

ผลของซิลิกาฟุ้งและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ต่อสมบัติทางกายภาพของ
ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of Silica Fume and Calcium Silicate Hydrate/Polycarboxylate Ether(CSH/PCE) on
Properties of Fly Ash Cement Blend



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของซิลิกาฟุ่มและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซีเลทอิมัลชันต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย
โดย	นายกฤตภาส สุวรรณมณี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์)

กฤตภาส สุวรรณมณี : ผลของซิลิกาฟุ้งและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย. (Effect of Silica Fume and Calcium Silicate Hydrate/Polycarboxylate Ether(CSH/PCE) on Properties of Fly Ash Cement Blend) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.มนัสกร ราชากรกิจ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เถ้าลอยร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์และซิลิกาฟุ้งผสมทดแทนปูนซีเมนต์ โดยเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากห้ำโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ประเทศญี่ปุ่น นำมาคัดขนาดอนุภาคคือ น้อยกว่า 45 μm ระหว่าง 45 – 75 μm และ 75 – 150 μm โดยงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลองคือ การศึกษาผลของเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาคต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และ การศึกษาปริมาณการใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์และซิลิกาฟุ้งร่วมกับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสม โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพเพื่อนำมอร์ตาร์ผสมไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ระยะเวลาก่อตัว การไหลแผ่ กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าลอยชนิด FA1 ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm ทดแทนปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ธรรมดาที่สุดในช่วงอายุ 28 วัน แต่มีความแข็งแรงที่ช่วงอายุต้นต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา นอกจากนี้การใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ทำให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงช่วงต้นใกล้เคียงมอร์ตาร์ธรรมดามากที่สุด และการใช้ซิลิกาฟุ้งปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัดในช่วงต้นที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ธรรมดา และในช่วงอายุปลายพบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและซิลิกาฟุ้งมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 66.02 MPa ดังนั้นทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์และซิลิกาฟุ้งมีความเหมาะสมที่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดช่วงต้นและพัฒนาสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยให้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาได้เพื่อให้สามารถนำปูนซีเมนต์ผสมไปใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปได้

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270007321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: fly ash, silica fume, calcium silicate hydrate/polycarboxylate ether,
compressive strength

Krittaphat Suwanmanee : Effect of Silica Fume and Calcium Silicate Hydrate/Polycarboxylate Ether(CSH/PCE) on Properties of Fly Ash Cement Blend. Advisor: Assoc. Prof. MANASKORN RACHAKARAKIJ

This research investigated fly ash with calcium silicate hydrate/polycarboxylate ether(CSH/PCE) and silica fume replacement in ordinary Portland cement. Fly ash in this research was received from Japan coal power plant with three particle size, <math><45 \mu\text{m}</math>, $45-75 \mu\text{m}$ and $75-150 \mu\text{m}$. The experiment was divided into 2 parts, which are the study of effect of fly ash from different origin sites and particle size, and the utilization of CSH/PCE and silica fume mixed with fly ash cement blend to investigate the physical properties of blended cement which are setting time, flow value, flexural and compressive strength. The results were found that flow value, flexural and compressive strength at 28 days of curing were nearly to control by using fly ash FA1, particle size <math><45 \mu\text{m}</math> with 10% replacement, but early age strength was reduced lesser than control. Moreover, using of 1%weight CSH/PCE has early age strength nearest to control mortar. Furthermore, the utilization of silica fume was found to increase the early age strength nearly to control, when silica fume was used at 5%weight, the later age strength was found to increase up to 66.02 MPa. Thereby, the utilization of CSH/PCE and silica fume with fly ash cement blend can leading to an improve the physical properties of fly ash cement blend to be similarly to ordinary Portland cement and can be used in construction.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2021 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ที่มีความกรุณาให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ในหัวข้อนี้ อีกทั้งยังกรุณาให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัยอย่างละเอียด และกรุณาช่วยตรวจทานและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ และศาสตราจารย์ ดร. ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังให้คำชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัย ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีความกรุณาให้คำปรึกษา เอื้อเฟื้อสถานที่ และให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือรวมทั้งบริการงานทดสอบที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท มิตรชุบิชิแมททีเรียล ที่กรุณาเอื้อเฟื้อทั้งอุปกรณ์ วัสดุและค่าใช้จ่ายสำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล อีกทั้งยังให้คำแนะนำที่ดีตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รอบครัว และเพื่อนของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนในด้านการศึกษากำลังทรัพย์ และคำปรึกษาตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัยฉบับนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กฤตภาส สุวรรณมณี

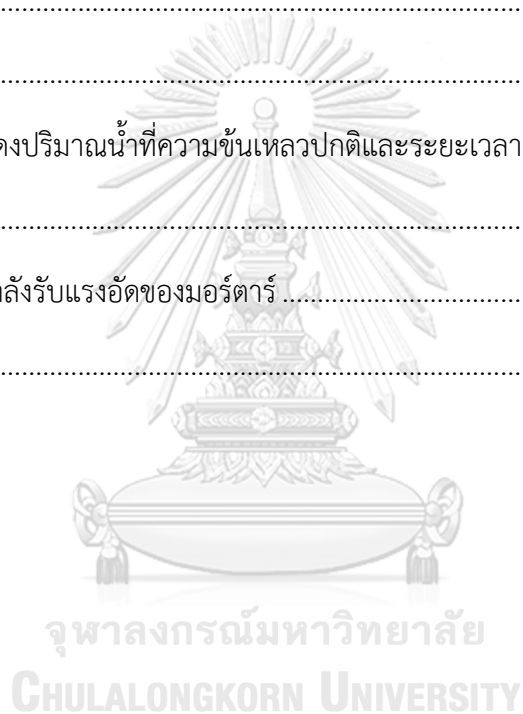
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	1
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2.....	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การผลิตปูนซีเมนต์.....	5
2.2 สมบัติทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.2.1 C ₃ S – Alite.....	7
2.2.2 C ₂ S – Belite.....	7
2.2.3 C ₃ A – Tricalcium aluminate.....	8
2.2.4 C ₄ AF – Tetracalcium aluminoferrite.....	9

2.3 ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	10
2.4 ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์.....	13
2.5 เถ้าลอย (Fly ash)	15
2.5.3 ประเภทของเถ้าลอย.....	16
2.6 ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume).....	17
2.6.1 สมบัติทางกายภาพ	18
2.6.2 สมบัติทางเคมี.....	18
2.6.3 ผลของซิลิกาฟุ้งต่อปฏิกริยาไฮเดรชัน	19
2.7 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ (CSH/PCE)	19
2.8 การประเมินคุณภาพปูนซีเมนต์	20
2.8.1 ระยะเวลาการก่อตัว(Setting time)	20
2.8.2 ความสามารถในการไหล(Workability)	21
2.8.3 กำลังรับแรงอัด(Compressive strength).....	21
2.8.4 กำลังรับแรงดัด(Flexural strength)	22
2.9 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3	28
แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	28
3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	28
3.1.2 เถ้าลอย	28
3.1.3 ซิลิกาฟุ้ง.....	28
3.1.4 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ (CSH/PCE).....	28
3.1.5 ทราชมมาตรฐาน.....	29
3.1.6 น้ำกลั่น	29

3.2 การดำเนินการวิจัย.....	29
3.2.1 การเตรียมวัสดุดิบ.....	31
3.2.2 อัตราส่วนผสมของการทดลอง	31
3.2.3 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (Setting time).....	34
3.2.4 การเตรียมมอร์ตาร์	36
3.2.5 การทดสอบการไหลแผ่.....	37
3.2.6 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength).....	39
3.2.7 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural strength).....	40
บทที่ 4	42
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	42
4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	42
4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี.....	42
4.2 การทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค	43
4.2.1 ระยะเวลาการก่อตัว	43
4.2.2 ความสามารถในการไหลแผ่.....	45
4.2.3 กำลังรับแรงอัด	47
4.2.4 กำลังรับแรงดัด	52
4.3 การทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยCSH/PCE และซิลิกาฟูม	57
4.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์	57
4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัว	58
4.3.3 ความสามารถในการไหลแผ่.....	61
4.3.4 กำลังรับแรงอัด	63
4.3.5 กำลังรับแรงดัด	66
บทที่ 5	70

สรุปผลการวิจัย	70
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.1.1 สรุปผลการทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค	70
5.1.2 สรุปผลการทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยCSH/PCE และซิลิกาฟูม	70
5.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	71
5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม	71
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก ก.....	78
ตารางและรูปภาพแสดงปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัว	78
ภาคผนวก ข.....	93
กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์	93
ประวัติผู้เขียน.....	100



สารบัญรูปภาพ

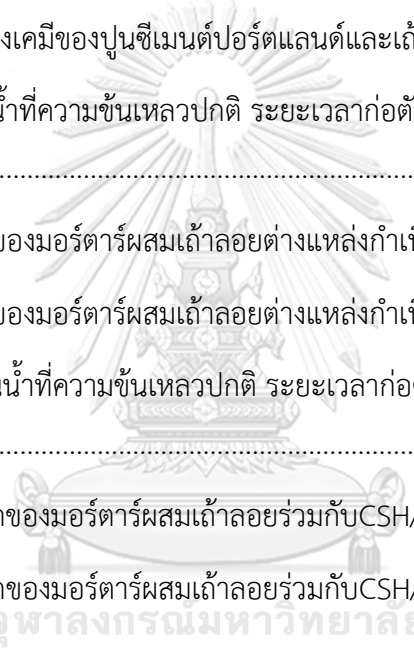
	หน้า
รูปที่ 1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....	5
รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของC ₃ S.....	7
รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของC ₂ S.....	8
รูปที่ 4 โครงสร้างผลึกของC ₃ A	9
รูปที่ 5 โครงสร้างผลึกของC ₄ AF	9
รูปที่ 6 ลักษณะรูพรุนในแคลเซียมซิลิเกตของระยะที่แตกต่างกันของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	11
รูปที่ 7 อัตราการพัฒนาความร้อนระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	12
รูปที่ 8 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์และความเป็นรูพรุน.....	13
รูปที่ 9 ความแข็งแรงของคอนกรีตต่ออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์	14
รูปที่ 10 แก้วลอย	16
รูปที่ 11 ซิลิกาฟูม	18
รูปที่ 12 การดำเนินการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โพลีคาร์บอกซีเลทอีเทอร์	29
รูปที่ 13 แผนการทดลองโดยรวมของงานวิจัย	30
รูปที่ 14 เครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์.....	31
รูปที่ 15 เข็มของไวแคต (Vicat needle).....	35
รูปที่ 16 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อมอร์ตาร์ขนาด 40x40x160 มม.	37
รูปที่ 17 โต๊ะทดสอบการไหล (Flow table).....	38
รูปที่ 18 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength testing machine).....	39
รูปที่ 19 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural strength testing machine)	40
รูปที่ 20 การจัดเรียงตำแหน่งของตัวกดและตัวรองรับของเครื่องวัดกำลังรับแรงงดัด.....	41
รูปที่ 21 กราฟค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA1, 2 และ 3	45
รูปที่ 22 กราฟค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA4 และ 5.....	46

รูปที่ 23 กราฟร้อยละค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA1, 2 และ 3	46
รูปที่ 24 กราฟร้อยละค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA4 และ 5.....	47
รูปที่ 25 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA1	49
รูปที่ 26 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA2	50
รูปที่ 27 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA3	51
รูปที่ 28 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA4	51
รูปที่ 29 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA5	52
รูปที่ 30 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA1	54
รูปที่ 31 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA2	54
รูปที่ 32 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA3	55
รูปที่ 33 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA4	55
รูปที่ 34 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA5	56
รูปที่ 35 การสังเคราะห์สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์	57
รูปที่ 36 ตะกอนสีขาวหลังจากการปั่นเหวี่ยง.....	58
รูปที่ 37 ผงแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์หลังฟริชดราย.....	58
รูปที่ 38 กราฟค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA1ร่วมกับCSH/PCEที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยน้ำหนัก.....	61
รูปที่ 39 กราฟค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA1ร่วมกับซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนร้อยละ 2.5, 5.0 และ 10.0 โดยน้ำหนัก	62
รูปที่ 40 กราฟร้อยละค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยชนิดFA1ร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ่ม	63
รูปที่ 41 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยและCSH/PCE	65
รูปที่ 42 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยและซิลิกาฟุ่ม.....	65
รูปที่ 43 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยและCSH/PCE.....	67
รูปที่ 44 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยและซิลิกาฟุ่ม.....	68

รูปที่ ก. 1 กราฟปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ.....	79
รูปที่ ก. 2 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุม	79



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สมบัติไฮดรเจนของส่วนประกอบในปูนซีเมนต์.....	10
ตารางที่ 2 ข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618-12a.....	17
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม.....	19
ตารางที่ 4 อัตราส่วนของส่วนผสมในการทดลองที่ 1.....	32
ตารางที่ 5 อัตราส่วนของส่วนผสมในการทดลองที่ 2.....	33
ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย.....	42
ตารางที่ 7 ร้อยละปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายของซีเมนต์ เพสต์ผสมเถ้าลอย.....	44
ตารางที่ 8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค.....	48
ตารางที่ 9 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค.....	53
ตารางที่ 10 ร้อยละปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายของซีเมนต์ เพสต์ผสม.....	59
ตารางที่ 11 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟูม.....	64
ตารางที่ 12 กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟูม.....	67
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY	
ตารางที่ ก. 1 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ชุดควบคุม.....	79
ตารางที่ ก. 2 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA1-F.....	80
ตารางที่ ก. 3 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA1-M.....	80
ตารางที่ ก. 4 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA1-C.....	80
ตารางที่ ก. 5 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA2-F.....	81
ตารางที่ ก. 6 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA2-M.....	81
ตารางที่ ก. 7 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA2-C.....	81
ตารางที่ ก. 8 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA3-F.....	82

ตารางที่ ก. 9 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA3-M	82
ตารางที่ ก. 10 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA3-C	82
ตารางที่ ก. 11 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA4-F	83
ตารางที่ ก. 12 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA4-M	83
ตารางที่ ก. 13 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA4-C	83
ตารางที่ ก. 14 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA5-F	84
ตารางที่ ก. 15 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA5-M	84
ตารางที่ ก. 16 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA5-C	84
ตารางที่ ก. 17 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟุ่ม .	85
ตารางที่ ก. 18 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCE	85
ตารางที่ ก. 19 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1	86
ตารางที่ ก. 20 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA2	87
ตารางที่ ก. 21 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA3	88
ตารางที่ ก. 22 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA4	89
ตารางที่ ก. 23 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA5	90
ตารางที่ ก. 24 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟุ่ม	91
ตารางที่ ก. 25 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCE	92
ตารางที่ ข. 1 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 1 และ 7 วัน	94
ตารางที่ ข. 2 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 14 และ 28 วัน	95
ตารางที่ ข. 3 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ่มที่อายุ 1 และ 7 วัน	96
ตารางที่ ข. 4 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ่มที่อายุ 14 และ 28 วัน	96
ตารางที่ ข. 5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 1 และ 7 วัน	97

ตารางที่ ข. 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 14 และ 28 วัน.....	98
ตารางที่ ข. 7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ่มที่อายุ 1 และ 7 วัน.....	99
ตารางที่ ข. 8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ่มที่อายุ 14 และ 28 วัน	99



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันงานก่อสร้างจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์จำนวนมากซึ่งส่งผลต่ออุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ให้มีความจำเป็นต้องผลิตปูนซีเมนต์มากขึ้นให้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์จำนวนมากนั้นต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติจำนวนมากเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ การเพิ่มขึ้นของวัตถุดิบตั้งต้นส่งผลให้มีต้นทุนในการก่อสร้างอย่างมาก จึงส่งผลในปัจจุบันนี้มีแนวโน้มของการผลิตปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมที่เปลี่ยนไปในทางที่ต้องการหาวัสดุทดแทนเพื่อนำมาทดแทนวัสดุเดิมที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้การใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์นั้นยังสามารถช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สอดคล้องกับแนวโน้มในปัจจุบันที่ต้องการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์

วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์นั้นมีหลายชนิด แต่ที่ได้รับความนิยมส่วนใหญ่เป็นวัสดุทดแทนที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือผลผลิตพลอย (By product) ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่มีการนำไปใช้งานต่อในกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมส่งผลให้การนำของเสียหรือผลผลิตพลอยได้ไปใช้ต่อเป็นวัสดุทดแทนนั้นทำให้อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์นั้นใช้ต้นทุนในการผลิตน้อยลง ในประเทศญี่ปุ่นปัจจุบันมีการหยุดการใช้งานพลังงานนิวเคลียร์และหันมาใช้พลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินมากขึ้นเนื่องจากเหตุผลด้านความปลอดภัยของการดำเนินการโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ส่งผลให้มีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นอย่างมากจนเกิดปัญหาในด้านการจัดการ เนื่องจากการจัดการเถ้าลอยปริมาณมากจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบมากขึ้น จึงมีความพยายามนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมเพื่อจัดการกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลผลิตพลอยได้ของการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง และมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์เพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าลอยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยากับผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับปูนซีเมนต์ได้อย่างมีนัยสำคัญในช่วงหลัง 28 วัน แต่การใส่เถ้าลอยลงไปทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ปูนซีเมนต์มีความแข็งแรงลดลงทำให้ไม่สามารถใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณที่มากส่งผลให้บางครั้งอาจมีการใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติของปูนซีเมนต์ให้ตรงกับการใช้งาน

ในการปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์นั้นบางครั้งมีการนำสารเติมแต่งมาใช้เพื่อปรับสมบัติบางส่วนของปูนซีเมนต์ให้มีสมบัติเป็นไปตามความต้องการของการใช้งาน ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) มีสมบัติ

เป็นสารเติมแต่งที่สามารถนำไปผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงความทนทานและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและมอร์ตาร์ เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการถลุงแร่เพื่อผลิตSilicon alloys และFerrosilicon alloys ทำให้มีส่วนประกอบคือซิลิกอนไดออกไซด์(SiO_2)ในปริมาณมาก และมีลักษณะเป็นผงละเอียดทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของการทำปฏิกิริยาได้

นอกจากการใส่สารเติมแต่งที่เป็นของเสียหรือผลผลิตพลอยได้เพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์ยังมีการพยายามสังเคราะห์สารเติมแต่งเพื่อปรับคุณภาพแก่ปูนซีเมนต์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความต้องการสังเคราะห์สารที่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์หรือทำปฏิกิริยาเลียนแบบปูนซีเมนต์ การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์(Calcium Silicate Hydrate/Polycarboxylate ether)เพื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์นั้นมีจุดประสงค์เพื่อต้องการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นส่งผลให้มีความแข็งแรงในช่วงต้นที่เพิ่มขึ้นและสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ได้ เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นสารประกอบที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ การทำปฏิกิริยานั้นส่งผลให้เกิดการจับตัวและพัฒนาความแข็งแรงของปูนซีเมนต์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาผลของการใช้เถ้าลอยที่มีจุดกำเนิดและขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันจากประเทศญี่ปุ่นต่อลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยทดแทนบางส่วนและอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้ซิลิกาฟูมหรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยที่ทำให้มีสมบัติทางกายภาพเหมือนการใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของการใช้สารเติมแต่งที่แตกต่างกันเพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นมากให้สามารถนำเถ้าลอยที่เป็นของเสียเหล่านี้มาใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตปูนซีเมนต์พร้อมกับการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ในระยะยาว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของการใช้เถ้าลอยที่มีจุดกำเนิดแตกต่างกันและขนาดอนุภาคของเถ้าลอยต่อลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์เมื่อนำเถ้าลอยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา
2. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้ซิลิกาฟูม และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมเถ้าลอยต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์
3. เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้เถ้าลอย ซิลิกาฟูม และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ทดแทนปูนซีเมนต์

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1. การใช้เถ้าลอยผสมทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนจะส่งผลให้ปูนซีเมนต์มีสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปโดยทำให้มีระยะเวลาก่อตัวที่นานขึ้น ความสามารถในการไหลแผ่เพิ่มมากขึ้น และมีการพัฒนาความแข็งแรงในช่วงแรกลดลงแต่มากขึ้นในช่วงหลัง 28 วัน

2. เถ้าลอยจากแต่ละแหล่งกำเนิดจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันและขนาดอนุภาคที่ละเอียดจะส่งผลได้รวดเร็วและมากกว่าเถ้าลอยขนาดที่หยาบกว่า

3. การใช้CSH/PCEและซิลิกาฟูมผสมร่วมกับเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์จะสามารถทำให้สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปกลับมาใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการทั้งหมด โดยดำเนินการที่อุณหภูมิตั้ง ๓๐ องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการทดลองดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้ในงานวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่ใช้สำหรับงานก่อสร้างทั่วไปจากปูนซีเมนต์ของประเทศญี่ปุ่นที่สามารถจัดหาได้

2. เถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอยจาก 5 แหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันในประเทศญี่ปุ่นที่มีปัญหาเถ้าลอยมากจากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า และคัดขนาดอนุภาคของเถ้าลอยให้มี 3 ช่วงขนาดตามเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม คือ น้อยกว่า 45 μm ระหว่าง 45 – 75 μm และมากกว่า 75 μm

3. มอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นทรงปริซึมสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40 x 40 x 160 มม. ที่ใช้อัตราส่วนทรายอยู่ที่สามส่วนต่อหนึ่งของปูนซีเมนต์โดยมวล และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน(Water to binder ratio)อยู่ที่ 0.55 โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนในภายหลังหากผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง

4. ทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยใช้ระยะเวลาก่อตัว(Setting time) ค่าการไหลแผ่(Flow) กำลังรับแรงอัด(Compressive strength) และกำลังรับแรงดัด(Flexural strength)

5. ระยะเวลาของมอร์ตาร์ที่ใช้สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดอยู่ที่ 1 7 14 และ 28 วัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลจากการทดลองสามารถทำให้ทราบผลของเถ้าลอยที่มีจุดกำเนิดแตกต่างกันและขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อลักษณะสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย และสามารถเลือกใช้ชนิดเถ้าลอยและขนาดอนุภาคที่เหมาะสมตามความต้องการของการใช้งานทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อเป็นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และสามารถแก้ปัญหาของเสียเถ้าลอยที่มีปริมาณมากได้

2. ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถทำให้ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถใส่ซิลิกาฟวมและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมเถ้าลอยได้โดยไม่ทำให้มีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

3. คาดการณ์ว่าการใช้ซิลิกาฟวมหรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมเถ้าลอยสามารถเพิ่มความแข็งแรงช่วงต้นได้และสามารถนำมาใช้งานโดยมีสมบัติเหมือนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

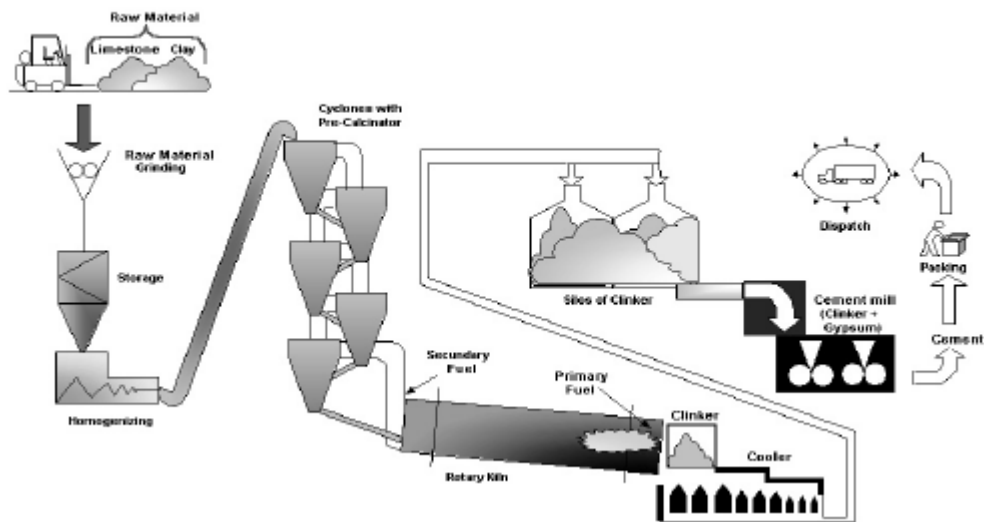


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตปูนซีเมนต์

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดมีสมบัติในการยึดจับ หากผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน(Hydration reaction)จนมีสภาพที่แข็งตัว ด้วยสมบัตินี้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคารและอื่นๆที่จำเป็นต้องอาศัยโครงสร้างที่มีความแข็งแรงทนทาน การผลิตปูนซีเมนต์อาศัยกระบวนการความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการหลอมและรวมกันกลายเป็นเม็ดปูนที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมซิลิเกต



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

(Carpio et al., 2008)

เป็นหลัก โดยรูปที่ 1 แสดงแผนภาพกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ขั้นตอนแรกเป็นการขุดนำวัตถุดิบออกมาจากเหมืองเพื่อลดขนาดด้วยเครื่องย่อย(Crusher) โดยปกติมักจะใช้เครื่องย่อยหลายประเภทร่วมกัน เช่น เครื่องย่อยชนิดใช้แรงกระแทกคือ Hammer crusher และ Impact crusher หรือเครื่องย่อยชนิดใช้แรงกดคือ Gyratory crusher และ Jaw crusher เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบไปใช้ในกระบวนการถัดไป

วัตถุดิบที่ผ่านการย่อยมาแล้วจะถูกส่งไปบดโดยใช้เครื่องบดแบบ Rotating mill หรือ Ball mill กระบวนการบดสามารถทำได้ทั้งแบบเปียกและแบบแห้งขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ต้องการใช้ หากต้องการบดแบบแห้งควรที่จะทำวัตถุดิบให้แห้งโดยผ่าน Cylindrical หรือ Rotary dryers ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการบด

การนำวัตถุดิบมาผสมทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน(Homogenization)เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญก่อนการนำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการเผาต่อไป กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันช่วยให้การเผาใหม่มีความเสถียร ควบคุมกระบวนการและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย

กระบวนการเผาปูนเป็นขั้นตอนที่ใช้ความร้อนสูงถึง 1,450 องศาเซลเซียสในเตาเผาปูนซีเมนต์ เตาเผาปูนซีเมนต์มีขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาการเผาที่ดีแต่ต้องการเชื้อเพลิงปริมาณมาก ปัจจุบันจึงมีการนำเชื้อเพลิงทดแทนมาใช้ในเตาเผาปูนซีเมนต์กันมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาที่เหมาะสมทำให้สารอินทรีย์ถูกเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากที่ถูกวัตถุดิบผ่านเตาเผาปูนซีเมนต์จะเกิดการจับตัวกลายเป็นเม็ดปูนที่มีความร้อนสูง

เครื่องทำความเย็นเป็นส่วนที่จะช่วยลดอุณหภูมิของเม็ดปูนที่ได้จากเตาเผาปูนซีเมนต์ โดยปกติมักใช้ Rotary coolers และ Grate coolers การทำให้เม็ดปูนเย็นตัวลงเพื่อให้เม็ดปูนสามารถถูกขนส่งไปจัดเก็บได้รวดเร็ว

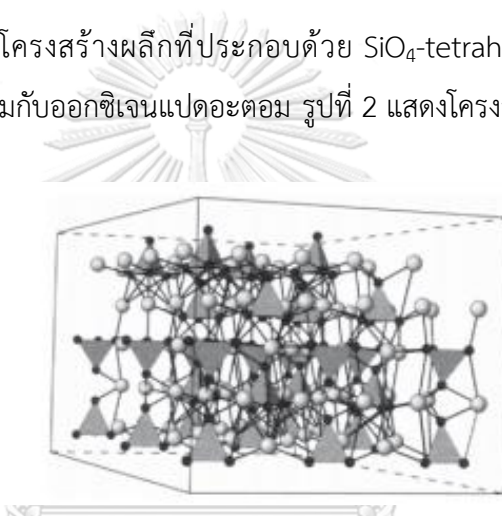
เม็ดปูนที่เย็นตัวแล้วจะถูกเก็บไว้ในที่เก็บโดยเฉพาะเพื่อวัดและควบคุมคุณภาพของเม็ดปูน เม็ดปูนที่ผ่านการตรวจสอบแล้วจะถูกผสมกับแคลเซียมซิลิเกตหรือยิปซัมแล้วนำไปบดโดยหม้อบด (ball mill) และใช้เครื่องแยกขนาดด้วยลม (air separator) ส่วนเม็ดที่มีขนาดใหญ่จะถูกส่งไปบดอีกครั้ง ซีเมนต์ที่บดละเอียดแล้วจะสามารถกรองผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช (Mesh) หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-80 ไมโครเมตร

2.2 สมบัติทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นมีส่วนประกอบที่มาจากวัตถุดิบในกระบวนการผลิต โดยปกติมีสารประกอบหลักที่พบในเม็ดปูนอยู่ 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate หรือ C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate หรือ C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate หรือ C_3A) และ เตตระแคลเซียมเฟอร์โรอะลูมิเนต (Tetracalcium ferro aluminate หรือ C_4AF) นอกจากนี้ยังพบสารประกอบรอง เช่น MgO TiO_2 Mn_2O_3 K_2O และ Na_2O ออกไซด์ของโซเดียมและโพแทสเซียมที่รู้จักกันในชื่ออัลคาไลน์เป็นตัวที่สามารถทำปฏิกิริยากับ Aggregates บางตัวแล้วส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของปูนซีเมนต์

2.2.1 C₃S – Alite

Aliteเป็นสารประกอบที่มีอัตราส่วนอยู่ประมาณ 50 – 90 เปอร์เซ็นต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 1,250 องศาเซลเซียสในเตาเผาปูนซีเมนต์นั้นทำให้เกิดการสร้างAliteขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง C₂S และ CaO ไอออนสามารถส่งผลกระทบต่อการศึกษา Aliteและการจัดเรียงตัวของโมเลกุล เช่น การมีปริมาณ SO₃ อยู่เยอะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการสร้าง Alite การรวมตัวกันของ Foreign ions กับ Alite ในรูปAlite-latticeสามารถช่วยให้เกิดความเสถียรของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลได้ แต่เสถียรภาพของC₂SและForeign ionsทำให้มีปริมาณอัลคาไลน์น้อยที่สามารถรวมตัวกันในAlite โดยปกติAliteมีลักษณะโครงสร้างยูนิทเซลล์เป็นแบบ Pseudohexagonal และมีโครงสร้างผลึกที่ประกอบด้วย SiO₄-tetrahedraที่เชื่อมกับแคลเซียมไอออนโดยที่แคลเซียมอยู่ร่วมกับบอออกซิเจนแปดอะตอม รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างผลึกของAlite



รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของC₃S

(Barnes & Bensted, 2001)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

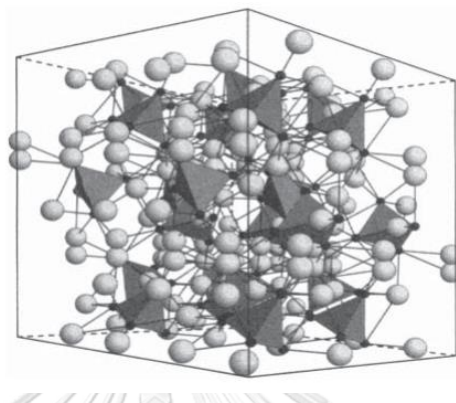
2.2.2 C₂S – Belite

Beliteเป็นสารประกอบหลังที่พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 10 – 40 เปอร์เซ็นต์ โดยปกติBeliteสามารถเปลี่ยนรูปได้หลายสถานะตามช่วงของอุณหภูมิ พบการเปลี่ยนแปลงได้เป็น β-C₂S และ γ-C₂S การเปลี่ยนแปลงสถานะทั้งสองจะเกิดโครงสร้างLamellaeคู่ขึ้นมาที่สามารถมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ได้ BeliteสามารถรวมตัวกับForeign ionsได้จำนวนมากกว่าAlite ในเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีBeliteที่มีจุดกำเนิดต่างกัน คือ

1. Beliteปฐมภูมิเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของlimeและsilicon
2. Beliteทุติยภูมิเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาสลายตัวของAliteตามสมการ C₃S → C₂S + C และการสร้างผลึกขนาดเล็กที่บริเวณขอบของผลึกAlite

3. Belite ตติยภูมิเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Recrystallization ของ Interstitial phase ที่มาจากการสลายตัวและการลดลงของ SiO_2 ในสภาวะ C_3A

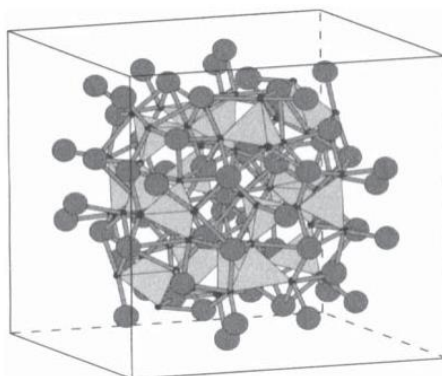
โครงสร้างผลึกของ Belite มีลักษณะเป็น Polyhedral ที่เชื่อมกับ SiO_4 -tetrahedra ที่เชื่อมต่อกัน โดยแคลเซียมดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของ C_2S
(Barnes & Bensted, 2001)

2.2.3 C_3A – Tricalcium aluminate

C_3A เป็นสารที่มีอะลูมิเนียมอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ CA เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับปูนซีเมนต์ออลูมินาสูง โครงสร้างผลึกประกอบด้วย $(\text{AlO}_4)^{5-}$ -tetrahedra ที่เชื่อมกับวงแหวน $(\text{Al}_6\text{O}_{18})^{18-}$ ที่มีไอออนของ Ca^{2+} ไอออนของ Na^+ สามารถเข้าแทนที่ไอออน Ca^{2+} ได้และไอออนของ Na^+ อีกตัวหนึ่งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงแหวน $(\text{Al}_6\text{O}_{18})^{18-}$ โครงสร้างผลึกของ C_3A เป็นแบบ Cubic lattice แต่เนื่องจากการรวมกันกับ Foreign ions ที่มีเป็นกลุ่มอัลคาไลและ SiO_2 ทำให้สมมาตรเปลี่ยนแปลงเป็นแบบ Orthorhombic และแบบ Monoclinic รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างผลึกของ C_3A



รูปที่ 4 โครงสร้างผลึกของ C_3A
(Barnes & Bensted, 2001)

2.2.4 C_4AF – Tetracalcium aluminoferrite

แคลเซียมอะลูมิเนียมเฟอร์ไรต์ (Calcium aluminum ferrite) ภายใต้สภาวะออกซิไดซ์จะสามารถตรึงเหล็กไอออนได้ ส่วนประกอบของเฟสโลหะสามารถเขียนเป็นสูตรได้ระหว่าง C_2F , C_6A_2F และ $C_4A_xF_{(1-x)}$ โดยที่ $0 < x < 0.7$ โครงสร้างผลึกของ C_4AF ประกอบด้วยชั้นของ $(Al, Fe)O^{6-}$ octahedra และ $(Al, Fe)O^{4-}$ tetrahedra ที่เชื่อมกันตามขอบ โดยรูปที่ 5 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของ C_4AF



รูปที่ 5 โครงสร้างผลึกของ C_4AF
(Barnes & Bensted, 2001)

2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การแข็งตัวของคอนกรีตนั้นเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีเมื่อเกิดการผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากปูนซีเมนต์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่ซับซ้อน การศึกษาเรื่องของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในด้านความแข็งแรงของปูนซีเมนต์เป็นเรื่องที่จำเป็น ตารางที่. 1 แสดงสมบัติไฮเดรชันของส่วนประกอบในปูนซีเมนต์

ตารางที่ 1 สมบัติไฮเดรชันของส่วนประกอบในปูนซีเมนต์

สารประกอบ	อัตราการเกิดปฏิกิริยา	ปริมาณการปลดปล่อยความร้อน	ผลต่อปูนซีเมนต์	
			ความแข็งแรง	การปลดปล่อยความร้อน
C ₃ S	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง ต่ำขณะเริ่มแรก	สูง
C ₂ S	ช้า	ต่ำ	และสูงเมื่อเวลาผ่านไป	ต่ำ
C ₃ A+CSH ₂	เร็ว	สูงมาก	ต่ำ	สูงมาก
C ₄ AF+CSH ₂	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง

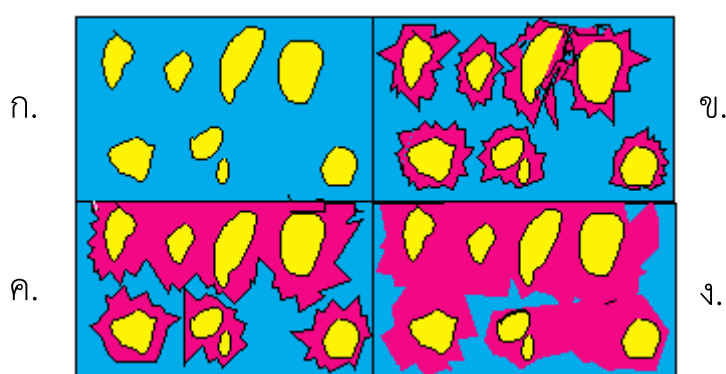
เมื่อมีการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับน้ำจะทำให้สารประกอบเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและส่งผลให้เปลี่ยนเป็นคอนกรีตในที่สุด โดยที่Calcium silicateเป็นสารประกอบที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตซึ่งไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบที่ส่งผลต่อความแข็งแรงในช่วงต้น(7วันแรก)มากที่สุด ในส่วนของความแข็งแรงที่ช่วงหลังเป็นผลจากDicalcium silicateที่ทำปฏิกิริยาช้ากว่า สมการปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$2\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 7\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{CaO}_2 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 173.6\text{kJ}$$

การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ไตรแคลเซียมซิลิเกตตอบสนองอย่างรุนแรงเพื่อปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออน และความร้อนปริมาณมาก การปลดปล่อยไฮดรอกไซด์ไอออน(OH⁻)ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดเบส(pH)จนมีค่ามากกว่า 12 หลังจากนั้นปฏิกิริยาการสร้างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออนเริ่มช้าลงจนกว่าระบบเข้าสู่จุดอิ่มตัวเมื่อระบบถึงจุดอิ่มตัวแคลเซียมไฮดรอกไซด์เริ่มก่อตัวเป็นผลึก(Crystallize)พร้อมกับการเกิดขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium silicate hydrate) เมื่อไอออนตกตะกอนออกจากสารละลายจะ

เร่งปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกตกลายเป็นแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้เกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นปริมาณมาก

การก่อตัวเป็นผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดเป็น Seeds ผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตขยายตัวหนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของน้ำผ่านเข้าไปถึง Unhydrated ไตรแคลเซียมซิลิเกตได้ยากมากขึ้น โดยที่ความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขณะนี้ถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำเข้าสู่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เคลือบผิวอยู่ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีชั้นเคลือบผิวหนาขึ้นและส่งผลให้การสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตช้าลง



รูปที่ 6 ลักษณะรูพรุนในแคลเซียมซิลิเกตของระยะที่แตกต่างกันของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

รูปที่ 6 ข้างบนแสดงการก่อตัวของรูพรุนเมื่อเกิดการสร้างตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตขึ้น (ก) ปฏิกิริยาไฮเดรชันยังไม่เริ่มต้นและรูพรุนคือช่องว่างที่ประกอบไปด้วยน้ำ (ข) ปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มต้นเนื่องจากการสัมผัสและทำปฏิกิริยากับน้ำ (ค) แคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำค่อยๆเติมเต็มช่องว่างเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงดำเนินต่อไป (ง) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเติมเต็มช่องว่างโดยส่วนมากจนใกล้กลายเป็นซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องก็ต่อเมื่อมีโมเลกุลน้ำและสารประกอบขาดน้ำ(Unhydrated compound)ปรากฏอยู่ในซีเมนต์เพสต์

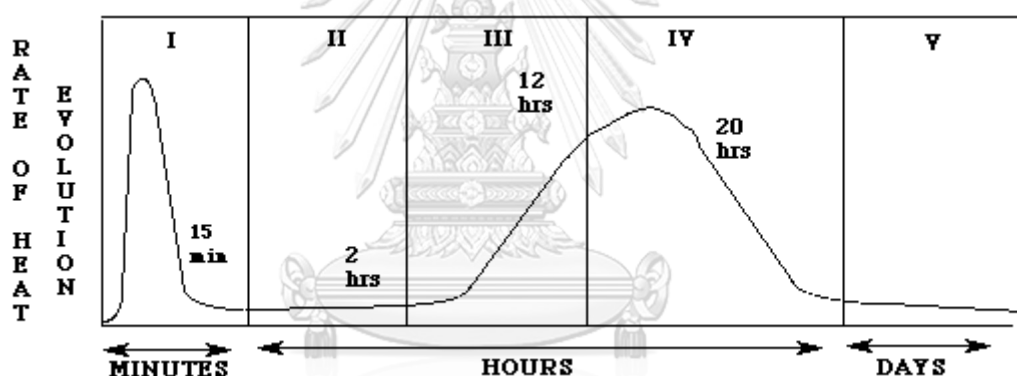
ความแข็งแรงของคอนกรีตมีผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของDicalcium silicateเมื่อสัมผัสและทำปฏิกิริยากับน้ำในลักษณะที่ใกล้เคียงกับไตรแคลเซียมซิลิเกตแต่มีความเร็วที่ช้ากว่ามาก การปลดปล่อยความร้อนของDicalcium silicateมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับไตรแคลเซียมซิลิเกตเพราะว่ามีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อยกว่า ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตเหมือนกับผลิตภัณฑ์ของไตรแคลเซียมซิลิเกตที่สามารถแสดงในสมการดังนี้



ส่วนประกอบอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์(Tetracalcium aluminoferrite)สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความซับซ้อนเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับยิปซัมเพราะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบอาจได้รับผลจากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างระยะเวลาไม่กี่วันแรกสามารถเรียงจากเร็วไปช้าได้ดังนี้

Tricalcium aluminate > Tricalcium silicate > Tetrecalcium aluminoferrite > Dicalcium silicate

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปลดปล่อยความร้อนออกมาเนื่องจากการสร้างและสลายพันธะทางเคมีระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยรูปที่ 7 แสดงการปลดปล่อยความร้อนต่อเวลาที่ผ่านไป

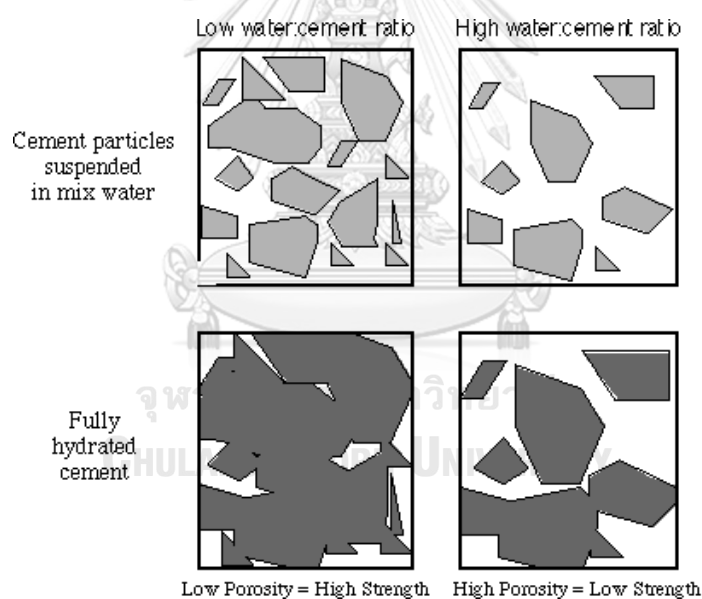


รูปที่ 7 อัตราการพัฒนาความร้อนระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากรูปภาพข้างบนในระยะเวลาที่ 1 ปฏิกิริยาHydrolysisของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลายองศา ระยะเวลาที่ 2 เรียกว่าระยะพัก(Dormancy period)เป็นช่วงเวลาที่มีการพัฒนาความร้อนที่ช้ามากโดยปกติมักพบว่ามียุคระยะเวลาในช่วง 1 – 3 ชั่วโมง ในระยะนี้คอนกรีตอยู่ในสถานะพลาสติกที่สามารถขนส่งและวางได้โดยไม่ยาก การก่อตัวเริ่มต้นเริ่มต้นขึ้นที่จุดสิ้นสุดของระยะนี้ ในระยะ 3 และ 4 คอนกรีตเริ่มต้นแข็งตัวและพัฒนาความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก เมื่อผ่านไป 36 ชั่วโมงจะเข้าสู่ระยะที่ 5 ผลึกไฮเดรตเกิดขึ้นช้าลงและเกิดขึ้นต่อเนื่องตราบที่ยังมีน้ำและสารประกอบซิลิเกตขาดน้ำหลงเหลืออยู่

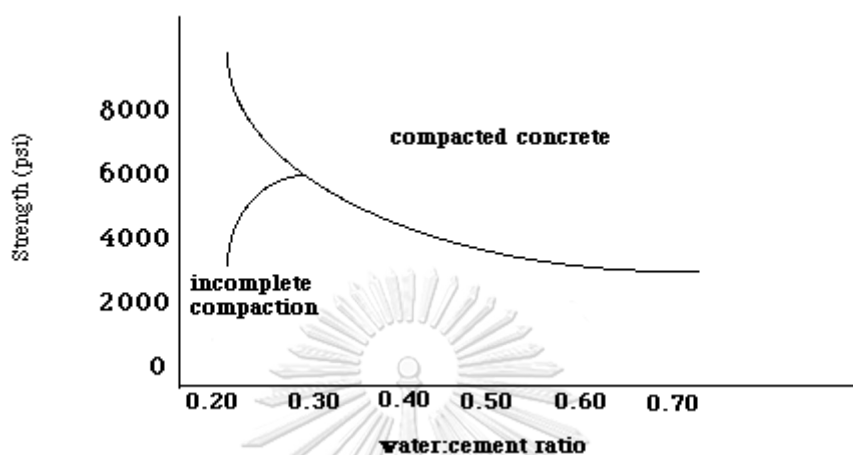
2.4 ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์

ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ขึ้นกับปัจจัยของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อธิบายข้างต้นไว้เป็นอย่างมาก โดยปริมาณน้ำเป็นสิ่งที่ปัจจัยสำคัญอย่างมากในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้น้ำปริมาณน้อยในการสร้างคอนกรีตทำให้มีความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความต้องการน้ำในปริมาณที่จำเพาะ การสร้างคอนกรีตมักใช้น้ำผสมในปริมาณที่เกินความจำเป็นของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การใส่น้ำที่เกินความต้องการมีจุดประสงค์เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการเท (Workability) ที่เพียงพอ การเทคอนกรีตให้เหมาะสมมีความต้องการสมบัติการไหลของคอนกรีตที่เหมาะสม น้ำที่มากเกินไปจะไม่ถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและเหลืออยู่ในระบบกลายเป็นช่องรูพรุนขนาดเล็ก (Microstructure pore space) ช่องว่างนี้ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงน้อยลงเนื่องจากขาดความแข็งแรงจากการสร้างพันธะของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตถึงแม้จะมีการอัดคอนกรีตอย่างดีแต่รูพรุนสามารถหลงเหลืออยู่ในคอนกรีตได้



รูปที่ 8 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์และความเป็นรูพรุน

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ว่างหรือรูพรุนเป็นผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์ โดยรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์และความแข็งแรง



รูปที่ 9 ความแข็งแรงของคอนกรีตต่ออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์

อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์ที่มีค่าต่ำนำไปสู่ค่าความแข็งแรงสูงแต่มีความสามารถในการเทต่ำ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์ที่มีค่าสูงส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงต่ำแต่มีความสามารถในการเทสูง

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมคอนกรีตคือ รูปร่าง เนื้อสาร และขนาด คุณสมบัติเหล่านี้สามารถส่งผลต่อความแข็งแรงทางอ้อมเพราะวัสดุผสมคอนกรีตส่งผลต่อความสามารถในการเทของคอนกรีตได้ ถ้าวัสดุผสมคอนกรีตทำให้คอนกรีตไม่สามารถเทได้ส่งผลให้ผู้รับเหมาก่อสร้างจำเป็นต้องใส่น้ำเพิ่มเติมและทำให้มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อนูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจนทำให้มีความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง

ความแข็งแรงของคอนกรีตยังขึ้นกับเวลาที่เป็นปัจจัยสำคัญ คอนกรีตแข็งตัวมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะช้าลงตามเวลาเมื่อไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตรวมตัวซึ่งใช้ระยะเวลาสำหรับการสร้างพันธะที่กำหนดความแข็งแรงต่อคอนกรีต โดยทั่วไปใช้การทดสอบที่ 28 วัน เพื่อวัดค่าความแข็งแรงของคอนกรีต

การใช้สารผสมเพิ่ม (Admixtures) อาจส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต โดยที่สารผสมเพิ่มคือสารอื่นนอกเหนือจากส่วนประกอบหลักหรือสารเพิ่มแรงที่ถูกละลายเข้ามาระหว่างกระบวนการผสม สารผสมเพิ่มบางชนิดสามารถเพิ่มความสามารถในการเป็นของไหล (Fluidity) แก่คอนกรีตโดยที่ความต้องการน้ำน้อย ตัวอย่างของสารผสมเพิ่มที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตคือ Superplasticizer

สารชนิดนี้สามารถทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้นหรือไหลได้ดีขึ้นโดยปราศจากการใส่น้ำเพิ่มเติม

2.5 เถ้าลอย (Fly ash)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินโดยปกติจะได้เถ้าที่มีขนาดแตกต่างกัน เถ้าที่มีขนาดใหญ่จะตกลงก้นเตาเรียกว่าเถ้าก้นเตา(Bottom ash) เถ้าลอยเป็นเถ้าส่วนที่ละเอียดที่สุดที่ได้จากการเผาไหม้ทำให้สามารถลอยขึ้นเหนือเตาไปกับอากาศร้อนและถูกดักจับเพื่อไม่ให้หลุดออกไปปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อม คุณภาพของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับคุณภาพของชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตเพื่อเป็นการลดการใช้ซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น การใส่เถ้าลอยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงต่อสภาพการกัดกร่อน การปรับปรุงสมบัติการแข็งตัวเพื่อให้ใช้งานได้ตามความต้องการของงาน โดยการนำเถ้าลอยมาใช้จำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติของเถ้าลอย หน่วยงานหลายแห่งจึงได้ตั้งข้อกำหนดสำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ เช่น หน่วยงาน American Society for Testing and Materials(ASTM) หน่วยงาน American Concrete Institute(ACI) และอีกหลายหน่วยงานโดยมาตรฐานที่กำหนดจะขึ้นกับการนำเถ้าลอยไปใช้อย่างไร

ปริมาณเถ้าลอยในประเทศญี่ปุ่นมีปริมาณแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการหยุดใช้งานพลังงานนิวเคลียร์และหันมาใช้พลังงานจากถ่านหิน ส่งผลให้เกิดเถ้าลอยปริมาณมากถึง 13 ล้านตันจากการใช้ถ่านหินผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีการคาดการณ์ว่ามีการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปริมาณประมาณ 70% ในปีค.ศ.2019 พบว่าประเทศญี่ปุ่นมีการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยออกมาปริมาณ 73,000 ตัน โดยเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนต่อการผลิตปูนซีเมนต์ทั้งหมดในประเทศญี่ปุ่นได้เพียง 13.8% เท่านั้น

2.5.1 สมบัติทางกายภาพ

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงทรงกลมละเอียดเป็นหลักและละเอียดกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มีขนาดอนุภาคโดยทั่วไประหว่าง 0.01-0.1 มิลลิเมตร สีของเถ้าลอยอาจพบได้ตั้งแต่สีเทาจนถึงสีดำขนาดอนุภาคและสีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับกาเผาไหม้และคุณภาพของเชื้อเพลิงดังรูปที่ 10 แสดงลักษณะของเถ้าลอย

2.5.2 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านล้อยขึ้นกับคุณภาพของถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง วิธีการเผา และวิธีการควบคุมจัดเก็บ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันในเชิงปริมาณได้ โดยทั่วไปถ่านล้อยมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O และ C



รูปที่ 10 ถ่านล้อย

2.5.3 ประเภทของถ่านล้อย

มาตรฐาน ASTM C618 – 12a ได้แบ่งประเภทของปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1. ชั้นคุณภาพ N คือ วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพให้มีสมบัติตามต้องการ
2. ชั้นคุณภาพ F คือ ถ่านล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์(Anthracite)หรือบิทูมินัส(Bituminous) เป็นถ่านล้อยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าถ่านล้อยแคลเซียมต่ำ
3. ชั้นคุณภาพ C คือ ถ่านล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์(Lignite)หรือซับบิทูมินัส(Subbituminous) โดยถ่านล้อยชนิดนี้มีสมบัติการเชื่อมประสานเนื่องจากปริมาณ CaO สูง สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าถ่านล้อยแคลเซียมสูง

โดยมาตรฐาน ASTM C618-12a ได้แบ่งประเภทของปอซโซลานตามสมบัติดังที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618-12a

สมบัติทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ซิลิคอนไดออกไซด์(SiO ₂) + อลูมิเนียมออกไซด์(Al ₂ O ₃) + ไอร์ออนออกไซด์(Fe ₂ O ₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์(SO ₃) ไม่มากกว่าร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ไม่มากกว่าร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้(LOI) ไม่มากกว่าร้อยละ	10.0	6.0 ^A	6.0

^A การใช้ปอซโซลานชั้นคุณภาพFอาจสามารถให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ไม่เกิน12.0% ได้หากมีข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพหรือการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.6 ซิลิกาฟุม (Silica fume)

ซิลิกาฟุมเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการถลุงแร่เพื่อผลิต Silicon alloys และ Ferrosilicon alloys มักพบว่าซิลิกาฟุมประกอบไปด้วยอนุภาค Silicon dioxide (SiO₂) ขนาดเล็ก และเรียงตัวอย่างไม่แน่นอนในอัตราส่วน 90 %ขององค์ประกอบทั้งหมด ซิลิกาฟุมนั้นสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าไมโครซิลิกาเนื่องจากความละเอียดของอนุภาคและปริมาณซิลิกาในส่วนประกอบที่สูง

ซิลิกาฟุมนั้นได้รับการยอมรับว่ามีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C1240 ที่สามารถใช้ซิลิกาฟุมเป็นสารเติมแต่งปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์และคอนกรีต เพื่อเพิ่มสมบัติในเชิงกล ปัจจุบันมีการนำซิลิกาฟุมมาใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์กันอย่างแพร่หลายตามแนวโน้มของการนำของเสียหรือผลผลิตพลอยได้จากอุตสาหกรรมมาใช้งานในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

2.6.1 สมบัติทางกายภาพ

ซิลิกาฟูมมีลักษณะอนุภาคขนาดเล็กมากและมีสีเทา-ดำ โดยมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่า $1\ \mu\text{m}$ ในปริมาณมากกว่า 95% มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ประมาณ $20,000\ \text{cm}^2/\text{g}$ มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.20 – 2.50 (เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ 3.15) และมีความหนาแน่นรวม(Bulk density)อยู่ในช่วงตั้งแต่ 130 – 430 kg/m^3 (Güneyisi et al., 2012; Lilkov et al., 2014; Mardani-Aghabaglou et al., 2014) ดังแสดงลักษณะของซิลิกาฟูมในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ซิลิกาฟูม

2.6.2 สมบัติทางเคมี

ซิลิกาฟูมประกอบไปด้วยซิลิกาบริสุทธิ์ที่ไม่อยู่ในรูปผลึกเป็นหลัก โดยที่ซิลิกาฟูมมีซิลิกอนไดออกไซด์(Silicon dioxide)ในอัตราส่วนปริมาณประมาณ 90% ที่เรียงตัวอย่างไม่แน่นอนเป็นอนุภาคลักษณะทรงกลมจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบของเหล็ก แมกนีเซียม และออกไซด์ของอัลคาไลน์ในปริมาณน้อย(Haruehansapong et al., 2014; Lilkov et al., 2014; Mardani-Aghabaglou et al., 2014) นอกจากนี้ซิลิกาฟูมยังพบส่วนประกอบทางเคมีชนิดอื่นๆอีกดังตารางที่ 3(Nochaiya et al., 2010)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม

สารออกไซด์	ซิลิกาฟูม
SiO ₂	95.3
Al ₂ O ₃	0.6
Fe ₂ O ₃	0.3
CaO	0.3
MgO	0.4
Na ₂ O	0.3
K ₂ O	0.8
P ₂ O ₅	1.2
SO ₃	0.2

2.6.3 ผลของซิลิกาฟูมต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เนื่องจากซิลิกาฟูมมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากและลักษณะการเรียงตัวที่ไม่แน่นอนส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้นและเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S C₂S และ C₄AF (Kurdowski & Nocuń-Wczelik, 1983) การเร่งปฏิกิริยาของซิลิกาฟูมเกิดขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากการเพิ่ม Nucleation sites ของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาจากซิลิกาฟูมสามารถละลายได้เมื่อมี Ca(OH)₂ แล้วทำปฏิกิริยาเป็นสารทดแทนในการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต การใส่ซิลิกาฟูมทดแทนในปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of hydration) ลดลงโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง

2.7 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ (CSH/PCE)

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (xCaO·ySiO₂·zH₂O หรือ CSH) เป็นผลผลิตหลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เกิดขึ้นขณะอยู่ในช่วงการจับตัว (Binding phase) และเป็นสิ่งที่ส่งผลให้เกิดการพัฒนาของความแข็งแรงและความทนทานของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตก่อตัวขึ้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมน้ำที่มีค่าความเป็นผลึกต่ำโดยมีอัตราส่วนโมลาร์ของ Ca/Si อยู่ที่ 1.6 – 1.9 ซึ่งสามารถขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานและปัจจัยอื่นๆได้เช่นกัน (Richardson & Groves, 1993; Taylor et al., 2007)

การใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสังเคราะห์ผสมในปูนซีเมนต์ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นกับปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสังเคราะห์ที่ใช้ เนื่องจากการใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

จำนวนเล็กน้อยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S ได้เร็วขึ้นและมีอัตราที่มากขึ้น (Kanchanason & Plank, 2017; Nicoleau et al., 2013a) นอกจากนี้ยังสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยได้อีกด้วย

การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์สามารถทำได้โดยการตกตะกอนผลผลิตจากการใส่ $Ca(NO_3)_2$ และ Na_2SiO_3 ลงในสารละลายโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์เนื่องจากโพลีคาร์บอกซิเลทซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (PCEs) เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายหวีโดยรองรับโครงสร้างที่คล้ายหวีด้วยโซ่แกนหลักของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยกลุ่มที่มีประจุลบ (กลุ่มคาร์บอกซิลิก กลุ่มซัลโฟนิค และกลุ่มฟอสเฟต) และต่อโซ่กิ่ง (ตัวอย่างเช่น poly(ethylene glycol) กับปลายกลุ่มไฮดรอกซิลหรือเมทิล) กลุ่มที่มีประจุลบทำหน้าที่เป็นกลุ่มตัวดูดซับผ่านการเกิดอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) กับอนุภาคระดับนาโน ขณะที่โซ่กิ่งเป็นตัวให้แรงผลักจากการกีดขวางเนื่องจากขนาด (Steric hindrance) เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคขนาดนาโนเกิดการรวมตัว (Shu et al., 2016)

2.8 การประเมินคุณภาพปูนซีเมนต์

2.8.1 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time)

ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ประกอบด้วยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นบ่งบอกถึงเวลาที่ปูนซีเมนต์เปลี่ยนเป็นปูนซีเมนต์เพสต์จากการผสมน้ำและเริ่มสูญเสียสภาพพลาสติกไป (Plasticity) และเวลาที่ปูนซีเมนต์สูญเสียสภาพพลาสติกโดยสมบูรณ์หลังจากการผสมน้ำและเริ่มมีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างเรียกว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย

ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์มีความสำคัญอย่างมากสำหรับโครงการก่อสร้าง โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่ควรที่จะเร็วมากเกินไปเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีระยะเวลาเพียงพอในการทำทุกกระบวนการให้สำเร็จ เช่น การหล่อในแม่พิมพ์ก่อนที่จะถึงช่วงก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายไม่ควรที่จะมีระยะเวลานานมากเกินไปเพื่อให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หลังจากผ่านกระบวนการเท (Pouring) และกระบวนการอัด (Tamping) เพื่อให้ทำกระบวนการถัดไปได้เร็วขึ้น (Zhang, 2011)

เครื่องมือไวแคต (Vicat's apparatus) สามารถนำมาใช้ในการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์เพสต์ได้อย่างแม่นยำซึ่งประกอบไปด้วยกรอบที่มีส่วนแท่งที่สามารถขยับได้กับปลอกที่ปลายด้านซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนได้ระหว่าง เข็มสำหรับใช้วัดเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และเข็มสำหรับใช้วัดเวลาการก่อตัวสุดท้าย โดยเข็มทั้งสองนี้ถูกทำให้สามารถตกลงอย่างอิสระลงสู่เบ้าของไวแคตที่มีซีเมนต์เพสต์อยู่

2.8.2 ความสามารถในการไหล(Workability)

ความสามารถในการไหลของปูนซีเมนต์เป็นสมบัติที่มีความซับซ้อนซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของคอนกรีต คุณภาพและลักษณะภายนอกของคอนกรีต ความสามารถในการไหลยังสามารถเป็นตัวกำหนดความง่ายของการผสม การจัดวาง และการอัดคอนกรีตให้สำเร็จได้โดยสูญเสียความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นลักษณะที่มีความซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัยที่จะทำให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีต่อการใช้งาน สำหรับการทดสอบความสามารถในการไหลของคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต(Slump test) และ การทดสอบโดยโต๊ะทดสอบการไหล(Flow table test)

สำหรับการทดสอบการไหลบนโต๊ะทดสอบการไหลใช้มอร์ตาร์ในการทดสอบโดยนำมอร์ตาร์ที่ผสมแล้วมาเทใส่กรวยแม่แบบทดสอบ(Flow cone)ให้อยู่ในบริเวณจุดศูนย์กลางของโต๊ะทดสอบการไหล(Flow table)ในปริมาณครึ่งหนึ่งของกรวย และทำการกดมอร์ตาร์ 15 ครั้งด้วยแท่งดำคอนกรีต(Tamping rod)แล้วจึงเติมมอร์ตาร์ลงไปอีกหนึ่งชั้นและทำการดำมอร์ตาร์ซ้ำอีก 15 ครั้งด้วยแท่งดำคอนกรีต หลังจากนั้นปาดส่วนเกินจนพื้นผิวหน้าสม่ำเสมอกับกรวยแม่แบบทดสอบแล้วจึงยกกรวยออกทางแนวตั้งทันทีต่อการดำเนินการหมุนยกโต๊ะทดสอบการไหลให้มีช่วงเวลาเคาะ 15 ครั้งในระหว่าง 15 วินาที

ผลของการทดสอบการไหลบนโต๊ะทดสอบการไหลสามารถสังเกตได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดของมอร์ตาร์ที่แผ่ออกจากการเคาะและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในมุมตั้งฉากกับเส้นที่วัดก่อนหน้า

2.8.3 กำลังรับแรงอัด(Compressive strength)

กำลังรับแรงอัดบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานแรงกดที่ทำให้เกิดการลดขนาดของวัสดุหรือโครงสร้างได้ วัสดุที่ถูกทดสอบจะถูกแรงกดจากด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานตัวอย่างจนกระทั่งชิ้นงานตัวอย่างเกิดหักหรือเสียรูปสภาพเดิมไป วัสดุที่มักได้รับการประเมินด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดคือ ปูนซีเมนต์และหินซึ่งในกรณีนี้จะพบการแตกหักของชิ้นตัวอย่างที่ถูกทดสอบ

ปูนซีเมนต์และคอนกรีตมักถูกทดสอบเพื่อประเมินว่าชิ้นงานคอนกรีตผสมตัวอย่างมีค่าเป็นไปตามความต้องการของการออกแบบและสามารถยอมรับให้นำไปใช้ได้ การทดสอบกำลังรับแรงอัดจึงมีความจำเป็นต้องทำการทดสอบในห้องทดลองเพื่อควบคุมตัวแปรให้ได้มากที่สุด

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ปูนซีเมนต์คอนกรีตผสมที่หล่อตัวอย่างในแม่พิมพ์รูปทรงลูกบาศก์หรือทรงกระบอกและทรงปริซึมและบ่มชิ้นงานตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน สำหรับชิ้นงานตัวอย่างที่ใส่สารเติมแต่งปูนซีเมนต์เพิ่มเติมมักนิยมทำการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างที่ระยะ 56 วัน ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกนำไปวางระหว่างจานทดสอบของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดและเริ่ม

ทดสอบโดยการให้เครื่องทดสอบกดแรงใส่ชิ้นงานตัวอย่างจนกระทั่งชิ้นงานตัวอย่างเกิดรอยแตกแล้ว อัตราเพิ่มแรงอัด(Loading rate)เป็นสิ่งสำคัญเพราะหากใช้อัตราที่น้อยเกินไปมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการคืบ(Creep)หรือการหดตัวลง ปัจจัยที่สำคัญที่สามารถส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์เช่น อัตราส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และการบ่มตัวอย่าง

กำลังรับแรงอัดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$F = P/A$$

เมื่อ

F คือ กำลังรับแรงอัด (N/mm²)

P คือ แรงที่รับได้สูงสุด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่รับแรง (mm²)

2.8.4 กำลังรับแรงดัด(Flexural strength)

กำลังดึงของคอนกรีต(Tensile strength)โดยทั่วไปจะมีค่าต่ำมากประมาณ 7 – 11% ของกำลังอัดเท่านั้น ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปแล้วมักจะไม่ได้คิดแรงดึงในการคำนวณ อย่างไรก็ตามสำหรับโครงสร้างบางรูปแบบที่ไม่ต้องการให้คอนกรีตแตกร้าวเนื่องจากต้องการป้องกันการซึมของน้ำ เช่น ถังน้ำ เขื่อน หรือในกรณีที่ไม่เสริมเหล็ก เช่น ถนน สนามบิน เป็นต้น มีความจำเป็นที่จะต้องใช้กำลังดึงช่วยในการออกแบบ โดยในการทดสอบหากำลังดึงของคอนกรีตมักไม่นิยมใช้ทดสอบหาโดยตรง เนื่องจากความยุ่งยากในการทดสอบ และทำให้ได้ค่าที่ไม่แน่นอน จึงได้มีการทดสอบหาโดยทางอ้อมด้วยการทดสอบกำลังรับแรงดัดเพื่อประเมินขึ้น

กำลังรับแรงดัดเป็นสมบัติหนึ่งของวัสดุที่ระบุถึงค่าความเครียดสูงสุดในวัสดุที่รับได้ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าวหรือเปลี่ยนรูปของวัสดุในการทดสอบ การทดสอบโดยทั่วไปมักใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีรูปทรงเป็นลักษณะทรงกระบอกและทรงปริซึมมาทดสอบด้วยการใส่แรงดัดในระดับต่างกันผ่านความลึกของชิ้นงานตัวอย่าง ความเค้นแรงอัดสูงสุดจะเป็นความเครียดที่อยู่ภายในส่วนโค้งงอในขณะที่ความเค้นแรงดึงสูงสุดอยู่ที่บริเวณฝั่งตรงข้ามกัน

โดยปกติการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างมักทดสอบโดยใช้แทนกดโลหะหนึ่งจุดที่เป็นส่วนสำคัญสำหรับการให้แรงกดลงบนบริเวณตรงกลางของชิ้นงานตัวอย่างที่มีจุดรองรับชิ้นงานสองจุดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันประมาณ 10 มม. และแทนโลหะที่ใช้กดและรองรับชิ้นงานควรมีความยาวอยู่ที่ประมาณ 45 – 50 มม. และวางอยู่ในตำแหน่งที่ขนานกัน ค่ากำลังรับแรงอัดสามารถวัดค่าโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด(Flexural strength testing machine)หรือใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมในเครื่องทดสอบแรงอัด(Compression testing machine)

กำลังรับแรงดัดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$R_f = 1.5F_f/b^3$$

เมื่อ b คือ ความยาวด้านข้างของหน้าจตุรัสของปริซึม (mm)

F_f คือ กำลังที่กดลงที่จุดกึ่งกลางของปริซึมจนแตกหัก (N)

L คือ ระยะห่างระหว่างแท่นโลหะรองรับชิ้นงาน (mm)

2.9 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุผสมทดแทนปูนซีเมนต์เป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นการนำผลผลิตพลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ทำให้สามารถลดระดับคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ประหยัดต้นทุนของการผลิตปูนซีเมนต์มากขึ้น (Aitcin, 2016) เมื่อมีความต้องการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีความต้องการต่อวัสดุเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นในอนาคต อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะมุ่งเน้นการพัฒนาอย่างยั่งยืนมากขึ้นในหลายแนวโน้มคือ การควบคุมการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และนำกลับมาใช้ใหม่ (Hasanbeigi et al., 2012) จึงได้มีการทดลองโดยการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยพบว่าเกิดปัญหาต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ในด้านกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ในช่วงต้น กำลังรับแรงดัด (Flexural strength) ความสามารถในการเท (Workability) และระยะเวลาก่อตัว (Setting time) เนื่องจากสมบัติปอซโซลานของเถ้าลอยที่เกิดปฏิกิริยาช้ากว่าปูนซีเมนต์ส่งผลให้เถ้าลอยส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุหลัง 28 วันมากขึ้น (Qin et al., 2019; Vance et al., 2013) กำลังรับแรงดัดแสดงผลเช่นเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดเมื่อมีอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นทำให้มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ลดลง (Sevim & Demir, 2019) สำหรับสมบัติของเถ้าลอยที่แตกต่างกันยังส่งผลให้คอนกรีตและมอร์ตาร์นั้นมีสมบัติที่แตกต่างกันเช่นกัน การใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นหรือเล็กกว่า $7 \mu\text{m}$ ส่งผลต่อความไวของการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ในท้ายที่สุดคอนกรีตและมอร์ตาร์ที่ขึ้นรูปมีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยที่หยาบกว่า $50 \mu\text{m}$ (Han et al., 2019) จากการศึกษาผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) พบว่าการใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงมีผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เพิ่มขึ้นอย่างมากบนพื้นผิวอนุภาคของเถ้าลอยหลังจากผ่านไป 28 วัน นอกจากนี้ผลของเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) ยังพบว่าความละเอียดของเถ้าลอยที่มากส่งผลต่อการบริโภคแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันให้มากขึ้นหลังจากผ่านไป 28 วันและทำให้การไหลมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน (Moghaddam et al., 2019) เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากส่งผลต่อรูพรุนของมอร์ตาร์ในการทดลอง

ด้วยเครื่องวัดความเป็นรูพรุนของวัสดุโดยการแทนที่ด้วยปรอท(Mercury Intrusion Porosimeter หรือ MIP)พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยความละเอียดสูงขึ้นและเมื่อมีการใส่เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนมากขึ้น(Hsu et al., 2018)

การทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 45% ส่งผลให้มีความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงจากชุดควบคุมที่เป็นปูนซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าความร้อนอยู่ที่ 2.4 W/kg เหลือ 1.27 W/kg โดยการพัฒนาความร้อน(Heat evolution)และค่าความร้อนสะสม(Cumulative heat evolution)ต่างลดลงในชุดการทดลองที่ผสมเถ้าลอยด้วยอัตราส่วน45%ภายในระยะเวลา72ชั่วโมงแรกหลังการผสมปูนซีเมนต์เข้ากับน้ำ โดยทำให้ค่าความร้อนสะสมลดลงไปถึง36%และทำให้ใช้ระยะเวลาที่ความร้อนพัฒนาถึงอัตราสูงสุดมากขึ้น(Poon et al., 2000) การทดลองผสมเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 45 – 50% แสดงผลว่ามีระดับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน(Degree of hydration)ลดลงที่ทำให้มีปริมาณเถ้าลอยมากกว่า 80% ที่ยังหลงเหลือและไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานหลังจากผ่านการบ่มซีเมนต์เพสต์ไป 90 วันและพบปริมาณน้ำที่ไม่ระเหยอยู่น้อยกว่าชุดการทดลองควบคุม(Lam et al., 2000) ผลการทดลองของisothermal calorimetryแสดงให้เห็นผลที่เปลี่ยนไปจากการใช้เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันและปริมาณที่ใส่ทดแทนแตกต่างกันว่าการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นผสมทดแทนปูนซีเมนต์ทำให้มีปริมาณความร้อนในช่วงพีคที่สองลดลงแต่เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงทำให้มีปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาในช่วงพีคที่สองมากขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดที่น้อยกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากDilution effectของปูนซีเมนต์ที่ทำให้มีปริมาณของC₃Sในระบบน้อยลงเนื่องจากการใช้เถ้าลอยทดแทน(Moghaddam et al., 2019) โดยปกติแล้วความสามารถในการละลายของเถ้าลอยจะใช้เวลาานจึงส่งผลให้การใช้เถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ไม่สามารถให้กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นได้ แต่เมื่อเถ้าลอยละลายในช่องว่างมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจะมีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ระยะหลัง 28 วัน (Elmrabet et al., 2019; Sakai et al., 2005)

การทำคอนกรีตสามารถใช้วัสดุเชื่อมประสานเสริม(Supplementary cementing materials)เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้บางส่วน ตัวอย่างของวัสดุเชื่อมประสานเสริมคือ เถ้าลอย และซิลิกาฟูม ถึงแม้วัสดุเชื่อมประสานเสริมมีสมบัติทางเคมีและกายภาพต่างกันแต่พบว่ามีสมบัติปอซโซลานปรากฏอยู่ร่วมกัน(Panesar, 2019) การใช้ทั้งเถ้าลอยและซิลิกาฟูมร่วมกันในการใส่ทดแทนปูนซีเมนต์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ งานวิจัยหลายงานวิจัยได้ใช้การผสมร่วมกันของสองผลผลิตพลอยได้เพื่อให้คอนกรีตหรือมอร์ตาร์มีสมบัติที่เป็นไปตามความต้องการมากขึ้น(Antoni et al., 2015; Yazici, 2007) การใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสานเสริมสามารถพัฒนา

กำลังรับแรงอัดให้แก่คอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายสมรรถนะสูง(Self-compacting high-performance concrete)และเพื่อเป็นประโยชน์ในด้านการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม(Mustapha et al., 2021) ซิลิกาฟวมในอัตราส่วนไม่เกิน15เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์พบว่าสามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญเช่นกำลังรับแรงอัด ความต้านทานการแข็งตัว(Freeze-thaw resistance) ความไม่ซึมผ่าน(Impermeability) และความต้านทานการขัดถู(Abrasion resistance)(Tang et al., 2014; Tang et al., 2015) ขนาดอนุภาคที่เล็กของซิลิกาฟวมช่วยให้ซิลิกาฟวมสามารถเป็นตัวฟิลเลอร์(Filler)ที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล(C-S-H gel)ที่ขยายตัวภายในช่องว่างที่ยังคงเหลือหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์(Blanco et al., 2006) การผสมซิลิกาฟวมร่วมกับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยทำให้ส่วนผสมมีความต้องการน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่ซิลิกาฟวมผสมที่การใส่ทดแทนเถ้าลอยปริมาณเท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคที่ละเอียดมากของซิลิกาฟวมที่นำไปสู่ความต้องการใช้น้ำในท้ายที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่ซิลิกาฟวมปริมาณ 5% และ 10% ร่วมกับการใส่เถ้าลอยทดแทนปริมาณ 10% และ 30% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ทำให้มีค่าความต้องการน้ำใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากที่สุด(Nochaiya et al., 2010)

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการทดลองผสมซิลิกาฟวมเข้ากับปูนซีเมนต์เพื่อสังเกตการรวมตัวกันของเฟสของปูนซีเมนต์เฟสที่แข็งตัวพบว่าตัวอย่างสามารถสร้างแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เอททริงไกต์($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) โมโนคาร์โบอลูมิเนต($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) และเฮมิคาร์โบอลูมิเนต($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.5\text{CaCO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยอ้างอิงผลจากมาตรฐาน Inorganic Crystal Structure Database(ICSD) และ Crystallography Open Database(COD) หลังจากผ่านไป 28 วัน การใช้ซิลิกาฟวมไม่เกิน 10% ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงอย่างเห็นได้ชัดในปูนซีเมนต์เฟส สะท้อนให้เห็นได้ว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ก่อนวันที่28(Jeong et al., 2020) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาปกติมีส่วนประกอบของ C_3A ยิบซั่ม และ แอนไฮไดรต์(Anhydrite) แต่ไม่สามารถตรวจจับได้ในปูนซีเมนต์เฟสที่แข็งตัวแล้วขณะที่เฟสอื่นในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาถูกพบเป็นเฟสหลงเหลือที่ไม่ทำปฏิกิริยา ในขณะที่โมโนและเฮมิคาร์โบอลูมิเนตไม่สามารถตรวจจับได้หลังจากผ่านไปหนึ่งวันเนื่องจากการสลายตัวที่ช้าของแคลไซต์(Kakali et al., 2000; Lothenbach et al., 2008) การทำปฏิกิริยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาและน้ำได้ผลผลิตคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

(C-S-H) มอร์ตาร์ที่ผสมซิลิกาฟุ้งจึงให้กำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าชุดควบคุมเนื่องจากการเหนียวนำจากปฏิกิริยาปอซโซลานของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและน้ำ (Jeong et al., 2020)

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสังเคราะห์มักถูกใช้เป็นเมล็ด (Seeds) เพื่อเพิ่มการพัฒนาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิเกตเฟสในวัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นหลัก (Alizadeh et al., 2009; Land & Stephan, 2015b) การใส่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสังเคราะห์ทดแทนปูนซีเมนต์ในปริมาณ 2% โดยน้ำหนักส่งผลให้ปูนซีเมนต์มีการพัฒนาความแข็งแรงในช่วงต้นเพิ่มขึ้นในขณะที่ระยะเวลาก่อตัวทั้งช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายลดลงประมาณ 50% โดยประมาณ (Owens et al., 2014) การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นเป็นผลมาจากการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่างกัน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตให้ผลต่อการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเพิ่มปริมาณของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยการส่งเสริมกระบวนการไฮเดรชัน (Thomas et al., 2009) ถึงจะพบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพและเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จากการใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามผลเหล่านี้พบได้ในช่วงต้นซึ่งอาจพบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่แสดงผล โดยเฉพาะเมื่อใส่ในปริมาณที่น้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก (Land & Stephan, 2015a) เนื่องจากข้อจำกัดของการเกิดผลึกและการเร่งปฏิกิริยามีปัจจัยขึ้นกับพื้นที่ผิวของอนุภาคละเอียดที่ถูกใส่เข้าไปเพิ่มเติม (Lindgreen et al., 2008) ผลการเร่งปฏิกิริยาที่น้อยลงอาจมีผลมาจากพื้นที่ผิวที่ถูกทำให้น้อยลงจากการรวมตัวกันของอนุภาคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสังเคราะห์ที่ไม่สามารถรักษาขนาดดั้งเดิมระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ การเติมโคพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายหวี (Comb-like copolymers) สามารถช่วยทำให้แคลเซียมซิลิเกตสังเคราะห์มีการรวมตัวกันที่ต่ำอย่างคงที่ (Nicoleau et al., 2013b) พอลิเมอร์โพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์สามารถสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสังเคราะห์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์สังเคราะห์จึงมีความสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดในช่วงต้นได้อย่างมีนัยสำคัญให้แก่มอร์ตาร์ (Kanchanason & Plank, 2018)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยที่ผ่านมาทดสอบสมบัติเชิงกลเพียงแต่กำลังรับแรงอัดเพียงอย่างเดียวและมีจุดประสงค์ที่จะเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้มีความมากกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา อีกทั้งการใช้แคลเซียมซิลิเกตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ผสมแล้วลดยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่น้อยอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งที่จะเพิ่มองค์ความรู้ในด้านของการวัดสมบัติทางกายภาพในด้านระยะเวลาการก่อตัว การไหล และกำลังรับแรงดัดเพิ่มเติมด้วยเพื่อให้สามารถเป็นข้อมูลใช้ประกอบการประเมินสมบัติทางกายภาพเพื่อใช้ในงานจริง

และเพิ่มความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์พร้อมกับการผสมในปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเพื่อประเมินสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมให้มีสมบัติคล้ายกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดามากที่สุด



บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดานำมาทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน และตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาโดยใช้เครื่องมือ X-ray fluorescence spectroscopy

3.1.2 แก้วลอย

แก้วลอยเป็นวัสดุพลอยได้ที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินโดยในงานวิจัยนี้ใช้แก้วลอยจำนวน 5 ชนิดจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันในประเทศญี่ปุ่นที่มีปัญหาแก้วลอยมากจากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า และนำมาคัดขนาดผ่านตะแกรงให้มีขนาดอนุภาคของแก้วลอยอยู่ที่น้อยกว่า $45\ \mu\text{m}$ $45 - 75\ \mu\text{m}$ และมากกว่า $75\ \mu\text{m}$ และตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยโดยใช้เครื่องมือ X-ray fluorescence spectroscopy

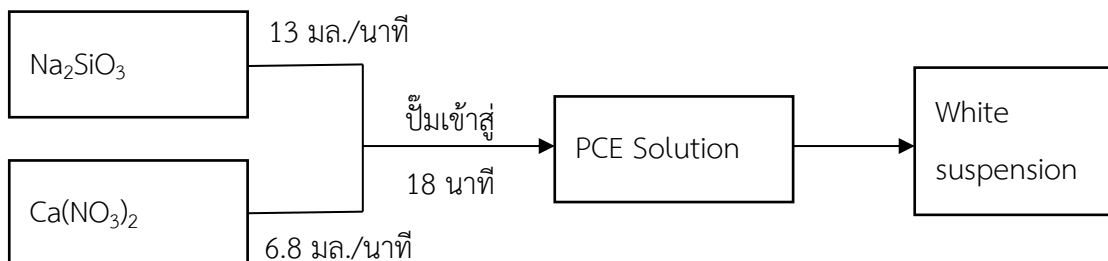
3.1.3 ซิลิกาฟุ่ม

ซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุที่มีสมบัติปอซโซลานที่เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการหลอมซิลิกอนสำหรับการวิจัยนี้เป็นซิลิกาฟุ่มจากบริษัท Elkem จำกัด และนำซิลิกาฟุ่มมาตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ่มก่อนการทดลองโดยใช้เครื่องมือ X-ray fluorescence spectroscopy

3.1.4 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ (CSH/PCE)

ในงานวิจัยนี้มีการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์เพื่อใช้สำหรับการทดลองนำไปใส่ในปูนซีเมนต์ผสมแก้วลอย การสังเคราะห์ดำเนินการโดยนำสารละลาย Na_2SiO_3 และสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ที่เตรียมไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้อยู่ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิห้อง ต่อมาป้อนสารละลายที่เตรียมไว้เข้าสู่สารละลายโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 8 ± 0.1 ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 13 มล./นาที่ และ 6.8 มล./นาที่ ตามลำดับภายใน 18 นาที ทำการกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กด้วยอัตรา 300 รอบ/นาที่ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและควบคุมค่า

ความเป็นกรดต่างให้อยู่ที่ 11.7 ± 0.1 ทำการกวนผสมต่อเนื่องอีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง และสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้ดังรูปที่ 12



- เตรียมสารในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส
- ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- ผสมด้วยแท่งแม่เหล็กที่อัตรา 300 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
- ควบคุมค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ที่ 11.7 ± 0.1
- กวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 12 การดำเนินการสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์

3.1.5 ทรายมาตรฐาน

ในงานวิจัยนี้ใช้งานมอร์ตาร์เป็นชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การเตรียมทรายมาตรฐานใช้ทรายนำมาล้างด้วยน้ำและทำให้แห้งจนเหลือค่าความชื้นไม่เกิน 0.2%

3.1.6 น้ำกลั่น

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำกลั่นทั้งหมดเพื่อต้องการควบคุมคุณภาพของตัวอย่างให้ได้ดีที่สุดและลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้น้ำประปา

3.2 การดำเนินการวิจัย

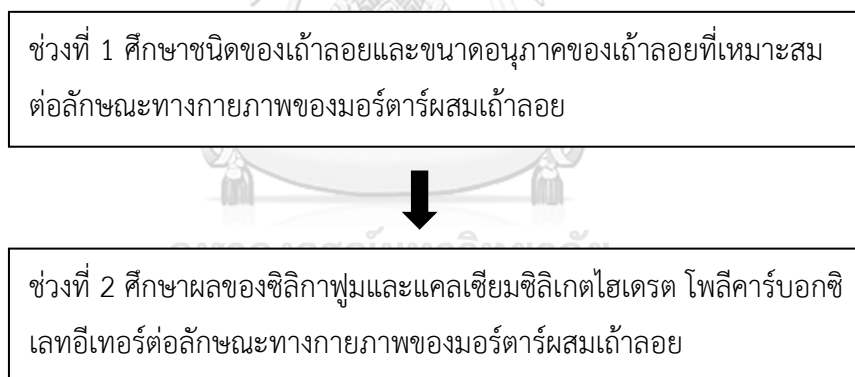
การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาชนิดของแก้วลอยและขนาดอนุภาคของแก้วลอยที่เหมาะสมต่อลักษณะทางกายภาพของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอย

การทดลองช่วงที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแก้วลอยที่มีจุดกำเนิดแตกต่างกันและมีขนาดอนุภาคที่ต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์อย่างไร เพื่อหาแก้วลอยชนิดที่

เหมาะสมและขนาดอนุภาคที่เหมาะสมกับการนำมาผสมทดแทนปูนซีเมนต์แล้วทำให้สมบัติทางกายภาพไม่แตกต่างไปจากการใช้ปูนซีเมนต์ที่เป็นชุดทดลองควบคุม โดยทำการทดลองวัดผลจากระยะเวลาการก่อตัว ความสามารถในการไหล กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด

การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาผลของซิลิกาฟุ่มและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอิเทอร์ต่อลักษณะทางกายภาพของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

การทดลองช่วงที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ซิลิกาฟุ่มหรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอิเทอร์เป็นสารเติมแต่งผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่เลือกใช้จากการทดลองที่ 1 ด้วยอัตราส่วน 10% ที่ทำให้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดามากที่สุด เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการปรับเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และหาอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งานเพื่อให้ปูนซีเมนต์ผสมมีสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ธรรมดาที่สุด โดยทำการทดลองวัดผลจากระยะเวลาการก่อตัว ความสามารถในการไหล กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด



รูปที่ 13 แผนการทดลองโดยรวมของงานวิจัย

รูปที่ 13 ดังแสดงข้างบนแสดงให้เห็นแผนการทดลองโดยรวมของงานวิจัยเมื่อได้ผลการทดลองที่ 1 แล้วจะเลือกเถ้าลอย 1 ชนิดเพื่อใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 ต่อไป

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ก่อนเริ่มต้นการทดลองจะนำปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา แก้วลอย และซิลิกาฟูมไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมเปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่าและคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 14 เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลขององค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 14 เครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

3.2.2 อัตราส่วนผสมของการทดลอง

การทดลองช่วงที่ 1 มีชุดการทดลองที่เป็นชุดควบคุมคือชุดทดลองที่เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาอัตราส่วน 100% โดยมีการผสมแก้วลอยจากแหล่งที่ต่างกัน 5 แหล่งโดยใช้ตัวอักษร FA แทนการใช้แก้วลอยและตัวเลข 1 2 3 4 และ 5 เป็นตัวแทนของแก้วลอยแต่ละแหล่งและนำมาคัดแยกขนาดอนุภาคแก้วลอยเป็น 3 ขนาดคือ น้อยกว่า $45 \mu\text{m}$ $45 - 75 \mu\text{m}$ และมากกว่า $75 \mu\text{m}$ โดยใช้ตัวอักษร F M และ C เป็นตัวแทนของขนาดอนุภาคตามลำดับ อัตราส่วนในการผสมแก้วลอยทดแทนปูนซีเมนต์คือ 10% และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to binder ratio) อยู่ที่ 0.55 ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงอัตราส่วนของส่วนผสมในแต่ละชุดการทดลองของการทดลองช่วงที่ 1

หากผลการทดลองของปูนซีเมนต์ผสมมีค่าไม่เหมาะสมต่อการทดลองเนื่องมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากหรือน้อยเกินไปจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้เหมาะสมเพื่อการทดลองมากขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนการใส่แก้วลอยทดแทนปูนซีเมนต์ที่กำหนดไว้หากพบว่าผลของการทดลองไม่เหมาะสมต่อการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมทดแทนให้มากขึ้นหรือลดลงตามความเหมาะสมต่อวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่อไป

ตารางที่ 4 อัตราส่วนของส่วนผสมในการทดลองที่ 1

ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนของส่วนผสม(%โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)				W/B ratio
	OPC	แก้ลยขนาดอนุภาค			
		น้อยกว่า 45 μm	45 - 75 μm	มากกว่า 75 μm	
Control	100	-	-	-	0.55
FA1 F	90	10	-	-	0.55
FA1 M	90	-	10	-	0.55
FA1 C	90	-	-	10	0.55
FA2 F	90	10	-	-	0.55
FA2 M	90	-	10	-	0.55
FA2 C	90	-	-	10	0.55
FA3 F	90	10	-	-	0.55
FA3 M	90	-	10	-	0.55
FA3 C	90	-	-	10	0.55
FA4 F	90	10	-	-	0.55
FA4 M	90	-	10	-	0.55
FA4 C	90	-	-	10	0.55
FA5 F	90	10	-	-	0.55
FA5 M	90	-	10	-	0.55
FA5 C	90	-	-	10	0.55

สำหรับการบันทึกผลการทดลองในช่วงที่ 1 ประเมินจากระยะเวลาการก่อตัว ความสามารถในการไหล กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด โดยการทดสอบความสามารถในการไหล กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดใช้ตัวอย่างเป็นมอร์ตาร์โดยใช้ทรายมาตรฐานใส่ผสมเพิ่มเติมด้วยอัตราส่วนทรายอยู่ที่สามส่วนต่อหนึ่งส่วนของปูนซีเมนต์โดยมวล ในขณะที่การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวใช้ตัวอย่างเป็นซีเมนต์เพสต์ในการทดลอง โดยรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองที่มีการทำซ้ำ 4 ครั้งในแต่ละชุดการทดลอง

ในการวิจัยช่วงที่ 2 มีชุดการทดลองที่เป็นชุดควบคุมคือชุดทดลองที่เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาอัตราส่วน 100% และคัดเลือกส่วนผสมที่ให้ผลต่อปูนซีเมนต์ผสมที่ผสมที่เหมาะสมที่สุด 1 ชนิดจากการทดลองช่วงที่ 1 เพื่อนำมาใช้ศึกษาผลของซิลิกาฟูมและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ โดยใช้ตัวอักษร SF แทนการใช้ซิลิกาฟูม ตัวอักษร CS แทนการใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ ตารางที่ 5 แสดงอัตราส่วนของส่วนผสมที่มีส่วนประกอบของส่วนผสม(10%) ซิลิกาฟูม(2.5% 5% และ 10%) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์(0.5% 1% และ 2%) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน(Water to binder ratio)อยู่ที่ 0.55

หากผลการทดลองของปูนซีเมนต์ผสมมีค่าไม่เหมาะสมต่อการทดลองเนื่องมาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากหรือน้อยเกินไปจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้เหมาะสมเพื่อการทดลองมากขึ้น

ตารางที่ 5 อัตราส่วนของส่วนผสมในการทดลองที่ 2

ชื่อส่วนผสม	อัตราส่วนของส่วนผสม(%โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)				W/B ratio
	OPC	FA	SF	CSH/PCE	
Control	100	-	-	-	0.55
FA10	90	10	-	-	0.55
FA10SF2.5	87.5	10	2.5	-	0.55
FA10SF5	85	10	5	-	0.55
FA10SF10	80	10	10	-	0.55
FA10CS0.5	89.5	10	-	0.5	0.55
FA10CS1	89	10	-	1	0.55
FA10CS2	88	10	-	2	0.55

สำหรับการบันทึกผลการทดลองในช่วงที่ 2 ประเมินจากระยะเวลาการก่อตัว ความสามารถในการไหล กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด โดยการทดสอบความสามารถในการไหล กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดใช้ตัวอย่างเป็นมอร์ตาร์โดยใช้ทรายมาตรฐานใส่ผสมเพิ่มเติมด้วยอัตราส่วน

ทรายอยู่ที่สามส่วนต่อหนึ่งของปูนซีเมนต์โดยมวล ในขณะที่การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวใช้ตัวอย่างเป็นซีเมนต์เพสต์ในการทดลอง โดยรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองที่มีการทำซ้ำ 4 ครั้งในแต่ละชุดการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ตามมาตรฐานของ Japan Industrial Standard (JIS) โดยดำเนินการทดลองตามวิธีที่ระบุไว้ใน JIS R 5201: 2015 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่จัดทำขึ้นโดยอ้างอิงตามมาตรฐานสากล ISO 9597 Second edition ที่ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 2008 และมาตรฐาน ISO 679 Second edition ที่ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 2009 โดยมีการปรับเปลี่ยนบางขั้นตอนเพื่อให้เหมาะสม

ในมาตรฐาน JIS R 5201: 2015 ขั้นตอนดำเนินการทดสอบได้มีการเสนอขั้นตอนที่สามารถใช้ได้เพิ่มเติมโดยมีความสัมพันธ์กับวิธีการทดสอบของมาตรฐานสากล ISO และมีบางขั้นตอนที่ไม่ได้ระบุวิธีการไว้ในมาตรฐานสากล

3.2.3 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (Setting time)

การทดสอบเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวในการวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เข็มแบบไวแคต (Vicat needle) ที่มีลักษณะดังรูปที่ 15 โดยเริ่มจากการเตรียมซีเมนต์เพสต์ด้วยการผสมส่วนผสมตามตารางแสดงอัตราส่วนผสมที่แสดงอยู่ในตารางที่ 3 และ 4 เข้ากับน้ำกลั่นโดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ที่ 0.55 ทำการกวนผสมด้วยช้อนกวนผสมด้วยระยะเวลา 3 นาที

การหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นดำเนินการโดยวิธีการดังนี้

1. นำซีเมนต์เพสต์ใส่ลงในบ้ำของเครื่องมือไวแคต
2. ปรับเคลื่อนส่วนเข็มให้สัมผัสกับพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์และหยุดเข็มในตำแหน่งนี้ 2 วินาที เพื่อไม่ให้มีแรงจากความเร็วเริ่มต้น
3. ปลดปล่อยเข็มทดสอบตามแนวตั้งที่จุดศูนย์กลางของซีเมนต์เพสต์พร้อมเริ่มจับเวลา
4. บันทึกผลเมื่อเข็มหยุดการเคลื่อนไหวหรือเมื่อผ่านไป 30 วินาทีหลังจากการปล่อยเข็ม

ทำการทดลองปล่อยเข็มช้ำบนตัวอย่างเดิมในพื้นที่ว่าง โดยห่างจากขอบของเบ้าไม่น้อยกว่า 8 มม. หรือห่างจากแต่ละการทดสอบไม่น้อยกว่า 5 มม. และห่างจากการทดสอบครั้งล่าสุดไม่น้อยกว่า 10 มม. การทดสอบช้ำต้องทำความสะอาดเข็มทดสอบทันทีหลังการทดสอบแต่ละครั้งโดยมีระยะเวลาทดสอบแต่ละครั้งห่างกัน 5 นาที และระยะเวลา(นาที)ที่เข็มสามารถกดซีเมนต์เพสต์ลงไปให้มีระยะระหว่างเข็มและฐานอยู่ที่ 1 มม.ให้บันทึกเป็นระยะก่อดำเริ่มต้น



รูปที่ 15 เข็มของไวแคต (Vicat needle)

การหาระยะเวลาก่อดำสุดท้ายดำเนินการโดยวิธีการดังนี้

1. กลับด้านของซีเมนต์เพสต์ในเบ้าเครื่องมือไวแคตจากการทดสอบหาระยะเวลาก่อดำเริ่มต้น
2. เริ่มลดระดับเข็มของไวแคตจนสัมผัสกับผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์และหยุดเข็มที่ตำแหน่งนี้ 2 วินาทีเพื่อไม่ให้เกิดแรงจากความเร็วเริ่มต้น
3. ปล่อยเข็มตามแนวตั้งจุดศูนย์กลางของซีเมนต์เพสต์พร้อมเริ่มจับเวลา
4. บันทึกผลเมื่อเข็มหยุดการเคลื่อนไหวหรือเมื่อผ่านไป 30 วินาทีหลังจากการปล่อยเข็ม

ทำการทดลองปล่อยเข็มช้ำบนตัวอย่างเดิมบนพื้นที่ที่ว่างโดยห่างจากขอบของเบ้าไม่น้อยกว่า 8 มม. หรือห่างจากแต่ละการทดสอบไม่น้อยกว่า 5 มม. และห่างจากการทดสอบครั้งล่าสุดไม่น้อยกว่า 10 มม. การทดสอบช้ำต้องทำความสะอาดเข็มทดสอบทันทีหลังการทดสอบแต่ละครั้งโดยมีระยะเวลาทดสอบแต่ละครั้งห่างกัน 5 นาที บันทึกระยะเวลาที่เข็มสามารถกดซีเมนต์เพสต์ได้แต่วงแหวนรอบเข็มไม่สามารถทั้งร่องรอยได้

3.2.4 การเตรียมมอร์ตาร์

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้มอร์ตาร์ในการเป็นแบบการทดสอบของการไหลแผ่ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และการดัดโค้งเพื่อประเมินสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ โดยมีขั้นตอนในการเตรียมมอร์ตาร์ดังนี้

1. เตรียมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เถ้าลอย ซิลิกาฟูม แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพสิคาร์บอกลีเทออีเทอร์ น้ำกลั่น และทรายมาตรฐาน

2. ผสมส่วนผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3 หรือ 4 ตามช่วงการทดลองโดยใช้อัตราส่วนทรายอยู่ที่สามส่วนต่อหนึ่งของปูนซีเมนต์โดยมวล

3. เทน้ำผสมลงไปด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ที่ 0.55 โดยทำการกวนผสมทันทีหลังจากการใส่น้ำผสมลงไป และเริ่มผสมทรายมาตรฐานหลังจากผ่านไป 30 วินาทีแล้วกวนผสมต่ออีก 30 วินาที

4. เทมอร์ตาร์ที่ผ่านการกวนผสมแล้วลงในแม่พิมพ์ขนาด 40x40x160 มม. ทันที

5. นำมอร์ตาร์ออกจากแม่พิมพ์ด้วยความระมัดระวังเมื่ออายุอยู่ระหว่าง 20 – 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานใส่ในถังบ่มตัวอย่าง (Curing tank) ที่บรรจุน้ำอยู่ให้จมลงในแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ ในระหว่างการบ่มตัวอย่างจะทำการไหลเวียนระบบน้ำโดยไม่ให้เกิดการแทนที่น้ำมากเกินไปครั้งหนึ่งของน้ำในถังบ่มตัวอย่าง สำหรับชิ้นงานที่ต้องทำการทดสอบที่อายุ 1 วัน หลังจากนำตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์เวลา 20 นาทีก่อนทดสอบและคลุมชิ้นงานตัวอย่างด้วยผ้าชื้นจนกว่าจะนำไปทดสอบชิ้นงาน

สำหรับการทดลองที่ต้องหล่อมอร์ตาร์ในแม่พิมพ์ขนาด 40x40x160 มม. ใช้อายุของมอร์ตาร์ในการทดสอบที่หลายช่วงอายุ โดยเริ่มนับอายุของมอร์ตาร์ตั้งแต่วันที่เริ่มผสมปูนซีเมนต์เข้ากับน้ำ และมีอายุจำกัดที่ยอมรับสำหรับการทดสอบดังนี้

ก) อายุ 1 วัน: 24 ชั่วโมง \pm 15 นาที

ข) อายุ 7 วัน: 7 วัน \pm 2 ชั่วโมง

ค) อายุ 14 วัน: 28 วัน \pm 8 ชั่วโมง

ง) อายุ 28 วัน: 28 วัน \pm 8 ชั่วโมง

การหล่อมอร์จาร์ในแม่พิมพ์ขนาด 40x40x160 มม. ใช้แม่พิมพ์ดังรูปที่แสดงในรูปที่ 16 ซึ่งสามารถหล่อมอร์จาร์ได้ตามขนาดได้สามชิ้นงานสำหรับการหล่อหนึ่งรอบ



รูปที่ 16 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อมอร์จาร์ขนาด 40x40x160 มม.

โดยการหล่อมอร์จาร์ในแม่พิมพ์ขนาด 40x40x160 มม. ใช้วัสดุในการหล่อมอร์จาร์ปริมาณดังนี้

- | | |
|-------------------------------|----------------|
| ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา | 450 ± 2 กรัม |
| ข. ทรายมาตรฐาน | 1,350 ± 5 กรัม |
| ค. น้ำ | 225 ± 1 กรัม |

ในชุดการทดลองที่ใช้แก้วลอย ซิลิกาฟูม และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซีเลทอีเทอร์ผสมทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาจะปรับเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณเฉพาะส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาให้ลดลงเพื่อผสมวัสดุทดแทน

3.2.5 การทดสอบการไหลแม่

การทดสอบการไหลแม่ของมอร์จาร์ใช้ตัวอย่างมอร์จาร์ที่ไม่ได้หล่อในแม่พิมพ์เนื่องจากต้องการทดสอบสมบัติในการไหลและความชื้นเหลวของมอร์จาร์สดที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของตัวอย่างมอร์จาร์ โดยการทดสอบการไหลในงานวิจัยนี้ใช้วิธีทดสอบโดยใช้โต๊ะทดสอบการไหล (Flow table) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 โต๊ะทดสอบการไหล (Flow table)

การดำเนินการทดสอบโดยการใช้โต๊ะทดสอบการไหล

1. นำมอร์ตาร์ที่ผสมแล้วตามข้อ 4.2.3 ใส่ลงในกรวยแม่แบบทดสอบ(Flow cone)ที่วางอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของโต๊ะทดสอบการไหล(Flow table)ในปริมาณครึ่งหนึ่งของกรวย
2. กดมอร์ตาร์ 15 ครั้งด้วยแท่งตาคอนกรีต(tamping rod)ให้ทั่วบริเวณพื้นผิว
3. เติummอร์ตาร์ลงไปอีกหนึ่งชั้นแล้วทำการกดด้วยแท่งตาคอนกรีต(tamping rod) 15 ครั้ง
4. ปาดส่วนเกินออกจากพื้นผิวหน้าให้เรียบเนียน
5. ยกกรวยออกทางแนวตั้งทันทีและเริ่มดำเนินการหมุนยกโต๊ะทดสอบการไหล(Flow table)ให้เคาะ 15 ครั้ง ในระหว่าง 15 วินาที

บันทึกผลการทดลองด้วยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดของมอร์ตาร์ที่แผ่ออกจากการเคาะและเส้นผ่านศูนย์กลางในมุมตั้งฉาก

3.2.6 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างที่หล่อในแม่พิมพ์ขนาด 40x40x160 มม. สำหรับหนึ่งชุดการทดลองใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่องทดสอบ Compressive strength testing machine ดังที่แสดงในรูปที่ 18 ที่ที่มีสมบัติตามมาตรฐาน JIS B 7721 ที่สามารถให้อัตราเพิ่มแรงอัดอยู่ที่ $2,400 \pm 200$ N/s



รูปที่ 18 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength testing machine)

การคำนวณกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างสามารถใช้สมการดังแสดงนี้

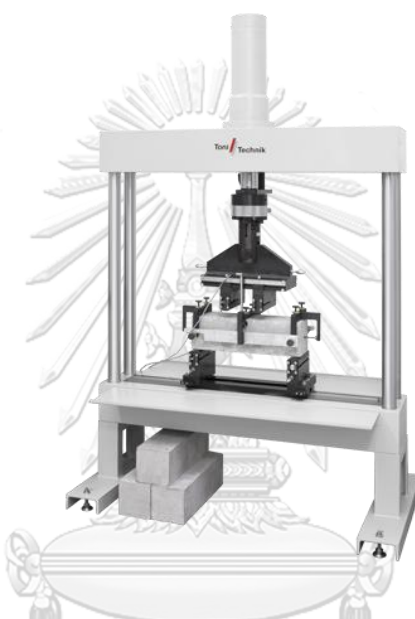
$$C = \frac{W}{1600}$$

เมื่อ C คือ กำลังรับแรงอัด (N/mm^2)

W คือ แรงที่รับได้สูงสุด (N)

3.2.7 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural strength)

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างที่หล่อในแม่พิมพ์ขนาด 40x40x160 มม. สำหรับหนึ่งชุดการทดลองใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของค่ากำลังรับแรงดัด โดยใช้เครื่องทดสอบ Flexural strength testing machine ที่มีลักษณะดังรูปที่ 19 สมบัติตามมาตรฐาน JIS B 7721 ที่สามารถให้แรงมากถึง 10 kN ที่อัตรา 50 ± 10 N/s และจัดวางชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 20



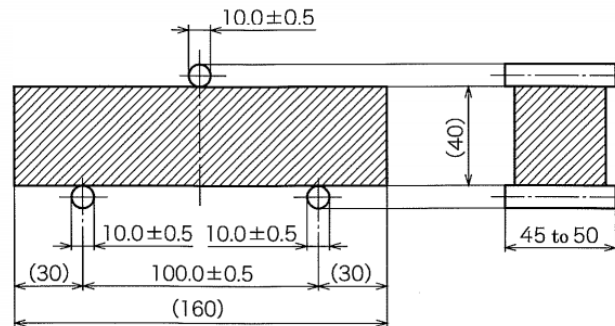
รูปที่ 19 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural strength testing machine)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ลักษณะของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด

1. เครื่องทดสอบสามารถให้แรงมากถึง 10 kN ที่อัตรา 50 ± 10 N/s
2. วัสดุของตัวกด>Loading rollers)และตัวรองรับ(Supporting rollers)ควรเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน
3. รายละเอียดและการจัดวางตำแหน่งของตัวกดและตัวรองรับดำเนินการตามข้อดังกล่าว
 - 3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกด 10 ± 0.5 มม.
 - 3.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวรองรับ 10 ± 0.5 มม.
 - 3.3 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของตัวรองรับทั้งสอง 100 ± 0.5 มม.
 - 3.4 ความยาวของตัวรองรับ 45 – 50 มม.

4. ตัวกดและตัวรองรับวางไว้ในแนวขนานกันและตัวกดวางอยู่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างตัวรองรับทั้งสอง



Unit: mm

รูปที่ 20 การจัดเรียงตำแหน่งของตัวกดและตัวรองรับของเครื่องวัดกำลังรับแรงดัด

การคำนวณค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างสามารถใช้สมการดังแสดงนี้

$$R_f = \frac{1.5F_f l}{b^3}$$

เมื่อ R_f คือ ค่ากำลังรับแรงดัด (N/mm^2)

b คือ ความยาวด้านของส่วนจัตุรัสของปริซึม (mm)

F_f คือ แรงที่รับได้สูงสุด (N)

L คือ ระยะห่างระหว่างตัวรองรับ (mm)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจาก 5 แหล่งกำเนิดโดยแบ่งเป็น 3 ขนาดอนุภาคคือ ขนาดน้อยกว่า 45 μm ขนาดระหว่าง 45 – 75 μm และขนาดระหว่าง 75 – 150 μm หาโดยวิธี X-Ray fluorescence (XRF) ดังตารางที่ 6 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั้งหมดและปูนซีเมนต์ในงานวิจัย พบว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีค่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ถึงร้อยละ 65.58% ซึ่งแคลเซียมออกไซด์นี้เป็นสารประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำแล้วจึงเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งการเชื่อมประสานของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับ การเกิดขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นหลักที่จะทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว

สำหรับเถ้าลอยทั้งหมด มีปริมาณค่าของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 ขององค์ประกอบทั้งหมดที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C618 เมื่อใช้เกณฑ์ตามที่ได้ระบุไว้พบว่าเถ้าลอยจากทุกแหล่งกำเนิดและทุกขนาดอนุภาคสามารถจำแนกให้อยู่ใน class F ยกเว้นเถ้าลอยชนิดFA2-C และ FA4-F ที่สามารถจำแนกให้อยู่ใน class C เนื่องจากมีค่าออกไซด์ดังกล่าวมากกว่าร้อยละ 50 แต่ไม่ถึงร้อยละ 70

ค่า Loss on ignition (LOI) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา ซึ่งเกิดจากการสูญเสียธาตุคาร์บอน ธาตุซัลเฟอร์ และค่าความชื้นจากการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยค่าLOIของเถ้าลอยทั้งหมดมีค่าไม่เกินร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าไม่มีค่าLOIเกินกว่าตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และเถ้าลอย

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
OPC	16.98	4.69	3.38	65.58	1.78	2.75	0.03
FA1-F	55.65	30.86	2.72	0.59	0.17	-	0.05
FA1-M	55.48	26.17	2.55	1.10	-	0.14	0.11
FA1-C	52.36	22.69	1.72	1.08	-	0.22	0.19
FA2-F	60.61	18.72	3.85	1.04	0.17	-	0.12
FA2-M	51.47	15.29	4.57	1.13	0.15	0.15	0.24

FA2-C	37.78	13.26	0.26	0.96	0.14	0.23	0.42
FA3-F	52.04	22.82	0.26	6.36	1.40	0.38	0.03
FA3-M	49.41	23.06	7.78	7.20	1.17	0.26	0.05
FA3-C	51.94	23.98	6.61	6.07	1.05	0.22	0.04
FA4-F	45.01	17.21	3.46	1.99	0.37	0.40	0.13
FA4-M	55.72	19.31	3.46	1.94	0.29	0.50	0.15
FA4-C	61.35	21.21	4.07	2.08	0.32	0.54	0.07
FA5-F	56.63	24.88	5.11	1.81	0.56	0.32	0.06
FA5-M	53.53	23.56	3.84	1.82	0.39	0.23	0.13
FA5-C	58.88	26.44	3.84	1.74	0.38	0.35	0.05
Silica fume	97.83	-	570 ppm	0.532	0.2	-	-

4.2 การทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค

การทดลองช่วงที่ 1 มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบผลของการใช้เถ้าลอยที่มีจุดกำเนิดและขนาดอนุภาคแตกต่างกันเมื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา โดยในการทดลองนี้ได้ทดสอบผลของคุณสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

4.2.1 ระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ธรรมดา และปูนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาคดำเนินการด้วยเครื่องทดสอบเข็มของไวแคต ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 7 ซึ่งแสดงปริมาณน้ำที่ได้ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวต้น และระยะเวลาก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์ พบว่าปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมีค่าความชื้นเหลือปกติเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ชุดควบคุมที่มีค่าอยู่ที่ และขนาดอนุภาคที่ต่างกันของเถ้าลอยส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 7 ร้อยละปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายของซีเมนต์
เพสต์ผสมเถ้าลอย

ชื่อส่วนผสม	Normal consistency (%)	Initial setting time (Min)	Final setting time (Min)
Control	25.91	75	180
FA1-F	25.33	90	240
FA1-M	26.12	90	240
FA1-C	26.85	75	225
FA2-F	26.49	90	240
FA2-M	26.66	75	240
FA2-C	28.48	75	225
FA3-F	26.24	90	240
FA3-M	26.61	90	240
FA3-C	28.78	60	225
FA4-F	26.44	90	240
FA4-M	27.2	90	225
FA4-C	27.85	75	225
FA5-F	26.22	90	240
FA5-M	26.24	90	240
FA5-C	27.19	90	240

ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยพบว่ามีค่าระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุม ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นของซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุมมีค่าอยู่ที่ 75 นาที การใช้เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์พบว่าส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยชนิดเดียวกันที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า โดยเถ้าลอยจากส่วนผสม FA1-C, FA2-M, FA2-C และ FA4-C ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุมที่สุดเท่ากับ 75 นาที

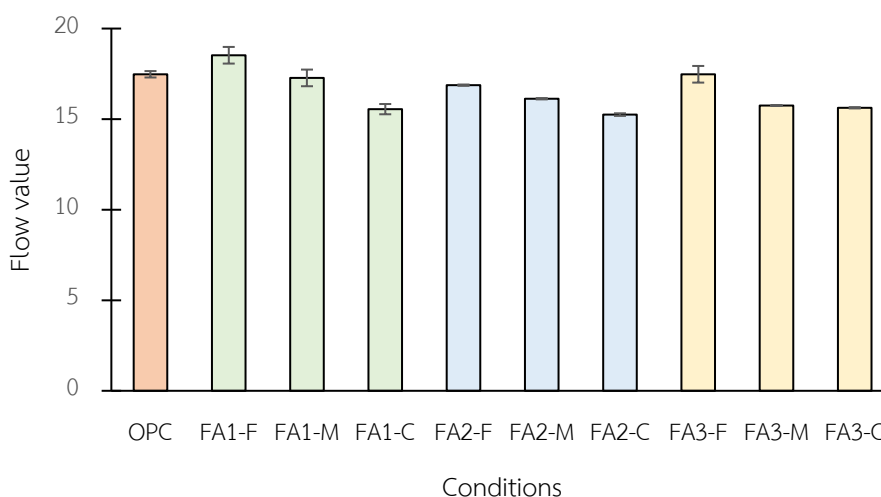
สำหรับค่าระยะเวลาก่อตัวช่วงปลายของปูนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยพบว่าให้ผลที่มีแนวโน้มเหมือนกับระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นคือระยะเวลาก่อตัวปลายมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุมที่มีค่าอยู่ที่ 180 นาที โดยขนาดอนุภาคของเถ้าลอยส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวช่วง

ปลายด้วยเช่นกัน เมื่อใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดมากขึ้นผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนเดียวกันพบว่าทำให้มีระยะเวลาก่อตัวช่วงปลายมากขึ้นด้วย

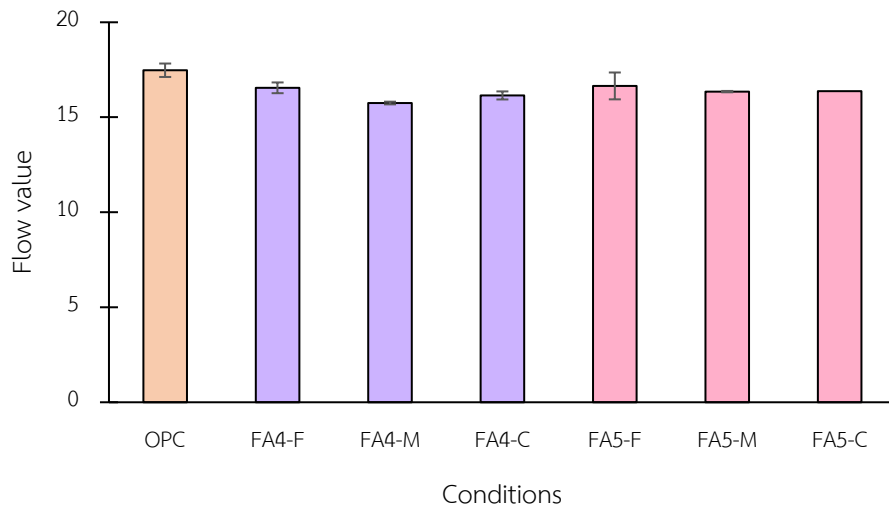
ผลจากการศึกษานี้พบว่าการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่อผลสอดคล้องกับงานการศึกษาก่อนหน้าโดยการลดอัตราส่วนปูนซีเมนต์รวมลงนั้นส่งผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นเกิดขึ้นน้อยลงและทำให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้นในท้ายที่สุด (Islam et al., 2022)

4.2.2 ความสามารถในการไหลแผ่

จากการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน JIS R5201 ของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยจากห้าแหล่งกำเนิดที่มีขนาดแตกต่างกันสามขนาดที่อัตราส่วนผสมทดแทนปูนซีเมนต์เท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่มีค่าดังแสดงในรูปที่ 21 และ 22 พบว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์นั้นได้ค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่าชุดทดลองควบคุม ยกเว้นการใส่เถ้าลอย 1 ที่ขนาดอนุภาคน้อยกว่า $45\ \mu\text{m}$ และพบว่าเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาค $75 - 150\ \mu\text{m}$ ส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ที่ลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับในแต่ละชนิดของเถ้าลอย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่พบว่าเถ้าลอยที่มีขนาดมากกว่า $75\ \mu\text{m}$ ส่งผลให้มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ขนาดเล็กกว่า $45\ \mu\text{m}$ (Bicer, 2018)



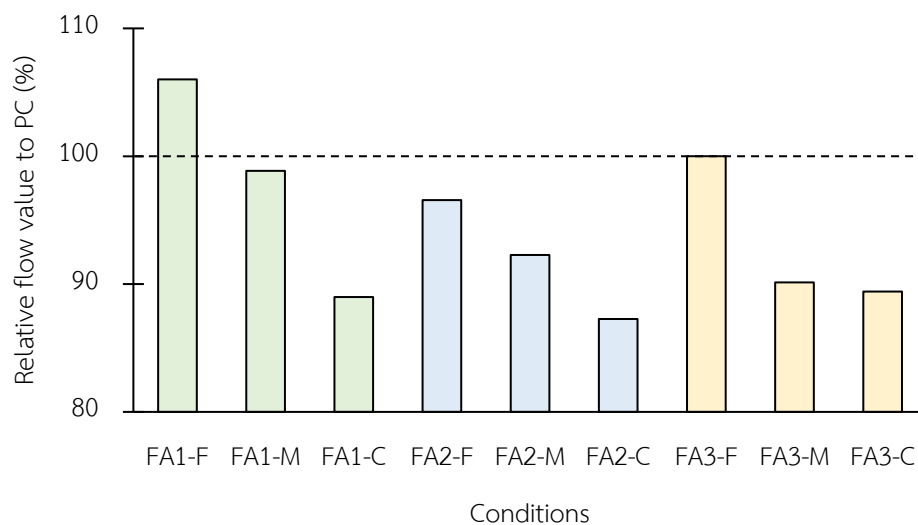
รูปที่ 21 กราฟค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิด FA1, 2 และ 3



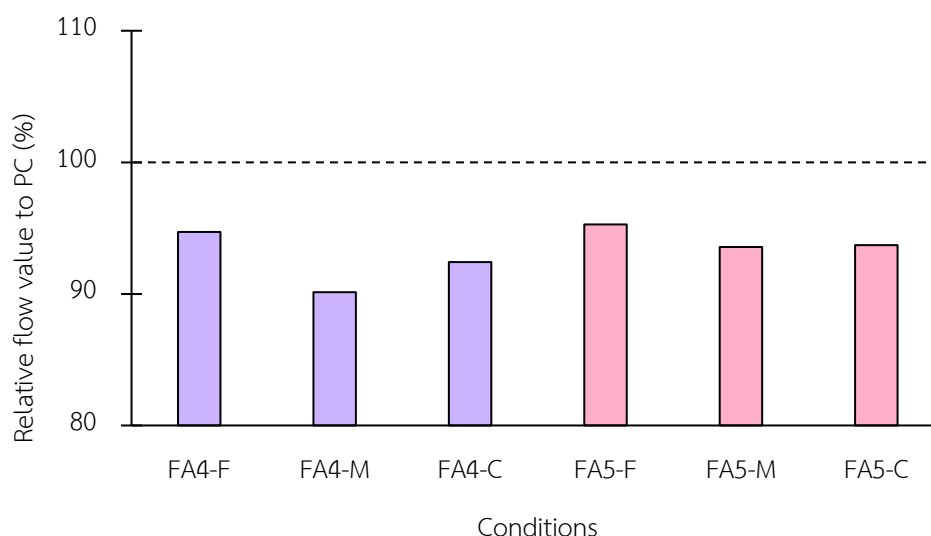
รูปที่ 22 กราฟค่าการไหลแม่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA4 และ 5

ค่าร้อยละค่าการไหลแม่เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาแสดงในรูปที่ 23 และ 24 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยปริมาณ 10 % ส่งผลให้ค่าการไหลแม่มีค่าลดลงในทุกชนิดและขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ยกเว้นการแทนที่ด้วยเถ้าลอย J1 ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm ที่ส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลที่เพิ่มขึ้น 6 % ในขณะที่การผสมเถ้าลอย J1 J2 และ J3 ที่ขนาดอนุภาคระหว่าง 75 -150 μm ส่งผลให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีค่าการไหลที่ลดลงมากกว่า 10 % และการผสมเถ้าลอยชนิด K1 และ T2 นั้นส่งผลให้มีค่าการไหลที่ลดลงไม่เกิน 10 % ที่ทุกขนาดอนุภาค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 23 กราฟร้อยละค่าการไหลแม่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1, 2 และ 3



รูปที่ 24 กราฟร้อยละค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA4 และ 5

ค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์จากการศึกษานี้มีแนวโน้มเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานศึกษาก่อนหน้า พบว่ามีการทดลองผสมเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนร้อยละ 25 ทดแทนปูนซีเมนต์ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Han et al., 2019) และนอกจากนี้พบแนวโน้มของความละเอียดเถ้าลอยต่อค่าการไหลผ่านเกี่ยวกับการศึกษานี้ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดเถ้าลอยที่หยาบกว่าส่งผลให้มีค่าความต้องการน้ำที่มากขึ้นและเมื่อในการศึกษาใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานคงที่จึงส่งผลให้มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดหยาบมีค่าการไหลผ่านที่ลดลง (Moghaddam et al., 2019)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 กำลังรับแรงอัด

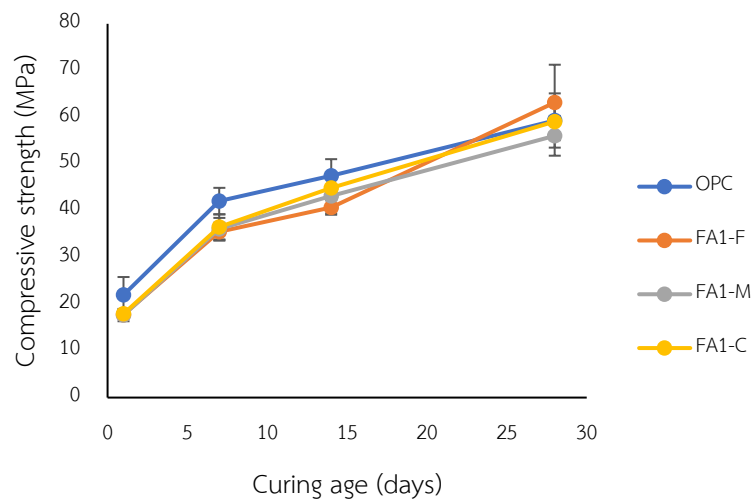
การทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยการทดสอบมอร์ตาร์หล่อทรงปริซึมสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4x4x16 ซม. โดยการทดลองได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาด้วยเถ้าลอย 5 ชนิดจากประเทศญี่ปุ่นที่คัดเป็นขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm ขนาดระหว่าง 45 – 75 μm และ ขนาดอนุภาคระหว่าง 75 – 150 μm ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนทรายสามส่วนต่อหนึ่งส่วนปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 การทดสอบกำลังรับแรงอัดทำที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน ตารางที่ 8 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ชุดควบคุมและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีการพัฒนาขึ้นเมื่อมีอายุการบ่มที่มากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจึงเกิดผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ การผสมเถ้าลอยปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทดแทนปูนซีเมนต์ส่งผลต่อค่ากำลังรับ

แรงอัด โดยในช่วงระยะเวลาการบ่มที่ 1 และ 7 วัน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่า มอร์ตาร์ปราศจากเถ้าลอย เพราะการผสมเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ปฏิกริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในช่วงอายุนี้จึงน้อยลงตามไป ทำให้ท้ายที่สุดส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย อย่างไรก็ตามในช่วงอายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มสูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ปราศจากเถ้าลอย ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยที่มีปริมาณของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์อยู่มากทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจนได้เป็นโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ สำหรับขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่แตกต่างกันส่งผลต่อความไวต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพื้นที่ผิวของเถ้าลอย โดยขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่ละเอียดขึ้นส่งผลให้ในช่วงอายุการบ่มที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า พื้นที่ผิวที่มากของเถ้าลอยที่มีความละเอียดเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานให้มากขึ้นและเร็วขึ้นกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า การศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าการผสมเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักส่งผลให้การพัฒนาำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงอายุการบ่ม(Wongkeo et al., 2012) และมีการทดลองใช้เถ้าลอยที่มีค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาค D50 อยู่ที่ 2.3 μm เปรียบเทียบกับชนิดที่มีการกระจายตัว D50 เท่ากับ 13.7 μm พบว่าเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่าการใช้เถ้าลอยที่ไม่ได้คัดขนาดในทุกช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 1 – 28 วัน เนื่องจากความละเอียดของเถ้าลอยมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์และเถ้าลอยไม่คัดขนาด จึงมีความสามารถในการเติมเต็มช่องว่างได้มากกว่าและสามารถสร้างผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ง่ายซึ่งเป็นผลโดยตรงต่อการพัฒนาความแข็งแรง(Yang et al., 2021)

ตารางที่ 8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค

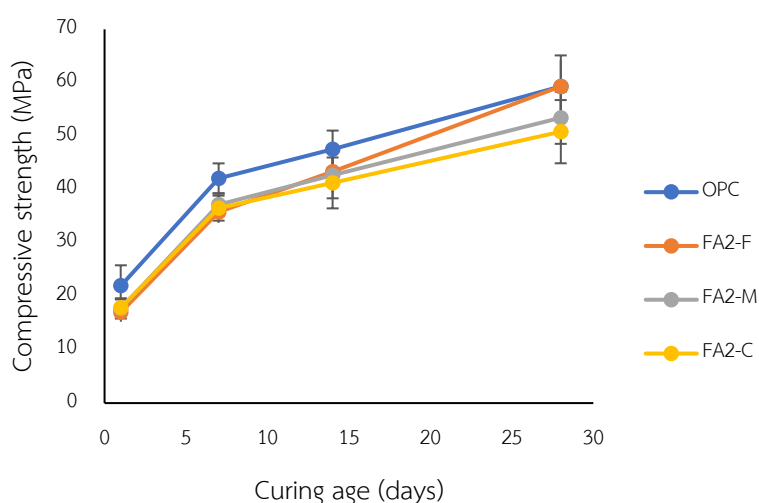
ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (MPa)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	21.97	42.05	47.51	59.30
FA1-F	17.77	35.52	40.67	63.16
FA1-M	17.66	36.11	43.20	56.03
FA1-C	17.94	36.53	44.85	59.09
FA2-F	17.02	35.76	43.32	59.30
FA2-M	17.73	37.15	42.67	53.44

FA2-C	17.88	36.51	41.23	50.83
FA3-F	17.96	37.47	43.45	61.57
FA3-M	17.26	36.12	39.07	58.05
FA3-C	17.70	37.29	40.61	58.32
FA4-F	18.77	37.04	43.39	63.54
FA4-M	17.55	37.35	42.55	54.66
FA4-C	17.30	36.46	42.48	56.64
FA5-F	17.80	37.34	46.35	62.74
FA5-M	17.70	36.91	39.94	56.48
FA5-C	16.89	37.07	42.13	55.30



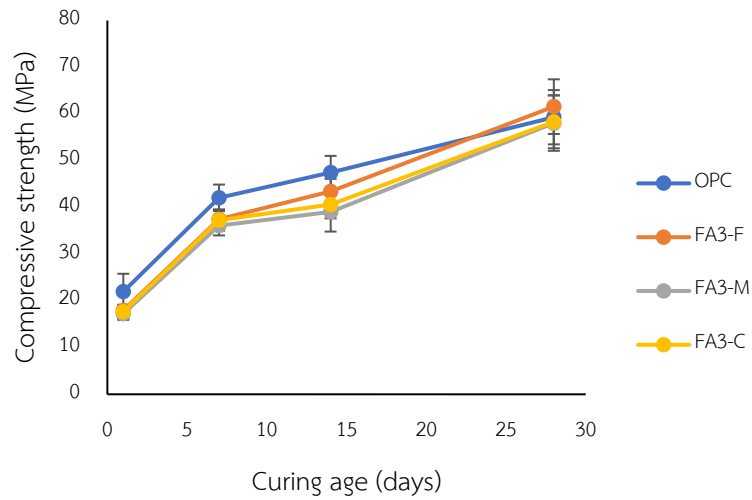
รูปที่ 25 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ชุดควบคุมเป็นไปดังรูปที่ 25 โดยที่ช่วงอายุการบ่ม 1 – 14 วัน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1มีค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่ามอร์ตาร์ชุดควบคุม โดยเริ่มพบแนวโน้มว่าเถ้าลอยเริ่มมีกำลังรับแรงอัดเข้าใกล้มอร์ตาร์ชุดควบคุมตั้งแต่อายุ 14 วันขึ้นไป โดยที่อายุ 28 วัน พบว่ามีแนวโน้มที่เถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า 45 μm มีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่าเถ้าลอยขนาดหยาบกว่า โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 63.16 MPa ซึ่งมากกว่ามอร์ตาร์ชุดควบคุมที่มีค่า 59.30 MPa



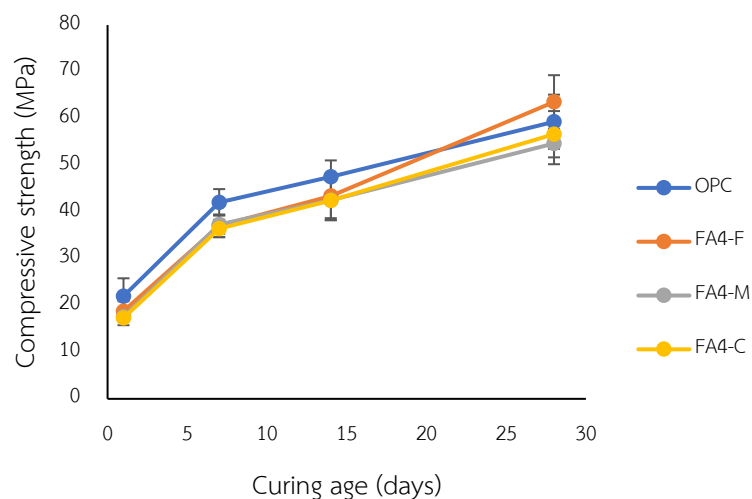
รูปที่ 26 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA2

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA2เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ชุดควบคุมเป็นไปดังรูปที่ 26 เถ้าลอยชนิดFA2ส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง โดยพบแนวโน้มเถ้าลอยที่ละเอียดกว่าส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดที่มากกว่าเถ้าลอยที่หยาบกว่าตั้งแต่อายุการบ่ม 14 วัน โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า 45 μm มีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับชุดควบคุมอยู่ที่ 59.30 MPa



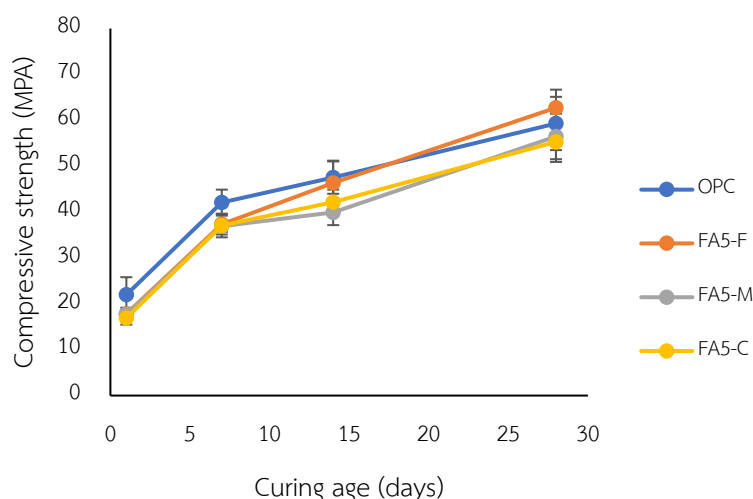
รูปที่ 27 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA3

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA3เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ชุดควบคุมเป็นไปดังรูปที่ 27 พบว่าเถ้าลอยชนิดFA3ให้ผลที่คล้ายกับเถ้าลอยชนิดFA2ที่ให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าชุดควบคุมในช่วง 1 – 14 วัน และมีความใกล้เคียงกับชุดควบคุมมากขึ้นที่อายุ 28 วัน โดยที่ความละเอียดน้อยกว่า $45 \mu\text{m}$ มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 61.57 MPa ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่มากกว่าชุดควบคุม



รูปที่ 28 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA4

การพัฒนาแรงกำลังรับอัดของเถ้าลอยชนิดFA4ดังรูปที่ 28 แสดงเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม พบว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า $45\ \mu\text{m}$ ให้ผลกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยมากกว่าชุดควบคุม โดยมีค่าเท่ากับ $63.54\ \text{MPa}$



รูปที่ 29 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA5

เถ้าลอยชนิดFA5มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 29 พบว่าที่ความละเอียดน้อยกว่า $45\ \mu\text{m}$ มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่อายุการบ่ม 14 วัน และที่อายุ 28 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ $62.74\ \text{MPa}$

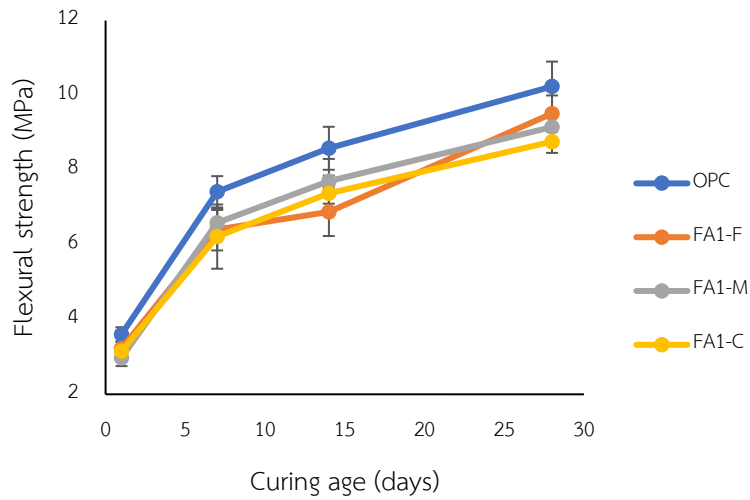
4.2.4 กำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดด้วยการทดสอบมอร์ตาร์หล่อทรงปริซึมสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $4 \times 4 \times 16\ \text{cm}$. โดยการทดลองได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาด้วยเถ้าลอย 5 ชนิดจากประเทศญี่ปุ่นที่คัดเป็นขนาดอนุภาคน้อยกว่า $45\ \mu\text{m}$ ขนาดระหว่าง $45 - 75\ \mu\text{m}$ และ ขนาดอนุภาคระหว่าง $75 - 150\ \mu\text{m}$ ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนทรายสามส่วนต่อหนึ่งส่วนปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 การทดสอบกำลังรับแรงดัดทำที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน ตารางที่ 9 แสดงกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ชุดควบคุมและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยคัดขนาด พบว่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคต่างกันในช่วงอายุต้นมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ของชุดควบคุม เมื่อมีการใช้เถ้าลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเกิดขึ้นน้อยลงจึงเป็นผลให้มีค่ากำลังรับแรงดัดลดลง เมื่อมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีอายุการบ่มที่มากขึ้นพบว่าค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ชุดควบคุมมากขึ้น เนื่องจาก

ในช่วงอายุปลายเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์จากเถ้าลอยเพิ่มขึ้นหรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นเป็นโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล และขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่ละเอียดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการทำปฏิกิริยาปอซโซลานให้มากขึ้นและเร็วขึ้น จึงพบว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน การผสมเถ้าลอยที่ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปราศจากเถ้าลอยและมากกว่าเมื่อเทียบกับการผสมเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า

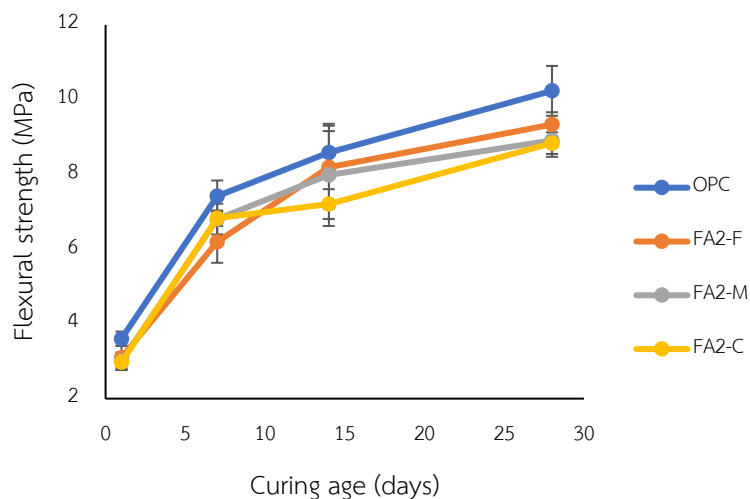
ตารางที่ 9 กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค

ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงดัด (MPa)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	3.60	7.42	8.58	10.23
FA1-F	3.22	6.41	6.88	9.51
FA1-M	2.98	6.59	7.70	9.15
FA1-C	3.16	6.22	7.38	8.76
FA2-F	3.10	6.20	8.19	9.33
FA2-M	3.00	6.80	7.99	8.90
FA2-C	2.97	6.83	7.21	8.83
FA3-F	3.25	7.01	8.01	9.63
FA3-M	3.01	6.47	7.25	9.24
FA3-C	2.94	6.62	7.00	8.71
FA4-F	3.16	6.94	8.57	9.56
FA4-M	2.95	6.68	8.05	9.40
FA4-C	3.04	6.14	7.49	8.96
FA5-F	3.15	6.72	7.45	9.52
FA5-M	3.13	6.40	6.87	9.41
FA5-C	3.12	6.08	6.94	9.22



รูปที่ 30 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1

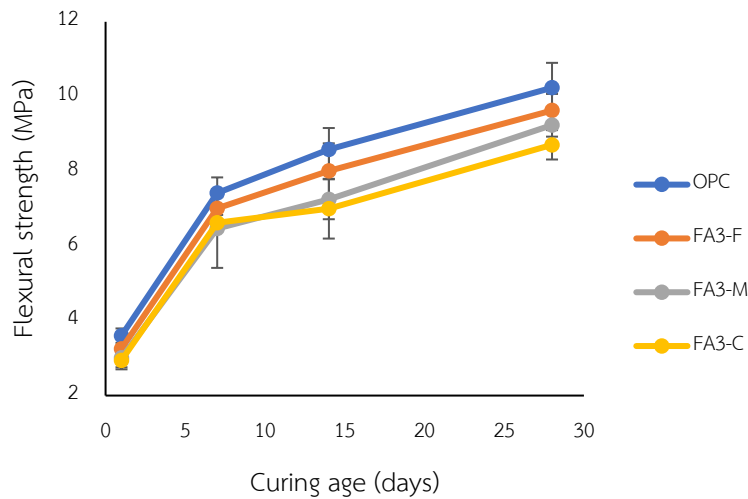
การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1เปรียบเทียบกับชุดควบคุม เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 30 ค่ากำลังรับแรงดัดของเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า 45 μm พบว่าเริ่มมีค่ามากกว่าเถ้าลอยที่หยาบกว่าทั้งสองขนาดที่อายุการบ่มหลัง 28 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 9.51 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ชุดควบคุมมากที่สุดที่มีค่าเท่ากับ 10.23 MPa



รูปที่ 31 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA2

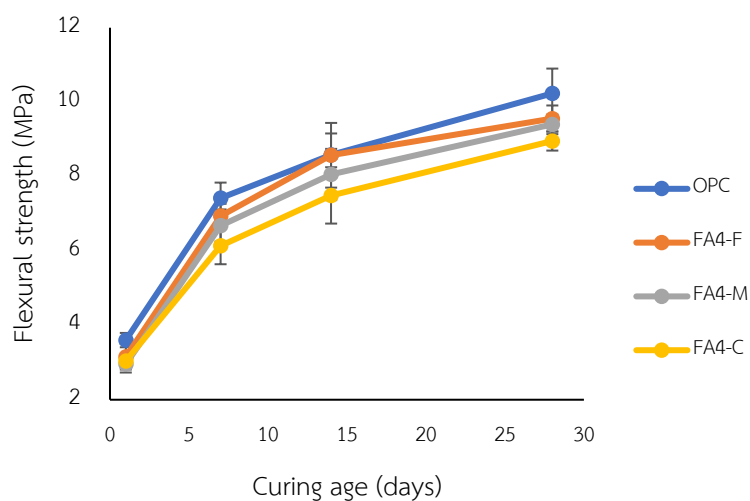
การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA2เปรียบเทียบกับชุดควบคุม เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 31 พบว่ามีแนวโน้มของเถ้าลอยที่ละเอียดกว่ามีกำลังรับแรงดัดมากกว่าเถ้า

ลวยที่หยาบกว่าตั้งแต่อายุ 14 วัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกันแต่ขนาดอนุภาคที่อายุการบ่ม 28 วัน
 ใ้ลวยที่ละเอียดน้อยกว่า 45 μm มีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดเท่ากับ 9.33 MPa



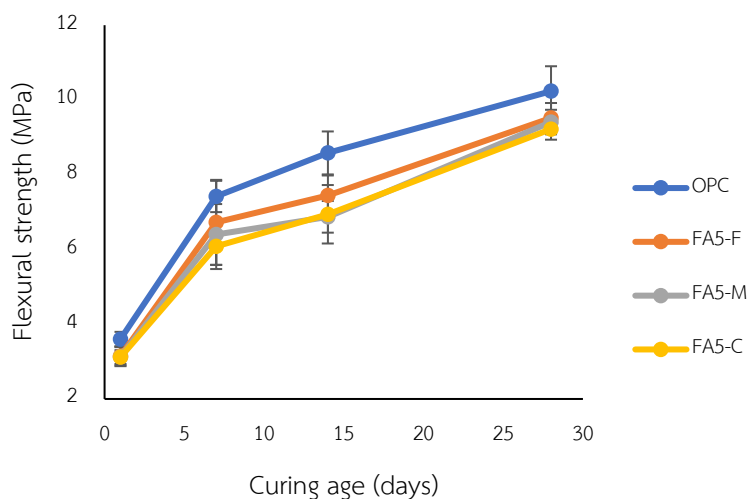
รูปที่ 32 การพัฒนาำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมใ้ลวยชนิดFA3

ใ้ลวยชนิดFA3มีการพัฒนาำลังรับแรงดัดดั่งแสดงในรูปที่ 32 โดยที่ขนาดอนุภาคระหว่าง 75 – 150 μm มีค่าการพัฒนาำลังรับแรงดัดที่น้อยที่สุดที่อายุ 14 และ 28 วัน ในขณะที่ใ้ลวยความละเอียดน้อยกว่า 45 μm มีค่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยมากกว่าที่อายุ 14 และ 28 วัน เท่ากับ 8.01 และ 9.63 MPa



รูปที่ 33 การพัฒนาำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมใ้ลวยชนิดFA4

เถ้าลอยชนิดFA4มีกำลังรับแรงดัดตามอายุการบ่มที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 33 พบว่าที่อายุการบ่ม 28 วัน เถ้าลอยขนาดน้อยกว่า 45 μm มีค่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยใกล้เคียงกับขนาดระหว่าง 45 – 75 μm โดยมีค่าเท่ากับ 9.56 และ 9.40 MPa



รูปที่ 34 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA5

การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA5เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 34 เถ้าลอยชนิดFA5ที่ทุกขนาดอนุภาคที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 9.52, 9.41 และ 9.22 MPa ตามลำดับจากขนาดอนุภาคเล็กไปขนาดใหญ่

สำหรับการศึกษากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดนั้นพบว่ามีผลแนวโน้มการพัฒนาความแข็งแรงเป็นไปในแนวทางเดียวกับการศึกษาก่อนหน้า มีการศึกษาผลของการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ พบว่ามีแนวโน้มกำลังรับแรงอัดมากกว่าชุดควบคุมได้ตั้งแต่ 28 วัน (Vance et al., 2013) สำหรับการพัฒนากำลังรับแรงดัดในงานวิจัยนี้พบว่าไม่สามารถสรุปได้ว่าใช้เวลากี่วันที่จะทำให้มอร์ตาร์มีค่าเฉลี่ยมากกว่าชุดควบคุม ซึ่งอาจแตกต่างกับการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่าใช้เวลา 28 วันจึงมีค่ามากกว่าชุดควบคุม (Han et al., 2019; Huang et al., 2013) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณอัตราส่วนทดแทนที่แตกต่างกันและขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่ละเอียดกว่าการศึกษานี้ จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดนั้นสามารถมากขึ้นกว่าชุดควบคุมได้ตั้งแต่อายุ 28 วัน

จากผลการทดลองข้างต้นได้ประเมินว่าเถ้าลอยชนิดFA1ที่ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีสมบัติเชิงกลที่มีความใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ธรรมดาในหลาย

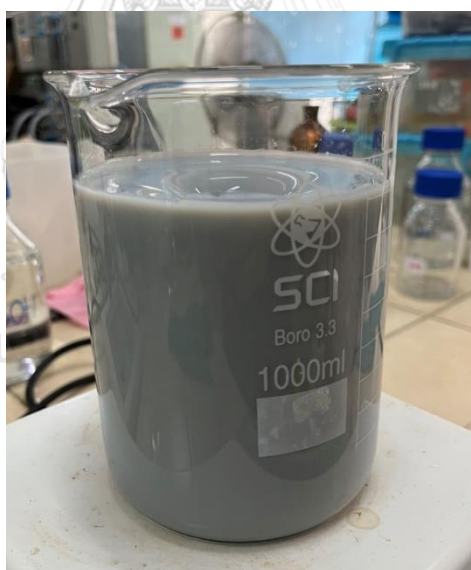
คุณสมบัติและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองครั้งที่ 2 เนื่องจากสมบัติการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดนี้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าชุดควบคุมเพียงส่วนผสมเดียวในการทดลอง และคาดการณ์ว่าการผสมCSH/PCEหรือซิลิกาฟุ่มเพิ่มเติมจะส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลงจนมีค่าใกล้เคียงมอร์ตาร์ชุดควบคุม จึงได้พิจารณาเลือกเถ้าลอยชนิดFA1 ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm เพื่อใช้ในการทดลองครั้งที่สองของงานวิจัยนี้

4.3 การทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยCSH/PCE และซิลิกาฟุ่ม

การทดลองครั้งที่ 2 มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบผลของการใช้สารCSH/PCE และซิลิกาฟุ่มที่ใส่เพิ่มเติมลงในปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย โดยในการทดลองนี้ได้ทดสอบผลของคุณสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและสารเติมแต่งข้างต้น

4.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์

การสังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ดำเนินการโดยผสมสาร Na_2SiO_3 และ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ที่อัตรา 13 และ 6.8 มล./นาที่ ตามลำดับ ลงในสารละลายPCE และกวนผสมที่อัตรา 300 rpm โดยควบคุมค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ที่ 11.7 ดังรูปที่ 35



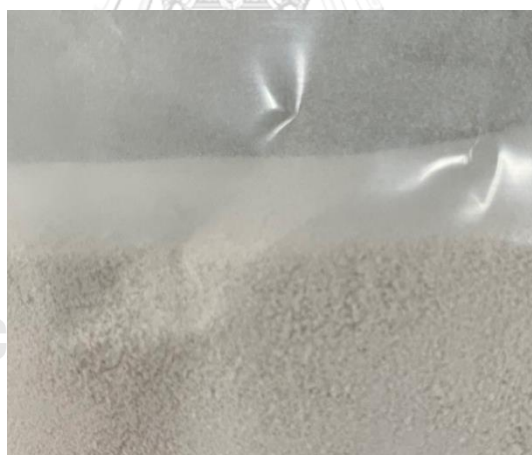
รูปที่ 35 การสังเคราะห์สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์

เมื่อกวนผสมครบ 24 ชั่วโมงจึงนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที จะได้ตะกอนสีขาว แล้วจึงนำไปล้างน้ำกลั่นและปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วและเวลาเดิมอีก 2 ครั้ง จนได้ตะกอนสีขาวที่ตกอยู่ก้นหลอดทดลอง ดังรูปที่ 36



รูปที่ 37 ตะกอนสีขาวหลังจากการปั่นเหวี่ยง

หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้นี้ไปทำให้แห้งด้วยวิธีการพรีซดราย (Freeze dry) เพื่อนำน้ำออก จากตะกอนทั้งหมด หลังจากผ่านวิธีการพรีซดรายแล้วจะได้ผงแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิ เลทอีเทอร์ที่มีลักษณะละเอียด ดังรูปที่ 37



รูปที่ 36 ผงแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์หลังพรีซดราย

เมื่อได้ผงแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ที่ผ่านกระบวนการพรีซดรายแล้ว จึงนำผงที่ได้นี้ไปใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในการทดลองถัดไป

4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ในปริมาณที่แตกต่างกันคือร้อยละ 0.5, 1.0 และ

2.0 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 2.5, 5.0 และ 10.0 โดยน้ำหนัก ดำเนินการด้วยเครื่องทดสอบเข็มของไวแคต ผลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 10 ซึ่งแสดงปริมาณน้ำที่ให้ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะเวลาก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์ พบว่าปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ในทุกอัตราส่วนโดยน้ำหนักส่งผลให้มีความชื้นเหลวปกติที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1 ขนาดอนุภาคน้อยกว่า $45 \mu\text{m}$ ที่มีค่าอยู่ที่ และอัตราส่วนการใช้ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ให้มีความชื้นเหลวปกติที่ลดลงตามด้วย สำหรับการใส่ซิลิกาฟูมส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวปกติที่มากขึ้น หากมีอัตราส่วนการใช้ซิลิกาฟูมเพิ่มมากขึ้นพบว่ามีความชื้นเหลวปกติเพิ่มขึ้นด้วย โดยการใช้ซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนร้อยละ 10.0 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าความชื้นเหลวปกติสูงที่สุดเท่ากับ

ตารางที่ 10 ร้อยละปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นและช่วงปลายของซีเมนต์เพสต์ผสม

ชื่อส่วนผสม	Normal consistency (%)	Initial setting time (Min)	Final setting time (Min)
Control	25.91	75	180
FA10	25.33	90	240
FA10SF2.5	25.84	75	225
FA10SF5	27.33	60	210
FA10SF10	30.485	60	180
FA10CS0.5	24.89	90	240
FA10CS1	23.88	105	255
FA10CS2	22.9	105	255

ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์พบว่ามีความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเพียงเถ้าลอยอย่างเดียว ระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวมีค่าอยู่ที่ 90 นาที การใช้เถ้าลอยผสมร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้นพบว่าส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ

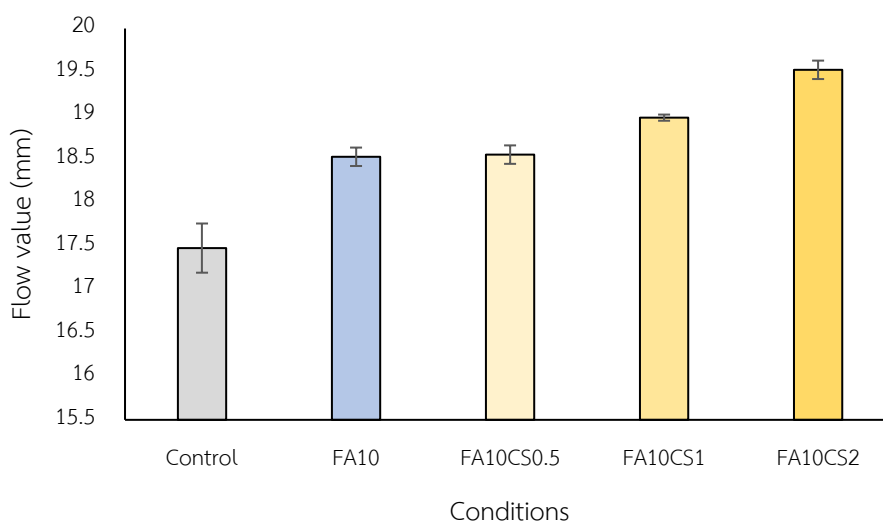
ใช้อัตราส่วนที่น้อยกว่า โดยการใช้อัตราส่วนที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักทำให้ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุมที่สุดเท่ากับ 90 นาที สำหรับการใช้ซิลิกาฟุ่มในการทดลองพบว่าซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นลดลงในทุกอัตราส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยผสมเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วนผสมร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักมีค่าระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ช่วงต้นมากที่สุดเท่ากับ 75 นาที

สำหรับค่าระยะเวลาก่อตัวช่วงปลายของปูนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์พบว่าให้ผลที่มีแนวโน้มเหมือนกับระยะเวลาก่อตัวช่วงต้นคือ ระยะเวลาก่อตัวปลายมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวที่มีค่าอยู่ที่ 240 นาที โดยการเพิ่มอัตราส่วนการใช้ส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวช่วงปลายด้วยเช่นกัน เมื่อใช้อัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นพบว่าทำให้มีระยะเวลาก่อตัวช่วงปลายมากขึ้นด้วย โดยการใช้อัตราส่วนที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวช่วงปลายที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุมมากที่สุดเท่ากับ 240 นาที การใช้ซิลิกาฟุ่มพบว่าซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาก่อตัวช่วงปลายที่ลดลงในทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเปรียบเทียบกับการผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว โดยที่อัตราส่วนซิลิกาฟุ่มผสมร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักพบว่ามีความระยะเวลาก่อตัวปลายที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ธรรมดา อยู่ที่ 225 นาที

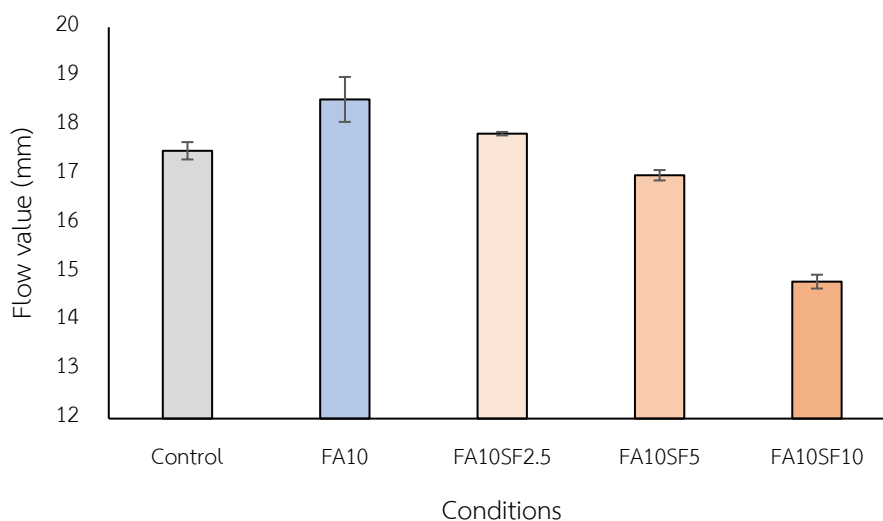
เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่มีการใช้CSHสังเคราะห์ร่วมกับเถ้าลอยพบว่าส่งผลให้มีระยะเวลาก่อตัวที่เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม(Zhou et al., 2021) และในส่วนผสมที่ปราศจากเถ้าลอย การใช้CSHสังเคราะห์ก็สามารถส่งผลให้มีระยะเวลาก่อตัวที่เร็วขึ้นได้เช่นกัน(Das et al., 2020) ต่างกับการศึกษานี้ที่พบว่าชะลอระยะเวลาก่อตัวลง ซึ่งอาจเป็นผลจากขั้นตอนการสังเคราะห์CSH/PCEที่อาจมีส่วนผสมของสารSuperplasticizerออกไม่หมด ส่งผลให้ยังคงเหลือสารที่สามารถส่งผลต่อค่าการไหลและการก่อตัวของปูนซีเมนต์ได้(Kanchanason & Plank, 2018) สำหรับผลการทดลองการใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยพบผลที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกันคือการใช้ซิลิกาฟุ่มอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ส่งผลให้มีระยะเวลาก่อตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ปราศจากซิลิกาฟุ่มและมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม(Sankar et al., 2020)

4.3.3 ความสามารถในการไหลผ่าน

การทดลองผสมแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์และซิลิกาฟุ่มทดแทนปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในปริมาณที่ต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการไหลผ่านของมอร์ตาร์โดยสอดคล้องกับปริมาณที่ใส่ทดแทนลงไป ในปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย รูปที่ 38 แสดงค่าความสามารถในการไหลผ่านของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่ใส่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ด้วยอัตราส่วนทดแทน 0.5, 1.0 และ 2.0 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบด้วยโต๊ะทดสอบการไหลผ่าน พบว่าการใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ใส่ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลผ่านที่เพิ่มขึ้น โดยหากเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของการใส่ผสมเพิ่มส่งผลให้ค่าการไหลมากขึ้น อาจเกิดจากโพลีเมอร์โพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ที่ละลายเป็นอิสระในสารประกอบ (Kanchanason & Plank, 2018) โดยการใส่เพิ่มที่อัตราส่วนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักทำให้มีค่าการไหลผ่านมากที่สุดอยู่ที่

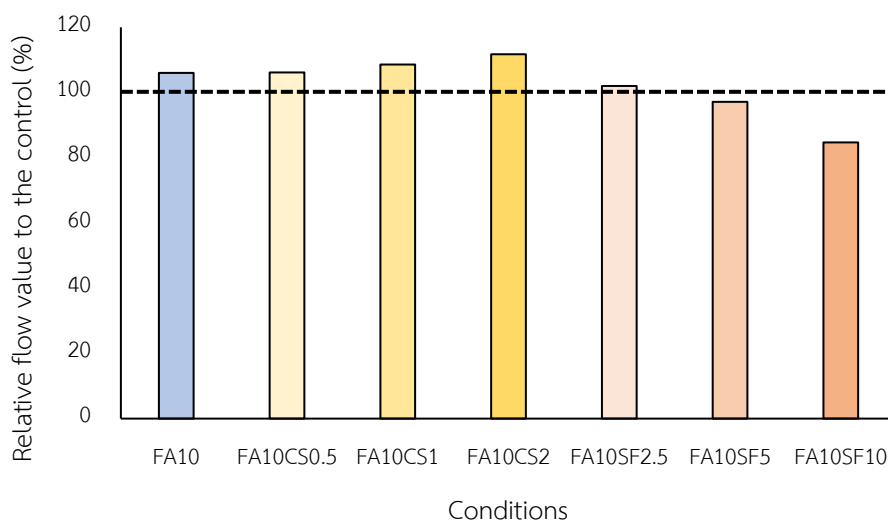


รูปที่ 38 กราฟค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1ร่วมกับCSH/PCEที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 39 กราฟค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1ร่วมกับซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนร้อยละ 2.5, 5.0 และ 10.0 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 39 แสดงค่าความสามารถในการไหลผ่านของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่ใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณ 2.5, 5.0 และ 10.0 %โดยน้ำหนัก ค่าความสามารถในการไหลผ่านของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนทดแทนของซิลิกาฟูมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ซิลิกาฟูมมีค่าพื้นที่ผิวที่มากกว่าปูนซีเมนต์และส่งผลต่อความต้องการน้ำของส่วนผสม ทำให้มอร์ตาร์ที่ได้มีลักษณะที่เหนียวขึ้นและมีค่าความสามารถในการไหลผ่านที่ลดลง มีผลการศึกษาดทดลองก่อนหน้าสอดคล้องกับการทดลองนี้คือการศึกษาผลของการใช้ซิลิกาฟูมผสมปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวลดลงอย่างมากเมื่อมีการแทนที่ซิลิกาฟูมที่อัตราส่วนร้อยละ 10.0 โดยน้ำหนักขึ้นไป (Wong & Abdul Razak, 2005) นอกจากนี้ยังมีทดลองผสมซิลิกาฟูมลงไปปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยส่งผลให้มีค่าความสามารถในการไหลผ่านลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว (Nochaiya et al., 2010)



รูปที่ 40 กราฟร้อยละค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1ร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟวม

การใช้แคลเซียมซิลิเกตโพลีคาร์บอกซิเลทไฮดรอกไซด์ผสมร่วมกับเถ้าลอยพบว่ามีความชื้นทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลผ่านเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 40 โดยปริมาณอัตราส่วนที่มากขึ้นทำให้ค่าการไหลผ่านเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่การใช้ซิลิกาฟวมผสมร่วมกับเถ้าลอยพบว่าส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลผ่านลดลงตามอัตราส่วนการใช้ซิลิกาฟวมที่มากขึ้น โดยการใช้ซิลิกาฟวมที่อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการไหลผ่านลดลงต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 84.7 โดยพบว่าการใช้ซิลิกาฟวมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 มีค่าการไหลผ่านเท่ากับ 97.14 % เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม

เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้พบผลที่คล้ายกันสำหรับการใช้CSH/PCEร่วมกับเถ้าลอย เนื่องจากโพลีเมอร์โพลีคาร์บอกซิเลทไฮดรอกไซด์ที่ละลายเป็นอิสระในสารประกอบส่งผลให้มีค่าการไหลที่เพิ่มมากขึ้น(Kanchanason & Plank, 2018) และการใช้ซิลิกาฟวมสามารถทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลผ่านลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการผสมด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวรวมทั้งมีค่าการไหลที่ใกล้เคียงกับชุดควบคุม(Chen et al., 2022)

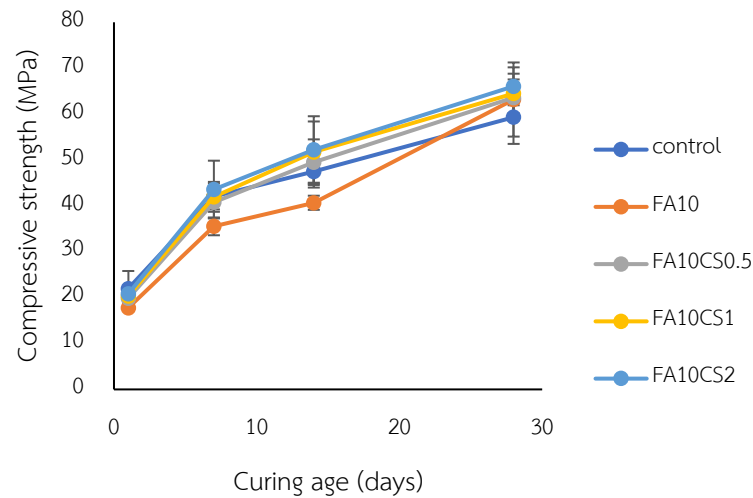
4.3.4 กำลังรับแรงอัด

มอร์ตาร์ขนาด 4x4x16 ซม.ที่บ่มครบตามจำนวน 1, 7, 14 และ 28 วัน จะถูกนำไปทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด สำหรับการใส่แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์โพลีคาร์บอกซิเลทไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 %โดยน้ำหนัก ผสมร่วมกับเถ้าลอยชนิด ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm ค่ากำลังรับแรงอัดแสดงในตารางที่ 11 พบว่ามอร์ตาร์ให้ค่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อ

เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยชนิดFA1 ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm เพียงอย่างเดียวในทุกช่วงอายุการบ่มดังแสดงในรูปที่ 41 โดยในช่วงอายุ 7 วัน มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ ซึ่งมากขึ้นกว่าอยู่ที่ ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดาพบว่าการผสมแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ร่วมกับเถ้าลอยที่อายุการบ่ม 7 วัน ทำให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นมากกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาเป็น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าทดลองใช้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ต่ออายุการบ่มช่วงต้นทำให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่ช่วงอายุ 1 – 3 วัน เนื่องจากอนุภาคของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ที่มีขนาดเล็กช่วยเพิ่มพื้นที่การเกิดแกนหลักของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต จึงส่งผลต่อเนื่องให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น(Sun et al., 2017)

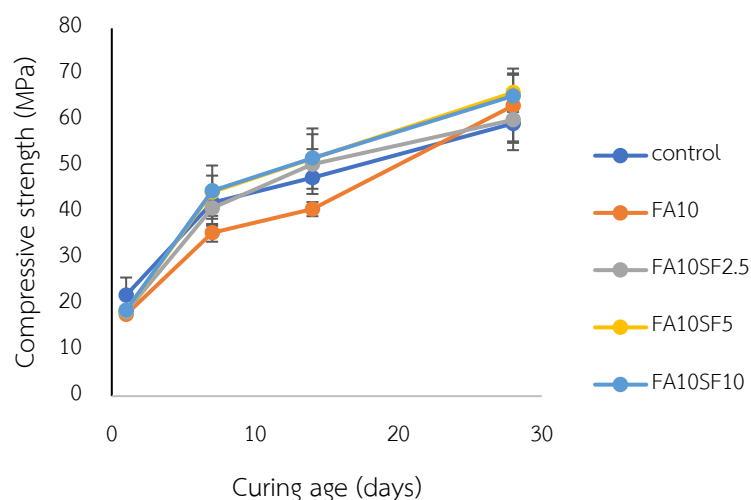
ตารางที่ 11 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ่ม

ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (MPa)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	21.97	42.05	47.51	59.30
FA1-F	17.77	35.52	40.67	63.16
FA10SF2.5	18.38	40.88	50.41	60.09
FA10SF5	18.61	44.38	51.66	66.02
FA10SF10	18.72	44.66	51.76	65.30
FA10CS0.5	19.86	40.80	49.52	63.59
FA10CS1	20.36	41.96	51.71	64.47
FA10CS2	20.85	43.55	52.19	66.05



รูปที่ 41 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและCSH/PCE

รูปที่ 42 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 2.5, 5.0 และ 10.0 โดยน้ำหนัก กำลังอัดของมอร์ตาร์ พบว่ากำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำจนได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล โดยปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้จนกว่าสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนหมด การที่มอร์ตาร์มีอายุการบ่มที่มากขึ้นจึงส่งผลให้มีความกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นด้วย และซิลิกาฟุ่มส่งผลให้มีความกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยผสมเพียงอย่างเดียว ในช่วงอายุการบ่มที่ 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ธรรมดาอยู่ที่ ตามลำดับ และในช่วงอายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 42 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่ม

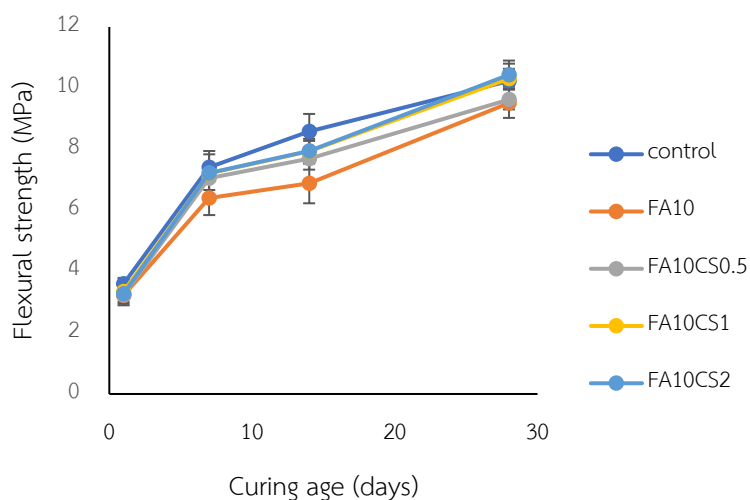
จนมากกว่าของมอร์ตาร์ธรรมดาได้ โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ที่ ตามลำดับ การศึกษาก่อนหน้ามีผลการศึกษาที่ใกล้เคียงกัน ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและซิลิกาฟูมทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงอายุต้นได้ โดยอาจเป็นผลจากทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของตัวซิลิกาฟูม ขนาดอนุภาคที่ละเอียดของซิลิกาฟูมสามารถเติมเต็มรูพรุนในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย และทางเคมีสารประกอบกลุ่มซิลิกาสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Ma et al., 2022)

4.3.5 กำลังรับแรงดัด

ค่าการทดสอบกำลังรับแรงดัดด้วยการทดสอบมอร์ตาร์หล่อทรงปริซึมสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4x4x16 ซม. โดยการทดลองได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาด้วยเถ้าลอยชนิด FA1 ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 45 μm ผสมร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0.5, 1.0 และ 2.0 %โดยน้ำหนัก และผสมร่วมกับซิลิกาฟูมในปริมาณน้อยละ 2.5, 5.0 และ 10.0 โดยน้ำหนักแสดงในตารางที่ 12 รูปที่ 43 แสดงการพัฒนา กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดของทุกส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเกิดผลิตภัณฑ์เป็นโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโพลีคาร์บอกซิเลทอีเทอร์ส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเพียงเถ้าลอยอย่างเดียว ในช่วงอายุการบ่มที่ 7 วัน ค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าอยู่ที่ ตามลำดับ และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ธรรมดาอยู่ที่ ตามลำดับ

ตารางที่ 12 กำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ่ม

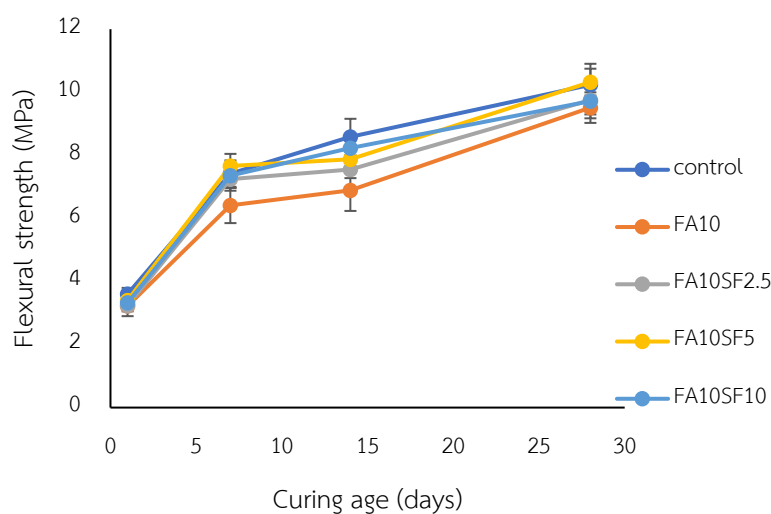
ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงดัด (MPa)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	3.60	7.42	8.58	10.23
FA1-F	3.22	6.41	6.88	9.51
FA10SF2.5	3.24	7.24	7.55	9.75
FA10SF5	3.40	7.66	7.88	10.32
FA10SF10	3.32	7.36	8.23	9.72
FA10CS0.5	3.24	7.06	7.69	9.63
FA10CS1	3.36	7.22	7.94	10.31
FA10CS2	3.28	7.22	7.95	10.44



รูปที่ 43 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและCSH/PCE

รูปที่ 44 แสดงค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 2.5, 5.0 และ 10.0 โดยน้ำหนัก พบว่าซิลิกาฟุ่มสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ให้มากขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวที่อายุ 14 และ 28 วัน การพัฒนากำลังนี้ เป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ่มที่มีขนาดเล็กจึงส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เป็นส่วนประกอบหลักของซิลิกาฟุ่มทำให้เกิด

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลดเพิ่มมากขึ้น เมื่อขณะทำปฏิกิริยาซิลิกาฟุ่มแตกตัวเป็นอนุภาคที่เล็กกว่า ปูนซีเมนต์ สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้รวดเร็วและสามารถเติมเต็มช่องว่างในมอร์ตาร์ได้ ส่งผลให้มอร์ตาร์ผสมทั้งเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่มมีกำลังรับแรงดัดสูงขึ้นทั้งช่วงอายุ 14 และ 28 วัน สำหรับการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงมาก แต่การแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มปริมาณมากอาจทำให้มอร์ตาร์มีความเปราะมากขึ้นได้



รูปที่ 44 การพัฒนากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่ม

ผลจากการผสมCSH/PCEร่วมกับเถ้าลอยในงานการศึกษานี้มีผลที่คล้ายกับการใช้CSH/PCE ร่วมกับเถ้าลอยในการศึกษาก่อนหน้า พบว่ามอร์ตาร์มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทั้งกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยผสมเพียงอย่างเดียว แต่เพิ่มขึ้นไม่มากเท่าการศึกษาก่อนหน้าที่มีค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่าชุดควบคุม 27%(Kanchanason & Plank, 2017) สำหรับการผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยนั้นพบว่ามีผลแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับการศึกษาก่อนหน้าที่ศึกษาการผสมซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์พบว่าทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่ช่วงอายุต้น(Singh et al., 2022) และมีค่าสูงที่ช่วงอายุปลาย(Padavala et al., 2021) กำลังรับแรงอัดของการผสมซิลิกาฟุ่มและเถ้าลอยพบว่ามีแนวโน้มเดียวกับการศึกษานี้เช่นกัน มีการศึกษาผสมเถ้าลอยอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ร่วมกับซิลิกาฟุ่มอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์พบว่าสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วงต้นได้เช่นกัน(Guo et al., 2021)

ผลของการศึกษากำลังรับแรงดัดในการศึกษานี้พบว่ามีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของกำลังรับแรงอัดที่คาดว่ามีความเหมาะสมร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัด ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้เครื่องมือวัดกำลังรับแรงดัดที่แตกต่างกับเครื่องมือวัดกำลังรับแรงอัด รวมทั้ง

ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากอายุการใช้งานของเครื่องวัดกำลังรับแรงดัดและความผิดพลาดจากการอ่านค่าที่อาจเกิดขึ้นจากสายตามนุษย์ จึงทำให้ผลกำลังรับแรงดัดที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น อย่างไรก็ตามผลการศึกษานี้สามารถใช้ศึกษาแนวโน้มของการใช้เก้าอี้ลอยและวัสดุทดแทนCSH/PCEและซิลิกาฟวมที่มีต่อกำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาในงานวิจัยนี้ได้้นำเถ้าลอยที่เป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าถ่านหินกลับมาใช้งานผสมทดแทนปูนซีเมนต์โดยศึกษาผลที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ด้วยการศึกษาทั้งซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์เพื่อเป็นการทดลองที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรม นอกจากนี้ยังมีการทดลองศึกษาผลของการผสมCSH/PCEและซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จากผลการทดลองได้สรุปแบ่งเป็นสองช่วงการทดลองดังนี้

5.1.1 สรุปผลการทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่างแหล่งกำเนิดและขนาดอนุภาค

1. การใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ส่งผลให้มีระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้นทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าการไหลแผ่ที่ลดลงยกเว้นเถ้าลอยชนิดFA1-Fที่ทำให้มีค่าการไหลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่ากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดลดลงในช่วงอายุการบ่ม 1 – 14 วัน แต่มีค่าเฉลี่ยเพิ่มจนใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่อายุการบ่ม 28 วัน

2. เถ้าลอยที่มีจุดกำเนิดแตกต่างกันมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันจึงส่งผลต่อปูนซีเมนต์ในลักษณะที่ต่างกัน และการใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า $45 \mu\text{m}$ ทดแทนปูนซีเมนต์ส่งผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า

5.1.2 สรุปผลการทดลองทดแทนปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยด้วยCSH/PCE และซิลิกาฟุ่ม

1. การผสมCSH/PCEร่วมกับเถ้าลอยในการศึกษานี้ส่งผลให้ปูนซีเมนต์มีระยะเวลาก่อตัวและความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น แต่สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดแก่มอร์ตาร์ในช่วงอายุการบ่มต้นให้มากกว่าการผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวได้ โดยการเพิ่มอัตราส่วนผสมส่งผลให้มีผลต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น

2. การศึกษาผลของซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าลอยพบว่าซิลิกาฟุ่มสามารถทำให้ระยะเวลาก่อตัวและความสามารถในการไหลแผ่ลดลงได้ และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดให้แก่ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในช่วงอายุต้นได้ สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มให้มากขึ้นส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์มากขึ้นเช่นกัน

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการผสมซิลิกาฟุ่มด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีลักษณะทางกายภาพในด้าน ระยะเวลาก่อตัว ความสามารถในการไหล กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ธรรมดามากที่สุด

5.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

1. สามารถนำเถ้าลอยที่เป็นของเสียจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งเป็นการช่วยลดปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า และกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ที่สร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณของเสียอุตสาหกรรมอย่างเถ้าลอยที่จะถูกขนส่งไปกำจัดด้วยการทิ้งในหลุมฝังกลบ

2. เกิดองค์ความรู้ในด้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งสามารถนำไปสู่แนวทางการประยุกต์ใช้หรือสร้างแนวทางในการลดความเป็นพิษของของเสียอุตสาหกรรมชนิดนี้ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์และกำจัดของเสียอย่างถูกต้องเหมาะสมต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. ศึกษาเถ้าลอยชนิดอื่นๆเพิ่มเติม เช่น เถ้าลอยจากขยะอุตสาหกรรม เถ้าลอยจากขยะชุมชน

2. เพิ่มปริมาณอัตราส่วนการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ให้มากขึ้นเพื่อเป็นหาแนวทางการใช้ของเสียเถ้าลอย และเพื่อศึกษาแนวโน้มของลักษณะที่จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณมากทดแทนปูนซีเมนต์ และเปลี่ยนการทดลองไปศึกษาผลของคอนกรีตเพื่อให้สามารถเป็นแนวทางในการทำปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยไปใช้ได้จริง

3. ทำการทดลองเพื่อหาผลทางด้านการพัฒนาความร้อนของปูนซีเมนต์ และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเพิ่มเติมเพื่อเป็นข้อมูลเชิงลึกและเข้าใจถึงปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานมากขึ้น

4. ทดลองผลของการใช้CSH/PCEร่วมกับซิลิกาฟุ่มเพิ่มเติมเพื่อดูแนวโน้มสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ผสม

5. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในด้านต้นทุนทางการตลาดของการนำของเสียเถ้าลอย ซิลิกาฟุ่ม และการสังเคราะห์CSH/PCEเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการผสมปูนซีเมนต์ในระดับใหญ่

บรรณานุกรม

- Aïtcin, P. C. (2016). Supplementary cementitious materials and blended cements. In *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 53-73).
- Alizadeh, R., Raki, L., Makar, J. M., Beaudoin, J. J., & Moudrakovski, I. (2009). Hydration of tricalcium silicate in the presence of synthetic calcium–silicate–hydrate [10.1039/B910216G]. *Journal of Materials Chemistry*, 19(42), 7937-7946.
- Antoni, Chandra, L., & Hardjito, D. (2015). The Impact of Using Fly Ash, Silica Fume and Calcium Carbonate on the Workability and Compressive Strength of Mortar. *Procedia Engineering*, 125, 773-779.
- Barnes, P., & Bensted, J. (2001). Structure and Performance of Cements.
- Bicer, A. (2018). Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites. *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 78-82.
- Blanco, F., Garcia, M. P., Ayala, J., Mayoral, G., & Garcia, M. A. (2006). The effect of mechanically and chemically activated fly ashes on mortar properties. *Fuel*, 85(14), 2018-2026.
- Carpio, R., De, F., Júnior, S., & Silva, R. (2008). Alternative Fuels Mixture in Cement Industry Kilns Employing Particle Swarm Optimization Algorithm. *Soc. of Mech. Sci. & Eng*, 30.
- Chen, H., Chen, Q., Xu, Y., & Lawi, A. S. (2022). Effects of silica fume and Fly ash on properties of mortar reinforced with recycled-polypropylene. *Construction and Building Materials*, 316, 125887.
- Das, S., Ray, S., & Sarkar, S. (2020). Early strength development in concrete using preformed CSH nano crystals. *Construction and Building Materials*, 233, 117214.
- Elmrabet, R., El Harfi, A., & El Youbi, M. S. (2019). Study of properties of fly ash cements. *Materials Today: Proceedings*, 13, 850-856.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S., & Mermerdaş, K. (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*, 34, 120-130.

- Guo, Y., Zhang, Y. X., Soe, K., Wuhler, R., Hutchison, W. D., & Timmers, H. (2021). Development of magnesium oxychloride cement with enhanced water resistance by adding silica fume and hybrid fly ash-silica fume. *Journal of Cleaner Production*, *313*, 127682.
- Han, X., Yang, J., Feng, J., Zhou, C., & Wang, X. (2019). Research on hydration mechanism of ultrafine fly ash and cement composite. *Construction and Building Materials*, *227*, 116697.
- Haruehansapong, S., Pulngern, T., & Chucheepsakul, S. (2014). Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂. *Construction and Building Materials*, *50*, 471-477.
- Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(8), 6220-6238.
- Hsu, S., Chi, M., & Huang, R. (2018). Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar. *Construction and Building Materials*, *176*, 250-258.
- Huang, C.-H., Lin, S.-K., Chang, C.-S., & Chen, H.-J. (2013). Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Construction and Building Materials*, *46*, 71-78.
- Islam, M. S., Mohr, B. J., & VandenBerge, D. (2022). Performance of natural clinoptilolite zeolite in the cementitious materials: A comparative study with metakaolin, fly ash, and blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, *53*, 104535.
- Jeong, Y., Kang, S.-H., Kim, M. O., & Moon, J. (2020). Acceleration of cement hydration from supplementary cementitious materials: Performance comparison between silica fume and hydrophobic silica. *Cement and Concrete Composites*, *112*, 103688.
- Kakali, G., Tsvilis, S., Aggeli, E., & Bati, M. (2000). Hydration products of C₃A, C₃S and Portland cement in the presence of CaCO₃. *Cement and Concrete Research*, *30*(7), 1073-1077.

- Kanchanason, V., & Plank, J. (2017). Role of pH on the structure, composition and morphology of C-S-H-PCE nanocomposites and their effect on early strength development of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, *102*, 90-98.
- Kanchanason, V., & Plank, J. (2018). Effectiveness of a calcium silicate hydrate – Polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite on early strength development of fly ash cement. *Construction and Building Materials*, *169*, 20-27.
- Kurdowski, W., & Nocun-Wczelik, W. (1983). The tricalcium silicate hydration in the presence of active silica. *Cement and Concrete Research*, *13*(3), 341-348.
- Lam, L., Wong, Y. L., & Poon, C. S. (2000). Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. *Cement and Concrete Research*, *30*(5), 747-756.
- Land, G., & Stephan, D. (2015a). Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, *57*, 64-67.
- Land, G., & Stephan, D. (2015b, 2015//). Preparation and Application of Nanoscaled C-S-H as an Accelerator for Cement Hydration. *Nanotechnology in Construction*, Cham.
- Lilkov, V., Rostovsky, I., Petrov, O., Tzvetanova, Y., & Savov, P. (2014). Long term study of hardened cement pastes containing silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, *60*, 48-56.
- Lindgreen, H., Geiker, M., Krøyer, H., Springer, N., & Skibsted, J. (2008). Microstructure engineering of Portland cement pastes and mortars through addition of ultrafine layer silicates. *Cement and Concrete Composites*, *30*(8), 686-699.
- Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, *38*(6), 848-860.
- Ma, X., He, T., Xu, Y., Yang, R., & Sun, Y. (2022). Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00989.

- Mardani-Aghabaglou, A., İnan Sezer, G., & Ramyar, K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17-25.
- Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V., & Vessalas, K. (2019). The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00218.
- Mustapha, F. A., Sulaiman, A., Mohamed, R. N., & Umara, S. A. (2021). The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete. *Materials Today: Proceedings*, 39, 965-969.
- Nicoleau, L., Gädt, T., Chitu, L., Maier, G., & Paris, O. (2013a). Oriented aggregation of calcium silicate hydrate platelets by the use of comb-like copolymers. *Soft Matter*, 9(19), 4864-4874.
- Nicoleau, L., Gädt, T., Chitu, L., Maier, G., & Paris, O. (2013b). Oriented aggregation of calcium silicate hydrate platelets by the use of comb-like copolymers. *Soft Matter*, 9, 4864-4874.
- Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, 89(3), 768-774.
- Owens, K., Russell, M. I., Donnelly, G., Kirk, A., & Basheer, P. A. M. (2014). Use of nanocrystal seeding chemical admixture in improving Portland cement strength development: application for precast concrete industry. *Advances in Applied Ceramics*, 113(8), 478-484.
- Padavala, A. B., Potharaju, M., & Kode, V. R. (2021). Mechanical properties of ternary blended mix concrete of fly ash and silica fume. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2198-2202.
- Panesar, D. K. (2019). 3 - Supplementary cementing materials. In S. Mindess (Ed.), *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition)* (pp. 55-85). Woodhead Publishing.
- Poon, C. S., Lam, L., & Wong, Y. L. (2000). A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 447-455.

- Qin, L., Gao, X., & Li, Q. (2019). Influences of coal fly ash containing ammonium salts on properties of cement paste. *Journal of Environmental Management*, 249, 109374.
- Richardson, I. G., & Groves, G. W. (1993). The incorporation of minor and trace elements into calcium silicate hydrate (C-S-H) gel in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 23(1), 131-138.
- Sakai, E., Miyahara, S., Ohsawa, S., Lee, S.-H., & Daimon, M. (2005). Hydration of fly ash cement. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1135-1140.
- Sankar, L. P., Sivasankar, S., Shunmugasundaram, M., & Praveen Kumar, A. (2020). Investigation on binder and concrete with fine grinded fly ash and silica fume as pozzolanic combined replacement. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1157-1162.
- Sevim, Ö., & Demir, İ. (2019). Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness. *Construction and Building Materials*, 195, 104-114.
- Shu, X., Ran, Q., Liu, J., Zhao, H., Zhang, Q., Wang, X., Yang, Y., & Liu, J. (2016). Tailoring the solution conformation of polycarboxylate superplasticizer toward the improvement of dispersing performance in cement paste. *Construction and Building Materials*, 116, 289-298.
- Singh, A., Mehta, P. K., & Kumar, R. (2022). Performance of binary admixtures (Fly Ash and Silica Fume) on Self Compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*, 58, 970-977.
- Sun, J., Shi, H., Qian, B., Xu, Z., Li, W., & Shen, X. (2017). Effects of synthetic C-S-H/PCE nanocomposites on early cement hydration. *Construction and Building Materials*, 140, 282-292.
- Tang, S., Li, Z., Chen, E., & Shao, H. (2014). Non-steady state migration of chloride ions in cement pastes at early age. *RSC Adv.*, 4.
- Tang, S. W., Chen, E., Shao, H. Y., & Li, Z. J. (2015). A fractal approach to determine thermal conductivity in cement pastes. *Construction and Building Materials*, 74, 73-82.

- Taylor, R., Richardson, I. G., & Brydson, R. M. D. (2007). Nature of C–S–H in 20 year old neat ordinary Portland cement and 10% Portland cement–90% ground granulated blast furnace slag pastes. *Advances in Applied Ceramics*, 106(6), 294-301.
- Thomas, J. J., Jennings, H. M., & Chen, J. J. (2009). Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(11), 4327-4334.
- Vance, K., Aguayo, M., Oey, T., Sant, G., & Neithalath, N. (2013). Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 39, 93-103.
- Wong, H. S., & Abdul Razak, H. (2005). Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 696-702.
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., & Chaipanich, A. (2012). Compressive strength and drying shrinkage of fly ash-bottom ash-silica fume multi-blended cement mortars. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 655-662.
- Yang, J., Hu, H., He, X., Su, Y., Wang, Y., Tan, H., & Pan, H. (2021). Effect of steam curing on compressive strength and microstructure of high volume ultrafine fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*, 266, 120894.
- Yazıcı, H. (2007). The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and Environment*, 42(5), 2083-2089.
- Zhang, H. (2011). *Building Materials in Civil Engineering*. Woodhead Publishing.
- Zhou, Z., Sofi, M., Liu, J., Li, S., Zhong, A., & Mendis, P. (2021). Nano-CSH modified high volume fly ash concrete: Early-age properties and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124924.



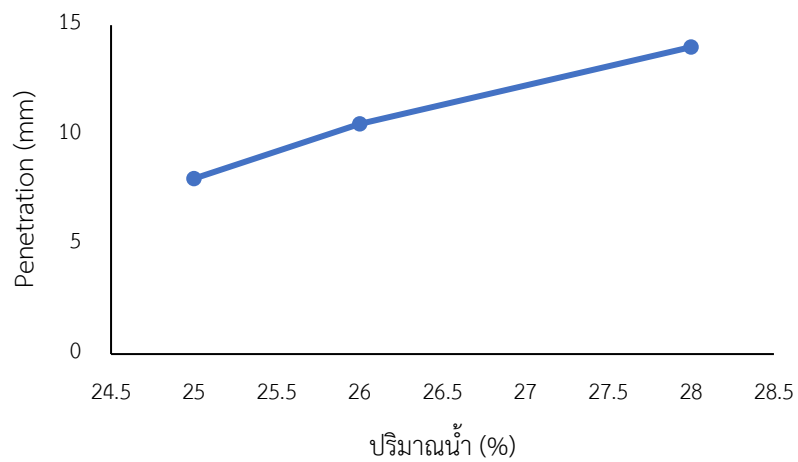
ภาคผนวก ก

ตารางและรูปภาพแสดงปริมาณน้ำที่ความชันเหลวกติและระยะเวลาก่อตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

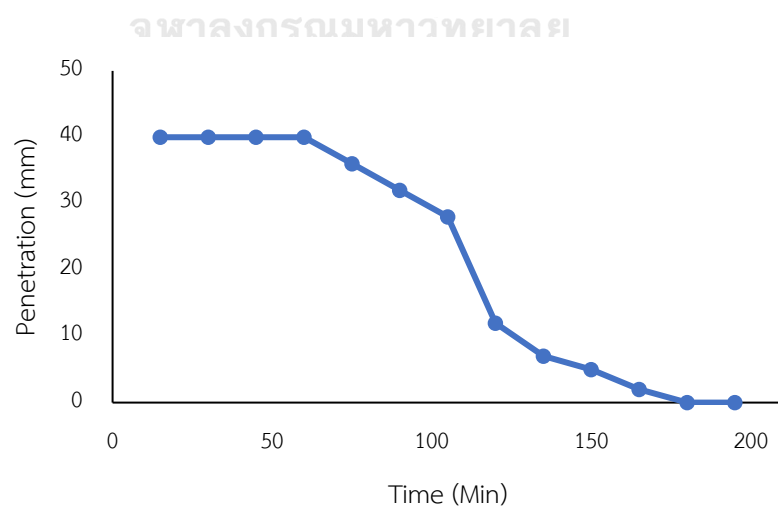
ตารางที่ ก. 1 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ชุดควบคุม

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
25	450	112.5	8
26	450	117	10.5
28	450	126	14



รูปที่ ก. 1 กราฟปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ

Penetration = 10 mm, normal consistency = 25.91%



รูปที่ ก. 2 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุม

ตารางที่ ก. 2 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมแฉ่ำลอยFA1-F

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
23	450	103.5	7
25	450	112.5	8.5
27	450	121.5	13
Normal consistency (%)			25.33

ตารางที่ ก. 3 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมแฉ่ำลอยFA1-M

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	108	7.5
26	450	117	9
28	450	126	13
Normal consistency (%)			26.12

ตารางที่ ก. 4 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมแฉ่ำลอยFA1-C

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	108	6.5
26	450	117	8
28	450	126	12
Normal consistency (%)			26.85

ตารางที่ ก. 5 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA2-F

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	103.5	7
26	450	112.5	8.5
28	450	121.5	12.5
Normal consistency (%)			26.49

ตารางที่ ก. 6 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA2-M

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	108	7
26	450	117	8.5
28	450	126	12
Normal consistency (%)			26.66

ตารางที่ ก. 7 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA2-C

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
25	450	112.5	6.5
27	450	121.5	7.5
29	450	130.5	11
Normal consistency (%)			28.48

ตารางที่ ก. 8 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA3-F

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	103.5	7.5
26	450	112.5	8.5
28	450	121.5	13
Normal consistency (%)			26.24

ตารางที่ ก. 9 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA3-M

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	108	7
26	450	117	8
28	450	126	12.5
Normal consistency (%)			26.61

ตารางที่ ก. 10 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA3-C

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
25	450	112.5	6
27	450	121.5	7.5
29	450	130.5	10.5
Normal consistency (%)			28.78

ตารางที่ ก. 11 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA4-F

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	103.5	7
26	450	112.5	8
28	450	121.5	13
Normal consistency (%)			26.44

ตารางที่ ก. 12 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA4-M

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	108	6.5
26	450	117	7.5
28	450	126	11.5
Normal consistency (%)			27.2

ตารางที่ ก. 13 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA4-C

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
25	450	112.5	6.5
27	450	121.5	8
29	450	130.5	12
Normal consistency (%)			27.85

ตารางที่ ก. 14 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA5-F

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	103.5	7.5
26	450	112.5	8
28	450	121.5	13.5
Normal consistency (%)			26.22

ตารางที่ ก. 15 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA5-M

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
24	450	108	7.5
26	450	117	8.5
28	450	126	13
Normal consistency (%)			26.24

ตารางที่ ก. 16 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยFA5-C

%condition	Cement (g)	water	Penetration (mm)
25	450	112.5	7
27	450	121.5	8
29	450	130.5	14
Normal consistency (%)			27.19

ตารางที่ ก. 17 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟวม

FA10SF2.5		FA10SF5		FA10SF10	
%condition	Penetration (mm)	%condition	Penetration (mm)	%condition	Penetration (mm)
23	6.5	25	7	28	7
25	8	27	8.5	30	8.5
27	12	29	13	32	12.5
Normal consistency		25.84	27.33	30.49	

ตารางที่ ก. 18 การหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCE

FA10CS0.5		FA10CS1		FA10CS2	
%condition	Penetration (mm)	%condition	Penetration (mm)	%condition	Penetration (mm)
23	7.5	22	7.5	21	7
25	9.5	24	10	23	9.5
27	13.5	26	13	25	14
Normal consistency		24.89	23.88	22.9	

ตารางที่ ก. 19 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA1

Time (Min)	Penetration (mm)		
	FA1-F	FA1-M	FA1-C
15	40	40	40
30	40	40	40
45	40	40	40
60	40	40	40
75	40	40	38
90	38	37	35
105	34	34	30
120	32	31	28
135	28	26	23
150	24	24	19
165	17	18	15
180	11	12	9
195	6	8	7
210	3	2	3
225	1	2	0
240	0	0	0

ตารางที่ ก. 20 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA2

Time (Min)	Penetration (mm)		
	FA2-F	FA2-M	FA2-C
15	40	40	40
30	40	40	40
45	40	40	40
60	40	40	40
75	40	39	38
90	39	37	34
105	36	35	29
120	33	32	25
135	27	28	20
150	22	23	18
165	15	18	11
180	12	10	7
195	8	6	4
210	4	3	3
225	1	2	0
240	0	0	0

ตารางที่ ก. 21 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA3

Time (Min)	Penetration (mm)		
	FA3-F	FA3-M	FA3-C
15	40	40	40
30	40	40	40
45	40	40	40
60	40	40	39
75	40	40	37
90	37	36	32
105	34	34	28
120	32	30	23
135	27	28	19
150	24	22	15
165	17	16	10
180	13	11	6
195	7	7	3
210	3	2	1
225	1	1	0
240	0	0	0

ตารางที่ ก. 22 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA4

Time (Min)	Penetration (mm)		
	FA4-F	FA4-M	FA4-C
15	40	40	40
30	40	40	40
45	40	40	40
60	40	40	40
75	40	40	38
90	38	36	34
105	33	32	30
120	31	30	26
135	28	26	21
150	23	21	17
165	19	17	13
180	13	13	8
195	8	7	3
210	2	2	2
225	1	0	1
240	0	0	0

ตารางที่ ก. 23 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยชนิดFA5

Time (Min)	Penetration (mm)		
	FA5-F	FA5-M	FA5-C
15	40	40	40
30	40	40	40
45	40	40	40
60	40	40	40
75	40	40	40
90	39	37	38
105	35	33	33
120	32	30	29
135	28	27	25
150	24	24	21
165	20	19	17
180	15	16	12
195	9	8	6
210	4	3	2
225	2	1	1
240	0	0	0

ตารางที่ ก. 24 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูม

Time (Min)	Penetration (mm)		
	FA10SF2.5	FA10SF5	FA10SF10
15	40	40	40
30	40	40	40
45	40	40	40
60	40	39	37
75	39	37	32
90	37	34	27
105	32	30	22
120	28	26	15
135	24	21	7
150	18	16	4
165	12	11	3
180	7	5	0
195	4	1	0
210	1	0	0
225	0	0	0
240	0	0	0

ตารางที่ ก. 25 ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เฟสผสมแก้วลอยร่วมกับCSH/PCE

Time (Min)	Penetration (mm)		
	FA10CS0.5	FA10CS1	FA10CS2
15	40	40	40
30	40	40	40
45	40	40	40
60	40	40	40
75	40	40	40
90	39	40	40
105	35	37	39
120	30	33	36
135	28	29	31
150	26	25	27
165	18	20	22
180	15	16	18
195	8	10	13
210	4	5	7
225	2	3	4
240	0	1	2
255		0	0



ตารางที่ ข. 1 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 1 และ 7 วัน

ชื่อ	กำลังรับแรงดัดที่อายุ 1 วัน (MPa)				กำลังรับแรงดัดที่อายุ 7 วัน (MPa)					
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG
Control	3.53	3.63	3.40	3.86	3.60	7.66	7.30	7.83	6.88	7.42
FA1-F	3.44	2.75	3.44	3.26	3.22	6.06	5.87	7.11	6.59	6.41
FA1-M	3.07	2.73	3.24	2.87	2.98	6.65	6.47	6.20	7.02	6.59
FA1-C	2.91	3.51	3.12	3.07	3.16	6.20	5.74	5.51	7.44	6.22
FA2-F	3.26	2.75	3.47	2.91	3.10	5.74	6.43	6.88	5.74	6.20
FA2-M	3.10	2.71	3.26	2.94	3.00	6.47	7.16	6.43	7.16	6.80
FA2-C	2.89	3.05	3.14	2.80	2.97	6.65	6.70	7.11	6.84	6.83
FA3-F	3.10	3.58	3.40	2.94	3.25	6.93	7.39	6.68	7.04	7.01
FA3-M	3.33	2.78	3.07	2.85	3.01	5.78	8.03	6.20	5.87	6.47
FA3-C	2.91	2.62	3.17	3.07	2.94	6.70	6.47	6.43	6.88	6.62
FA4-F	3.35	3.53	2.80	2.94	3.16	7.11	6.88	6.49	7.25	6.94
FA4-M	3.07	2.64	3.14	2.96	2.95	6.84	6.22	7.21	6.47	6.68
FA4-C	2.94	3.26	3.10	2.87	3.04	5.74	6.47	5.69	6.65	6.14
FA5-F	3.07	3.44	2.85	3.24	3.15	6.20	7.62	7.71	5.37	6.72
FA5-M	2.80	3.28	3.37	3.07	3.13	6.47	7.21	6.65	5.28	6.40
FA5-C	3.05	3.35	3.17	2.91	3.12	5.51	6.29	5.69	6.84	6.08

ตารางที่ ข. 2 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 14 และ 28 วัน

ชื่อ	กำลังรับแรงดัดที่อายุ 14 วัน (MPa)				กำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน (MPa)				
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG
Control	9.18	8.54	8.03	-	9.98	9.41	10.72	10.83	10.23
FA1-F	6.43	7.80	6.43	6.88	8.81	9.91	9.73	9.59	9.51
FA1-M	7.11	7.30	8.40	7.99	9.11	9.27	8.63	9.59	9.15
FA1-C	7.16	7.99	7.48	6.88	9.18	8.61	8.77	8.49	8.76
FA2-F	8.49	9.59	7.66	7.02	9.45	8.90	9.29	9.68	9.33
FA2-M	9.36	7.62	8.72	6.24	9.09	8.31	9.34	8.90	8.91
FA2-C	7.57	7.53	6.84	6.88	8.42	9.00	8.86	9.06	8.83
FA3-F	7.57	7.21	8.77	8.49	10.14	9.06	9.71	9.59	9.63
FA3-M	6.52	7.21	7.71	7.57	9.32	8.88	9.62	9.13	9.24
FA3-C	6.88	6.24	6.75	8.12	9.09	8.54	8.97	8.24	8.71
FA4-F	9.78	8.03	8.63	7.85	9.71	9.32	9.98	9.22	9.56
FA4-M	7.99	7.89	7.34	9.00	9.29	9.75	9.13	9.43	9.40
FA4-C	7.34	8.49	6.65	7.48	9.04	8.67	9.27	8.83	8.96
FA5-F	7.34	8.17	7.39	6.88	9.73	9.91	9.43	9.00	9.52
FA5-M	7.02	6.24	7.11	7.11	9.64	9.59	8.93	9.48	9.41
FA5-C	7.80	6.15	7.39	6.43	8.88	9.52	9.36	9.11	9.22

ตารางที่ ข. 3 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ้งที่อายุ 1 และ 7 วัน

ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงดัดที่อายุ 1 วัน (MPa)				กำลังรับแรงดัดที่อายุ 7 วัน (MPa)					
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG	
FA10SF2.5	2.89	3.53	3.12	3.40	3.24	6.75	7.62	6.88	6.98	7.06
FA10SF5	3.28	3.07	3.58	3.49	3.36	6.79	6.65	8.26	7.16	7.22
FA10SF10	3.21	2.94	3.40	3.56	3.28	6.98	7.57	7.07	7.27	7.22
FA10CS0.5	3.14	3.44	3.33	3.03	3.24	6.95	7.02	7.76	7.23	7.24
FA10CS1	3.40	3.26	3.60	3.35	3.40	8.08	7.53	7.85	7.21	7.66
FA10CS2	3.10	3.49	3.30	3.40	3.32	6.88	7.39	7.32	7.85	7.36

ตารางที่ ข. 4 ค่ากำลังรับแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ้งที่อายุ 14 และ 28 วัน

ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงดัดที่อายุ 14 วัน (MPa)				กำลังรับแรงดัดที่อายุ 28 วัน (MPa)					
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG	
FA10SF2.5	8.10	7.85	7.27	7.55	7.69	9.64	10.05	9.55	9.27	9.63
FA10SF5	7.76	7.57	8.12	8.31	7.94	10.37	9.91	10.26	10.69	10.31
FA10SF10	7.48	7.89	8.44	7.96	7.95	10.83	10.21	10.05	10.65	10.44
FA10CS0.5	7.85	7.48	7.66	7.21	7.55	9.11	10.14	9.75	10.01	9.75
FA10CS1	7.99	7.50	7.80	8.22	7.88	9.73	10.72	10.33	10.51	10.32
FA10CS2	8.19	8.81	8.05	7.85	8.23	9.55	9.06	9.91	10.35	9.72

ตารางที่ ข. 5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 1 และ 7 วัน

ชื่อ	กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน (MPa)				กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน (MPa)					
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG	
Control	16.34	23.72	24.88	22.94	21.97	40.53	45.41	39.03	43.25	42.05
FA1-F	17.06	18.31	18.28	17.41	17.77	38.31	34.03	35.22	34.50	35.52
FA1-M	17.84	16.34	19.41	17.03	17.66	36.06	39.25	33.59	35.53	36.11
FA1-C	18.25	18.88	16.78	17.84	17.94	36.59	40.22	35.44	33.88	36.53
FA2-F	14.75	18.56	16.47	18.28	17.02	33.19	38.09	36.06	35.69	35.76
FA2-M	17.56	20.44	16.09	16.84	17.73	36.94	35.13	40.19	36.34	37.15
FA2-C	17.91	15.88	19.56	18.19	17.88	33.59	38.97	35.78	37.69	36.51
FA3-F	17.13	18.53	17.38	18.81	17.96	39.50	38.81	35.28	36.28	37.47
FA3-M	18.25	15.50	16.97	18.31	17.26	33.34	37.28	35.69	38.16	36.12
FA3-C	16.16	19.50	18.22	16.91	17.70	40.13	34.63	36.72	37.69	37.29
FA4-F	18.97	16.34	18.31	21.47	18.77	39.16	34.13	38.91	35.97	37.04
FA4-M	16.72	18.50	17.31	17.69	17.55	36.81	38.56	39.25	34.78	37.35
FA4-C	18.97	17.13	15.28	17.84	17.30	34.22	36.63	38.78	36.22	36.46
FA5-F	19.53	17.47	17.94	16.28	17.80	39.91	34.53	37.91	37.00	37.34
FA5-M	16.94	18.59	17.72	17.53	17.70	36.50	35.47	38.34	37.31	36.91
FA5-C	17.34	14.88	18.22	17.13	16.89	36.00	33.94	39.50	38.84	37.07

ตารางที่ ข. 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อายุ 14 และ 28 วัน

ชื่อ	กำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วัน (MPa)				กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (MPa)				
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG
Control	48.25	51.69	43.16	46.94	51.81	58.63	65.75	61.03	59.30
FA1-F	41.22	38.63	40.56	42.28	55.22	68.22	71.78	57.44	63.16
FA1-M	47.31	41.44	38.84	45.19	61.69	51.34	55.47	55.63	56.03
FA1-C	44.56	41.91	48.03	44.91	57.56	54.88	60.69	63.22	59.09
FA2-F	45.38	42.31	47.25	38.34	66.03	59.88	55.25	56.06	59.30
FA2-M	39.25	42.41	40.19	48.84	57.66	55.69	46.47	53.94	53.44
FA2-C	36.03	42.31	39.31	47.25	48.97	53.06	43.69	57.59	50.83
FA3-F	44.88	40.16	42.53	46.22	64.25	54.94	68.22	58.88	61.57
FA3-M	41.50	40.25	32.78	41.75	62.09	63.94	51.41	54.78	58.05
FA3-C	39.59	42.25	36.97	43.63	64.50	57.56	60.22	51.00	58.32
FA4-F	39.50	49.59	44.53	39.94	70.19	65.56	56.69	61.72	63.54
FA4-M	36.47	46.63	42.91	44.19	54.56	60.91	50.84	52.31	54.66
FA4-C	41.44	48.16	38.03	42.31	63.25	56.59	51.31	55.41	56.64
FA5-F	48.00	46.38	51.28	39.75	64.31	67.06	57.78	61.81	62.74
FA5-M	39.63	43.25	36.47	40.41	58.34	49.31	60.69	57.59	56.48
FA5-C	42.13	45.84	39.19	41.34	61.31	52.31	55.78	51.81	55.30

ตารางที่ ข. 7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ้งที่อายุ 1 และ 7 วัน

ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน (MPa)				กำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน (MPa)					
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG	
FA10SF2.5	19.16	18.00	18.81	17.53	18.38	42.50	45.34	38.97	36.69	40.88
FA10SF5	18.06	19.59	18.56	18.22	18.61	37.84	51.28	46.44	41.94	44.38
FA10SF10	19.28	18.31	18.47	18.81	18.72	45.16	43.34	48.97	41.16	44.66
FA10CS0.5	21.16	19.75	18.34	20.19	19.86	44.84	39.28	42.06	37.00	40.80
FA10CS1	20.41	21.53	19.00	20.50	20.36	46.50	40.94	41.63	38.78	41.96
FA10CS2	18.69	21.38	21.09	22.25	20.85	44.13	52.00	37.28	40.78	43.55

ตารางที่ ข. 8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับCSH/PCEและซิลิกาฟุ้งที่อายุ 14 และ 28 วัน

ชื่อส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วัน (MPa)				กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (MPa)					
	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง 3	ตัวอย่าง 4	AVG	
FA10SF2.5	52.03	49.16	54.03	46.44	50.41	54.19	65.34	59.19	61.66	60.09
FA10SF5	43.84	58.81	54.91	49.09	51.66	71.06	64.94	61.03	67.03	66.02
FA10SF10	54.00	49.66	45.69	57.69	51.76	67.38	69.91	59.19	64.75	65.30
FA10CS0.5	54.94	43.78	52.09	47.25	49.52	67.50	61.69	58.97	66.19	63.59
FA10CS1	59.22	53.25	43.06	51.31	51.71	59.25	69.78	65.03	63.81	64.47
FA10CS2	55.97	43.53	49.13	60.13	52.19	67.09	65.50	70.78	60.81	66.05

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กฤตภาส สุวรรณมณี
วัน เดือน ปี เกิด	15 พฤศจิกายน 2539
สถานที่เกิด	อ.เบตง จ.ยะลา
ที่อยู่ปัจจุบัน	24/5 ถ.สโมสร ต.เบตง อ.เบตง จ.ยะลา 95110



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY