatsoever. However, the value was good enough for hollow block products, according to TIS 58-2560.

Field of Study: Science for Industry

Academic Year: 2023

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้สามารถเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความร่วมมือการช่วยเหลือและสนับสนุนอย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์ และ ดร.นิธิวัชร นวอักษรนันท์ ที่ได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำแนะนำปรึกษาด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ตลอดจนให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ คอยรับฟังและอบรมสั่งสอนเสมอมา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้โดยการสนับสนุนจากโครงการเครือข่ายการอุดมศึกษาเพื่ออุตสาหกรรม (Higher Education for Industry Consortium: Hi-Fi) ภายใต้การสนับสนุนงบประมาณจากโครงการปฏิรูประบบ อววน. การส่งเสริมและพัฒนาบุคลากรผ่านการเรียนรู้แบบปฏิบัติจริง (Experiential Learning) เรื่อง การสนับสนุนการพัฒนาความเป็นเลิศของสถาบันอุดมศึกษาและผลิตกำลังคนคุณภาพสูงผ่านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษาเพื่ออุตสาหกรรม (Hi-Fi) สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม(สป.อว.) ปีงบประมาณ 2565 ร่วมกับโรงงานกระดาษ เทนมา (ประเทศไทย) จำกัด

ขอขอบพระคุณ โรงงานกระดาษ เทนมา (ประเทศไทย) ผู้บริหารคุณปัทมรัตน์ ศาสตร์สาร คุณลดาพร บุญครอง และคุณธนพร อุทัยน้อย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัย ตลอดจน ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนการดำเนินงานเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามาให้คำชี้แนะเกี่ยวกับแนวทางในงานวิจัยและแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง และสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่สำหรับดำเนินงานวิจัย

ณัฐวรรณ ดวงแก้ว

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ฉ	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....ฉ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2	2
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม..... 3	3
2.1 กระบวนการผลิตกระดาษ..... 3	3
2.1.1 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ และเครื่องจักรในสายการผลิต..... 3	3
2.1.2 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด..... 4	4
2.1.3 ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิต..... 5	5
2.2 การผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 7	7
2.2.1 วัตถุประสงค์ของการผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 7	7
2.2.2 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องการผลิตบล็อกคอนกรีต..... 9	9
2.2.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของคอนกรีต..... 11	11
2.2.4 การผสมบล็อกคอนกรีต..... 12	12

2.3 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer).....	16
2.3.1 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) .....	17
2.3.2 ส่วนผสม.....	17
2.3.3 การผสมจีโอพอลิเมอร์.....	18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	19
2.4.1 บล็อกประสานปูนพื้นฐานซีเมนต์.....	19
2.4.2 บล็อกจีโอพอลิเมอร์ .....	20
บทที่ 3     วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	21
3.1.1 วัตถุประสงค์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการห้องทดลอง .....	21
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตบล็อกประสานปูนพื้นตัวหนอน .....	22
3.2 ขั้นตอนการวิจัย .....	22
3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุดิบ.....	22
3.2.1.1 องค์ประกอบทางเคมี.....	22
3.2.1.2 องค์ประกอบเฟส.....	23
3.2.1.3 สมบัติทางกายภาพ.....	23
3.2.2 การขึ้นรูปตัวอย่างบล็อกประสานปูนพื้นฐานซีเมนต์.....	25
3.2.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	25
3.2.2.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน .....	28
3.2.3 การขึ้นรูปเป็นตัวอย่างทดสอบบล็อกจีโอพอลิเมอร์ .....	29
3.2.3.1 การศึกษาผลของสัดส่วนเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล.....	29
3.2.3.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนโซเดียมเมตาซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ของสาร กระตุ้นอัลคาไล.....	32



3.2.4 การขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบ.....	34
3.3 กระบวนการทดสอบตัวอย่าง.....	39
3.3.1 กำลังรับแรงอัด.....	39
3.3.2 ค่าความหนาแน่น.....	40
3.3.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดเชิงเส้น.....	40
3.3.4 ระยะเวลาก่อตัว.....	41
3.3.5 ปริมาณธาตุและโลหะ.....	42
3.3.6 องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมี.....	42
3.3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	43
3.3.8 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์หัตถุติบ.....	44
4.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของหัตถุติบ.....	44
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและเฟสองค์ประกอบ.....	44
4.1.2 สัมฐานวิทยาของหัตถุติบ.....	47
4.1.3 การกระจายขนาดอนุภาค.....	47
4.1.4 โมดูลัสความละเอียด.....	49
4.1.5 ความถ่วงจำเพาะ.....	49
4.1.6 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก.....	49
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายและการทดลองการใช้กากของเสียเป็นส่วนผสมใน บล็อกคอนกรีตปูพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	50
5.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	50
5.1.1 กำลังรับแรงอัดชิ้นงาน.....	50
5.1.2 ความหนาแน่นมวลรวม.....	51
5.1.3 การขยายตัวเชิงเส้น.....	52

5.1.4	ระยะเวลาก่อตัว .....	53
5.2	การศึกษาผลของอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน.....	54
5.2.1	กำลังรับแรงอัดชิ้นงาน.....	54
5.2.2	ความหนาแน่นมวลรวม.....	56
5.2.3	การขยายตัวเชิงเส้น.....	58
5.3	การขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบ.....	59
บทที่ 6	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นส่วนผสมใน บล็อก ฐานจีโอพอลิเมอร์ .....	61
6.1	การศึกษาผลของสัดส่วนเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล .....	61
6.1.1	กำลังรับแรงอัดชิ้นงาน.....	61
6.1.2	ความหนาแน่นมวลรวม.....	62
6.2	การศึกษาผลของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารกระตุ้นอัลคาไล .....	63
6.2.1	กำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน .....	63
6.2.2	ความหนาแน่นมวลรวม.....	65
6.2.3	ปริมาณธาตุและโลหะหนัก.....	66
6.2.4	องค์ประกอบของโมเลกุลของสารเชื่อมประสาน .....	67
6.2.5	สัณฐานวิทยา และปริมาณธาตุของสารเชื่อมประสาน .....	68
บทที่ 7	สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	71
7.1	บล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	71
7.2	บล็อกจีโอพอลิเมอร์.....	71
7.3	ข้อเสนอแนะ .....	72
7.3.1	บล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	72
7.3.2	บล็อกจีโอพอลิเมอร์ .....	72
ภาคผนวก	.....	73

ภาคผนวก ก การกระจายตัวขนาดอนุภาคของวัตุดิบ .....	74
ภาคผนวก ข บล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	76
ภาคผนวก ค จีโอพอลิเมอร์บล็อก .....	79
บรรณานุกรม .....	81
ประวัติผู้เขียน.....	87



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618.....	8
ตารางที่ 2.2 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของบล็อกประสานปูพื้น.....	14
ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนัก.....	14
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์สำหรับทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง .....	24
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมวัตถุดิบของอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแก้ลดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	26
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมวัตถุดิบของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อัตราส่วนผสมทรายของเสียต่อวัสดุประสาน.....	28
ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมวัตถุดิบของอัตราส่วนผสมแก้ลดยต่อสารกระตุ้นอัลคาไลของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์.....	30
ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมวัตถุดิบของอัตราส่วนผสมสารกระตุ้นอัลคาไลของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์.....	33
ตารางที่ 3.6 ร้อยละโดยน้ำหนักส่วนผสมวัตถุดิบของอิฐบล็อกต้นแบบ .....	34
ตารางที่ 4.1 สมบัติของวัตถุดิบ .....	46
ตารางที่ 4.2 การร่อนผ่านตะแกรงของทรายหยาบ .....	48
ตารางที่ 5.1 ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมแก้ลดย.....	54
ตารางที่ 6.1 ปริมาณสารโลหะหนักในสารละลาย.....	66

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการขึ้นชั้นกระดาษเพื่อซ้อนให้เป็นแผ่น.....	3
รูปที่ 2.2 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไชน์เบด .....	5
รูปที่ 2.3 ทราายของเสียแต่ละขนาด .....	7
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างบล็อกประสานปูพื้น.....	13
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการวางเรียงประสาน.....	13
รูปที่ 2.6 บล็อกคอนกรีตกลางไม่รับน้ำหนัก.....	15
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์พวงสายโซ่พอลิไซอะเลต .....	16
รูปที่ 2.8 กระบวนการผสมจีโอพอลิเมอร์.....	19
รูปที่ 3.1 เครื่อง Scanning Electron Microscope.....	24
รูปที่ 3.2 เครื่องปั่นผสม.....	27
รูปที่ 3.3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว.....	27
รูปที่ 3.4 เครื่องบดผสม.....	31
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดขึ้นรูป.....	32
รูปที่ 3.6 ถังเปลมผสมปูน.....	35
รูปที่ 3.7 การใช้มือกำส่วนผสม (Ball in hand).....	36
รูปที่ 3.8 เครื่องอัดขึ้นรูปบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอน .....	36
รูปที่ 3.9 แผนผังการดำเนินการทดลองบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	37
รูปที่ 3.10 แผนผังการดำเนินการทดลองบล็อกจีโอพอลิเมอร์.....	38
รูปที่ 3.11 เครื่องมือหาเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (Vicat apparatus) .....	42
รูปที่ 3.12 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR).....	43
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของแก้วลอย (XRD).....	45

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายเก้าอี้ลอย.....	47
รูปที่ 4.3 ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาค .....	48
รูปที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	51
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความหนาแน่น .....	52
รูปที่ 5.3 การขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	53
รูปที่ 5.4 กำลังรับแรงอัดตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเก้าอี้ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์.....	55
รูปที่ 5.5 กำลังรับแรงอัดตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเก้าอี้ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์.....	56
รูปที่ 5.6 ความหนาแน่นมวลรวมตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเก้าอี้ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์.....	57
รูปที่ 5.7 ความหนาแน่นมวลรวม ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเก้าอี้ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์.....	57
รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวเชิงเส้น ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน เมื่ออัตราส่วนเก้าอี้ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์.....	58
รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวเชิงเส้น ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน เมื่ออัตราส่วนเก้าอี้ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์.....	59
รูปที่ 5.10 เครื่องอัดอิฐบล็อกต้นแบบรูปตัวหนอน.....	60
รูปที่ 5.11 ชั้นวางชิ้นงานต้นแบบ .....	60
รูปที่ 5.12 อิฐบล็อกปูพื้นต้นแบบรูปตัวหนอน .....	60
รูปที่ 6.1 กำลังรับแรงอัดของบล็อกจีโอพอลิเมอร์.....	62
รูปที่ 6.2 ความหนาแน่นมวลรวมบล็อกจีโอพอลิเมอร์ .....	63
รูปที่ 6.3 กำลังรับแรงอัดของบล็อกจีโอพอลิเมอร์.....	64
รูปที่ 6.4 ความหนาแน่นของบล็อกจีโอพอลิเมอร์.....	65
รูปที่ 6.5 องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์.....	67

รูปที่ 6.6 สันฐานวิทยาของสารเชื่อมประสานบล็อกจีโอพอลิเมอร์ .....70



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

บริษัท โรงงานกระดาษเทนมา (ประเทศไทย) จำกัด เป็นบริษัทผลิตกระดาษเก่าแก่ของประเทศ ไทย มีอายุกว่า 50 ปี เป็นโรงงานผลิตกระดาษชั้นกลางมีกำลังการผลิตประมาณ 38,000 ตันต่อปี ใน กระบวนการผลิตกระดาษมีขั้นตอนการอบแห้งซึ่งต้องอาศัยพลังงานความร้อนจากถ่านหิน โดย เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไชต์เบด เพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนซึ่งเป็นที่มาของเถ้าหลังกระบวนการ เเผาไหม้ และยังมีกากของเสียจากกระบวนการผลิต (By-products) หลายชนิดได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) วันละ 1.5-2.0 ตัน เถ้าหนัก (Bottom ash) วันละ 0.1-0.2 ตัน ทราายละเอียด วันละ 0.5-1.0 ตัน และทรายหยาบ วันละ 3.5-4.0 ตัน

กากเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินแบบฟลูอิดไชต์เบดต้องส่งกำจัดไปยังหลุมฝังกลบ ซึ่งมี ค่าใช้จ่ายที่สูงและเปลืองพื้นที่ในการจัดเก็บ ทั้งนี้เถ้าลอยจัดเป็นวัสดุปอซโซลานสามารถนำมาใช้ ประโยชน์ โดยทั่วไปเถ้าลอยสามารถนำมาใช้แทนที่หรือทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้บางส่วน ในขณะที่ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยยังคงคุณสมบัติทั้งทางด้านกำลังอัดและความคงทนให้คงเดิม หรือดีขึ้น อีกทั้งเมื่อซีเมนต์รวมกับทรายยังคงสามารถนำมาเป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุคอนกรีตได้ เช่น อิฐทางเท้า บล็อกคอนกรีต เป็นต้น

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ (1) การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นฐานซีเมนต์ และ (2) การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ โดยส่วนแรกจะศึกษาการ นำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์บล็อก และใช้ทรายเป็น มวลรวมเพื่อช่วยส่งเสริมความแข็งแรงของซีเมนต์บล็อก ส่วนที่สองเป็นการศึกษาบล็อกคอนกรีตฐาน จีโอพอลิเมอร์ ศึกษาปริมาณเถ้าลอยให้อยู่ในส่วนผสมได้มากที่สุด โดยที่ยังคงความแข็งแรงของบล็อก งานวิจัยนี้จึงเป็นการเสริมสร้างความยั่งยืนตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) ที่มี การนำผลิตภัณฑ์ที่สิ้นอายุหรือของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตนำมาผ่านกระบวนการจัดการที่ เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการส่งของเสียไปยังหลุมฝังกลบ นำกากของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการมาทำ ให้เป็นประโยชน์ในรูปของวัสดุตั้งต้น ส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนวัสดุให้อยู่ในวงจรการผลิตและ บริโภคให้นานยิ่งขึ้น



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อนำกากของเสียในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดเป็นส่วนผสมในบล็อกฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และฐานจีโอพอลิเมอร์ และศึกษาผลของอัตราส่วนผสมของกากของเสียที่ผ่านการใช้งานแล้วต่อสมบัติของบล็อกประสานปูพื้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากของเสีย จากการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด ออกแบบส่วนผสมและทดลองขึ้นรูปตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล
- 3) การเตรียมบล็อกจากเถ้าลอย ทราายละเอียด และทรายหยาบ ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดในกระบวนการอบแห้งของการผลิตกระดาศ
- 4) การเตรียมบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทดสอบสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด การขยายตัวเชิงเส้น ความหนาแน่น และระยะเวลาก่อตัวของชิ้นงาน เป้าหมายเป็นไปตาม มอก.827-2531
- 5) การเตรียมบล็อกจีโอพอลิเมอร์ ทดสอบสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นของชิ้นงาน วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะ และทดสอบสารเชื่อมประสาน วิเคราะห์สัณฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค เป้าหมายเป็นไปตาม มอก.58-2560

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ผลิตภัณฑ์บล็อกประสานปูพื้นจากกากของเสียกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดในกระบวนการอบแห้งของการผลิตกระดาศที่ผ่านมาตรฐาน มอก.827-2531 และบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนักที่ผ่านมาตรฐาน มอก.58-2560

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม

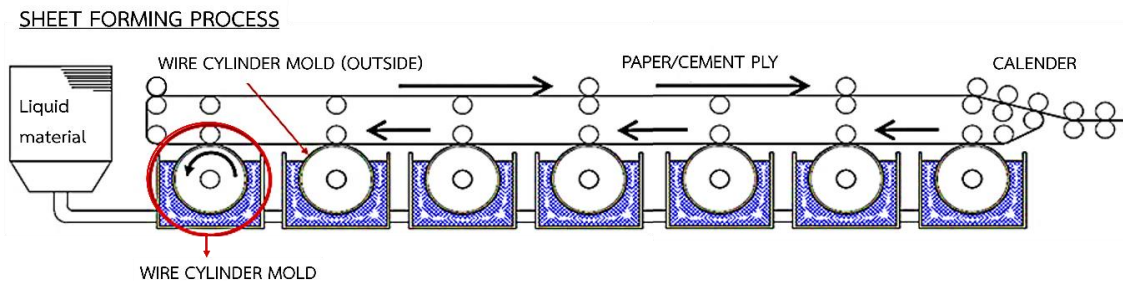
#### 2.1 กระบวนการผลิตกระดาษ

##### 2.1.1 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ และเครื่องจักรในสายการผลิต

ผลิตภัณฑ์โรงงานกระดาษเทนมา เป็นกระดาษที่เรียกว่า กระดาษกล่องขาวเคลือบหน้าเดียว (MC Duplex board) คือกระดาษแข็งที่เกิดจากการซ้อนทับกันหลาย ๆ ชั้นของเยื่อกระดาษ โดยการนำกระดาษแต่ละชั้นมารีดประกบกันเป็นแผ่นเดียวด้วยกรรมวิธีจากเครื่องจักร ที่หน้าผิวกระดาษต้องมีการเคลือบให้ผิวเรียบ (Calendering) เพื่อใช้สำหรับพิมพ์งาน กระดาษกล่องขาวเคลือบหน้าเดียว มักนำมาใช้ทำกล่องสำหรับบรรจุสินค้าต่าง ๆ เช่น ขนม ยาสีฟัน สุรา ของเล่นเด็กและอื่น ๆ โดยกรรมวิธีการผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบหน้าเดียวแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

##### 1) การขึ้นชั้นกระดาษเพื่อซ้อนให้เป็นแผ่น (Forming)

ในการผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบหน้าเดียวจะมีถึงที่จะบรรจุวัตถุดิบ ได้แก่ เยื่อกระดาษ และ เศษกระดาษต่าง ๆ ทั้งหมด 7 ถึง 8 วัตถุดิบทั้งหมดจะไหลผ่านถังพัก (Head box) ไปที่ เครื่องขึ้นชั้นกระดาษ (Ultra former) ซึ่งจะทำหน้าที่ฉีดวัตถุดิบไหลลงไปยังสัมผัสกับพื้นผิวของลูกกลิ้งตะแกรงกลม (Wire cylinder mold) ซึ่งมีพื้นผิวหน้าพันรอบด้วยตะแกรงสแตนเลส (Stainless wire net) ลูกกลิ้งตะแกรงกลมนี้จะหมุนรอบไปเรื่อย ๆ และลำเลียงวัตถุดิบเคลื่อนที่จากชั้นหนึ่งไปแตะซ้อนทับกับชั้นต่อ ๆ ไปจนครบทั้ง 7 ชั้น เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วกระดาษจะเริ่มจับตัวกันเป็นแผ่นที่ยังคงสภาพความเปียกชื้นสูงมาก ระบบดังกล่าวจะหมุนเวียนต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ (Continuous process) แสดงในรูปที่ 2.1 จากนั้นกระดาษนี้จะถูกลำเลียงเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการขึ้นชั้นกระดาษเพื่อซ้อนให้เป็นแผ่น

(ที่มา: ดัดแปลงจาก Taiyo wire cloth co.,ltd)

## 2) การรีดบด (Pressing)

กรรมวิธีนี้เป็นการเอาความชื้นบางส่วนที่อยู่ในกระดาษออก โดยใช้ลูกกลิ้งโลหะขนาดใหญ่หลายลูกที่มีแรงอัดสูงถูกติดตั้งให้ขบเข้าหากัน กระดาษจะถูกบด รีด จนแบนแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้กระดาษก็ยังคงมีความชื้นค่อนข้างสูงอยู่

## 3) การอบแห้ง (Drying)

กระดาษที่ผ่านจากกรรมวิธีบด แล้วจะถูกป้อนผ่านลูกกลิ้งชนิดพิเศษซึ่งเก็บความร้อนสูง ความร้อนที่ได้มาจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด ลูกกลิ้งจำนวนมากจะถูกติดตั้งตามแนวนอนและกระดาษที่เข้าอบแห้งนี้จะแตะลูกกลิ้งโดยส่วนของผิวหน้า เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วกระดาษจะแห้งจนเกือบสนิท

## 4) การเตรียมผิวหน้า (Surface calendaring)

เมื่อถึงขั้นตอนนี้ ผิวหน้าของกระดาษจะมีลักษณะหยาบ ขรุขระ และมีรูพรุนเล็ก ๆ (Pin holes) เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องการฉาบผิวหน้าและมีการอบน้ำยาเพื่อปิดรูพรุนและรอยขรุขระของผิวหน้ากระดาษ

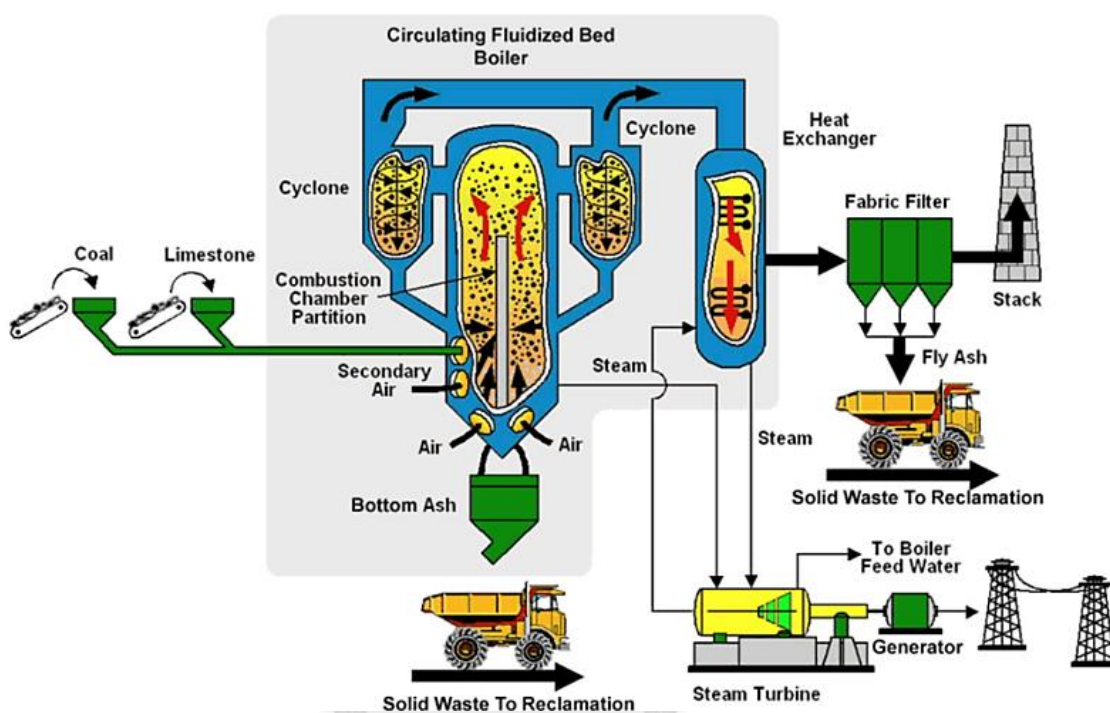
## 5) การเคลือบผิวหน้าและขัดเงา (Coating and finishing)

ขั้นตอนนี้จะถูกเคลือบผิวโดยเครื่องเคลือบผิว (Coater) เพื่อให้มีสมบัติการใช้งานพิมพ์หลาย ๆ สีได้ ต่อมาไปสู่ส่วนการขัดเงาผิวหน้า (Finishing) เพื่อให้ผิวหน้ากระดาษสวยงาม อยู่ในสภาพเหมาะสมกับการใช้งานพิมพ์ จากนั้นนำไปตัดขนาดให้ได้ตามความต้องการ

### 2.1.2 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด

กระบวนการผลิตพลังงานความร้อน มีการใช้ถ่านหินซับบิทูมินัส (Subbituminous coal) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนโดยเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized-bed combustion) ซึ่งเป็นการเผาความร้อนที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 800-900 °C ถ่านหินที่ถูกนำมาใช้จะมีขนาดอยู่ที่ 5-10 mm พร้อมอากาศร้อน ถ่านหินและทรายที่เข้าไปจะแขวนลอยอยู่ในคลื่นอากาศร้อน ซึ่งทำให้เกิดกากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อเอาพลังงานความร้อน ได้แก่ ถ่านที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงไปยังก้นเตา จึงเรียกกันว่าถ่านก้น (Bottom ash) และถ่านที่มีความละเอียดและมีขนาดเล็กกว่าประมาณ 1-250  $\mu\text{m}$  ซึ่งจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่บริเวณรอบโรงงาน ส่วนทรายซึ่งเป็นวัสดุที่เก็บความร้อนได้ดีจึงเป็นตัวกลาง ทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อนไป

ถ่ายเทให้กับถ่านหิน เมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งทรายที่มีการปล่อยทิ้งจากกระบวนการด้วยขนาดที่ต่างกัน ทรายที่มีขนาดอยู่ในช่วงขนาดที่สามารถใช้งานได้สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการได้บางส่วน ในขณะที่ทรายที่ไม่อยู่ในช่วงขนาดที่นำไปใช้งานได้ ไม่ว่าจะขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ก็ตาม จะถูกกำจัดออกจากเตาเผา [1] โดยเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไชน์เบดแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไชน์เบด

(ที่มา: Abandoned Mine Reclamation Clearinghouse,

<http://www.amrclearinghouse.org/Sub/landreclamation/cfb/wpcamr-cfbpower.htm>)

### 2.1.3 ผลกระทบที่พลอยได้จากกระบวนการผลิต

#### 1) เถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized fuel ash) เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไชน์เบดเพื่อผลิตพลังงานความร้อน ในส่วนของเถ้าถ่านหินที่มีการหลอมเหลวบางส่วนจะจับกันเป็นก้อน หรือเป็นเม็ดที่ใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมาก จึงเรียกกันว่าเถ้าหนัก (Bottom ash)

ถ้าลอยจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่อได้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) และน้ำที่อุณหภูมิปกติจะได้สารที่มีสมบัติเชื่อมประสาน ถูกนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าชนิดอื่น เนื่องจากเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรกถ้าหินมีส่วนประกอบหลักคือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาปอซโซลานิกและยังสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ ประการที่สอง เนื่องจากลักษณะของเม็ดถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างเล็กและรูปร่างส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตด้วยขนาดที่เล็กสามารถเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทรายได้ ช่วยให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น [2] ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของถ่านหินจะขึ้นอยู่กับความละเอียดและสมบัติของถ่านหิน ถ่านหินที่มีความละเอียดสูงจะสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ อีกทั้งยังให้กำลังอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการใช้ถ่านหิน [3]

องค์ประกอบหลักทางเคมีของถ่านหินคือ  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  อัตราส่วนของออกไซด์ทั้งสามชนิดขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน และอุณหภูมิ ด้วยเหตุนี้จึงมีการแบ่งประเภทของถ่านหิน โดย ASTM C618 [4] แบ่งถ่านหินออกเป็น 2 ประเภทคือ Class F และ Class C โดยเกณฑ์ของ Class F ต้องมีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่มาจากถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (Anthracite) และหินบิทูมินัส (Bituminous) ส่วนของ Class C ต้องมีผลรวมของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก มาจากถ่านหินซับบิทูมินัส (Subbituminous coal) และถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นส่วนใหญ่ การที่ถ่านหินจากแหล่งเดียวกันจะพบทั้ง Class F และ Class C นั้นเป็นเรื่องปกติ เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติและมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นสมบัติทางกายภาพและเคมีย่อมเปลี่ยนไปได้ อย่างไรก็ตามถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต [2]

## 2) ทรายของเสีย

ทรายใช้เป็นตัวพาความร้อนในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบด และระบบจะมีการเปลี่ยนทราย ทรายจะตกลงมาทางด้านล่างของห้องเผาไหม้ไปสู่เครื่องคัดแยกขนาดทราย ทรายเหล่านี้จะเรียกว่าทรายของเสียโดยจะแบ่งทรายของเสียออกเป็น 3 ขนาด คือ ทรายขนาดแรกมีขนาด  $\leq 0.5$  mm คือ ทรายละเอียด ต่อมาเป็นทรายขนาดกลางมีขนาด  $< 1$  mm เรียกว่า ทรายรีไซเคิล นี้สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบดได้อีกครั้ง และขนาดสุดท้ายมีขนาด  $\geq 1$  mm เรียกว่า ทรายหยาบ โดยที่ทรายละเอียดและทรายหยาบไม่สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินได้ เนื่องจากขนาดและประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ลดลง ในงานวิจัยนี้จะใช้ทรายของเสียชนิดทรายละเอียด และทรายหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



ก. ทรายละเอียด

ข. ทรายรีไซเคิล

ค. ทรายหยาบ

รูปที่ 2.3 ทรายของเสียแต่ละขนาด

## 2.2 การผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

### 2.2.1 วัตถุดิบของการผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

#### 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ในงานวิจัยนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งต่อไปจะขอเรียกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โดยมีออกไซด์หลัก ๆ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่สำคัญอยู่ 4 อย่างคือ

- ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate,  $\text{C}_3\text{S}$ )
- ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate,  $\text{C}_2\text{S}$ )
- ค. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate,  $\text{C}_3\text{A}$ )
- ง. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetra calcium aluminoferrite,  $\text{C}_4\text{AF}$ )

#### 2) วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานจัดเป็นแร่ผสมเพิ่ม (Mineral admixture) แร่ธาตุชนิดหนึ่งทั่วไป วัสดุปอซโซลานจะประกอบด้วยสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่ละเอียดเป็นส่วนใหญ่ โดยตัวมันเองจะไม่มีสมบัติเชื่อมประสาน แต่เมื่อได้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Calcium hydroxide) และน้ำที่อุณหภูมิปกติจะได้สารที่มีสมบัติเชื่อมประสาน โดยวัสดุปอซโซลานมีทั้งที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) หรือหินพัมมิช (Pumice) และได้จากการผลิตขึ้นมา ได้แก่ ดินเหนียว หรือหินดินดานเผา (Burnt clay or shale) และเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งมีรายงานเกี่ยวกับการนำเถ้าถ่านหินมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในการผลิตบล็อกประสานปูพื้น อีกทั้งยังทนต่อการสึกหรอ [5] การผสมวัสดุปอซโซลานทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ) ลดลง เพิ่มความสามารถในการต้านทานสารละลายซัลเฟต การใช้วัสดุประสานนอกจากจะเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมแล้วยังสามารถนำมอลดต้นทุนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ [2, 4]

สารปอซโซลานสำหรับงานคอนกรีต แบ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้ 3 ชนิด [4]

- (1) Class N คือสารปอซโซลานธรรมชาติ เช่น แร่ไดอะตอมไมต์ เถ้าภูเขาไฟ หรือ พูมิไซด์ และดินหรือวัสดุที่ได้รับการเผาเพื่อให้ได้สมบัติตามข้อกำหนด
- (2) Class F คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ หรือปิทูนินัส และเป็นวัสดุที่มีสมบัติตรงตามข้อกำหนด เถ้าลอยชนิดที่มีสมบัติเป็นปอซโซลานิก
- (3) Class C คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ หรือซับปิทูนินัส มีสมบัติเป็นปอซโซลานิกและมีสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน โดยเถ้าลอย C อาจมีปริมาณของ CaO สูงกว่าร้อยละ 10 ตัวอย่างข้อกำหนดแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 [4]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่า (%)	70.0	70.0	50.0
$\text{SiO}_2$ ไม่เกิน (%)	4.0	5.0	5.0
ความชื้นไม่เกิน (%)	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกิน (%)	10.0	6.0*	6.0

\* สามารถใช้เถ้าลอยชนิด F ที่มีค่า LOI สูงถึง 12% ได้หากมีผลการใช้งานหรือมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ยอมรับได้

### 3) มวลรวม

การใช้มวลรวมจะช่วยให้สามารถลดปริมาณของซีเมนต์เพสต์และยังทำให้คอนกรีตยังเกาะตัวกันได้ดีไม่แยกตัว อีกทั้งยังเป็นการประหยัดการใช้ซีเมนต์เพสต์ โดยปกติจะแบ่งเป็น 2 ขนาด ขนาดแรกคือต้องมีขนาดเล็กกว่า 4.75 mm (เบอร์ 4) เรียกว่า มวลรวมละเอียด เช่น ทรายแม่น้ำ ในงานวิจัยนี้ใช้ทรายที่เป็นกากของเสียจากกระบวนการผลิตกระดาษในขั้นตอนการอบแห้งที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด และมวลรวมขนาดที่สองต้องมีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 4.75 mm เรียกว่า มวลรวมหยาบ (ACI 116R-00) [6]

## 2.2.2 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องการผลิตบล็อกคอนกรีต

### 1) ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับน้ำ (Hydration reaction)

การก่อตัว และแข็งตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดจากปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดความร้อน เรียกว่า ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ปฏิกริยาไฮเดรชันจะขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) เมื่อรวมตัวกับน้ำจะทำกันปฏิกริยากันได้เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, CSH) จะทำหน้าที่เชื่อมประสานส่วนผสมของคอนกรีตให้จับตัวกัน และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, CH) สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงแต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปอาจส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว [7]

สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารประกอบเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รวมกับน้ำ) ทั้งในสภาพพลาสติกและในสภาพแข็งตัวแล้ว ดังนั้นสามารถแยกพิจารณาปฏิกริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำดังนี้

#### ก. แคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) เมื่อรวมตัวกับน้ำจะทำปฏิกริยากันได้เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะทำหน้าที่เชื่อมประสานส่วนผสมของคอนกรีตให้จับตัวกัน และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ [2]

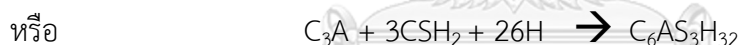
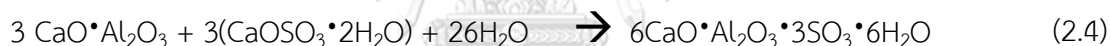






#### ข. แคลเซียมอะลูมิเนตและแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์

ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการที่ (2.3) จึงจำเป็นต้องผสมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยา ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นของเอททริงไทต์ (Ettringite) [2] ดังสมการที่ (2.4)



#### 2) ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

เมื่อนำเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รวมกับน้ำเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยที่ในเถ้าลอย จะมีส่วนประกอบของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นหลัก ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) สามารถช่วยส่งเสริมกำลังของคอนกรีตได้ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าถ่านหินจะขึ้นอยู่กับความละเอียดและสมบัติของเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงจะสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำ และให้กำลังอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าถ่านหิน [3] ถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำยังสามารถพัฒนากำลังได้เร็วอีกด้วย ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ดังแสดงในสมการที่ (2.5) และ (2.6)



### 2.2.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของคอนกรีต

สมบัติของบล็อกขึ้นอยู่กัส่วนผสมได้แก่ ปริมาณน้ำในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สมบัติของมวลรวม และวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต รวมทั้งปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ระยะเวลา ความชื้น และอุณหภูมิ เป็นต้น

#### 1) ปริมาณน้ำในส่วนผสม

ปริมาณน้ำมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของคอนกรีต การเพิ่มน้ำในปริมาณที่มากส่งผลทำให้ส่วนผสมมีสภาพเหลว ทำให้สามารถเทและอัดลงแม่พิมพ์ได้ง่าย การที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากเกินไปจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงด้วย นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่มากเกินไปยังทำให้ส่วนผสมไม่เกาะตัวกันเกิดการแยกตัวของชิ้นงานได้ง่าย เนื่องจากการแข็งตัวเกิดได้ช้าทำให้หินและทรายที่ผสมในชิ้นงานจมลงสู่ด้านล่างได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขณะที่น้ำจะลอยอยู่ด้านบน ในทางกลับกันอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยเกินไปจะทำให้ส่วนผสมแห้งกระด้าง ความสามารถในการเทและอัดลงแม่พิมพ์จะทำได้ยากขึ้น

#### 2) ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การเลือกชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลอย่างมาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความอ่อนไหวในการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วและความสามารถในการเทลงแม่พิมพ์ได้จะลดลงเนื่องจากเกิดการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ชนิดนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และความร้อนปานกลาง นิยมใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป

#### 3) สมบัติของมวลรวม

ลักษณะผิวและรูปร่างของมวลรวมมีผลต่อสมบัติของคอนกรีต มวลรวมที่มีอนุภาคกลมจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ดีกว่ามวลรวมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม การกระจายขนาดอนุภาคของมวลรวมก็มีอิทธิพลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากทำให้ความต้องการน้ำมากขึ้น มวลรวมที่มีรูพรุนสูง จะมีการดูดซึมน้ำมากทำให้เกิดการยุบตัวได้ และต้องมีการเผื่อปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสม

#### 4) เวลาและอุณหภูมิ

ที่อุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตจะลดลง เนื่องจากความร้อนทำให้น้ำระเหยออกอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ปฏิกิริยาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำสามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงส่งผลให้ความสามารถในการเทลดลงตามเวลาหลังผสมคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว โดยการผสมซ้ำ (Retempering) คือการใส่น้ำในคอนกรีตที่ยังไม่ก่อตัว ซึ่งจะช่วยให้คอนกรีตสามารถทำงานได้ดีขึ้น แต่การเติมน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มากเกินไป คอนกรีตอาจมีกำลังอัดที่ต่ำลง

#### 2.2.4 การผสมบล็อกคอนกรีต

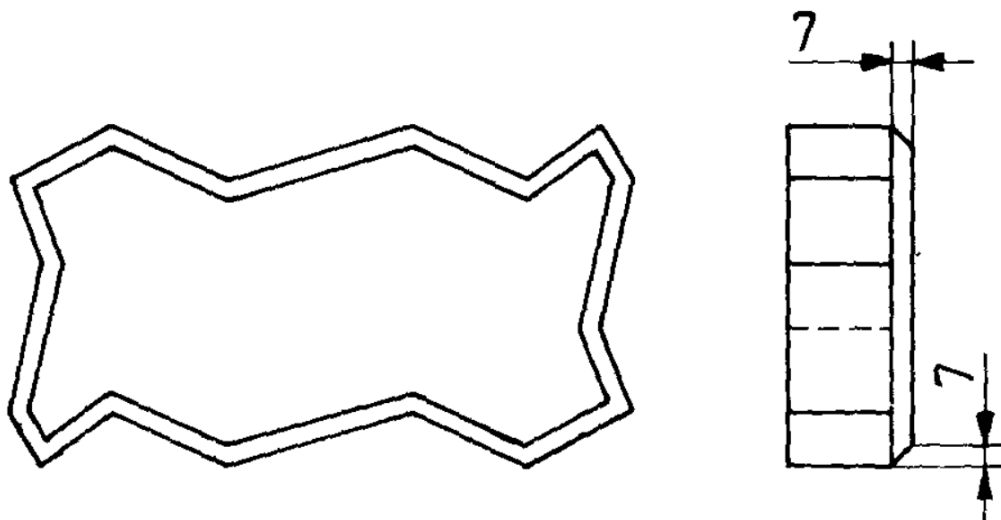
การผสมบล็อกคอนกรีตโดยทั่วไป ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) และวัสดุเสริม (Aggregate) เช่น ทราย และกรวดหิน ที่ผสมเข้าด้วยกันด้วยน้ำ และทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องเขย่า หรืออัดให้แน่น และเมื่อส่วนผสมแข็งตัวโครงสร้างจะมีความแข็งแรง คอนกรีตนั้นได้รับการนำไปใช้ในการก่อสร้างสิ่งต่าง ๆ เช่น บล็อกประสานปูพื้น บล็อกก่อผนัง เป็นต้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุเสริมรวมกันแล้วสามารถรับน้ำหนักและแรงกระทำได้ดี มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ (ACI 318-19) [8]

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ที่ใช้อ้างอิงมี 2 มาตรฐาน คือ

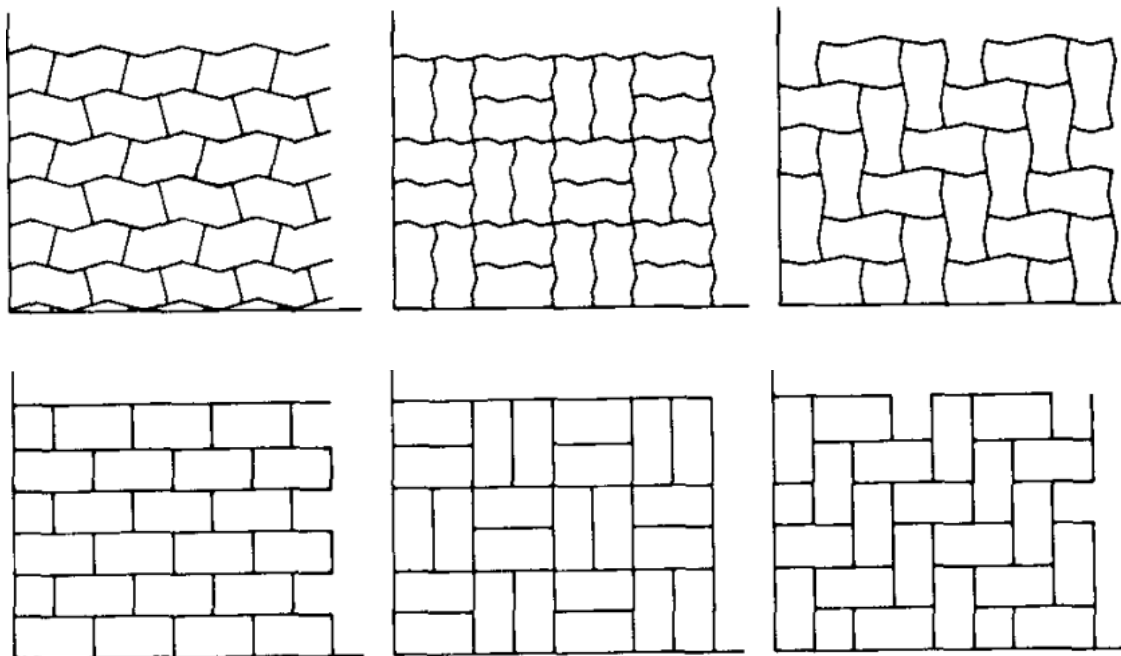
- 1) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของ บล็อกคอนกรีตประสานปูพื้น (มอก. 827-2531)

บล็อกคอนกรีตประสานปูพื้น ตัวอย่างบล็อกประสานปูพื้น แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งในมาตรฐานจะใช้คำว่า บล็อก คือ ก้อนคอนกรีตที่สามารถนำมาวางเรียงประสานกันได้อย่างต่อเนื่องดังในรูปที่ 2.5 มีสีตามธรรมชาติ หรืออาจมีผงสีเจือปนอยู่ที่บล็อกหรือเฉพาะที่ชั้นผิวหน้า จะมีรูปร่างแบบใดก็ได้ เหมาะสำหรับใช้ปูพื้น

ตามมาตรฐาน มอก. 827-2531 ระบุว่าลักษณะทั่วไปของบล็อกประสานปูพื้น ต้องมีเนื้อแน่น ไม่ร้าว และสีของชั้นผิวหน้าต้องสม่ำเสมอ และกำลังรับแรงอัดของบล็อกต้องไม่น้อยกว่า 35 MPa และกำลังรับแรงอัดสุทธิเฉลี่ย ไม่ต่ำกว่า 5 ก้อน ต้องไม่น้อยกว่า 40 MPa บล็อกที่นำมาทดสอบต้องมีอายุไม่น้อยกว่า 7 วัน การกำหนดค่ามิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของบล็อกประสานปูพื้นระบุดังตารางที่ 2.2 การลบมุมของบล็อกประสานปูพื้น ต้องไม่เกิน 7 mm แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างบล็อกประสานปูพื้น  
(ที่มา: มอก. 827-2531 บล็อกคอนกรีตประสานปูพื้น)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการวางเรียงประสาน  
(ที่มา: มอก. 827-2531 บล็อกคอนกรีตประสานปูพื้น)

ตารางที่ 2.2 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของบล็อกประสานปูพื้น (มอก. 827-2531)

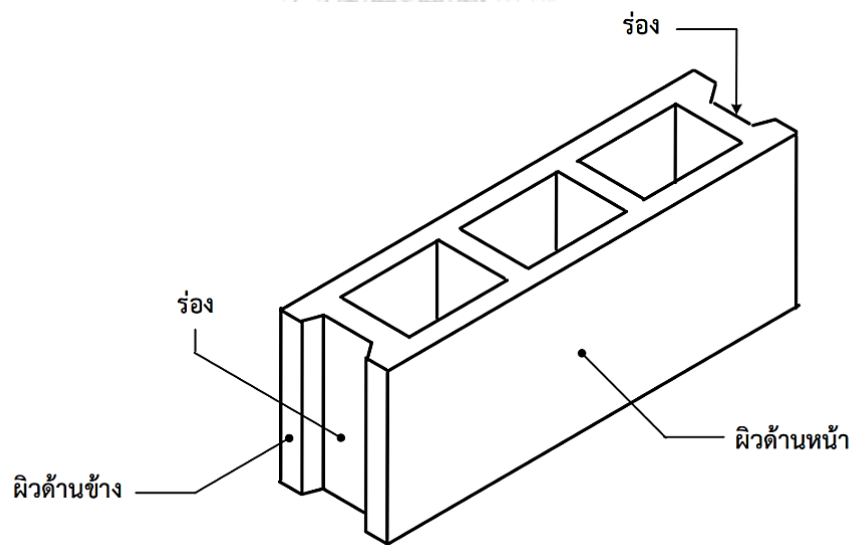
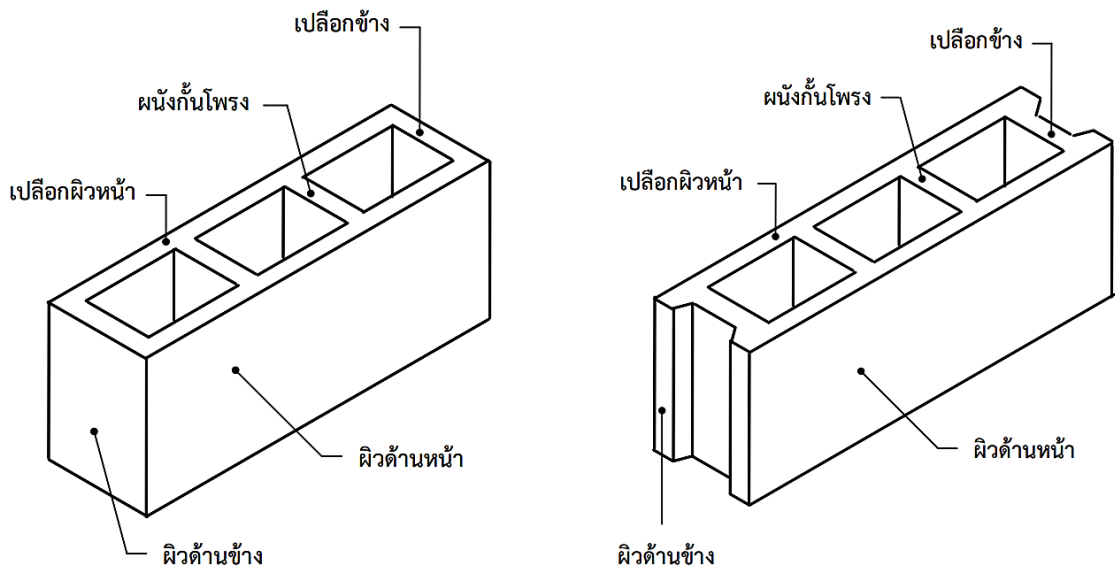
มิติ	เกณฑ์ที่กำหนด ( mm )	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (mm)
ความกว้างและความยาว	ไม่เกิน 295	$\pm 2$
ความหนา	60	$\pm 2$
	80	
	100	$\pm 3$
	120	
ความหนาของชั้นผิวหน้า (เฉพาะชั้นผิวหน้าที่ทำเป็นสี)	ต่ำสุด 3	

2) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2560)

ลักษณะของบล็อกที่ต้องการ คือบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนักทุกก้อน ปราศจากรอยแตกร้าว หรือส่วนเสียที่เป็นอุปสรรคต่อการกอบบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนักหรือทำให้สิ่งก่อสร้างเกิดความเสียหาย รอยผิวกะเทาะ ต้องมีขนาดไม่มากกว่า 25 mm ณ ตำแหน่งใด ๆ ในส่วนของกำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนักแต่ละก้อน ไม่น้อยกว่า 3.45 MPa และกำลังรับแรงอัดสุทธิเฉลี่ย ต้องไม่น้อยกว่า 4.14 MPa ความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนักแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนัก ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ) (มอก. 58-2560)

ประเภทของบล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนัก	ความหนาแน่น ( $\rho$ )
น้ำหนักเบา	$< 1680$
น้ำหนักปานกลาง	$1680 \leq \rho < 2000$
น้ำหนักทั่วไป	$\geq 2000$



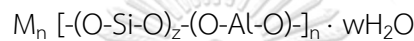
ข. ร่อง

รูปที่ 2.6 บล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนัก  
(ที่มา: มอก. 58-2560 บล็อกคอนกรีตกลวงไม่รับน้ำหนัก)

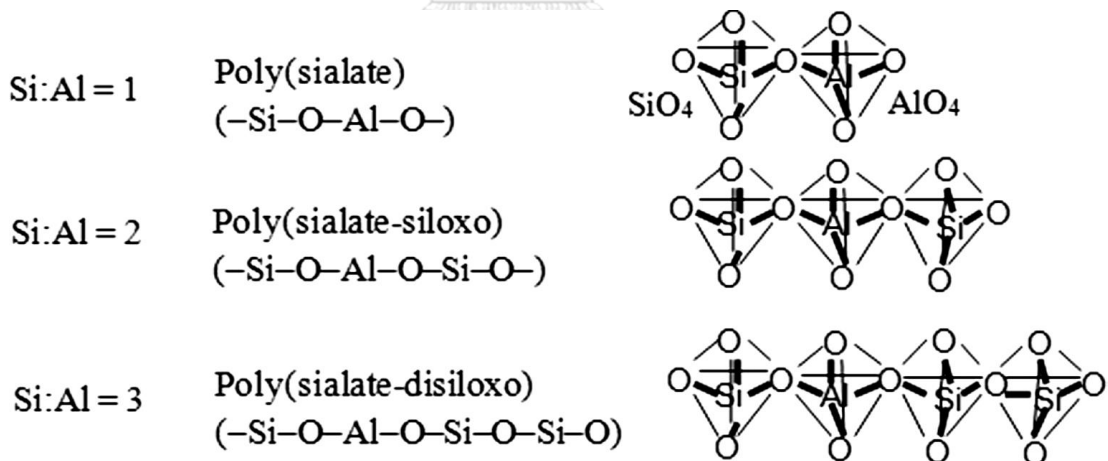
### 2.3 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

ปัจจุบันนี้มีแนวทางในการขึ้นรูปวัสดุให้มีสมบัติคล้ายคอนกรีต แต่ไม่ได้ใช้วัสดุเชื่อมประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากต้องการลดการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เรียกว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานได้ จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสานพวกอะลูมิโนซิลิเกตจากแร่ธาตุในธรรมชาติสามารถสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 °C เกิดจากการทำปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ของ ออกไซด์ของซิลิกา อะลูมิเนียม และอัลคาไล [9]

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์เป็นสายโซ่พอลิไซอะเลต (Si-O-Al-O) ดังนี้



เมื่อ M คือโลหะอัลคาไล n คือจำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ z คือตัวเลข 1 2 หรือ 3 และ w คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ หาก z มีค่าเป็น 1 ได้สารพอลิไซอะเลต z มีค่าเป็น 2 ได้สารพอลิไซอะเลตไซลอกโซ หรือ z มีค่าเป็น 3 ได้สารพอลิไซอะเลต-ไดไซลอกโซ โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์พวกสายโซ่พอลิไซอะเลต ดังรูปที่ 2.7 [9]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์พวกสายโซ่พอลิไซอะเลต

(ที่มา: A. Mahmood et.al (2021))

### 2.3.1 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization)

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ เริ่มจากเถ้าลอยถูกชะละลายด้วยสารละลาย กระตุ้นอัลคาไล ทำให้อะลูมินาและซิลิกาอสัณฐานที่ผิวของอนุภาคถูกชะละลายออกมา เกิดการ รวมตัวของไอออนออกซิเจนกับไอออนซิลิคอนและอะลูมิเนียม เกิดเป็นปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างโมเลกุลได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] [10, 11]

### 2.3.2 ส่วนผสม

#### 1) สารปอซโซลาน

สารปอซโซลานที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ คือเถ้าลอยจากกระบวนการเผาไหม้ ถ่านหินแบบถ่านหินบด และนอกจากนี้สารปอซโซลานที่สามารถนำมาใช้ได้คือ เถ้าลอยจาก กระบวนการเผาไหม้ถ่านหินแบบฟลูอิดไธด์เบด [12] เถ้าหนัก [13] และเถ้าชีวมวล [14] สำหรับนำมาใช้ เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีต

#### 2) สารกระตุ้นอัลคาไล (Alkali activator)

สารกระตุ้นอัลคาไลที่ใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม ตาม องค์ประกอบทางเคมี คือ กลุ่มแรก เบสอัลคาไล (Caustic alkali) เช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เป็นสารเคมีของแข็งในรูปเม็ด (Bead) หรือแผ่นเกล็ด (Flake) ทำหน้าที่ชะไอออนของซิลิคอนและอะลูมิเนียมออกมาจากสารปอซโซลาน และกลุ่มที่สอง โซเดียมเมตาซิลิเกต เป็นสารประกอบของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) และซิลิคอนไดออกไซด์ หรือซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ดังนั้นการใช้โซเดียมเมตาซิลิเกตจึงส่งผลต่ออัตราส่วนโดยมวล  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  ซึ่งสามารถส่งผลต่อ สมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น กำลังอัด ระยะเวลาการก่อตัว เป็นต้น [10]

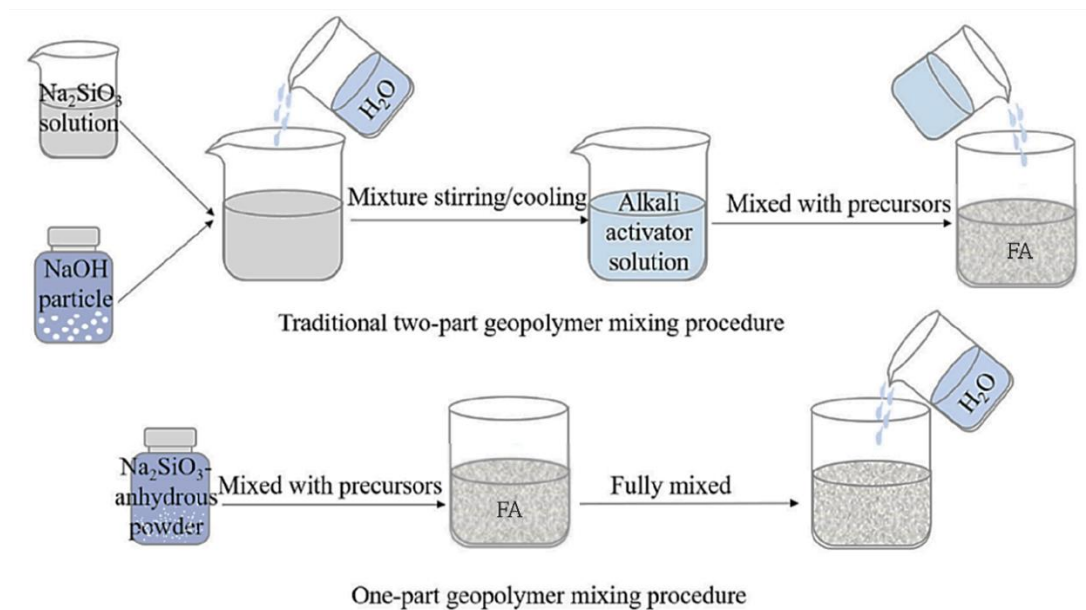
#### 3) มวลรวม

มวลรวมที่ใช้คือ ทรายและหินเช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีต การผลิตจีโอพอลิเมอร์ไม่ได้ มีมาตรฐานกำหนดเหมือนกับการผลิตคอนกรีต ดังนั้นสามารถยึดมาตรฐานการผลิตตามมาตรฐานของ คอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ [13]



### 2.3.3 การผสมจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือการใช้พลังงานความร้อนในขั้นตอนการผลิตจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์จากวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตอสันฐานร่วมกับสารละลายกระตุ้นอัลคาไล สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์คือ กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่มีซิลิกาและอะลูมินาอสันฐานเป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าลอย เถ้าหนัก และเถ้าแกลบ เป็นต้น ซึ่งสามารถเกิดการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ระหว่างออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา ผสมกับสารละลายกระตุ้นอัลคาไลรวมกับน้ำ เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน [9] ดังนั้นการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากกากของเสียจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เพื่อผลิตเป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ลดการใช้พลังงานและลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศได้ [10] โดยขั้นตอนการทำจีโอพอลิเมอร์จะมี 2 แบบ คือ จีโอพอลิเมอร์สองส่วน (Two-part geopolymer) และจีโอพอลิเมอร์ส่วนเดียว (One-part geopolymer) แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 สำหรับจีโอพอลิเมอร์สองส่วน ขั้นแรกเตรียมสารละลายตัวกระตุ้นอัลคาไลโดยการผสมสารละลายโซเดียมเมตาซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ร่วมกับอนุภาค  $\text{NaOH}$  และน้ำ ในสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นรอให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. ก่อนนำไปผสมกับเถ้าลอยด้วยเครื่องปั่นผสม และนำส่วนผสมไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ โดยชิ้นงานที่ได้จะถูกปิดผนึกและบ่ม และแบบที่สองคือ จีโอพอลิเมอร์ส่วนเดียว อันดับแรก สารตั้งต้นเช่น เถ้าลอย ถูกผสมแบบแห้งและปั่นผสมกับสารกระตุ้นต่างที่เป็นของแข็ง เช่น  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  จากนั้นเติมน้ำลงในของผสม และผสมให้เข้ากันก่อนนำไปขึ้นรูป โดยขั้นตอนที่เหลือจะเหมือนกับจีโอพอลิเมอร์สองส่วน [15]



รูปที่ 2.8 กระบวนการผสมจีโอพอลิเมอร์  
(ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Q. Zhao et al. (2023))

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 บล็อกประสานปูนซีเมนต์

T. Uygunoğlu I. B. Topcu O. Gencil และ W. Brostow [16] ได้มีการศึกษาการทำบล็อกคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (10-40 wt%) และทำการผลิตโดยการอัดและการสั่น จากผลของการรับกำลังอัดพบว่ากำลังอัดของบล็อกเพิ่มขึ้น (ประมาณ 9%) ด้วยการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกเหนือจากนั้น กำลังอัดลดลงจากค่าประมาณ 32 MPa เป็น 18 MPa ในทางกลับกันการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานแรงดึงของบล็อกคอนกรีตลดลง ในขณะที่การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้เถ้าลอยเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถสังเกตได้ว่าที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้นสามารถลดการขยายตัวของปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาของบล็อกคอนกรีตได้อีกด้วย

F. Koksall O. Gencil Y. Sahin, และ O. Okur [5] ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินในการผลิตบล็อกประสานปูนซีเมนต์คอนกรีตขึ้นรูปโดยการอัด ในการผลิตมีการทดลองใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (W/C) เท่ากับ 0.5 และทำการบ่มภายใต้อุณหภูมิคงที่ 22 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังขึ้นรูป และ

จากนั้นบ่มโดยการพรมน้ำต่อเป็นเวลา 27 วัน ทำการทดสอบความชื้นน้ำและสมบัติทางกลของบล็อกประสานปูพื้น (แรงดึง และแรงอัด) สรุปได้ว่าถ้าถ่านหินสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในการผลิตอิฐบล็อกประสานปูพื้นคอนกรีต นอกจากนี้ยังสามารถรับน้ำหนักที่ใช้สำหรับปูผิวทางเท้าได้ อีกทั้งยังทนต่อการสึกหรอ

T. R. Naik และคณะ [17] ได้ศึกษาผลการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในบล็อก โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สูงสุดถึง 25% โดยน้ำหนัก สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้เล็กน้อย ศึกษาการใช้มวลรวมเป็นทรายจากโรงหล่อ และเถ้าหนักพบว่าการใช้ทรายจากโรงหล่อทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ ชีงงานที่ไม่ได้ใช้ของเสีย แต่การใช้เถ้าหนักในมวลรวมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมาก กำลังรับแรงอัดของชีงงานยังอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 55

#### 2.4.2 บล็อกจีโอพอลิเมอร์

B. S. Mohammed และคณะ [18] ศึกษาจีโอพอลิเมอร์แบบส่วนเดียว ได้รับการพัฒนาโดยใช้เถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูงและใช้ในการผลิตสารยึดเกาะที่กระตุ้นด้วยต่าง คือผงโซเดียมซิลิเกต และบ่มในสภาพแวดล้อม จากผลการทดสอบ การเพิ่มตัวกระตุ้นแบบเม็ดเกินกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะลดความแข็งแรงและความสามารถในการทำงานของซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์แบบส่วนเดียว การบ่มที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเกือบ 50 MPa จากการศึกษาสามารถอนุมานได้ว่าการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์แบบส่วนเดียวนั้นคล้ายคลึงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

A. Hajimohammadi T. Ngo และ A. Kashani [19] มีการศึกษาการใช้มวลรวมในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ คือ ทราย และแก้ว ผลการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้มวลรวมทราย หรือแก้วจะให้กำลังรับแรงอัดดีกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ใช้มวลรวมในระยะเวลา 7 วัน อย่างไรก็ตามจีโอพอลิเมอร์ไม่ผสมมวลรวมมีความแข็งแรงสูงขึ้นใกล้เคียงกับการใช้มวลรวมทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าหากความแข็งแรงของการใช้มวลรวมใกล้เคียงกับสารเชื่อมประสาน มวลรวมสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้

S. Prasanphan A. Wannagon T. Kobayashi และ S. Jiemsirilers [20] ได้ใช้วิธีการขึ้นรูปแบบอัดวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดลองพบว่าทำให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้เมทริกซ์ที่หนาแน่นขึ้น การอัดทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์บนพื้นผิวที่อยู่ติดกันระหว่างอนุภาคส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการหล่อแบบปกติ ผลการวิจัยพบว่าวิธีนี้มีศักยภาพสูงกว่าสำหรับวัสดุก่อสร้างที่ต้องการความแข็งแรง

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงขั้นตอนการทดลอง และวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัตถุดิบ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ถ้ำลอย (Fly ash) จากกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด
- 2) ทราซของเสี่ยละเอียด (Fine waste sand) จากกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด
- 3) ทราซของเสี่ยหยาบ (Coarse waste sand) จากกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด
- 4) น้ำ (Water) ในการวิจัยจะใช้เป็นน้ำประปา
- 5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Ordinary portland cement type 1: OPC) ยี่ห้อ TPI
- 6) โซเดียมเมตาซิลิเกต (Sodium metasilicate,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ของแข็ง ยี่ห้อ กรุงเทพเคมี
- 7) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) ของแข็ง ยี่ห้อ กรุงเทพเคมี

##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการห้องทดลอง

- 1) เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)
- 2) เครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในของแข็ง (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF)
- 3) เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง (Laser particle size distribution analyzer: PSD)
- 4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) และการใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)
- 5) ขวดหาความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer)
- 6) แม่พิมพ์อะลูมิเนียมลูกบาศก์ขนาด 5 cm × 5 cm × 5 cm
- 7) แม่พิมพ์อะลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 cm สูง 5 cm

- 8) เครื่องปั่นผสมขนาด 5 kg
- 9) เครื่องบดผสม
- 10) เครื่องอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว
- 11) เครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก
- 12) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 13) ตะแกรงร่อน (sieve) เบอร์ 6
- 14) ถูมือยาง

### 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอน

- 1) เครื่องอัดขึ้นรูปบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอน
- 2) ถังเปลมผสมปูน ขนาดสำหรับปูน 50 kg
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนัก ขนาด 15 kg
- 4) จอบ หรือพลั่วผสมปูน
- 5) ถังตักส่วนผสม
- 6) เกรียงเหล็ก

## 3.2 ขั้นตอนการวิจัย

ในส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนที่ 1 คือการวิเคราะห์วัตถุดิบ ส่วนที่ 2 คือ การผสมวัตถุดิบและการขึ้นรูปตัวอย่างบล็อกประสานปูพื้นฐานซีเมนต์ และบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ ส่วนที่ 3 คือการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่าง

### 3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัตถุดิบ

#### 3.2.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) เตรียมวัตถุดิบโดยการบดให้เป็นผงละเอียด โดยจะต้องมีขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ได้ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence spectrometer ผลิตโดยบริษัท Philips model PW2400

### 3.2.1.2 องค์ประกอบเฟส

องค์ประกอบเฟสวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) เตรียมวัตถุดิบเช่นเดียวกับ การทดสอบด้วยเทคนิค XRF โดยการบดให้เป็นผงละเอียด โดยจะต้องมีขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ได้ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Advance โดยใช้ Cu-K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) ด้วย Scanning speed 2.4 °C/min. ช่วง  $2\theta$  เท่ากับ 10-80 °C

### 3.2.1.3 สมบัติทางกายภาพ

- 1) การกระจายตัวของอนุภาคตัวอย่าง ทำการทดลองด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคสารแขวนลอยโดยใช้หลักการ Laser scattering ด้วยการกระจายตัวอย่างในสารตัวกลางที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Particle size distribution analyzer: PSD)
- 2) โมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus: F.M.) เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ค่าสามารถบ่งบอกว่าลักษณะของทรายเป็นแบบหยาบหรือละเอียด เช่น ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดสูงจะเป็นทรายที่หยาบมากกว่าทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำ โดยนำค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานแต่ละตะแกรงมารวมกันแล้วหารด้วย 100 ตาม ASTM C136 [21]
- 3) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเถ้าลอยสามารถวัดโดยการทดสอบเช่นเดียวกับมาตรฐาน ASTM C188 ที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้ การวัดความหนาแน่นของของเหลวอ้างอิงกับการทำงานของของไหลที่เหมาะสม เช่น น้ำ โดยใช้ขวดหาความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer)
- 4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีกำลังขยายสูงถึง 2,000 เท่า เป็นการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง จะได้ภาพ 2 มิติ เครื่อง Scanning Electron Microscope ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่อง Scanning Electron Microscope

- 5) การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย (Pozzolanic activity) ด้วยการหาค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index, SAI) ตามมาตรฐาน ASTM C311 [22] โดยค่าดัชนีกำลังนี้ คืออัตราส่วนร้อยละความต้านแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 โดยมวล ในงานวิจัยนี้คือ เถ้าลอย ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของตัวอย่างวัสดุปอซโซลานชนิดนั้นๆ เมื่อนำมาใช้งานเป็นส่วนผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการทดลอง โดยในการหาค่าดัชนีกำลังของวัสดุดิบ เริ่มจากเตรียมตัวอย่างลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ดังแสดงใน ตารางที่ 3.1 ทำการหล่อตัวอย่างลูกบาศก์จำนวน 3 ชิ้นต่อสูตรตัวอย่าง หลังทำการถอดแบบบ่มตัวอย่างไว้เป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างลูกบาศก์ไปอบ ณ อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นส่วนเกินก่อนนำไปทดสอบค่าความต้านแรงอัด สุดท้ายนำค่ากำลังอัดของตัวอย่างมาคำนวณค่าดัชนีกำลังจากสมการที่ (3.1) ถ้าค่า SAI มีค่ามากกว่า 75% ตามมาตรฐาน ASTM C618-12a จัดเป็นวัสดุปอซโซลานได้ [23]

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์สำหรับทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง

ตัวอย่าง	OPC (g)	FA (g)	ทราย (g)	W/OPC
เพสต์ควบคุม	500	-	1375	0.666
เพสต์ทดสอบ	400	100	1375	ปรับให้ความชื้นเหลวเท่ากับเพสต์ควบคุม

\*OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, FA = เถ้าลอย, W/B = น้ำ: วัสดุประสาน

คำนวณค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index, SAI)

$$SAI, \% = \frac{A}{B} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย A คือ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ซีเมนต์ทดสอบที่มีส่วนผสมของ  
วัสดุปอซโซลาน (MPa)

B คือ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ซีเมนต์ควบคุม (MPa)

### 3.2.2 การขึ้นรูปตัวอย่างบล็อกประสานปูพื้นฐานซีเมนต์

ในการศึกษาเตรียมตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 เรื่องในขั้นตอนการพัฒนาบล็อกประสานปูพื้น เรื่องแรกเป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้มีความแข็งแรงสูงสุด ต่อมาเป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน เพื่อให้สามารถใช้มวลรวมได้มากที่สุด และในงานวิจัยนี้จะใช้มวลรวมเป็นทรายของเสียที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินด้วยเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบด ทั้ง 2 เรื่อง โดยจะใช้คำว่า ทรายละเอียด และทรายหยาบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 จะใช้คำว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

#### 3.2.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คอนกรีตโดยทั่วไปประกอบด้วยวัสดุเชื่อมประสาน มวลรวม และน้ำ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเถ้าลอย (FA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (Water-Binder ratio: W/B) เท่ากับ 0.30 มวลรวม (Aggregates: AG) คือ อัตราส่วนทรายละเอียด (Fine sand: FS) ต่อทรายหยาบ (Coarse sand: CS) เท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนักของมวลรวม และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวม เท่ากับ 1:1 โดยทำการขึ้นรูปลูกบาศก์ขนาด 5 cm × 5 cm × 5 cm ใช้แรงอัดขึ้นรูป 2.7 MPa ด้วยเครื่องอัดแบบทิศทางเดียว และบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องในสภาวะที่มีความชื้นเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 3.2



ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมวัสดุของอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ชื่อสูตร	วัสดุประสาน (B)		มวลรวม (AG)		W/B ratio
	OPC (%)	FA (%)	FS (%)	CS (%)	
1.00CFA0	50 (100 %B)	-			0.30
1.00CFA10	45 (90 %B)	5 (10 %B)			
1.00CFA15	42.5 (85 %B)	7.5 (15 %B)	32.5 (65 %AG)	17.5 (35 %AG)	
1.00CFA20	40 (80 %B)	10 (20 %B)			
1.00CFA30	35 (70 %B)	15 (30 %B)			

\*OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, FA = เถ้าลอย, FS = ทรายละเอียด, CS = ทรายหยาบ, %B = ร้อยละของวัสดุประสาน,

%AG = ร้อยละของมวลรวม, W/B = น้ำ: วัสดุประสาน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยมีขั้นตอนการผสมขึ้นรูปดังนี้

- (1) ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2 ผสมด้วยเครื่องปั่นผสมแสดงในรูปที่ 3.2
- (2) นำทรายละเอียดและทรายหยาบใส่ปั่นผสมในเครื่องปั่นผสมในอัตราส่วนทรายละเอียดต่อทรายหยาบร้อยละ 65:35 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำการปั่นเป็นเวลา 1 นาที
- (3) เติมน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ทำการปั่นผสมอีก 2-3 นาที
- (4) เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้ว นำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยใช้แรง 2.7 MPa ในแม่พิมพ์ทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 cm × 5 cm × 5 cm
- (5) ทำการบ่มตัวอย่างในกล่องปิดสนิทที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 7 และ 28 วัน



รูปที่ 3.2 เครื่องปั่นผสม



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว

### 3.2.2.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน

ในกรณีนี้จะขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากอัตราส่วนที่ดีที่สุด 2 สูตร ในหัวข้อ 3.2.2.1 มาพัฒนาต่อโดยการเพิ่มอัตราส่วนทรายของเสียให้มีปริมาณมากขึ้น โดยที่ยังคงอัตราส่วนทรายละเอียดต่อทรายหยาบที่ 65:35 เพื่อเป็นการลดต้นทุนอีกทั้งยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกให้กับโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้ในการผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาศึกษามวลรวมต่อวัสดุประสาน (AG/B) 1.00 1.25 และ 1.50 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วน FS:CS เท่ากับ 65:35 และอัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.30 ทำการขึ้นรูปลูกบาศก์ขนาด 5 cm × 5 cm × 5 cm ใช้แรงอัดขึ้นรูป 2.7 MPa ด้วยเครื่องอัดแบบทิศทางเดียว บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องในสภาวะที่มีความชื้นที่ระยะเวลา 17 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 3.3 โดยมีขั้นตอนการผสมขึ้นรูปเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 3.2.2.1

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมวัตถุดิบของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อัตราส่วนผสมทรายของเสียต่อวัสดุประสาน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ชื่อสูตร	วัสดุประสาน (B)		มวลรวม (AG)		AG/B	W/B ratio
	OPC (%)	FA (%)	FS (%)	CS (%)		
1.00CFA10	45.00 (90 %B)	5.00	32.50 (65 %AG)	17.50 (35 %AG)	1.00	0.30
1.00CFA15	42.50 (85 %B)	7.50				
1.25CFA10	40.00 (90 %B)	4.44	36.11 (65 %AG)	19.44 (35 %AG)	1.25	
1.25CFA15	34.00 (85 %B)	6.00				
1.50CFA10	36.00 (90 %B)	4.00	39.00 (65 %AG)	21.00 (35 %AG)	1.50	
1.50CFA15	37.78 (85 %B)	6.67				

\*OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, FA = เถ้าลอย, FS = ทรายละเอียด, CS = ทรายหยาบ, %B = ร้อยละของวัสดุประสาน, %AG = ร้อยละของมวลรวม, W/B = น้ำ: วัสดุประสาน

### 3.2.3 การขึ้นรูปเป็นตัวอย่างทดสอบบล็อกจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษาเตรียมตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 เรื่องในขั้นตอนการพัฒนาบล็อกประสานปูพื้น เรื่องแรกเป็น การศึกษาผลของเถ้าลอยต่อ สารกระตุ้นอัลคาไล ให้มีการใช้เถ้าลอยได้ปริมาณสูงที่สุด ต่อมาเป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นอัลคาไล เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงที่สุด ในงานวิจัยนี้จะใช้มวลรวมเป็นทรายของเสียที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินด้วยเตาแบบฟลูอิดไบล์เบด ทั้ง 2 เรื่อง โดยจะใช้คำว่า ทรายละเอียด และทรายหยาบ

#### 3.2.3.1 การศึกษาผลของสัดส่วนเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล

การขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ ใช้วัสดุเชื่อมประสานเป็นเถ้าลอยและสารกระตุ้นอัลคาไล (Alkali: AL) ในงานวิจัยนี้คือ โซเดียมเมตาซิลิเกต (Sodium metasilicate,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) ในที่นี้ใช้ตัวย่อเป็น SH โดยศึกษาเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล (FA/AL) ในอัตราส่วนร้อยละ 80:20 85:15 90:10 และ 95:5 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ตามลำดับ และใช้อัตราส่วน SS:SH ร้อยละ 60:40 โดยน้ำหนักผสมกับทรายของเสีย (มวลรวม) โดยใช้สัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานต่อมวลรวมเช่นเดียวกับการเตรียมบล็อกคอนกรีตฐานซีเมนต์ คือ 1:1 โดยน้ำหนัก มวลรวมที่ใช้มีอัตราส่วนของทรายละเอียดต่อทรายหยาบ (FS:CS) เท่ากับ 65:35 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water-Binder ratio: W/B) เท่ากับ 0.37 0.35 0.33 และ 0.31 ตามลำดับ โดยอัตราส่วน W/B เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย (W/FA) จะเท่ากับ 0.39 ในทุกอัตราส่วน จากนั้นทำการขึ้นชิ้นงานรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.54 cm ความสูง 5 cm ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูประบบไฮดรอลิก ใช้แรงอัดขึ้นรูป 20 MPa บ่มตัวอย่างที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยไม่มีการทดสอบที่ 1 วัน เนื่องจากเมื่อสังเกตตัวอย่างจากภายนอกตัวอย่างยังแข็งตัวได้ไม่ดี อัตราส่วนผสมแสดงตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมวัตถุดิบของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไลของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ชื่อสูตร	วัสดุประสาน (B)			มวลรวม (AG)		W/B ratio
	FA (%)	สารกระตุ้นอัลคาไล (AL)		FS (%)	CS (%)	
		SS (%)	SH (%)			
GFA95	47.5 (95 %B)	1.5 (60 %AL)	1	32.5 (65 %AG)	17.5 (35 %AG)	0.37
GFA90	45 (90 %B)	3 (60 %AL)	2			0.35
GFA85	42.5 (85 %B)	4.5 (60 %AL)	3			0.33
GFA80	40 (80 %B)	6 (60 %AL)	4			0.31

\* FA = เถ้าลอย, SS = โซเดียมเมตาซิลิเกต, SH = โซเดียมไฮดรอกไซด์, FS = ทรายละเอียด, CS = ทรายหยาบ, W/B = น้ำ:วัสดุประสาน, %B = ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, %AL = ร้อยละโดยน้ำหนักของอัลคาไล, %AG = ร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวม

โดยมีขั้นตอนการผสมขั้นตอนนี้

- (1) ผสมผงเถ้าลอย ผงโซเดียมเมตาซิลิเกต และเม็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4 ด้วยการบดด้วยลูกบอลแบบแห้งบนรางบดผสมดังรูปที่ 3.4 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนผสมมีขนาดเล็กกลง โดยผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 60 เมช (250  $\mu$ m)
- (2) นำวัตถุดิบในข้อ 1) ผสมกับน้ำ ในเครื่องปั่นผสมดังรูปที่ 3.2 เป็นเวลา 10 นาที
- (3) เติมมวลรวมคือ ทรายละเอียดและทรายหยาบในเครื่องปั่นผสม และทำการปั่นผสมเป็นเวลา 5 นาที ดังรูปที่ 3.4

- (4) เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้ว นำไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 cm ความสูง 5 cm ด้วยเครื่องอัดตั้งรูปที่ 3.5 ด้วยแรงอัด 20 MPa
- (5) ปั่นตัวอย่างในกล่องปิด เป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน



รูปที่ 3.4 เครื่องบดผสม



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดขึ้นรูป

### 3.2.3.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนโซเดียมเมตะซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ของสารกระตุ้นอัลคาไล

การขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ เป็นการเลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดจากข้อ 3.4.3.1 มาศึกษาต่อเพื่อหาอัตราส่วนของโซเดียมเมตะซิลิเกต (SS) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SH) ในสารกระตุ้นอัลคาไลที่ดีที่สุด กรณีนี้ทำการศึกษาอัตราส่วน SS ต่อ SH ร้อยละ 50:50 60:40 70:30 80:20 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ ใช้ W/B เท่ากับ 0.30 ผสมกับทรายของเสียในอัตราส่วนทรายของเสียละเอียดต่อทรายของเสียหยาบร้อยละ 65:35 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 cm สูง 5 cm ใช้แรงอัดขึ้นรูป 20 MPa ด้วยเครื่องอัด

บ่มตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ แสดงในตารางที่ 3.5 โดยมีขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 2.2.3.1

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมวัสดุดิบของอัตราส่วนผสมสารกระตุ้นอัลคาไลของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตฐานจีโอพอลิเมอร์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ชื่อสูตร	วัสดุประสาน (B)		มวลรวม (AG)		W/B ratio	
	FA (g)	สารกระตุ้นอัลคาไล (AL)		FS (g)		CS (g)
		SS (g)	SH (g)			
100GFA80	40 (80 %B)	10 (100 %AL)	0	32.5 (65 %AG)	17.5 (35 %AG)	0.3
90GFA80		9 (90 %AL)	1			
80GFA80		8 (80 %AL)	2			
70GFA80		7 (70 %AL)	3			
60GFA80		6 (60 %AL)	4			
50GFA80		5 (50 %AL)	5			

\* FA = ฝัากลอย, SS = โซเดียมเมตาซิลิเกต, SH = โซเดียมไฮดรอกไซด์, FS = ทรายละเอียด, CS = ทรายหยาบ,  
W/B = น้ำ:วัสดุประสาน, %B = ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, %AL = ร้อยละโดยน้ำหนักของอัลคาไล,  
%AG = ร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวม



### 3.2.4 การขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบ

การขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบจากสูตรบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีขนาดและรูปทรงแบบบล็อกรูปตัวหนอน ตามมาตรฐาน มอก.827-2531 เลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดในหัวข้อ 3.2.2 นำมาขึ้นรูปเป็นอิฐต้นแบบเลือกจากสูตรที่กำลังรับแรงอัดสูงและสามารถใช้ปริมาณเถ้าลอยได้สูงสุดที่เป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนผสมที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และทรายของเสีย (ทรายละเอียดและทรายหยาบ) รวมกับน้ำ ผสมวัตถุดิบให้เข้ากันในถังเปลงผสมปูน ด้วยอัตราส่วนของบล็อกต้นแบบเป็นไปตามตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอนขนาดจริง ดังรูปที่ 3.8 ในการขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบจะต้องมีน้ำหนักประมาณ 2.9-3.0 kg ต่อก้อน เพื่อให้มีความสูงได้ตามมาตรฐานมอก. และได้รูปร่างของอิฐบล็อกที่สมบูรณ์ ไม่แตกร้าว เมื่อขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบเสร็จจากนั้นนำไปบ่มเป็นเวลาตั้งแต่ 7 วัน โดยการนำพลาสติกมาคลุม

ตารางที่ 3.6 ร้อยละโดยน้ำหนักส่วนผสมวัตถุดิบของอิฐบล็อกต้นแบบ

ชื่อสูตร	วัสดุประสาน (B)		มวลรวม (AG)		W/B
	OPC (g)	FA (g)	FS (g)	CS (g)	
1.00CFA15	42.5 (85 %B)	7.5 (15 %B)	32.5 (65 %AG)	17.5 (35 %AG)	0.35

\*OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, FA = เถ้าลอย, FS = ทรายละเอียด, CS = ทรายหยาบ, W/B = น้ำ: วัสดุประสาน

%B = ร้อยละของวัสดุประสาน, %AG = ร้อยละของมวลรวม

โดยมีขั้นตอนการผสมอิฐบล็อกต้นแบบดังนี้

- (1) ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.6 ผสมด้วยแรงมือในถังเปลงผสมปูนดังรูปที่ 3.6 จนส่วนผสมเข้ากันจนมีสีที่สม่ำเสมอ
- (2) นำทรายละเอียดและทรายหยาบผสมในอัตราส่วนทรายละเอียดต่อทรายหยาบร้อยละ 65:35 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตได้จากเนื้อส่วนผสมมีสีเทา ๆ สม่ำเสมอ

- (3) เติมน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตามที่กำหนดผสมให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน การดูลักษณะส่วนผสมที่สามารถนำไปขึ้นรูปได้ทำการทดสอบโดยการใช้มือกำส่วนผสม (Ball in hand) หากเข้ากันดีแล้วจะมีลักษณะเป็นก้อนเกาะกันบนมือ ลักษณะก้อนไม่แตกหรือแยกออก ดังรูปที่ 3.7
- (4) เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้ว นำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอน ดังแสดงรูปที่ 3.8 โดยในแต่ละก้อนต้องมีน้ำหนักประมาณ 2.9-3.0 kg
- (5) ทำการบ่มตัวอย่างในชั้นวางที่ปิดด้วยพลาสติก ป้องกันน้ำระเหยออกซึ่งส่งผลต่อค่ากำลังอัดได้



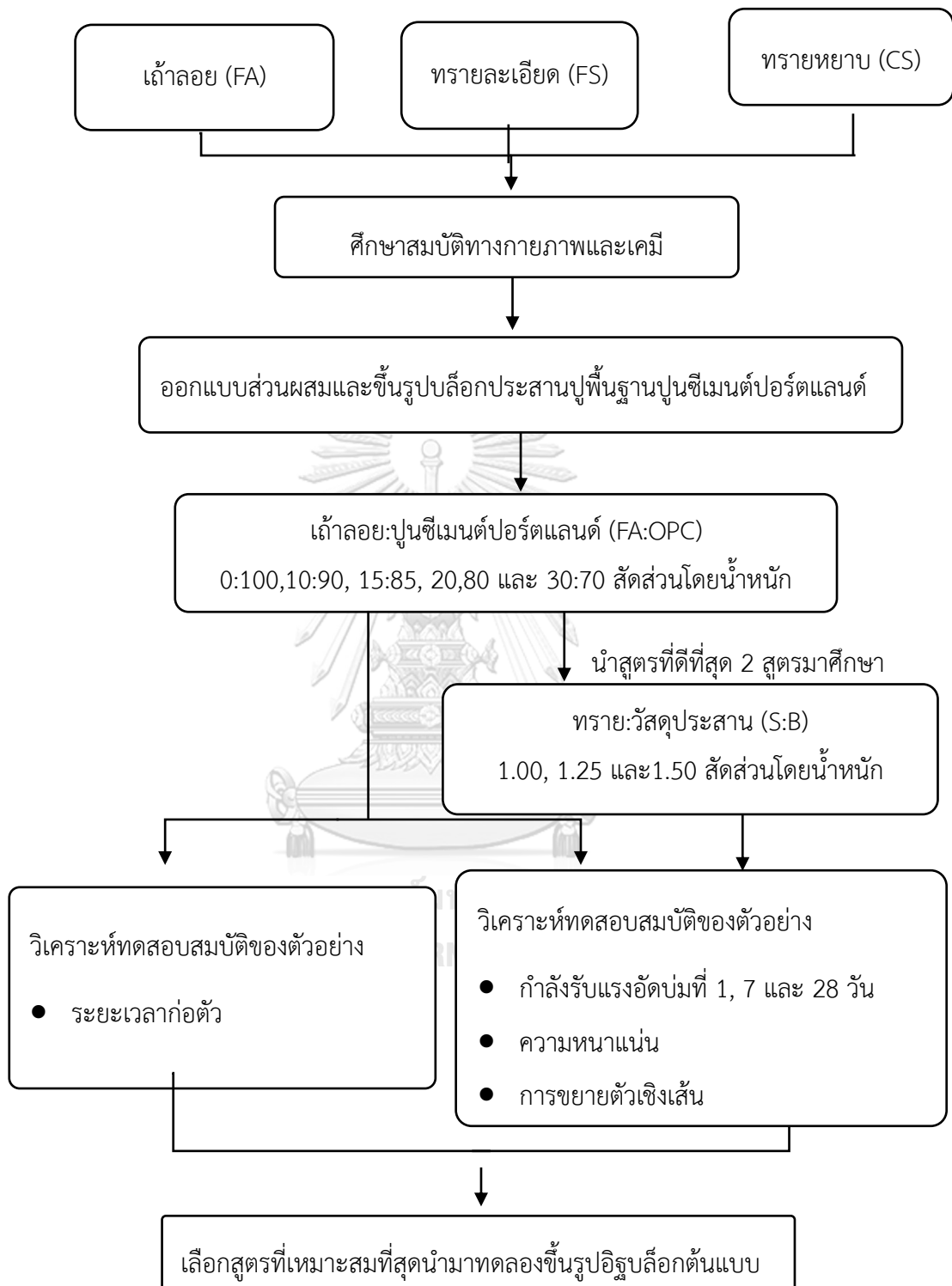
รูปที่ 3.6 ถังเปลงผสมปูน



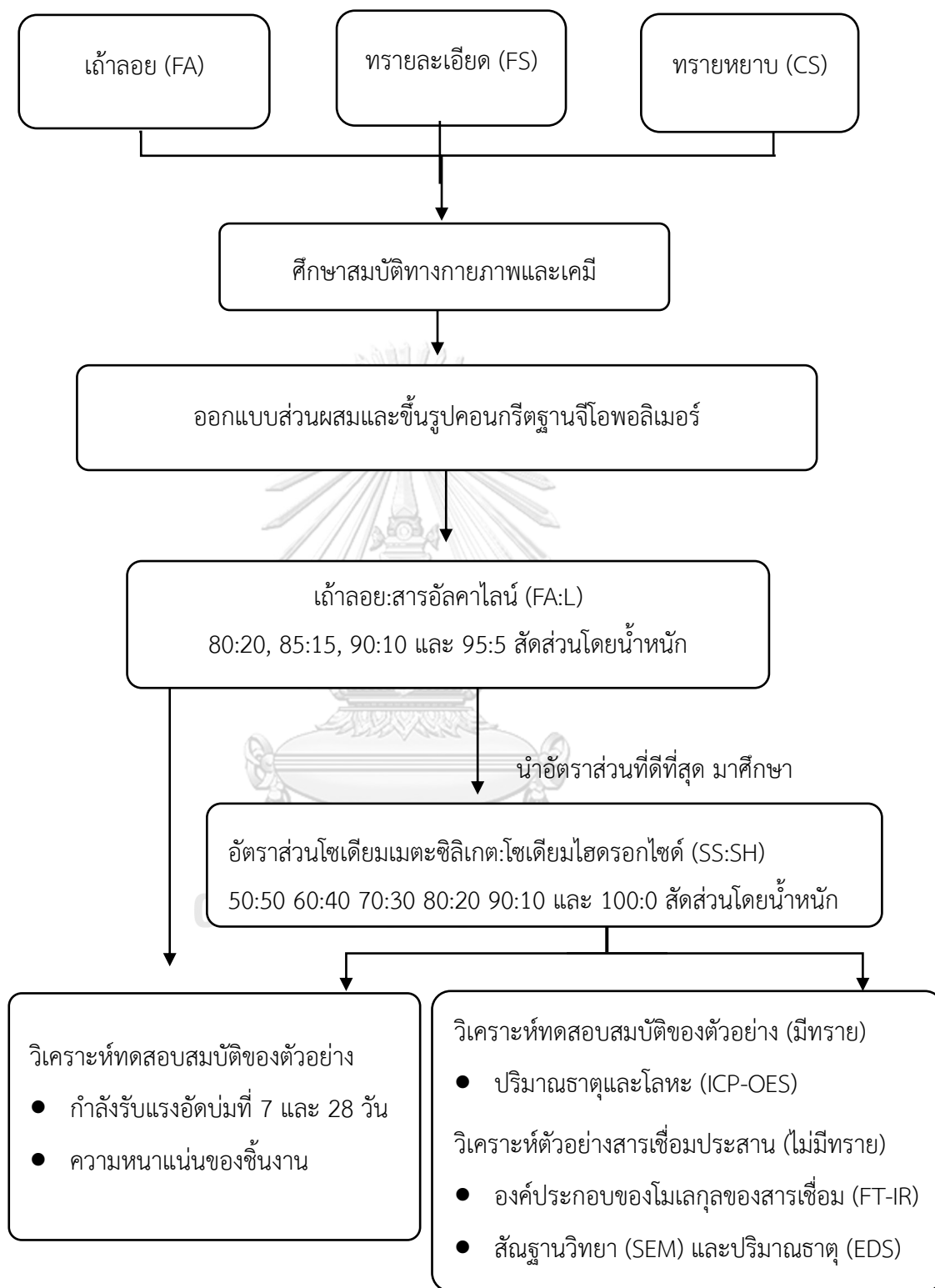
รูปที่ 3.8 เครื่องอัดขึ้นรูปบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอน



รูปที่ 3.7 การใช้มือกำส่วนผสม (Ball in hand)



รูปที่ 3.9 แผนผังการดำเนินการทดลองบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 3.10 แผนผังการดำเนินการทดลองบล็อกอีโพลีเมอร์

### 3.3 กระบวนการทดสอบตัวอย่าง

ในการศึกษานี้ได้ใช้การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ในหัวข้อตั้งแต่ 3.5.1-3.5.5 และการทดสอบของบล็อกจีโอพอลิเมอร์หัวข้อ 3.5.1- 3.5.2, 3.5.6-3.5.9 จะใช้วิธีการเดียวกันในหัวข้อที่เหมือนกัน

#### 3.3.1 กำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ด้วยคอนกรีตขนาด 5 cm × 5 cm × 5 cm ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด ที่อายุการบ่มต่าง ๆ การทดสอบจะเป็นไปตาม ASTM C109 standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or 50-mm cube specimens) [24] มีขั้นตอนดังนี้

- (1) นำตัวอย่างวางลงที่กึ่งกลางแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของหัวกด และพื้นผิวตัวอย่างขนาดเท่ากับหัวกด
- (2) เปิดเครื่องทดสอบ โดยหัวกดต้องมีการควบคุมน้ำหนักที่กดลงบนตัวอย่างด้วยอัตราสม่ำเสมอ
- (3) กดตัวอย่างจนแตก และบันทึกค่ากำลังอัดสูงสุดที่ได้
- (4) คำนวณกำลังรับแรงอัด จากค่ากำลังอัดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ดังสมการที่ 3.1 หน่วยคือ MPa

$$F = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $F$  คือ ค่าหน่วยกำลังรับแรงอัด (MPa)

$P$  คือ กำลังอัดสูงสุด (N)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (mm<sup>2</sup>)

### 3.3.2 ค่าความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่าง (Bulk density) เป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยสัญลักษณ์สำหรับความหนาแน่นมักใช้เป็นตัวหนา  $\rho$  ทำโดยนำตัวอย่างไปชั่งในอากาศและวัดขนาดขึ้นเพื่อหาปริมาตรของตัวอย่างที่ทดสอบ คำนวณความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร,  $\text{g/cm}^3$ ) ดังสมการที่ 3.3

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )

$m$  คือ มวลของตัวอย่าง (g)

$v$  คือ ปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ ( $\text{cm}^3$ )

### 3.3.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดเชิงเส้น

การทดสอบการขยายตัวเชิงเส้นแบบแห้งของตัวอย่างคอนกรีต การทดสอบด้วยการวัดความยาวที่เปลี่ยนไปภายหลังการบ่มด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ 2 ตำแหน่ง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ เทียบกับขนาดของแม่พิมพ์

$$\alpha = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น

$L_0$  คือ ความยาวของชิ้นงานตัวอย่างที่เริ่มต้น (cm)

$L$  คือ ความยาวของชิ้นงานตัวอย่างใหม่ (cm)

### 3.3.4 ระยะเวลาก่อตัว

ศึกษาระยะเวลาก่อตัว (Setting Time) โดยใช้เครื่องมือหาเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (Vicat apparatus) ดังรูปที่ 3.11 ตามมาตรฐาน มอก.2752 เล่ม 9-2560 ผสมซีเมนต์เพสต์ตามอัตราส่วน จากนั้นปล่อยให้เริ่มก่อตัว ช่วงระยะเวลาจมนคือเมื่อเข็มไวแคตขนาด 1 mm จมลงในซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาก่อตัวต้นโดยใช้เข็มแบบไวแคตคือช่วงเวลาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เริ่มสัมผัสกับน้ำ และเวลาเมื่อวัดการจมหรือคำนวณที่ระยะจม 25 mm

คำนวณระยะเวลาก่อตัวต้นโดยใช้เข็มแบบไวแคต ดังสมการที่ 3.4

$$S = \left( \left( \frac{(H - E)}{(C - D)} \right) \times (C - 25) \right) + E \quad (3.5)$$

เมื่อ S คือ ระยะเวลาก่อตัวต้น

E คือ ระยะเวลาสุดท้ายที่การจมมากกว่า 25 mm (นาท)

H คือ ระยะเวลาแรกที่การจมน้อยกว่า 25 mm (นาท)

C คือ ระยะจมที่เวลา E (cm)

D คือ ระยะจมที่เวลา H (cm)

ระยะเวลาก่อตัวปลาย คือระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์เกิดการแข็งตัววัดได้โดยใช้เข็มแบบไวแคต คือ หาได้จากช่วงเวลาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เริ่มสัมผัสน้ำครั้งแรก และเวลาเมื่อเข็มไม่สามารถกดเป็นรอยวงกลมสมบูรณ์บนผิวซีเมนต์เพสต์ได้





รูปที่ 3.11 เครื่องมือหาเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (Vicat apparatus)

### 3.3.5 ปริมาณธาตุและโลหะ

ปริมาณธาตุและโลหะ (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, ICP-MS) โดยนำตัวอย่างบล็อกจีโอพอลิเมอร์มาทุบให้มีขนาดเล็กที่อายุการบ่ม 28 วัน แล้วใส่กับสารละลายของกรดอาร์ซีนิกที่มีค่า pH  $4.93 \pm 0.05$  ในอัตราส่วนของสารอาร์ซีนิกต่อบล็อกจีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 20 และสกัดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ค่าที่ได้ใช้มาตรฐาน US EPA ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก [25]

### 3.3.6 องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมี

องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารเชื่อมประสาน (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) โดยนำสารเชื่อมประสาน (ในส่วนผสมไม่มีมวลรวม) ที่อายุ 7 วัน มาทำการบดให้ละเอียด ปริมาณสารที่ต้องใช้อย่างน้อย 2 mg นำมาทดสอบเพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ สามารถวิเคราะห์ได้ในช่วงเลขคลื่น  $4,000-500 \text{ cm}^{-1}$  และมีการใช้เครื่องมือเสริมในการวิเคราะห์ เช่น UATR



รูปที่ 3.12 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

### 3.3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สังเกตและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบล็อกจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมมวลรวมที่อายุ 28 วัน โดยการนำตัวอย่างมาหุบให้มีขนาดเล็กเท่าหัวเข็มหมุด จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองเพื่อให้ตัวอย่างเกิดการนำไฟฟ้าได้ และได้ภาพที่คมชัด โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV รูปที่ 3.1

### 3.3.8 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) การเตรียมชิ้นงานบล็อกจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมมวลรวม ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.5.8 โดยใช้หลักการกระตุ้นวัตถุโดยอนุภาคอิเล็กตรอน จะเกิดการปล่อยและคายพลังงานที่แตกต่างกันจึงสามารถบอกองค์ประกอบของธาตุได้ ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV

## บทที่ 4

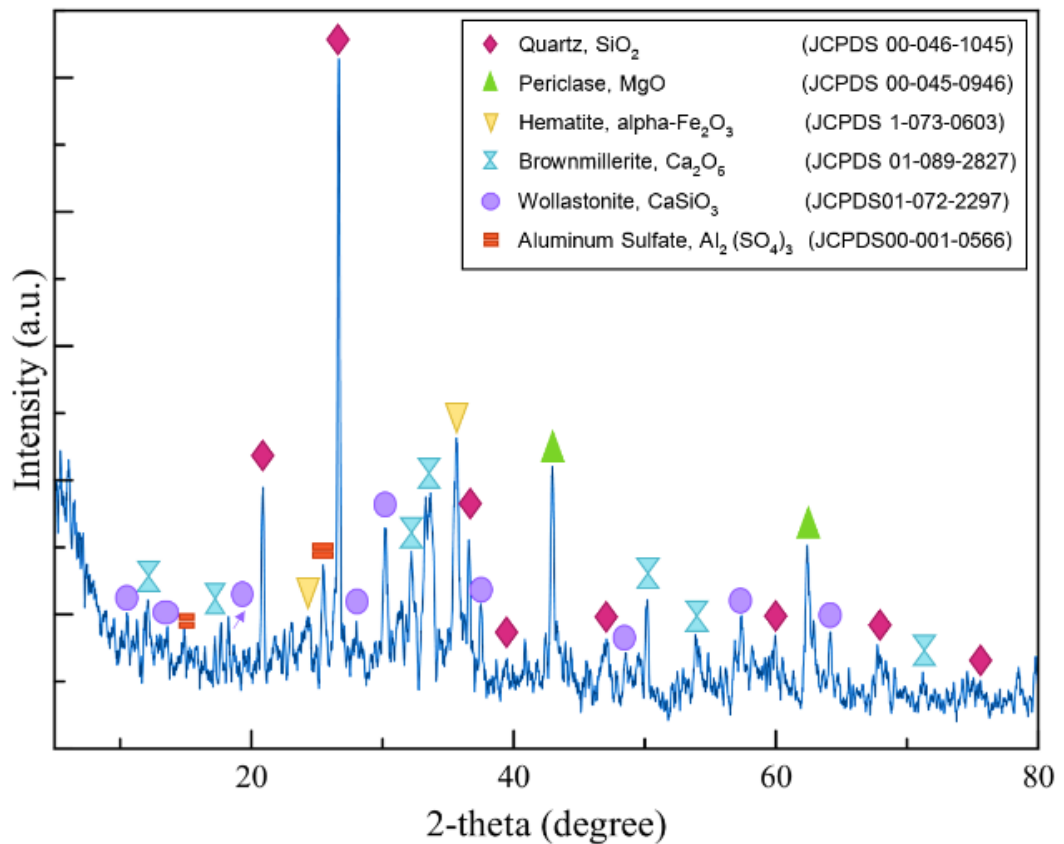
### ผลการทดลองและวิเคราะห์วัสดุดิบ

#### 4.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุดิบ

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและเฟสองค์ประกอบ

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเทคนิค เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) พบว่าในแก้วลอยมีปริมาณ โดยมวลของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากที่สุด คือ ร้อยละ 27.64 ในลำดับถัดมาคือ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และ เฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณโดยมวลร้อยละ 17.06 17.77 และ 22.75 ตามลำดับ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณโดยมวลมากถึงร้อยละ 67.55 และยังพบ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณโดยมวลร้อยละ 17.45 และ 4.43 ตามลำดับ ในขณะที่ทรายของเสีย แบ่งเป็นทรายหยาบ (CS) พบปริมาณโดยมวลของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากที่สุด ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 79.99 พบอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) รองลงมาโดยมีปริมาณโดยมวลร้อยละ 8.80 และ 6.33 ตามลำดับ และทรายละเอียด (FS) พบปริมาณโดยมวลของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากสุดเช่นกัน มีปริมาณโดยมวลร้อยละ 56.08 และรองลงมาพบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) โดยมีปริมาณร้อยละ 13.20 ดังตารางที่ 4.1

ในด้านของผลการวิเคราะห์การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของแก้วลอย ด้วยเทคนิควิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ประกอบด้วยผลึกของ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), Periclase ( $\text{MgO}$ ), Hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), Brownmillerite ( $\text{Ca}_2\text{O}_6$ ), Wollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ ) และ Aluminium Sulphate ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าลอย (XRD)

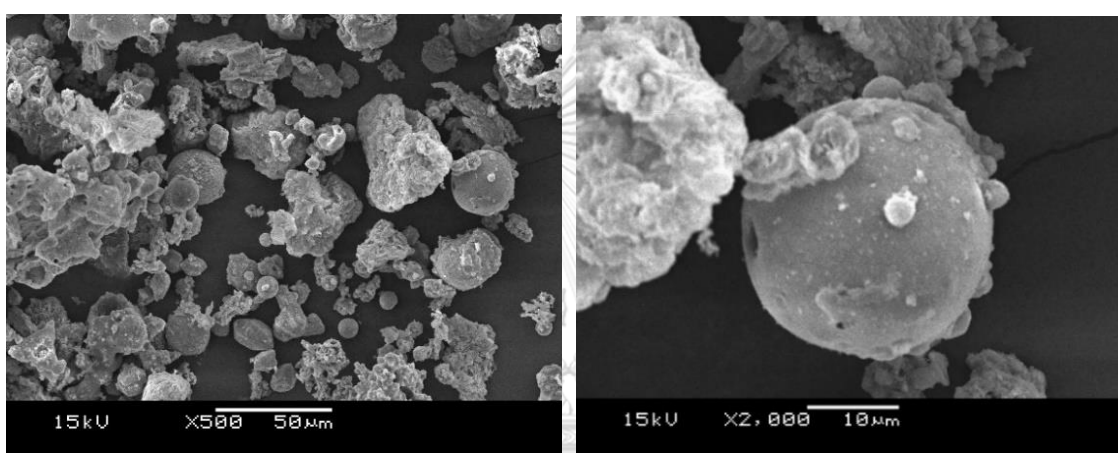
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไบล์ที่ได้รับจากโรงงานกระดาษเทนมา (ประเทศไทย) ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence: XRF) ดังตารางที่ 4.1 พบว่าเถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีมีผลรวมของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ของเถ้าลอยเป็นร้อยละ 67.45 จากผลการทดสอบสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า เถ้าลอยในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [4] ได้

ตารางที่ 4.1 สมบัติของวัสดุดิบ

องค์ประกอบ ทางเคมี	OPC (ร้อยละโดยมวล)	FA (ร้อยละโดยมวล)	ทรายของเสีย (ร้อยละโดยมวล)	
			FS	CS
SiO <sub>2</sub>	17.45	27.64	76.99	56.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.43	17.06	8.80	11.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.42	22.75	2.76	8.42
CaO	67.55	17.77	6.33	13.20
SO <sub>3</sub>	3.45	3.26	1.16	5.25
MgO	2.19	7.21	0.80	2.45
K <sub>2</sub> O	0.56	1.13	2.24	1.96
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.90	0.26	0.43
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.60	0.37	0.41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.32	0.09	0.16
Cl	0.19	0.04	-	-
MnO	0.06	0.59	0.04	0.16
SrO	0.05	0.44	-	-
BaO	-	0.18	0.08	0.12
ความถี่จำเพาะ (กรัม/ลบ.ซม.)	3.15	2.89	2.52	2.56
โมดูลัส ความละเอียด	-	-	3.92	2.66
ปริมาณความ ต้องการน้ำ (%)	-	109.92	-	-

#### 4.1.2 สัณฐานวิทยาของวัตุดิบ

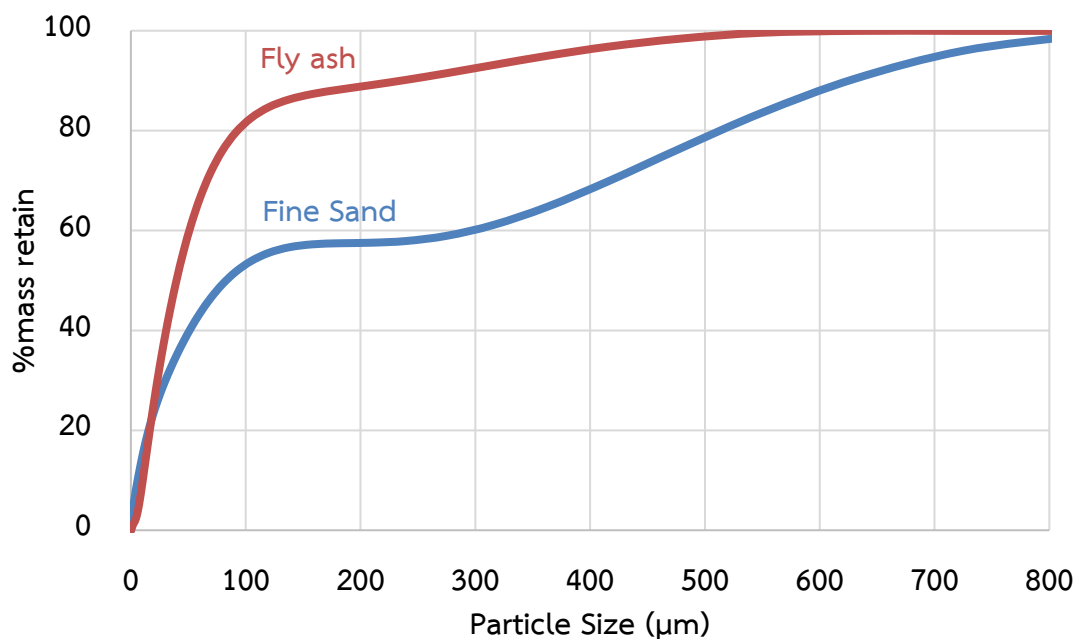
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (morphology) จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของแก้วลอยที่กำลังขยาย 500 เท่า และที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่าอนุภาคของแก้วลอยมีลักษณะขรุขระ ไม่เป็นรูปร่าง มีหลายขนาดปะปนกันอยู่ และมีบางส่วนที่เป็นทรงกลมซึ่งเกิดจากการหลอมที่สมบูรณ์พบได้น้อยเนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการเผาภายในเตาดำ ซึ่งแก้วลอยทรงกลมนี้มีความเป็นอสัณฐานทำให้สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายแก้วลอย (รูปซ้าย) กำลังขยาย 500 เท่า และ (รูปขวา) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

#### 4.1.3 การกระจายขนาดอนุภาค

การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแก้วลอย ทราบของเสียละเอียด ด้วยเครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution analyzer, PSD) พบว่าแก้วลอยมีการกระจายของขนาดแก้วลอยร้อยละ 10 (D10) การกระจายของขนาดแก้วลอยร้อยละ 50 (D50) และการกระจายของขนาดแก้วลอยร้อยละ 90 (D90) มีขนาดอนุภาค 11.86 45.55 และ 268.87  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ในส่วนของทราบของเสียแบบละเอียด พบว่าที่ D10 D50 และ D90 มีขนาดอนุภาค 6.71 94.96 และ 717.45  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแก้วลอยและทราบละเอียด ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ร้อยละการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาค

การวิเคราะห์หาขนาดคละของทรายของเสียหยาบ โดยการร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 4 (<4.75 mm) เบอร์ 6 (<3.35 mm) เบอร์ 12 (<1.70 mm) เบอร์ 18 (<1.00 mm) และ เบอร์ 35 (<500 μm) พบว่าขนาดค่าเฉลี่ยของทรายหยาบอยู่ในช่วงระหว่าง 3.35-1.00 mm การร่อนผ่านตะแกรงของทรายหยาบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การร่อนผ่านตะแกรงของทรายหยาบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ตะแกรงคัดขนาด (mm)	ร้อยละของทรายหยาบที่ผ่าน ตะแกรงแต่ละขนาด	ร้อยละของทรายหยาบที่ค้าง ตะแกรงแต่ละขนาด
4.75 (No.4)	100.00	0
3.35 (No.6)	85.25	14.75
1.7 (No.12)	30.35	54.90
1 (No.18)	0.25	30.10
0.5 (No.35)	0.15	0.25

#### 4.1.4 โมดูลัสความละเอียด

ผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus: F.M.) ของทรายละเอียด และทรายหยาบมีค่า 2.66 และ 3.92 ตามลำดับ โดยเมื่อนำค่าโมดูลัสของทรายละเอียดที่ใช้ผสมในตัวอย่างร้อยละ 65 โดยน้ำหนักของมวลรวม และทรายหยาบใช้ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อคำนวณค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายผสมที่ใช้ได้เท่ากับ 3.10 จัดอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 33 โดยในงานคอนกรีตต้องมีค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายผสมอยู่ในช่วงระหว่าง 2.20-3.20 [26]

#### 4.1.5 ความถ่วงจำเพาะ

ผลการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเถ้าลอย ทรายละเอียด และทรายหยาบ โดยการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยสามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C188 [27] ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย ทรายละเอียด และทรายหยาบมีค่าอยู่ที่ 2.89 2.56 และ 2.52 ตามลำดับ โดยแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย ทรายละเอียด และทรายหยาบ พบว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยอยู่ในมาตรฐานของ ASTM C188 และค่าความถ่วงจำเพาะของ ทรายละเอียด และทรายหยาบเป็นไปตามมาตรฐานของ BS 812-110 [28]

#### 4.1.6 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ผลการวิเคราะห์ความเป็นปอซโซลานิก (pozzolanic activity) เป็นการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานิกในที่นี้คือ เถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C311 [22] โดยการจะวัดความต้านแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ถูกแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานิก (เถ้าลอย) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเทียบกับความต้านแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอยให้เป็นซีเมนต์เพสต์ควบคุม ผลที่ได้คือค่าความต้านแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ซีเมนต์เพสต์ทดสอบที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย คือ 39 MPa และที่ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ซีเมนต์เพสต์ควบคุม คือ 41 MPa เมื่อคำนวณค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index, SAI) ได้เท่ากับ SAI = 93.49% ซึ่งมากกว่า 75% แสดงว่าจัดเป็นวัสดุปอซโซลานิกมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ แต่ไม่เทียบเท่าหรือมากกว่าการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



## บทที่ 5

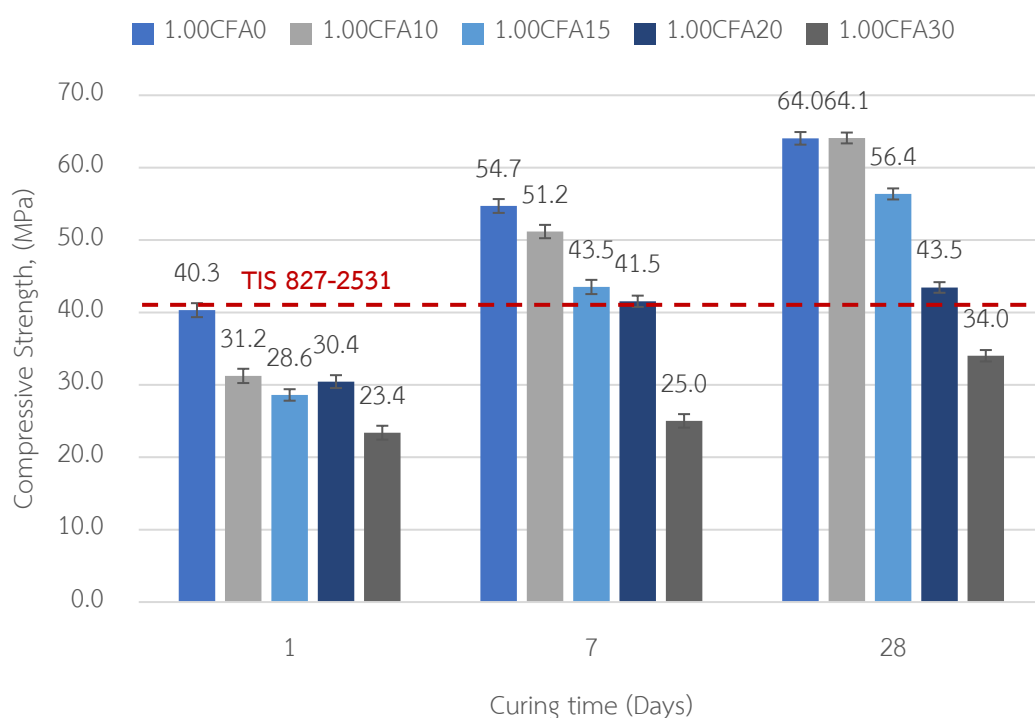
### ผลการทดลองและอภิปรายและการทดลองการใช้กากของเสียเป็นส่วนผสมใน บล็อกคอนกรีตปูพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

#### 5.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

##### 5.1.1 กำลังรับแรงอัดขึ้นงาน

จากผลการศึกษาการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เถ้าลอย (FA) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary portland cement type 1: OPC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 [24] ค่ากำลังรับแรงอัดขึ้นงานได้แสดงไว้ในจากรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อขึ้นงานบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอยในองค์ประกอบมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแนวโน้มที่อายุ 7 วันลดลงทุกอัตราส่วน เนื่องจากเมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงต้นเป็นปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ทำให้เกิดการแข็งตัวและตัวอย่างสามารถรับแรงอัด เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, CH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานให้ตัวอย่างจับตัวกัน อีกทั้งยังช่วยให้ตัวอย่างแข็งตัว [29, 30] การที่สัดส่วนของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงน้อยลงลงด้วย การเกิดปฏิกิริยาของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงเกิดน้อยลงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นของตัวอย่างน้อย ในขณะที่ตัวอย่างที่อายุมากขึ้นที่ 28 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทุกสูตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระยะเวลาขึ้นการปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ CSH และ CH เพิ่มขึ้นสามารถรับกำลังที่เพิ่มขึ้นตามอายุตัวอย่างที่มากขึ้น [7] การที่ตัวอย่างผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้ตัวอย่างสามารถพัฒนากำลังอัดได้เทียบเท่ากับตัวอย่างที่ไม่มีการผสมเถ้าลอย เนื่องจากการวิเคราะห์เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดที่ละเอียดอีกทั้งยังพบออกไซด์ของธาตุซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ [31, 32] ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดโดยใช้ต่างที่เหลือจากจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เข้ามาใช้ในการทำปฏิกิริยาให้เกิดสารเชื่อมประสาน เมื่ออายุตัวอย่างที่เวลามากขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้กำลังอัดสามารถเพิ่มขึ้นได้ ในทางกลับกัน การเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยในส่วนผสมที่มากเกินไปจะทำให้ส่วนผสมมีปริมาณของปูนซีเมนต์น้อยลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเกิดน้อยส่งผลให้ต่างเกิดน้อยลงปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงเกิดน้อยลงด้วย ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดพัฒนาน้อยตามอายุที่เพิ่มขึ้น [2] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Uygunoglu และคณะ (2012) ที่กล่าวว่ากำลังอัดของบล็อกจะเพิ่มขึ้นด้วยการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกเหนือจากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจะลดลง [17]

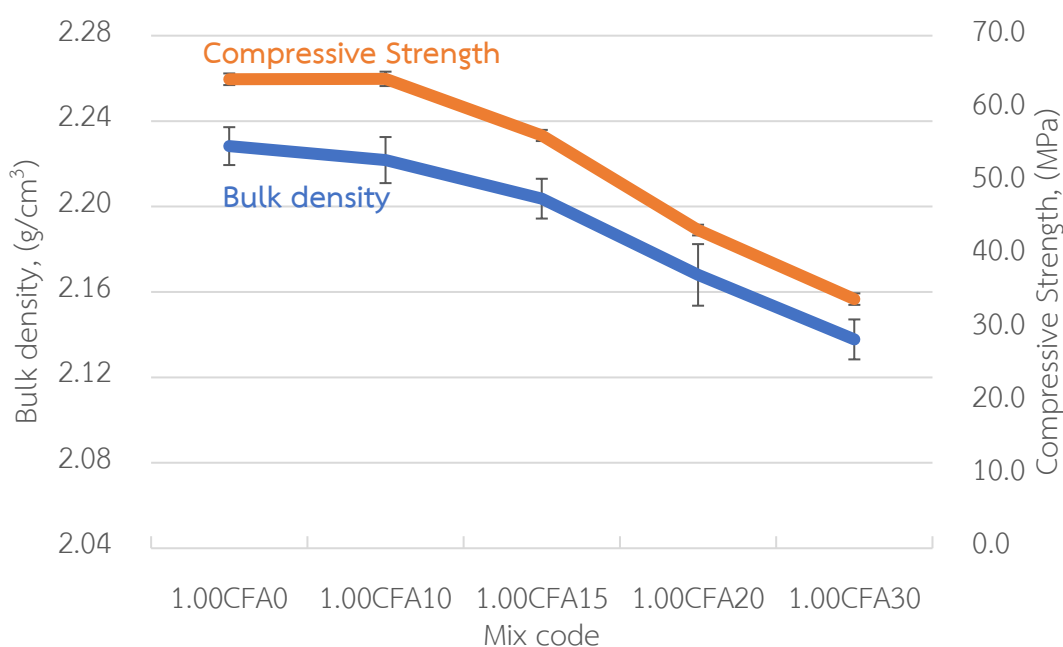


รูปที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

### 5.1.2 ความหนาแน่นมวลรวม

จากการศึกษาความหนาแน่นมวลรวมของบล็อกประสานปูพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Bulk density) โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน 1.00 บม เป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังรูปที่ 5.2 การเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอยมากขึ้นส่งผลให้มีแนวโน้มของค่าความหนาแน่นของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เนื่องจากการศึกษาสมบัติของวัสดุดิบ

พบว่าเถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะผิวขรุขระ เป็นรูพรองข้างในจึงทำให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นน้อยลงเมื่อมีปริมาณมากเกินไป และเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของตัวอย่างที่มากขึ้น เนื่องจากบล็อกตัวอย่างที่มีค่าความหนาแน่นต่ำจะมีสัดส่วนของเถ้าลอยสูงและส่งผลให้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมลดลงการที่ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์จึงเกิดน้อยลง การที่จะเกิดสารยึดเกาะให้แทรกเข้าไปในรูพรุนของเถ้าลอยไม่เพียงพอให้อุดช่องว่างในตัวชิ้นงาน จึงทำให้สามารถรับกำลังอัดของบล็อกได้น้อยลงด้วย [7]

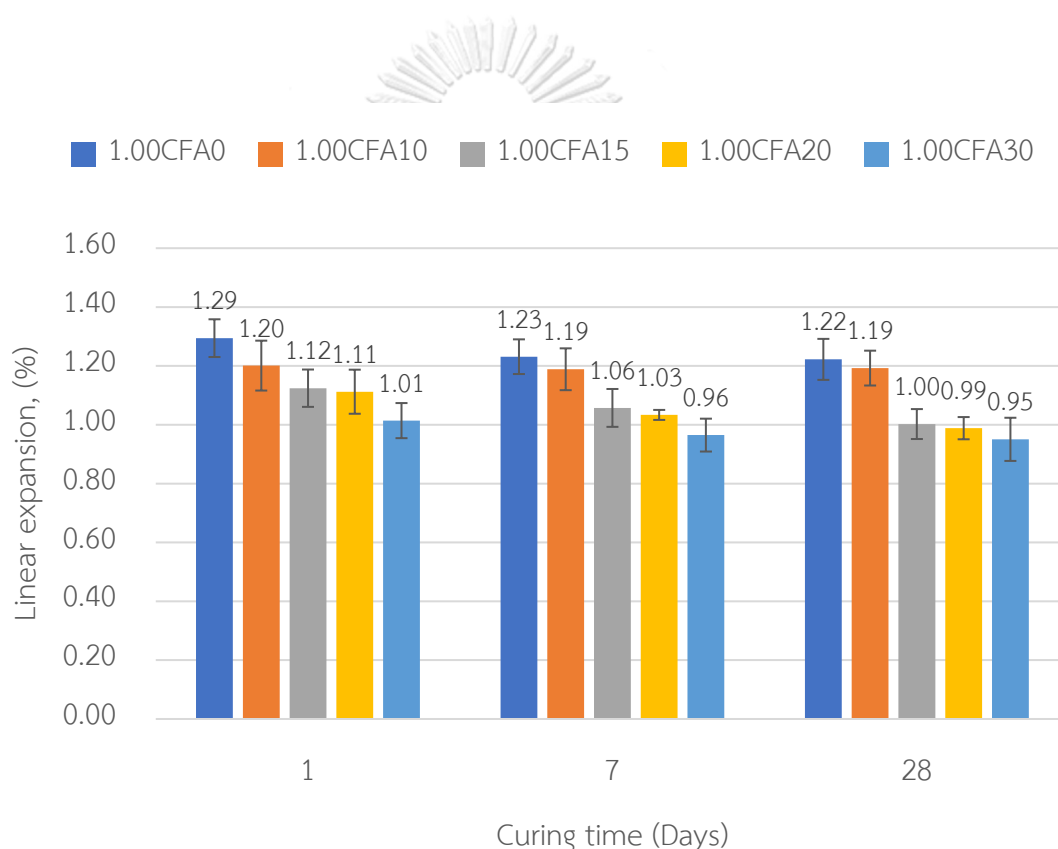


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความหนาแน่นของบล็อกปูพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

### 5.1.3 การขยายตัวเชิงเส้น

จากผลการศึกษาการขยายตัวเชิงเส้น โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary portland cement type 1: OPC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 28 วัน ค่าการขยายตัวเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 5.3 พบว่าทำให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอยในองค์ประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มี

การขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกน้อยลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมเถ้าลอย คาดว่าอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟต เช่น Ettringite เป็นตัวที่ก่อให้เกิดการขยายตัวของตัวอย่างจะไปเติมในรูพรุนของเถ้าลอยก่อนที่จะดันให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัว ดังนั้นการขยายตัวของตัวอย่างจึงลดลง นอกจากนี้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยช่วยลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างไม่ให้เกิดการขยายตัวได้ [6] อีกทั้งการศึกษาขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกเมื่อเทียบความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานตาม มอก. กำหนดให้ความคลาดเคลื่อน ไม่เกิน  $\pm 2 \text{ mm}$  แต่ตัวอย่างมีค่าประมาณ  $\pm 1 \text{ mm}$  จัดว่าอยู่ตามเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดเอาไว้



รูปที่ 5.3 การขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

#### 5.1.4 ระยะเวลาก่อตัว

การศึกษาระยะเวลาก่อตัว (Setting time) โดยใช้เข็มแบบไวแคต มีผลต่อการทำงานในการนำไปใช้ผลิตบล็อก เนื่องจากจะต้องรู้ระยะเวลาในการก่อตัวของส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานในช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยจะศึกษาระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนเถ้าลอยต่อ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมแก้าลอยแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่าเพสต์ที่ผสมแก้าลอยมีระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เพิ่มขึ้นมากกว่าเพสต์ที่ไม่ผสมแก้าลอย เนื่องจากการแทนที่ด้วยแก้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง [2, 33] ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้าลอยมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ที่ผสมแก้าลอยเพิ่มขึ้น [2] แก้าลอยในงานวิจัยนี้มีลักษณะที่หยาบจะมีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ที่ผสมแก้าลอยเพิ่มขึ้น [34] แต่ยังคงผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของ มอก.15 เล่ม 1 หรือ ASTM C150 กำหนดไว้ว่าสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องมีการก่อตัวระยะต้น (Initial setting time) ไม่น้อยกว่า 45 นาทีและการก่อตัวระยะปลาย (Final setting time) ไม่มากกว่า 375 นาที [35]

ตารางที่ 5.1 ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมแก้าลอย

	ระยะเวลาก่อตัวส่วนผสมของเพสต์ (นาที)				
	1.00CFA0	1.00CFA10	1.00CFA15	1.00CFA20	1.00CFA30
การก่อตัวระยะต้น	75	100	150	200	245
การก่อตัวระยะปลาย	180	188	200	247	280

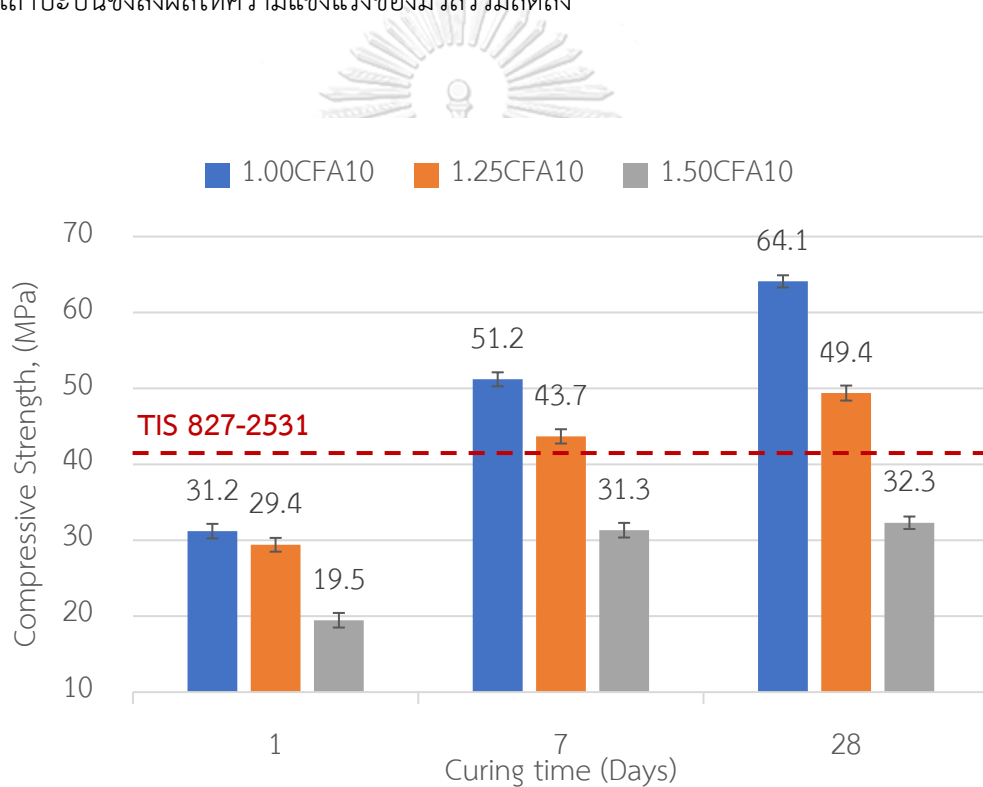
## จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน

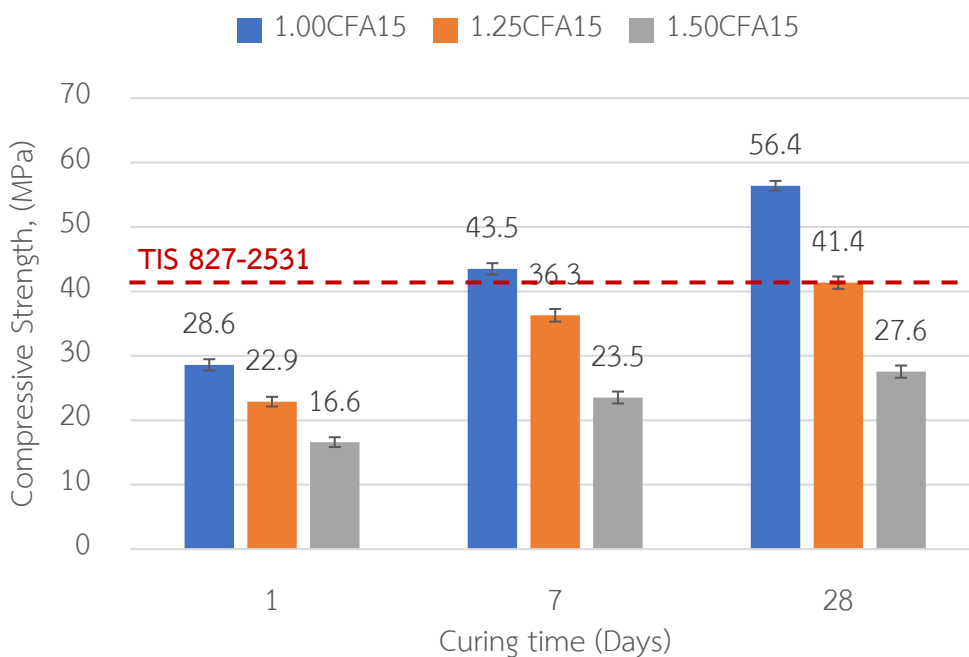
#### 5.2.1 กำลังรับแรงอัดชิ้นงาน

จากผลการศึกษาการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุด 2 สูตรจากหัวข้อ 5.1 โดยเลือกอัตราส่วนแก้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary portland cement type 1: OPC) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน มีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาพัฒนาต่อได้ จึงนำมาศึกษาอัตราส่วนมวลรวม (Fine Sand: FS + Coarse sand: CS) ต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รวมกับแก้าลอย) เท่ากับ 1.00 1.25 และ 1.50 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษา ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 พบว่าค่าของกำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีแนวโน้ม

สูงสุดเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยในทุกอัตราส่วน จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อาจเนื่องมาจากปริมาณทรายเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับปริมาณที่เหมาะสมและความเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้มีความสามารถในการยึดเกาะกับบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ดี และการเพิ่มปริมาณทรายในส่วนผสมมากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงทั้งสองสูตร เนื่องจากสัดส่วนของสารเชื่อมประสานในชิ้นงานมีน้อยจึงทำให้ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดเจลในการสารเชื่อมประสานเกิดน้อย ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของชิ้นงานต่ำ และเนื่องด้วยทรายที่ใช้เป็นทรายของเสียจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าในทรายของเสียอาจมีส่วนผสมของเหล็กปะปนซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของมวลรวมลดลง



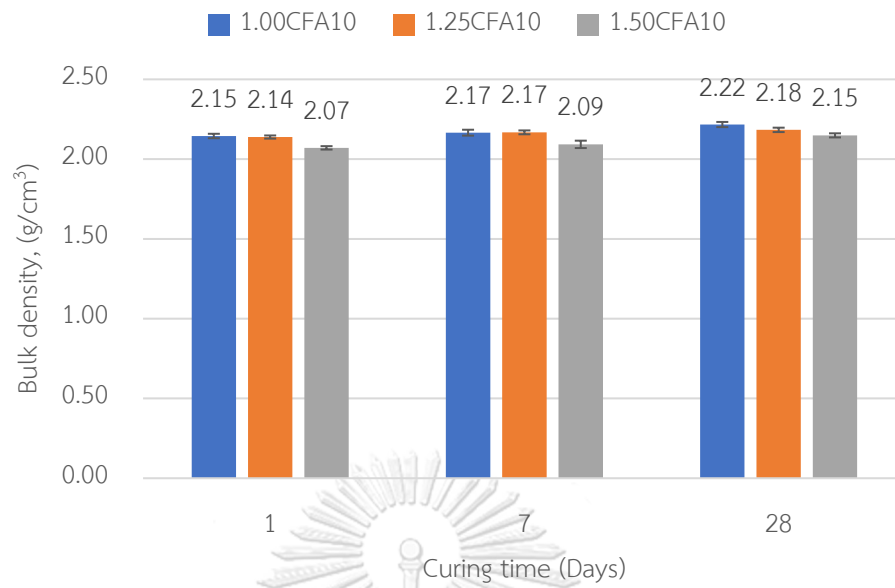
รูปที่ 5.4 กำลังรับแรงอัดตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์



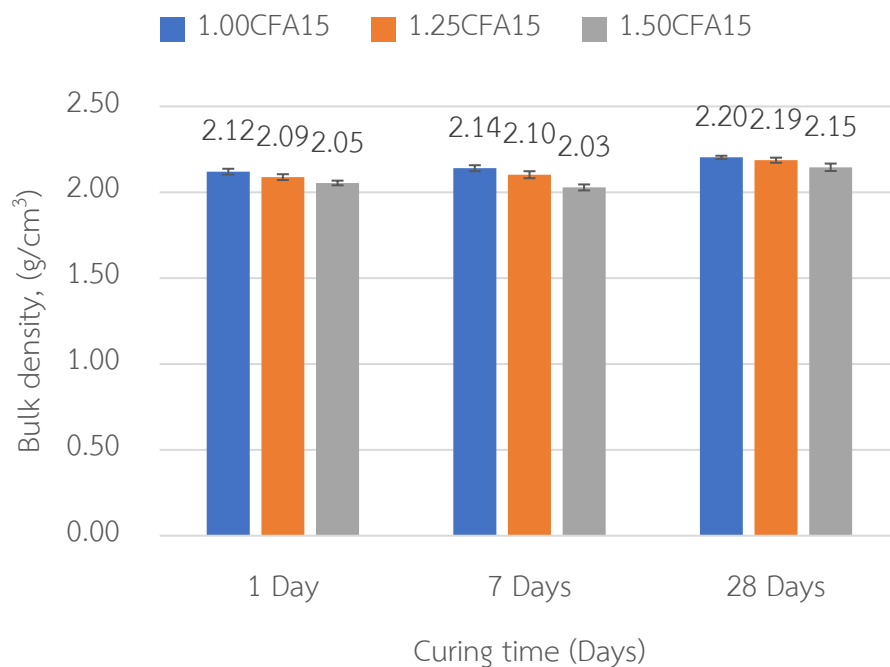
รูปที่ 5.5 กำลังรับแรงอัดตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน ที่อัตราส่วนแก้วลอยแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

### 5.2.2 ความหนาแน่นมวลรวม

จากผลการศึกษาค่าความหนาแน่นมวลรวมโดยใช้แก้วลอยแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1: OPC) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน ค่าความหนาแน่นมวลรวมกรณีศึกษาอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสานแสดงในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 พบว่ามีแนวโน้มของค่าความหนาแน่นมวลรวมลดลงแต่ไม่มาก เมื่อมีการเพิ่มองค์ประกอบของทรายของเสียเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาแต่ละสูตรที่ระยะเวลาการบ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถเกิดเจลมากขึ้นตัวอย่างจึงมีความหนาแน่นมากขึ้น



รูปที่ 5.6 ความหนาแน่นมวลรวมตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

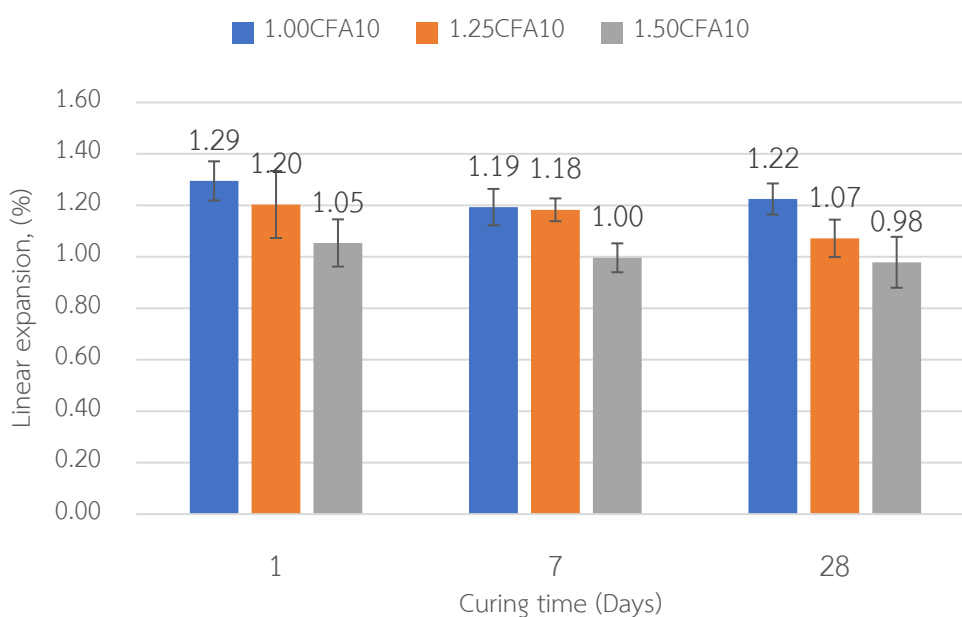


รูปที่ 5.7 ความหนาแน่นมวลรวม ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนเถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

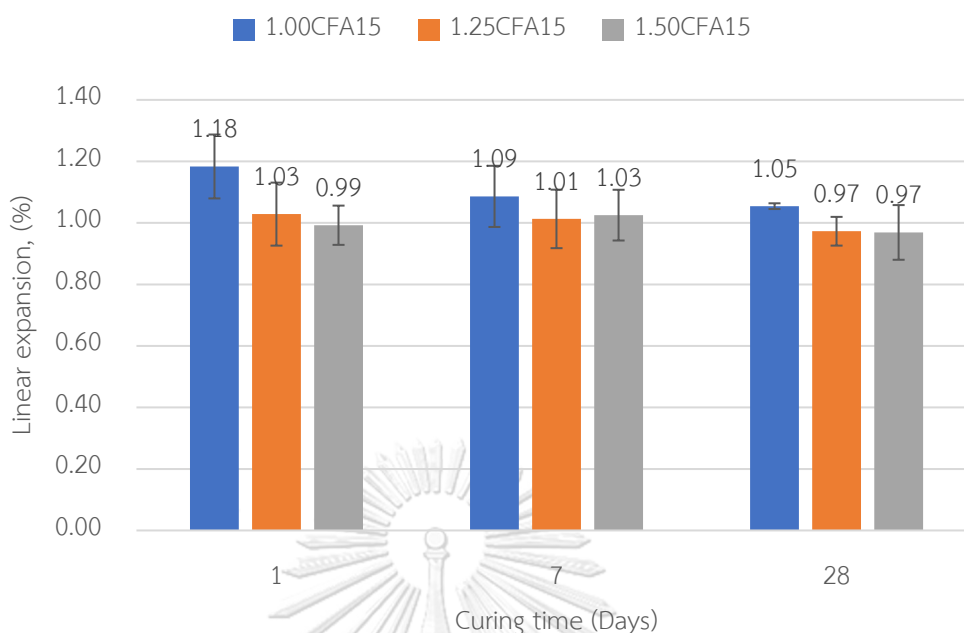


### 5.2.3 การขยายตัวเชิงเส้น

จากผลการศึกษาการขยายตัวเชิงเส้นโดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 พบว่ามีแนวโน้มของค่าการขยายตัวเชิงเส้นลดลงเมื่อมีการเพิ่มองค์ประกอบของทรายของเสียเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากเมื่อปริมาณองค์ประกอบของทรายในส่วนผสมมากขึ้น ปริมาณวัสดุประสานจึงมีน้อยลงเกิดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดน้อยลงแต่ยังเกิดอยู่เนื่องจากการพัฒนากำลังอัดที่ระยะเวลามากขึ้น การที่ชิ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขยายตัวจึงเกิดน้อย เมื่อจะไปเติมในรูปพรุนของเถ้าลอยก่อนที่จะดันให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัวดังนั้นการขยายตัวของตัวอย่างจึงลดลง นอกจากนี้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยช่วยลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างไม่ให้เกิดการขยายตัวได้ [6] อีกทั้งการศึกษายขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกยังสามารถทำให้คาดการณ์ขนาดสุดท้ายของชิ้นงานที่จะเกิดขึ้นได้เพื่อไม่ให้ขนาดของชิ้นงานที่ได้เกินกว่า มอก.827-2531 ที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวเชิงเส้น ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน เมื่ออัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์



รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวเชิงเส้น ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน เมื่ออัตราส่วนเก่าลดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

### 5.3 การขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบ

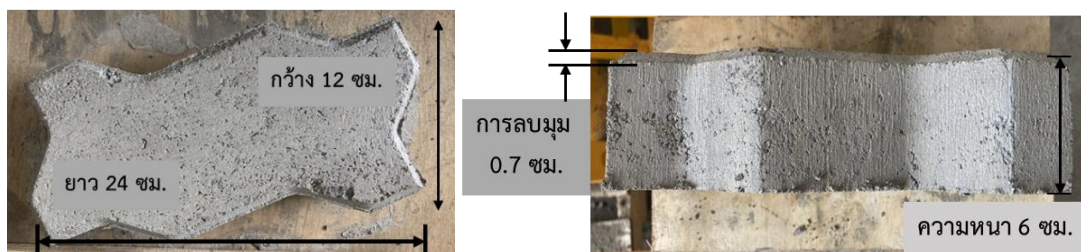
การขึ้นรูปอิฐบล็อกต้นแบบของประสานปูพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้นแบบ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุด โดยมีการขึ้นรูปบล็อกต้นแบบเป็นบล็อกตัวหนอน ด้วยเครื่องอัดอิฐบล็อกต้นแบบรูปตัวหนอนดังรูปที่ 5.10 พบว่าสามารถเตรียมบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการใช้เก่าลยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน อัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานคือ 1:1 ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่า 0.35 ก่อนการนำส่วนผสมไปใช้จะต้องมีการดูลักษณะส่วนผสมที่สามารถนำไปขึ้นรูปได้ทดสอบโดยการใช้มือกำส่วนผสม (Ball in hand) หากเข้ากันดีแล้วจะมีลักษณะเป็นก้อนเกาะกันบนมือ ลักษณะก้อนไม่แตกหรือแยกออกแสดงว่าสามารถใช้ได้ จากที่ขึ้นรูปและนำไปบ่มบนชั้นวางคลุมด้วยพลาสติกดังรูปที่ 5.11 พบว่าขนาดของบล็อกรูปตัวหนอนที่ดีควรมีความกว้าง 120 mm ความยาว 240 mm และความหนา 6 mm น้ำหนักต่อก้อนประมาณ 3 kg บริเวณขอบของบล็อกไม่บิ่นและไม่แตกร้าว และมีการลบมุมที่ 7 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.12 อิฐบล็อกต้นแบบเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.827-2531 บล็อกคอนกรีตประสานปูพื้น



รูปที่ 5.10 เครื่องอัดอิฐบล็อกต้นแบบรูปตัวหนอน



รูปที่ 5.11 ชั้นวางชิ้นงานต้นแบบ  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 5.12 อิฐบล็อกกึ่งพื้นต้นแบบรูปตัวหนอน

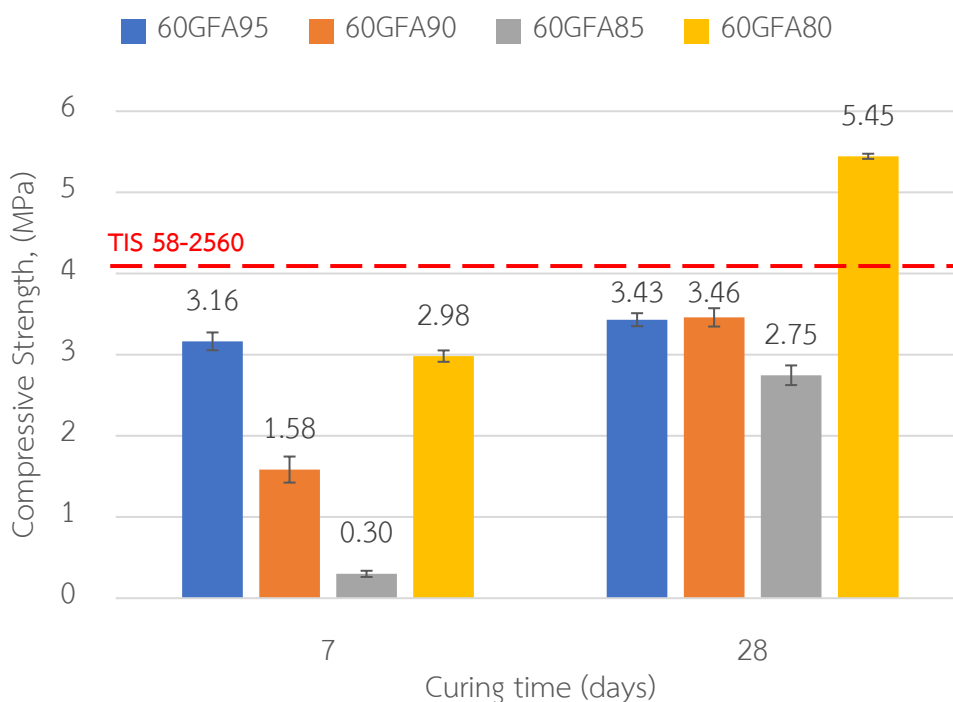
## บทที่ 6

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองการใช้กากของเสียเป็นส่วนผสมใน บล็อกฐานจีโอพอลิเมอร์

#### 6.1 การศึกษาผลของสัดส่วนเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล

##### 6.1.1 กำลังรับแรงอัดชิ้นงาน

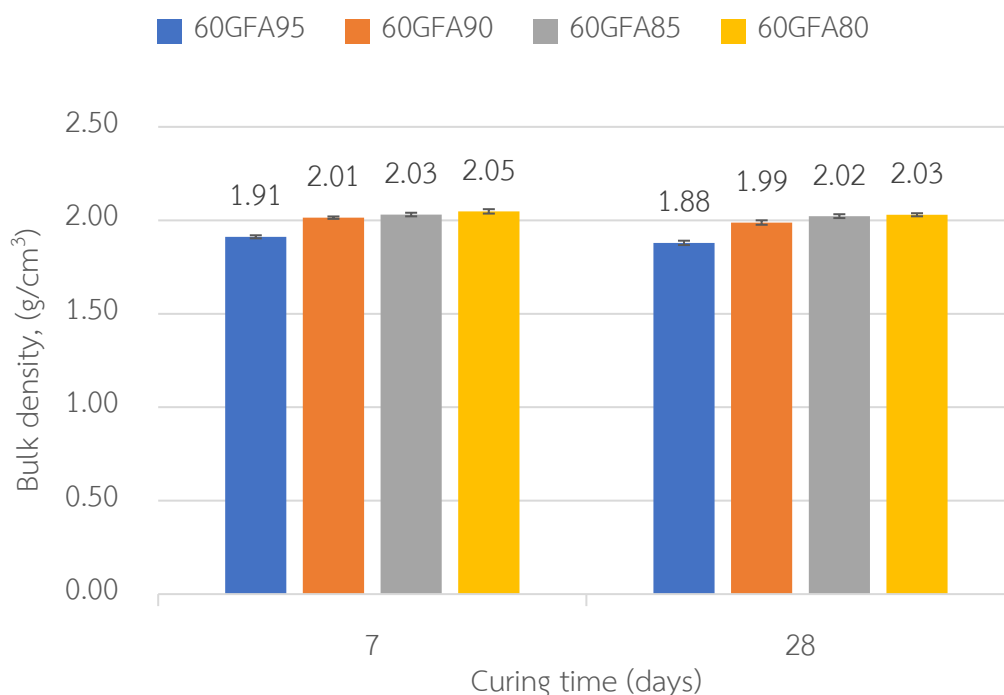
จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของบล็อกจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอย ทราขายของเสียทั้งสองขนาด และสารอัลคาไล (sodium metasilicate: SS และ sodium hydroxide: SH) เป็นสารตั้ง โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล (FA/LA) ที่ร้อยละ 80:20 85:15 90:10 และ 95:5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับการเตรียมคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.39 พบว่าชิ้นงานบล็อกจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดแสดงในรูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสัดส่วนของเถ้าลอยในองค์ประกอบลดลงจากอัตราส่วน FA/AG ร้อยละ 95 เป็น 80 โดยน้ำหนัก จะทำให้กำลังรับแรงอัดของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และชิ้นงานคอนกรีตที่อายุ 28 วัน แสดงการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดที่มากขึ้น โดยเฉพาะอัตราส่วน FA/AG ร้อยละ 80 ซึ่งแสดงการเพิ่มขึ้นถึง 91% เมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน นอกจากนี้ที่อัตราส่วนอื่นมีความแข็งแรงไม่สูงมาก เนื่องจากเถ้าลอยที่ใช้มีปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาน้อยเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ [36, 37] และมีความเป็นอสัณฐานต่ำ รวมทั้งอาจเนื่องจากมีปริมาณ NaOH ไม่เพียงพอส่งผลให้กระบวนการละลายของปฏิกิริยาลดลง [38] และทั้งนี้ที่มีสัดส่วนเถ้าลอยมากขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของสารกระตุ้นอัลคาไลลดลง จึงทำให้ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย โดย SH จะทำหน้าที่ในการชะอนุภาคที่เป็นอสัณฐานบริเวณผิวหน้าของอนุภาคเถ้าลอย ได้เป็นไอออนของซิลิกา และอะลูมินา เพื่อเกิดปฏิกิริยาและเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลของซิลิกา และอะลูมินาที่ผิวของเถ้าลอย เมื่อมีปริมาณเจือมากขึ้นจึงส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นจีโอพอลิเมอร์เจล จึงสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ [39] ในส่วนของค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม เช่นเดียวกับสารเชื่อมประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันอย่างต่อเนื่อง รวมถึงเนื่องจากเถ้าลอยมีปริมาณแคลเซียมสูง จึงสามารถเกิดเจลแคลเซียม (ไฮเดียม) อะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-(N)-A-S-H) ในบล็อกจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่พัฒนากำลังรับแรงอัดตามอายุการบ่ม [14, 40, 41]



รูปที่ 6.1 กำลังรับแรงอัดของบล็อกรีโอบอลิเมอร์ ตามอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล

### 6.1.2 ความหนาแน่นมวลรวม

กรณีศึกษาการขึ้นรูปบล็อกรีโอบอลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานรีโอบอลิเมอร์ (Bulk density) ที่ใช้เถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล เป็นเป็นร้อยละ 80:20 85:15 90:10 และ 95:5 ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1:1 ระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 6.2 พบว่าเมื่อมีสัดส่วนของสารกระตุ้นอัลคาไลในองค์ประกอบมากขึ้นส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดเจล C-(N-)A-S-H ได้มากขึ้น และเจลที่เกิดจะเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างของชิ้นงาน [7] ทำทำให้ชิ้นงานมีแนวโน้มของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของสารกระตุ้นอัลคาไล



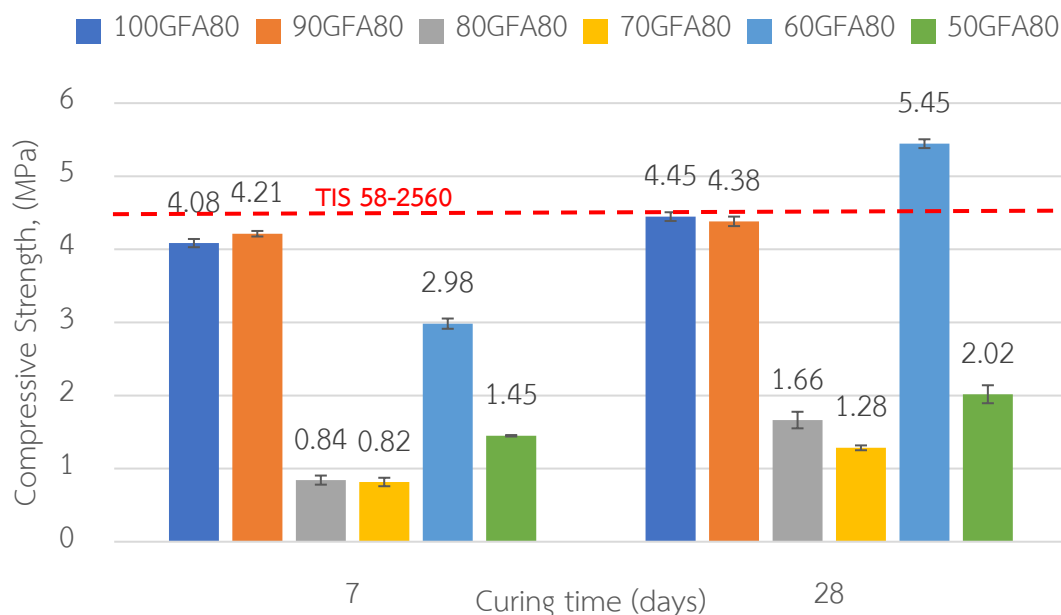
รูปที่ 6.2 ความหนาแน่นมวลรวมบล็อกรีโอพอลิเมอร์ ตามอัตราส่วนแก้วลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล

## 6.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารกระตุ้นอัลคาไล

### 6.2.1 กำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน

จากการศึกษาหัวข้อ 6.1 พบว่าอัตราส่วนแก้วลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไลร้อยละ 80:20 ที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดผ่านมอก. 58-2560 จึงมีแนวโน้มที่จะนำมาศึกษาอัตราส่วนของโซเดียมเมตาซิลิเกต (SS) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SH) ในสารกระตุ้นอัลคาไล ที่ร้อยละ 50:50 60:40 70:30 80:20 90:10 และ 100:0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับการทดลองที่ผ่านมา และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.31 หรืออัตราส่วนน้ำต่อแก้วลอยเท่ากับ 0.39 บ่มเป็นเวลา 7 และ 28 วัน เหมือนในหัวข้อที่ 6.1 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานบล็อกรีโอพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 6.3 พบว่าอัตราส่วนของ SS/SH ในสารกระตุ้นอัลคาไลมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัด โดยพบว่าชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ SS/SH เท่ากับ 100:0 และ 90:10 มีแนวโน้มที่กำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ เนื่องจากแก้วลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณของซิลิกาที่น้อย ซึ่งเป็นตัวสำคัญในการทำให้เกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดเจล C-(N)-A-S-H ดังนั้นซิลิกาในแก้วลอยจึงไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน แต่เมื่อมีปริมาณ SS มากจึงสามารถช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันและเกิดเจล C-(N)-S-H

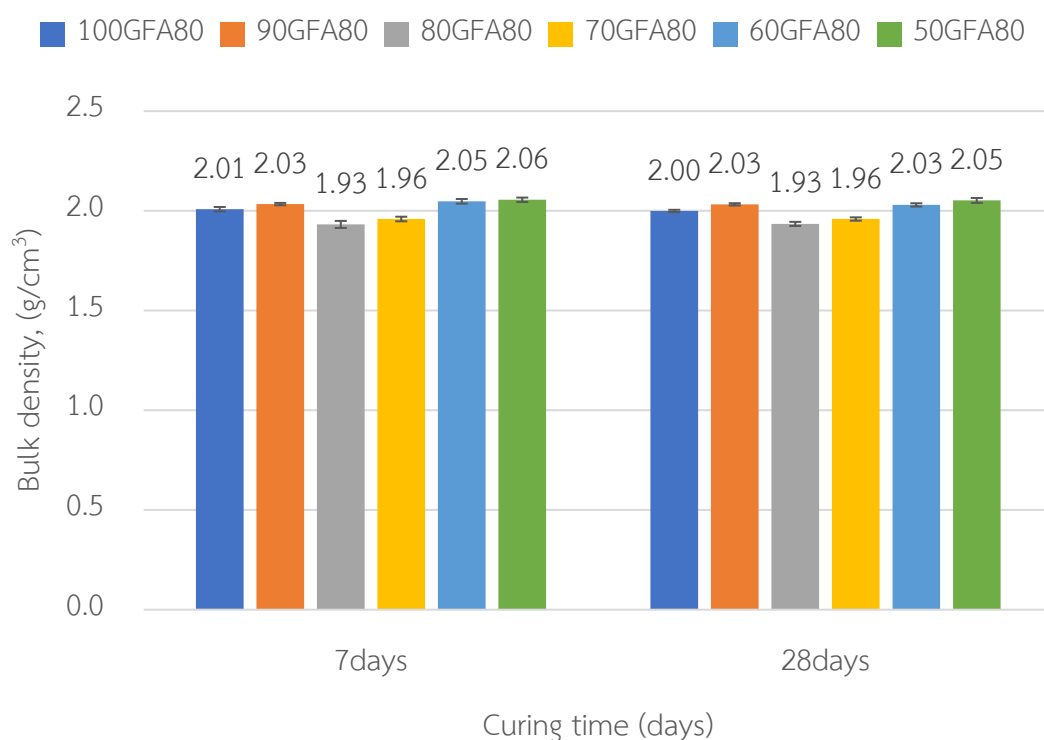
ทำให้ที่ช่วงอายุ 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าสูตรอื่น ๆ [38] แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นพบว่าการพัฒนา กำลังรับแรงอัดสามารถเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณของ SS ในการละลายอสังฐานของแก้วลอยได้น้อย ส่งผลให้มีการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้น้อยลงเมื่อขึ้นงานมีอายุมากขึ้น และเมื่อสัดส่วนของ SS/SH ในชิ้นงานลดลงเป็น 80:20 และ 70:30 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อลดสัดส่วนของ SS/SH เหลือที่ 60:40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดกลับมาเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่า SH ในส่วนผสมมีสัดส่วนที่มากพอต่อการชะละลายอสังฐานที่บริเวณผิวของแก้วลอย ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของตัวอย่างสูงขึ้น [10, 42] และค่าดังกล่าวผ่านมอก. 58-2560 แต่เมื่อมีปริมาณสาร SH ในสารกระตุ้นอัลคาไลที่มากเกินไป จะทำให้เกิดซีโอไลซ์ในจีโอพอลิเมอร์ และเกิดการขยายตัวของชิ้นงานทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลดลงได้ [43, 44] และในส่วนของ การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานตามระยะเวลาการบ่ม เกิดเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างต่อเนื่อง รวมถึงเนื่องจากแก้วลอยมีปริมาณแคลเซียมสูง จึงสามารถเกิดเจลแคลเซียม (ไฮเดียม) อะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-(N-)A-S-H) ในบล็อกจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่พัฒนา กำลังรับแรงอัดตามอายุการบ่ม [14, 40, 41]



รูปที่ 6.3 กำลังรับแรงอัดของบล็อกจีโอพอลิเมอร์ ตามอัตราส่วนสารกระตุ้นอัลคาไล

## 6.2.2 ความหนาแน่นมวลรวม

ค่าความหนาแน่นมวลรวมของบล็อกจีโอพอลิเมอร์ กรณีศึกษาอัตราส่วนสารกระตุ้นอัลคาไล (sodium metasilicate: SS และ sodium hydroxide: SH) ในอัตราส่วนโซเดียมเมตะซิลิเกต (SS) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SH) ร้อยละ 50:50 60:40 70:30 80:20 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.31 บ่มเป็นเวลา 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 6.4 พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่ค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งสามารถบอกได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เร่งส่งผลให้เจลจีโอพอลิเมอร์เข้าไปอุดในช่องว่างของเส้นลวด [7] ความหนาแน่นของตัวอย่างจึงเพิ่มขึ้น และที่สัดส่วนที่มี SS จะทำหน้าที่เพิ่มซิลิกาให้มีปริมาณสูง จะทำให้เกิดการแตกตัวในน้ำ หรือเมื่อตัวอย่างโดนความชื้น โดยซิลิกาในจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ดูดความชื้นได้ดี [45, 46]



รูปที่ 6.4 ความหนาแน่นของบล็อกจีโอพอลิเมอร์ ตามอัตราส่วนสารกระตุ้นอัลคาไล



### 6.2.3 ปริมาณธาตุและโลหะหนัก

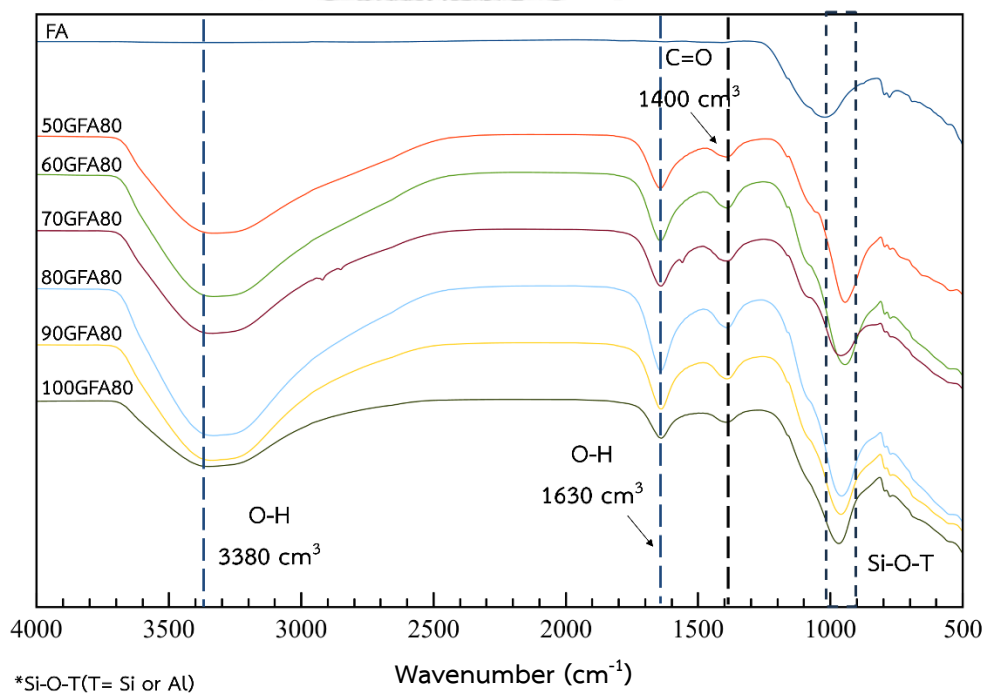
การกำจัดกากของเสียอันตรายโดยทำเป็นบล็อกจีโอพอลิเมอร์ ต้องมีการตรวจสอบความปลอดภัยเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารพิษเมื่อผ่านระยะเวลาไป ซึ่งหากมีการรั่วไหลเกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ โดยงานวิจัยนี้เลือกสูตรที่ดีที่สุดจากหัวข้อ 6.2.1 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่าน มอก. 58-2560 มาทดสอบปริมาณของโลหะหนัก 6 ชนิด อาร์ซีนิก (arsenic: AS), แคดเมียม (cadmium: Cd), โครเมียม (chromium: Cr), โคบอลต์ (cobalt: Co), ตะกั่ว (lead: Pb) และปรอท (mercury: Hg) เพื่อประเมินความปลอดภัยในกรณีที่มีการชะละลายเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานในงานก่อสร้างต่าง ๆ โดยใช้มาตรฐาน TCLP Limit ในการเปรียบเทียบ โดยใช้วิธีการชะละลายด้วยกรดอะซิติก (acetic) ที่ค่า pH  $4.93 \pm 0.05$  อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 และสกัดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 6.1 พบว่าปริมาณโลหะหนักทุกตัวในบล็อกจีโอพอลิเมอร์ไม่เกินค่ามาตรฐาน TCLP Limit เนื่องจากโลหะหนักจะมีประจุบวกที่ทำให้จับกับประจุลบในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ เช่น ไอออนของตะกั่ว ( $Pb^{3+}$ ) และซิลิเกต ( $SiO_4^-$ ) เกิดเป็นสารประกอบ  $Pb_3SiO_5$  [47] จากการวิเคราะห์เถ้าลอยใน บทที่ 4 จะพบว่าเถ้าลอยมีปริมาณของแคลเซียมสูง ซึ่งมีงานวิจัยระบุว่า  $Pb^{2+}$  จะจับกับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตเกิดเป็น Pb-C-S-H เหมือนกับวัสดุเชื่อมประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำเถ้าลอยมาใช้ในการทำบล็อกจีโอพอลิเมอร์สามารถนำไปใช้งานก่อสร้างต่าง ๆ ได้ โดยไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะในสิ่งแวดล้อมเกินกว่าค่ามาตรฐาน [48]

ตารางที่ 6.1 ปริมาณสารโลหะหนักในสารละลาย

ปริมาณสารโลหะหนักในสารละลาย (mg/L)						
โลหะหนัก	As	Cd	Cr	Co	Pb	Hg
60GFA80	0.1223	Not Detected	0.0046	0.0015	Not Detected	<0.0005
TCLP Limit	5.0	1.0	5.0	-	5.0	0.2

### 6.2.4 องค์ประกอบของโมเลกุลของสารเชื่อมประสาน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของโมเลกุลของสารเชื่อมประสานโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) กรณีศึกษาอัตราส่วนสารกระตุ้นอัลคาไลที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วน SS:SH ร้อยละ 50:50 60:40 70:30 80:20 90:10 และ 100:0 ตามลำดับ การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะไม่มีส่วนผสมที่เป็นมวลรวม (ทรายละเอียด และทรายหยาบ) โดยจะทำการศึกษาองค์ประกอบที่เกิดขึ้นในสารเชื่อมประสานที่ใช้สำหรับขึ้นรูปตัวอย่างทั้ง 6 สูตร แสดงในรูปที่ 6.5 พบว่าจากการเปรียบเทียบตำแหน่งของแถบดูดกลืนกับสารเชื่อมประสานที่เลขคลื่นประมาณ  $3380\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,630\text{ cm}^{-1}$  มีลักษณะการสั่นของ O-H stretching และ O-H bending กลุ่มโมเลกุลของน้ำ หรือความชื้นซึ่งติดอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการสั่นแบบนี้จะเด่นชัดมากในจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากมี SS และ SH ในส่วนผสม [49, 50] ต่อมาคลื่นช่วงประมาณ  $1,500\text{ cm}^{-1}$  การสั่นช่วงนี้เกิด C=O จากปฏิกิริยาคาร์บอนในตัวอย่าง [36, 51] ที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง  $900\text{--}1050\text{ cm}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่าสามารถเกิดจีโอพอลิเมอร์ได้จริง เพราะการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการที่คลื่นขยับต่ำลงมากกว่าพัน จากที่เมื่อเทียบกับแถบดูดกลืนไม่พบเลขคลื่นในช่วงนี้ ซึ่งการสั่นของ Si-O-T จุดนี้เป็นบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่ว่าจะผสมสารกระตุ้นอัลคาไลปริมาณน้อยหรือมากก็สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างพัฒนาเพิ่มขึ้นได้ [51, 52]

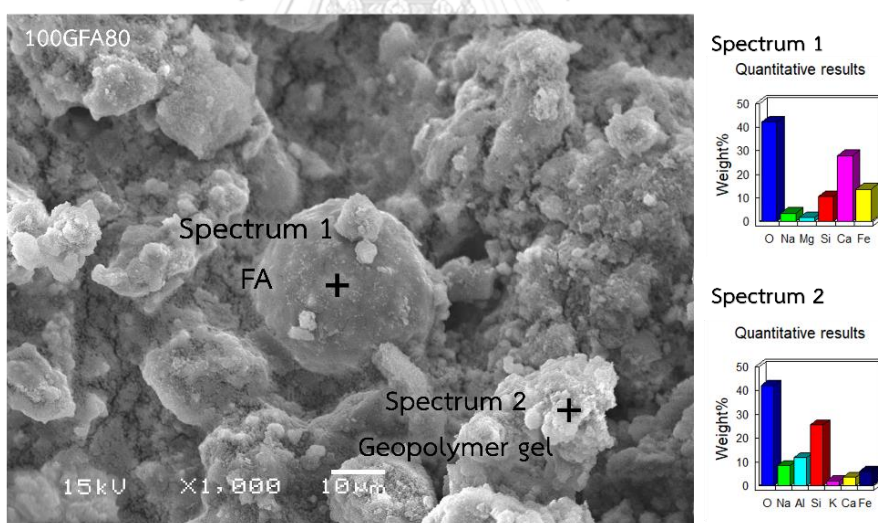


รูปที่ 6.5 องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์

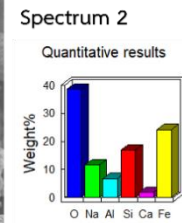
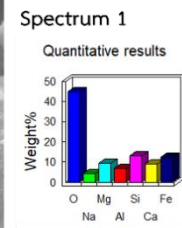
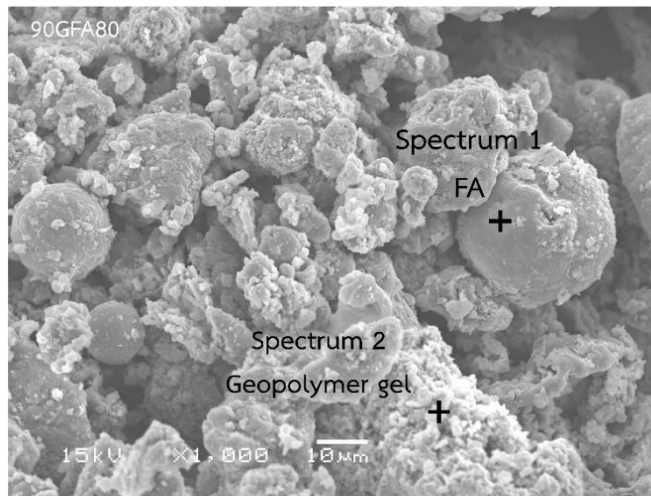
### 6.2.5 สัณฐานวิทยา และปริมาณธาตุของสารเชื่อมประสาน

สัณฐานวิทยาวิเคราะห์ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การทดสอบทำโดยใช้สารเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ โดยไม่มีส่วนผสมของทรายของเสีย รูปที่ 6.6 เพื่อสังเกตโครงสร้างของเนื้อวัสดุประสาน แสดงให้เห็นเนื้อวัสดุประสานที่มีเจลจีโอพอลิเมอร์เกิดขึ้นบริเวณผิวอนุภาคเถ้าลอย ที่ทำหน้าที่คล้ายกาวเชื่อมประสานอนุภาคของเถ้าลอยเข้าด้วยกัน

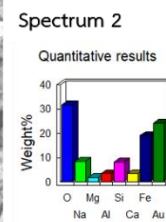
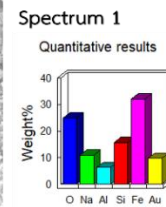
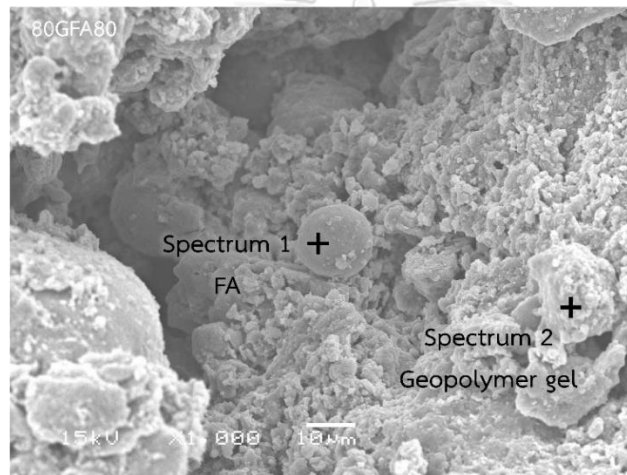
จากวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) ดังรูปที่ 6.6 พบว่าเนื้อของสารเชื่อมประสานบล็อกจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยอะตอม Si Al O Na และ Ca ซึ่งคาดว่าเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมไรเซชัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าเกิดเจล C-(N)-A-S-H บนผิวของเถ้าลอย และการพบของอะตอม Fe และ Mg ปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมในวัตถุดิบของเถ้าลอยพบปริมาณเหล็กที่สูง อาจในเถ้าลอยมีการพบแมกนีเซียมบางเล็กน้อย



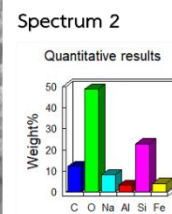
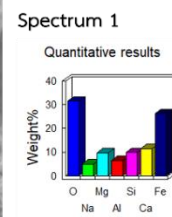
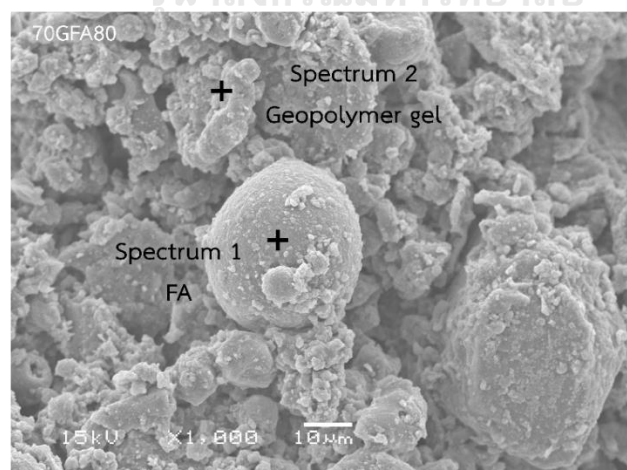
ก. 100GFA80



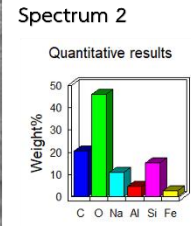
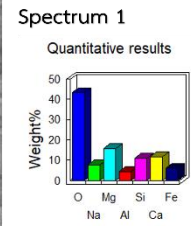
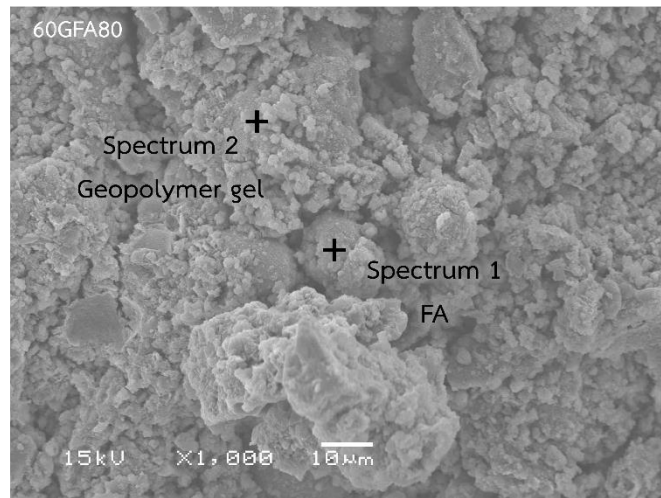
จ. 90GFA80



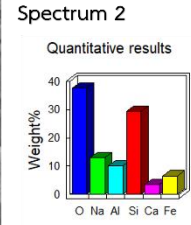
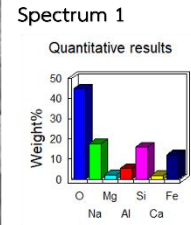
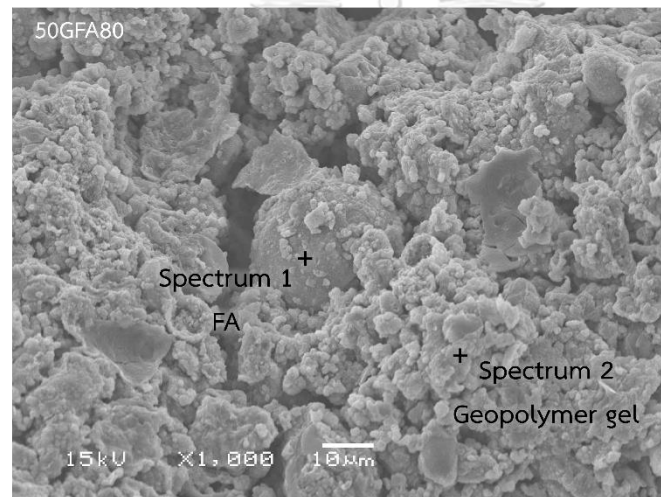
ค. 80GFA80



ง. 70GFA80



จ. 60GFA80



จ. 50GFA80

รูปที่ 6.6 สัณฐานวิทยาของสารเชื่อมประสานบดกึ่งโพลีเมอร์

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากการทดลองเตรียมบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากเถ้าลอย ทราายละเอียด และทรายหยาบ ที่ได้จากการบดการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบตในกระบวนการอบแห้งของการผลิตกระดาษ นำไปอัดขึ้นรูปหลังจากวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) ในการศึกษาผลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้ได้สมบัติเป็นไปตาม มอก.827-2531 คือเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุตั้งแต่ 7 วัน และที่อายุการบ่ม ตั้งแต่ 28 วัน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การมีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบในส่วนผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่าง และการขยายตัวเชิงเส้นของตัวอย่างลดลง
- 2) ในการศึกษาผลของอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน โดยเลือกสูตรที่ดีที่สุด 2 สูตร จากหัวข้อ 7.1.1 พบว่าอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสานกับ 1.00 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมแก่การผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่สมบัติเป็นไปตาม มอก.827-2531

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 7.2 บล็อกจีโอพอลิเมอร์

จากการทดลองเตรียมบล็อกจีโอพอลิเมอร์ จากเถ้าลอย ทราายละเอียด และทรายหยาบ ที่ได้จากการบดการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบตในกระบวนการอบแห้งของการผลิตกระดาษ นำไปอัดขึ้นรูปหลังจากวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่าง ๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) ในการศึกษาผลของเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล พบว่าปริมาณเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไลร้อยละ 80:20 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบล็อกจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 28 วัน เพื่อให้ได้สมบัติตาม มอก.58-2560 บล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

- 2) ในการศึกษาผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นอัลคาไล พบว่าอัตราส่วนของโซเดียมเมตะซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 60:40 และใช้เถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไลร้อยละ 80:20 เป็นอัตราส่วนที่ให้สมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในการขึ้นรูปตัวอย่าง บล็อกจีโอพอลิเมอร์ เพื่อเป็นไปตาม มอก.58-2560 บล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก

### 7.3 ข้อเสนอแนะ

#### 7.3.1 บล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- 1) เปลี่ยนวัตถุดิบบางชนิดเพื่อให้ได้บล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีสมบัติเหมาะสมมากขึ้น โดยเฉพาะมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสม
- 2) การปรับอัตราส่วนของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดในส่วนผสม เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดที่เหมาะสมมากขึ้นในการผลิตบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

#### 7.3.2 บล็อกจีโอพอลิเมอร์

- 1) การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ตัวอย่างมีสมบัติที่เหมาะสมมากขึ้น
- 2) การปรับอัตราส่วนของน้ำให้เพิ่มขึ้นและการนำสารผสมเพิ่มมาใช้ เช่น สารลดน้ำ เพื่อให้ได้บล็อกจีโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น
- 3) การปรับอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อมวลรวม และการเปลี่ยนมวลรวมที่ใช้เป็น วัตถุดิบชนิดอื่น เช่น ทรายแม่น้ำ เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีความเหมาะสมต่อการผลิต บล็อกจีโอพอลิเมอร์มากขึ้น

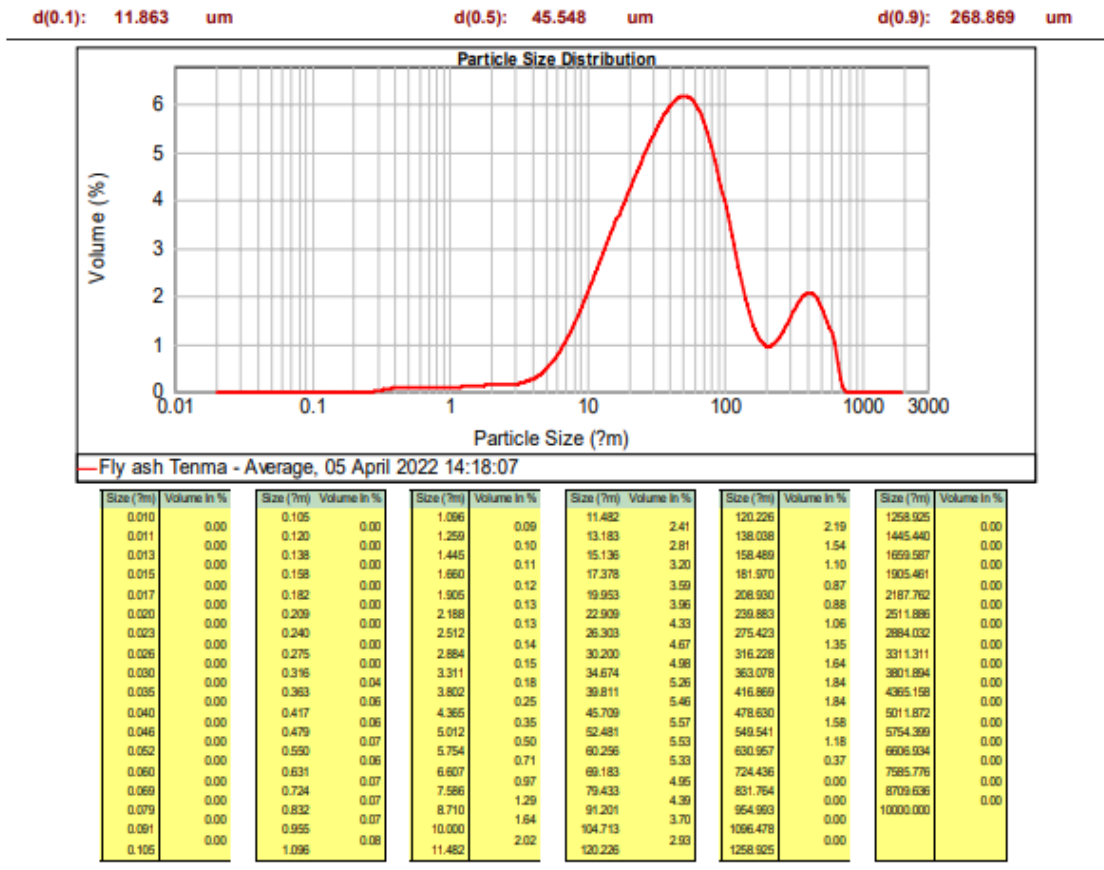


ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



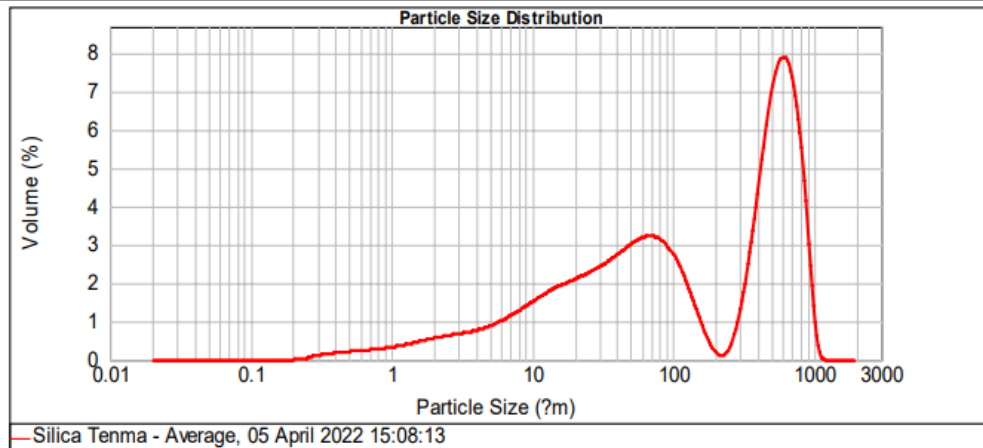
ภาคผนวก ก  
การกระจายตัวขนาดอนุภาคของวัสดุขี้เถ้า



Operator notes:

รูปที่ ก.1 การกระจายตัวขนาดของเถ้าลอย

d(0.1): 6.714 um d(0.5): 94.957 um d(0.9): 717.446 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.34	11.482	1.55	120.226	1.66	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.38	13.183	1.67	138.038	1.11	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.43	15.136	1.77	158.489	0.59	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.47	17.378	1.86	181.970	0.21	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.51	19.953	1.95	208.930	0.10	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.55	22.909	2.04	239.883	0.35	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.58	26.303	2.15	275.423	1.05	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.04	2.884	0.62	30.200	2.26	316.228	2.19	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.10	3.311	0.66	34.674	2.40	363.078	3.64	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.16	3.802	0.71	39.811	2.55	416.869	5.18	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.18	4.365	0.77	45.709	2.70	478.630	6.47	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.20	5.012	0.84	52.481	2.83	549.541	7.13	5754.369	0.00
0.052	0.00	0.550	0.22	5.754	0.94	60.256	2.91	630.957	6.85	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.23	6.607	1.05	69.183	2.91	724.436	5.55	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.25	7.586	1.17	79.433	2.80	831.764	3.28	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.27	8.710	1.30	91.201	2.55	954.993	0.72	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.27	10.000	1.43	104.713	2.16	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.30	11.482	1.43	120.226	2.16	1258.925	0.00		

Operator notes:

รูปที่ ก.2 การกระจายตัวของทรายละเอียด

**ภาคผนวก ข**  
**บล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์**

ตารางที่ ข.1 กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามอัตราส่วนเถ้า  
ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสูตร	กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (MPa)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.00CFA0	40.3 ± 0.97	54.7 ± 0.98	64.0 ± 0.80
1.00CFA10	31.2 ± 0.96	51.2 ± 0.92	64.1 ± 0.98
1.00CFA15	28.6 ± 0.87	43.5 ± 0.75	56.4 ± 0.76
1.00CFA20	30.4 ± 0.89	41.5 ± 0.78	43.5 ± 0.73
1.00CFA30	23.4 ± 0.96	25.0 ± 0.94	34.0 ± 0.78

ตารางที่ ข.2 การขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามอัตราส่วน  
เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อสูตร	การขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (%)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.00CFA0	1.29 ± 0.06	1.23 ± 0.06	1.22 ± 0.07
1.00CFA10	1.20 ± 0.08	1.19 ± 0.07	1.19 ± 0.06
1.00CFA15	1.12 ± 0.06	1.06 ± 0.06	1.00 ± 0.05
1.00CFA20	1.11 ± 0.07	1.03 ± 0.02	0.99 ± 0.04
1.00CFA30	1.01 ± 0.06	0.96 ± 0.06	0.95 ± 0.07

ตารางที่ ข.3 ความหนาแน่นมวลรวมของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสูตร	ความหนาแน่นมวลรวมของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (g/cm <sup>3</sup> )		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.00CFA0	2.22 ± 0.01	2.21 ± 0.01	2.23 ± 0.01
1.00CFA10	2.15 ± 0.01	2.17 ± 0.02	2.22 ± 0.01
1.00CFA15	2.12 ± 0.01	2.15 ± 0.01	2.20 ± 0.01
1.00CFA20	2.11 ± 0.01	2.11 ± 0.01	2.17 ± 0.01
1.00CFA30	2.05 ± 0.02	2.14 ± 0.01	2.14 ± 0.01

ตารางที่ ข.4 กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน

ชื่อสูตร	กำลังรับแรงอัดของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (MPa)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.00CFA10	31.2 ± 0.96	51.2 ± 0.92	64.1 ± 0.80
1.25CFA10	29.4 ± 0.91	43.7 ± 0.94	49.4 ± 0.99
1.50CFA10	19.5 ± 0.96	31.3 ± 0.96	32.3 ± 0.82
1.00CFA15	28.6 ± 0.87	43.5 ± 0.75	56.4 ± 0.76
1.25CFA15	22.9 ± 0.88	36.3 ± 0.98	41.4 ± 0.92
1.50CFA15	16.6 ± 0.75	23.5 ± 0.96	27.6 ± 0.95

ตารางที่ ข.5 การเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวเชิงเส้น ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุ  
ประสาน

ชื่อสูตร	การขยายตัวเชิงเส้นของบล็อกพื้นฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (%)		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.00CFA10	1.29 ± 0.08	1.19 ± 0.07	1.22 ± 0.06
1.25CFA10	1.20 ± 0.13	1.18 ± 0.04	1.07 ± 0.07
1.50CFA10	1.05 ± 0.09	1.00 ± 0.06	0.98 ± 0.10
1.00CFA15	1.18 ± 0.10	1.09 ± 0.10	1.05 ± 0.03
1.25CFA15	1.03 ± 0.10	1.01 ± 0.10	0.97 ± 0.05
1.50CFA15	0.99 ± 0.06	1.03 ± 0.08	0.96 ± 0.09

ตารางที่ ข.6 ความหนาแน่นมวลรวม ตามอัตราส่วนทรายของเสียต่อวัสดุประสาน

ชื่อสูตร	ความหนาแน่นมวลรวมของบล็อกคอนกรีตฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (g/cm <sup>3</sup> )		
	1 วัน	7 วัน	28 วัน
1.00CFA10	2.15 ± 0.01	2.17 ± 0.02	2.22 ± 0.02
1.25CFA10	2.14 ± 0.01	2.17 ± 0.01	2.18 ± 0.01
1.50CFA10	2.07 ± 0.01	2.09 ± 0.02	2.15 ± 0.01
1.00CFA15	2.12 ± 0.02	2.14 ± 0.02	2.20 ± 0.01
1.25CFA15	2.09 ± 0.02	2.10 ± 0.02	2.19 ± 0.01
1.50CFA15	2.05 ± 0.01	2.03 ± 0.02	2.15 ± 0.02

**ภาคผนวก ค**  
**จีโอพอลิเมอร์บล็อก**

ตารางที่ ค.1 กำลังรับแรงอัดของบล็อกจีโอพอลิเมอร์ตามอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสาร  
กระตุ้นอัลคาไล

ชื่อสูตร	กำลังรับแรงอัดชิ้นงานบล็อกจีโอพอลิเมอร์ (MPa)	
	7 วัน	28 วัน
GFA95	3.16 ± 0.11	3.43 ± 0.08
GFA90	1.58 ± 0.16	3.46 ± 0.11
GFA85	0.30 ± 0.04	2.75 ± 0.12
GFA80	2.98 ± 0.07	5.45 ± 0.03

ตารางที่ ค.2 ความหนาแน่นชิ้นงานคอนกรีต กรณีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไล

ชื่อสูตร	ความหนาแน่นมวลรวมของบล็อกจีโอพอลิเมอร์ (g/cm <sup>3</sup> )	
	7 วัน	28 วัน
60GFA95	1.91 ± 0.01	± 0.01
60GFA90	2.01 ± 0.01	1.99 ± 0.01
60GFA85	2.03 ± 0.01	1.882.02 ± 0.01
60GFA80	2.05 ± 0.01	1.892.03 ± 0.01

ตารางที่ ค.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกจีโอฟอลิเมอร์ กรณีศึกษาอัตราส่วนของ สารกระตุ้นอัลคาไล

ชื่อสูตร	กำลังรับแรงอัดขึ้นงานบล็อกรจีโอฟอลิเมอร์ (MPa)	
	7 วัน	28 วัน
100GFA80	4.08 ± 0.06	4.45 ± 0.06
90GFA80	4.21 ± 0.04	4.38 ± 0.06
80GFA80	0.84 ± 0.06	1.66 ± 0.11
70GFA80	0.82 ± 0.06	1.28 ± 0.03
60GFA80	2.98 ± 0.07	5.45 ± 0.06
50GFA80	1.45 ± 0.01	2.03 ± 0.15

ตารางที่ ค.4 ความหนาแน่นขึ้นงานบล็อกรจีโอฟอลิเมอร์ กรณีศึกษาอัตราส่วนของ สารกระตุ้นอัลคาไล

ชื่อสูตร	ความหนาแน่นมวลรวมของบล็อกรจีโอฟอลิเมอร์ (g/cm <sup>3</sup> )	
	7 วัน	28 วัน
100GFA80	2.01 ± 0.01	2.00 ± 0.01
90GFA80	2.03 ± 0.01	2.03 ± 0.01
80GFA80	1.93 ± 0.01	1.93 ± 0.01
70GFA80	1.96 ± 0.01	1.96 ± 0.01
60GFA80	2.05 ± 0.01	2.03 ± 0.01
50GFA80	2.06 ± 0.01	2.05 ± 0.01

## บรรณานุกรม

- [1] S. Oka, *Fluidized bed combustion*. CRC press, 2003.
- [2] ป. จินดาประเสริฐ, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2561.
- [3] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, and S. Chutubtim, "A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials," *Cement and concrete composites*, vol. 23, no. 4-5, pp. 335-343, 2001.
- [4] *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*, A. ASTM C618, 2019.
- [5] F. Koksall, O. Gencel, Y. Sahin, and O. Okur, "Recycling bottom ash in production of eco-friendly interlocking concrete paving blocks," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 23, pp. 985-1001, 2021.
- [6] A. C. Institute, "Cement and concrete terminology," 2000: American Concrete Institute.
- [7] A. Oner, S. Akyuz, and R. Yildiz, "An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1165-1171, 2005.
- [8] D. A. Kuchma, S. Wei, D. H. Sanders, A. Belarbi, and L. C. Novak, "Development of the One-Way Shear Design Provisions of ACI 318-19 for Reinforced Concrete," *ACI Structural Journal*, vol. 116, no. 4, pp. 285-296, 2019.
- [9] Y.-M. Liew, C.-Y. Heah, and H. Kamarudin, "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review," *Progress in Materials Science*, vol. 83, pp. 595-629, 2016.
- [10] อ. รัตน์ศักดิ์, วัสดุจีโอพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2560.
- [11] J. Davidovits, "Chemistry of geopolymeric systems, terminology," in *Geopolymer*,



- 1999, vol. 99, no. 292: sn, pp. 9-39.
- [12] P. Chindaprasirt, S. Thaiwitcharoen, S. Kaewpirom, and U. Rattanasak, "Controlling ettringite formation in FBC fly ash geopolymer concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 41, pp. 24-28, 2013.
- [13] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste management*, vol. 29, no. 2, pp. 539-543, 2009.
- [14] J. Wongpa, K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete," *Materials & Design*, vol. 31, no. 10, pp. 4748-4754, 2010.
- [15] Q. Zhao, C. Ma, B. Huang, and X. Lu, "Development of alkali activated cementitious material from sewage sludge ash: Two-part and one-part geopolymer," *Journal of Cleaner Production*, vol. 384, p. 135547, 2023.
- [16] T. Uygunoğlu, I. B. Topcu, O. Gencil, and W. Brostow, "The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs)," *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 180-187, 2012.
- [17] T. R. Naik, R. N. Kraus, Y.-m. Chun, B. W. Ramme, and S. S. Singh, "Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 400-407, 2003.
- [18] B. S. Mohammed, S. Haruna, M. Wahab, M. Liew, and A. Haruna, "Mechanical and microstructural properties of high calcium fly ash one-part geopolymer cement made with granular activator," *Heliyon*, vol. 5, no. 9, p. e02255, 2019.
- [19] A. Hajimohammadi, T. Ngo, and A. Kashani, "Sustainable one-part geopolymer foams with glass fines versus sand as aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp. 223-231, 2018.
- [20] S. Prasanphan, A. Wannagon, T. Kobayashi, and S. Jiemsirilers, "Reaction mechanisms of calcined kaolin processing waste-based geopolymers in the

- presence of low alkali activator solution," *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp. 409-420, 2019.
- [21] J. Xu, Y. Zhou, Q. Chang, and H. Qu, "Study on the factors of affecting the immobilization of heavy metals in fly ash-based geopolymers," *Materials letters*, vol. 60, no. 6, pp. 820-822, 2006.
- [22] *Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland-cement concrete*, A. C311, West Conshohocken, 2002.
- [23] P. Suraneni, L. Burris, C. R. Shearer, and R. D. Hooton, "ASTM C618 fly ash specification: Comparison with other specifications, shortcomings, and solutions," *ACI Mater. J.*, vol. 118, no. 10.14359, p. 51725994, 2021.
- [24] A. C. C. M.-. 2002, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)* (Annual Book of ASTM Standards). United States, 2002.
- [25] Y. L. Galiano, C. F. Pereira, and J. Vale, "Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers," *Journal of hazardous materials*, vol. 185, no. 1, pp. 373-381, 2011.
- [26] E. S. Berney and D. M. Smith, "Mechanical and physical properties of ASTM C33 Sand," 2008.
- [27] ASTM C188-09, 2009.
- [28] *Testing Aggregates–Part 110: Methods for Determination of Aggregate Crushing Value (ACV)*, BS812-110, 1990.
- [29] P. Chindapasirt, T. Chiyasena, and V. Sirivivatnanon, "High Strength concrete containing fly ash and black boiler rice husk ash," in *Proceedings of the 4th Symposium on Infrastructure*, 2003, pp. 363-368.
- [30] V. Malhotra and A. Ramezani-pour, "Fly Ash in Concrete, Canada Centre for Mineral and Energy Technology," *Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario*, 1994.

- [31] J. Prashanth, P. Sivapullaiah, and A. Sridharan, "Pozzolanic fly ash as a hydraulic barrier in land fills," *Engineering Geology*, vol. 60, no. 1-4, pp. 245-252, 2001.
- [32] Q. Zeng, K. Li, T. Fen-chong, and P. Dangla, "Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes," *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 560-569, 2012.
- [33] R. Lane and J. Best, "Properties and use of fly ash in Portland cement concrete," *Concr. Int.: Des. Constr.:(United States)*, vol. 4, no. 7, 1982.
- [34] C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, and T. Kunchong, "Strength activity index of single size fly ash mixed with Portland cement type I and type III," in *Proceedings of the 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 1999.
- [35] J. L. Dalton, K. H. Gardner, T. P. Seager, M. L. Weimer, J. C. Spear, and B. J. Magee, "Properties of Portland cement made from contaminated sediments," *Resources, conservation and recycling*, vol. 41, no. 3, pp. 227-241, 2004.
- [36] X. Guo, H. Shi, and W. A. Dick, "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer," *Cement and concrete composites*, vol. 32, no. 2, pp. 142-147, 2010.
- [37] A. Hajimohammadi and J. S. van Deventer, "Characterisation of one-part geopolymer binders made from fly ash," *Waste and biomass valorization*, vol. 8, pp. 225-233, 2017.
- [38] O. Shee-Ween *et al.*, "Cold-pressed fly ash geopolymers: Effect of formulation on mechanical and morphological characteristics," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 3028-3046, 2021.
- [39] H. Xu and J. Van Deventer, "The geopolymerisation of natural alumino-silicates," in *Proc. 2nd Internat. Conf. Geopolymere*, 1999, vol. 99, pp. 43-63.
- [40] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, and P. Chindapasirt, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature," *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2118-2124, 2011.

- [41] J. Zhang, C. Shi, and Z. Zhang, "Effect of Na<sub>2</sub>O concentration and water/binder ratio on carbonation of alkali-activated slag/fly ash cements," *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121258, 2021.
- [42] M. Inada, H. Tsujimoto, Y. Eguchi, N. Enomoto, and J. Hojo, "Microwave-assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process," *Fuel*, vol. 84, no. 12-13, pp. 1482-1486, 2005.
- [43] M. Eiamwijit, K. Pachana, S. Kaewpirom, U. Rattanasak, and P. Chindapasirt, "Comparative study on morphology of ground sub-bituminous FBC fly ash geopolymeric material," *Advanced Powder Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 1053-1057, 2015.
- [44] H. Ng, C. Heah, Y. Liew, and M. Abdullah, "The effect of various molarities of NaOH solution on fly ash geopolymer paste," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2045, no. 1: AIP Publishing.
- [45] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, "Compressive strength and degree of reaction of biomass-and fly ash-based geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 236-240, 2010.
- [46] U. Rattanasak, P. Chindapasirt, and P. Suwanvitaya, "Development of high volume rice husk ash alumino silicate composites," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 17, pp. 654-659, 2010.
- [47] D. S. Perera, Z. Aly, E. R. Vance, and M. Mizumo, "Immobilization of Pb in a geopolymer matrix," *Journal of the American ceramic society*, vol. 88, no. 9, pp. 2586-2588, 2005.
- [48] J. Van, J. Jaarsveld, J. Van Deventer, and L. Lorenzen, "The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilize Toxic Metals: Part I. Theory and Applications," *Minerals engineering*, vol. 10, no. 7, pp. 659-669, 1997.
- [49] U. Rattanasak and P. Chindapasirt, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer," *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 12, pp. 1073-1078, 2009.
- [50] C. A. Rees, J. L. Provis, G. C. Lukey, and J. S. Van Deventer, "In situ ATR-FTIR study

of the early stages of fly ash geopolymer gel formation," *Langmuir*, vol. 23, no. 17, pp. 9076-9082, 2007.

[51] J. Payne, J. Gautron, J. Doudeau, E. Joussein, and S. Rossignol, "Influence of calcium addition on calcined brick clay based geopolymers: A thermal and FTIR spectroscopy study," *Construction and building materials*, vol. 152, pp. 794-803, 2017.

[52] J. L. Bishop and E. Murad, "Characterization of minerals and biogeochemical markers on Mars: A Raman and IR spectroscopic study of montmorillonite," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 35, no. 6, pp. 480-486, 2004.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวรรณ ดวงแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	4 สิงหาคม 2541
สถานที่เกิด	จังหวัดสมุทรสาคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาวัสดุศาสตร์ แขนงเซรามิกและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปี 2564
ที่อยู่ปัจจุบัน	1/18 ถ.ธรรมคุณากร ต.โคกกราก อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Recycling of Fluidized Bed Combustion Fly Ash and Sand for Concrete Blocks Fabrication" ในการประชุมทางวิชาการ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics (ICTA2023) ระหว่างวันที่ 30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม พ.ศ. 2565 ได้รับ การตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding  ผศ.ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์ และ น.ส. ณัฐวรรณ ดวงแก้ว “การพัฒนาเครื่องผลิตอิฐดินเผาก่อสร้างเพื่อเพิ่มผลผลิตภาพของ วิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำโขง-ชี-มูล” ในวารสารเซรามิกส์ ฉบับที่ 55 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2565
รางวัลที่ได้รับ	ได้รางวัล Excellent presentation จากการนำเสนอผลงานทางวิชาการ ระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Recycling of Fluidized Bed Combustion Fly Ash and Sand for Concrete Blocks Fabrication" ในการประชุมทางวิชาการ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics (ICTA2023)