

2022

การกักเก็บคาร์บอนด้วยถ้ำลอยเพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์บางส่วน

สวิต วิเศษคุณธรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Environmental Engineering Commons](#)

Recommended Citation

วิเศษคุณธรรม, สวิต, "การกักเก็บคาร์บอนด้วยถ้ำลอยเพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์บางส่วน" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6593.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6593>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน



นายสวิต วิเศษคุณธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Carbon Sequestration of Fly Ash as a Partial Replacement for Portland Cement



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 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุแทนที่
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน
โดย	นายสวิต วิเศษคุณธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ธารทิพย์ พันธเมธาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ธารทิพย์ พันธเมธาฤทธิ์)

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

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

สวิต วิเศษคุณธรรม : การกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์บางส่วน. (Carbon Sequestration of Fly Ash as a Partial

Replacement for Portland Cement) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.มนัสกร ราชกรกิจ,

อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ธารทิพย์ พันธเมธาฤทธิ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอย ถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (FA) ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 100 และ 200 g/L และศึกษาความต้องการน้ำและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ของการใช้เถ้าลอยคาร์บอนเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนสูงสุด 66.69 mgCO₂/gFA และ 26.5% ตามลำดับ ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L ระยะเวลาเก็บนานที่สุด ที่สัดส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 200 g/L เมื่อเปรียบเทียบกับ 50 และ 100 g/L นอกจากนี้ เมื่อนำเถ้าลอยคาร์บอน (CFA) ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L ไปทดแทนปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก วิเคราะห์ความต้องการน้ำของเถ้าลอยคาร์บอน (CFA) มอร์ตาร์เทียบกับ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) มอร์ตาร์ พบว่าเมื่อมีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยคาร์บอน (CFA-OPC) ที่สัดส่วนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำลดลง และเมื่อวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยคาร์บอน (CFA) มอร์ตาร์ และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) มอร์ตาร์ ที่อายุ 1 3 7 28 และ 56 วัน พบว่ามอร์ตาร์ทุกการทดลองมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) มอร์ตาร์ แต่อย่างก็ตาม การใช้เถ้าลอยคาร์บอนที่ทุกอัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับการนำวัสดุปอซโซลานไปใช้งานในการทดแทนปูนซีเมนต์

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270337421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Fly ash, Carbonated fly ash, Portland cement, Carbon dioxide,

Carbon sequestration, Water requirement, Compressive strength

Sawit Visetkunnatham : Carbon Sequestration of Fly Ash as a Partial Replacement for Portland Cement. Advisor: Assoc. Prof. MANASKORN RACHAKARAKIJ, Ph.D. Co-advisor: Thantip Punmatharith, Ph.D.

This research investigated the impact of the carbon sequestration efficiency of fly ash on the carbonation process at different fly ash (FA) to water ratios (50, 100, and 200 g/L), as well as the effect of water requirement and compressive strength of mortar at different replacement levels of carbonated fly ash (10, 20, and 30% (w/w)). When the fly ash (FA) to water ratio is 200 g/L, the carbonation time is the longest, followed by 50 and 100 g/L. Based on the carbonate content, a maximum carbonation efficiency of 26.5% and CO₂ sequestration of 66.69 mgCO₂/gFA is calculated for fly ash (FA) to water ratio of 50 g/L. Furthermore, carbonated fly ash (CFA) with fly ash-to-water ratio of 50 g/L is used to prepare cement paste blends in which ordinary Portland cement (OPC) is replaced at 10, 20, and 30% (w/w). The water requirement of CFA-OPC mortars is compared to that of pure OPC. The results show that higher replacement levels require less water than pure OPC. The mechanical properties of CFA-OPC mortars were cured for 1 3 7 28 and 56 days. The results show that CFA-OPC has lower compressive strength than OPC at all replacement levels. However, according to the ASTM C 618 standard, CFA-OPC mortars at all replacement levels are recommended for use.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนจากรองศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ธารทิพย์ พันธุ์เมธาฤทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ได้สละเวลาให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อทุกขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณประธานกรรมการและคณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำแนะนำ และชี้แนะข้อผิดพลาด เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้อบรมสั่งสอน และเพิ่มพูนความรู้ อันเป็นประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะนำไปใช้ในภายภาคหน้า

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณครอบครัว ได้แก่ นายมนัส วิเศษคุณธรรม นางวาณี วิเศษคุณธรรม ประกอบกับบุคคลท่านอื่นในครอบครัว ที่คอยให้การสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายขอขอบคุณ เพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สวิต วิเศษคุณธรรม

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ.....	4
2.1.1 สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ.....	5
2.1.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ.....	6
2.2 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	6
2.3 เทคโนโลยีดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization and storage).....	7
2.3.1 รูปแบบของเทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน.....	11

ข้อดี และข้อเสียของเทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน.....	11
2.3.2 การกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่ (Mineral carbon sequestration).....	12
2.3.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยี CCS บนพื้นฐานของการใช้พลังงานจาก โรงไฟฟ้าถ่านหิน และพลังงานหมุนเวียน.....	13
2.4 เถ้าลอย	16
2.4.1 ประเภทของเถ้าลอย.....	16
2.4.2 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	18
2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	20
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	23
2.5.2 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์	23
2.5.3 ปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ	25
2.6 วัสดุปอซโซลาน	26
2.6.1 ปฏิกริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน	27
2.7 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต	27
2.7.1 ขั้นตอนและกลไกการเกิดปฏิกริยาคาร์บอนชั้นในเถ้าลอย	28
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย	33
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	33
3.1.2 วิธีการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย	34
3.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะ.....	35
3.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความชื้น (% Moisture content).....	36
3.1.5 ขั้นตอนการหาน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI).....	37
3.2 การสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอน.....	37

3.2.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	37
3.2.2	การติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	38
3.2.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสภาวะของการสังเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	38
3.2.4	ขั้นตอนการวิเคราะห์ขนาดฟองของหัวกระจายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	40
3.2.5	ขั้นตอนการสังเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	41
3.3	การศึกษาปริมาณและประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	42
3.3.1	การหาปริมาณและประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	42
3.3.2	การวิเคราะห์สมบัติของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	43
3.4	การศึกษาสมบัติพื้นฐาน และสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	43
3.4.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้	43
3.4.2	การเตรียมวัสดุ	44
3.4.2.1	การเตรียมส่วนผสมการผสมระหว่างปูนซีเมนต์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	44
3.4.2.2	การเตรียมมอร์ตาร์	45
3.4.3	การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานและสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	46
3.4.3.1	การศึกษาสมบัติการไหลตัว	46
3.4.3.2	การศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และดัชนีกำลัง (Strength Index Activity)	49
บทที่ 4	ผลการดำเนินงานวิจัย	54
4.1	ผลการดำเนินการสังเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	54
4.1.1	ผลการวิเคราะห์หาขนาดฟองของหัวกระจายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	54
4.1.2	ผลการวิเคราะห์หาขนาดฟองของหัวกระจายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายหลังการใช้ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอน	54

4.1.3 ผลการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต	55
4.1.3.1 ผลการศึกษาเวลาในการกักเก็บคาร์บอนของเถ้าลอยคาร์บอนเนต	55
4.1.3.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำในการกักเก็บคาร์บอนของเถ้าลอยคาร์บอนเนต.....	57
4.2 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยคาร์บอนเนตจากการสังเคราะห์	58
4.2.1 ความเป็นผลึก.....	58
4.2.2 สัณฐานและรายละเอียดผิว.....	59
4.3 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าลอยคาร์บอนเนตที่เหมาะสมที่สุด	63
4.3.1 องค์ประกอบทางเคมี.....	64
4.3.2 ขนาดของอนุภาค	65
4.3.3 ความถ่วงจำเพาะ.....	66
4.3.4 น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI).....	66
4.4 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐาน และสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนเนต	66
4.4.1 ส่วนคละของทราย.....	66
4.4.2 สมบัติมอร์ตาร์	67
4.4.2.1 ความต้องการน้ำ (Water requirement)	67
4.4.2.2 กำลังรับแรงอัดและค่าดัชนีกำลัง	68
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	72
5.1.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ	72
5.1.2 ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอย	72
5.1.3 สมบัติของมอร์ตาร์.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม.....	75

ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	164



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ข้อได้เปรียบ เสียเปรียบของเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	11
ตารางที่ 2 สรุปกระบวนการกักเก็บคาร์บอน	11
ตารางที่ 3 การแบ่งชั้นคุณภาพของถ่านล้อยโดยใช้องค์ประกอบทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C618	18
ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านล้อยแม่เมาะ	19
ตารางที่ 5 ข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-01	20
ตารางที่ 6 ปริมาณร้อยละของสารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ	22
ตารางที่ 7 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	23
ตารางที่ 8 คุณสมบัติด้านต่างๆ ของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	25
ตารางที่ 9 แสดงวิธีการและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถ่านล้อย และถ่านล้อยคาร์บอนเนต	34
ตารางที่ 10 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสภาวะของการสังเคราะห์ถ่านล้อยคาร์บอนเนต	39
ตารางที่ 11 แสดงวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของถ่านล้อยคาร์บอนเนต ...	43
ตารางที่ 12 อัตราส่วนการผสมสารเชื่อมประสาน (B).....	45
ตารางที่ 13 อายุมอร์ตาร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ.....	52
ตารางที่ 14 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์และถ่านล้อย	63
ตารางที่ 15 ขนาดของอนุภาคถ่านล้อย ที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 และถ่านล้อยคาร์บอนเนต	65
ตารางที่ 16 ส่วนคละทราย.....	67
ตารางที่ 17 ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าดัชนีกำลัง	70

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 หน่วย CCUS ขนาดใหญ่ (World large-scale CCUS facilities)	8
รูปที่ 2 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้.....	9
รูปที่ 3 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้	9
รูปที่ 4 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์	10
รูปที่ 5 ขั้นตอนของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่จากแหล่งที่มาของหินซิลิเกตหรือของเสียจากอุตสาหกรรม	13
รูปที่ 6 ข้อมูลโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ติดตั้งในปี พ.ศ. 2563.....	14
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการปล่อย CO ₂ สำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินแบบบดละเอียด (pulverised coal ; PC) NGCC และ IGCC (แต่ละประเภทรวมและไม่รวม CCS ด้วยอัตราการดักจับ CO ₂ ที่ 88% สำหรับหลังการเผาไหม้และก่อนการเผาไหม้ และ 99.5 % สำหรับการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจน) และพลังงานหมุนเวียน (ลม นอกชายฝั่งและพลังงานแสงอาทิตย์)	14
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (วัดในรูปของ CO ₂ เทียบเท่า) สำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินแบบบดละเอียด (pulverised coal ; PC) NGCC และ IGCC (แต่ละประเภทรวมและไม่รวม CCS ด้วยอัตราการดักจับ CO ₂ ที่ 88% สำหรับหลังการเผาไหม้และก่อนการเผาไหม้ และ 99.5 % สำหรับการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจน) และพลังงานหมุนเวียน (ลม นอกชายฝั่งและพลังงานแสงอาทิตย์)	15
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และของปริมาณซิลิกาออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ของเถ้าลอย	17
รูปที่ 10 ขั้นตอนการเกิดคาร์บอนเนชั่น	29
รูปที่ 11 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	32
รูปที่ 12 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อพีไอ	33
รูปที่ 13 เถ้าลอยที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325.....	33
รูปที่ 14 ทราเยแม้น้ำ.....	33

รูปที่ 15	จุ่มขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลีเอในอ่างน้ำ	35
รูปที่ 16	การติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	38
รูปที่ 17	รูปจากการอัดวิดีโอขณะทำการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยกล้องถ่ายภาพ.....	40
รูปที่ 18	ลากเส้นลงบนไม้บรรทัดในคลิปวิดีโอ.....	40
รูปที่ 19	กำหนดมาตราส่วนในโปรแกรม imageJ.....	40
รูปที่ 20	ทำการเลือกฟองจนได้ขั้นต่ำ 100 ฟอง.....	41
รูปที่ 21	หม้อผสม	45
รูปที่ 22	ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อผสมลงในหม้อ.....	46
รูปที่ 23	ปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินออกทิ้ง	47
รูปที่ 24	ยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างช้าๆ จะได้มอร์ตาร์ตามรูปทรงของแบบ.....	47
รูปที่ 25	ภายหลังจากการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหลซึ่งจะยกจาน และปล่อยให้ตก จำนวน 25 รอบ	48
รูปที่ 26	วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ จำนวน 4 ครั้ง ซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา	49
รูปที่ 27	การกระทุ้งมอร์ตาร์จำนวน 32 ครั้งโดยแบ่งเป็น 4 รอบ ๆ ละ 8 ครั้ง.....	50
รูปที่ 28	ดันมอร์ตาร์ที่ล้นออกมาเข้าไปอยู่ในแบบจากนั้นทำการกระทุ้งในรอบต่อไป	50
รูปที่ 29	ภายหลังจากกระทุ้งครบ 2 ชั้นใช้เกรียงปาดผิวหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อ	51
รูปที่ 30	บ่มมอร์ตาร์ในน้ำปูนขาวอิมตัว	51
รูปที่ 31	ทดสอบการรับน้ำหนักของมอร์ตาร์ด้วยเครื่องทดสอบ.....	52
รูปที่ 32	กราฟแสดงขนาดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 100 ฟอง	54
รูปที่ 33	กราฟแสดงขนาดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 100 ฟองภายหลังจากการใช้ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอน	55
รูปที่ 34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช และระยะเวลาในการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วนแก๊สต่อ น้ำ 50 g/L	56

รูปที่ 35 แสดงปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนที่เวลาต่างๆ และที่ค่าพีเอช 8.3 ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L.....	57
รูปที่ 36 แสดงระยะเวลาการกักเก็บคาร์บอนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.3 และที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 100 และ 200 กรัมต่อลิตร	57
รูปที่ 37 กราฟแสดงปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน ที่พีเอช 8.3 และสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ ที่ 50 100 และ 200 g/L.....	58
รูปที่ 38 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอย โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า	60
รูปที่ 39 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 5 นาที่ ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า.....	60
รูปที่ 40 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 10 นาที่ ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า.....	60
รูปที่ 41 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 15 นาที่ ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า.....	61
รูปที่ 42 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 30 นาที่ ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า	61
รูปที่ 43 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 52 นาที่ (pH 8.3) ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า	61
รูปที่ 44 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 60 นาที่ ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า	62

รูปที่ 45 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 90 นาที่ ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า.....	62
รูปที่ 46 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ค่าพีเอช 8.3 ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 100 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า	62
รูปที่ 47 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ค่าพีเอช 8.3 ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 200 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า	63
รูปที่ 48 การกระจายขนาดผลึกของอนุภาคเถ้าลอย ที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 และเถ้าลอยคาร์บอนเนต	66
รูปที่ 49 กราฟเปรียบเทียบความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC100) และมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าลอยคาร์บอนเนต (CFA) ที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก.....	68
รูปที่ 50 กราฟผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ทดแทนด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าลอยคาร์บอนเนต (CFA).....	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจก ที่ปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ที่มีการคิดเป็นสัดส่วนของการปลดปล่อยสู่บรรยากาศแล้วพบว่ามีปริมาณสูงถึงร้อยละ 74.4 เมื่อเทียบกับก๊าซเรือนกระจกตัวอื่นๆ (Ritchie และคณะ, 2560) และเมื่อพิจารณาจากรายงานของ Global Carbon Project ของ Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) ปีพ.ศ. 2561 ซึ่งนำตัวเลขปริมาณ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปีพ.ศ. 2560 อันส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกในแต่ละประเทศมาจัดลำดับ พบว่า ประเทศจีนเป็นอันดับหนึ่งที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คิดเป็นร้อยละ 27.2 จากจำนวนปริมาณก๊าซทั้งหมด 36,153 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ (MtCO_2) รองลงมา เป็นสหรัฐอเมริกา อินเดีย รัสเซียและญี่ปุ่น สำหรับประเทศไทยนั้นจัดอยู่ในลำดับที่ 20 ของโลก (สันติชัย อาภรณ์ศรี, 2563) เพื่อที่จะบรรเทาปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแล้ว ทุกภาคส่วนและทุกประเทศทั่วโลกจะต้องลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกัน

โดยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่แบ่งออกเป็น ภาคพลังงาน ภาคการเกษตร ภาคอุตสาหกรรม ภาคการใช้ประโยชน์จากที่ดินและป่าไม้ และภาคของเสีย โดยภาคอุตสาหกรรมถือเป็นภาคการผลิตหลักที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ที่เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีส่วนในการพัฒนาประเทศ และยังมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2559) ที่พบว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ถึงร้อยละ 8 ของการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจากแหล่งที่มีการปลดปล่อยทั่วโลก (Plaza และคณะ, 2563) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์คิดเป็นร้อยละ 14 ถึง 33 ของแก๊สเผาไหม้ (flue gas) (Bosoaga และคณะ, 2552) โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 2 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกคือ จากกระบวนการเผาเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงฟอสซิลตามค่าความร้อนที่ต้องการและอีกส่วนเกิดจากกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ (Gibbs และคณะ, 2544) ซึ่งสองส่วนดังกล่าวเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยคิดเป็นประมาณ 479 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตันของปูนซีเมนต์และ 319 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตันของปูนซีเมนต์ตามลำดับ (Czigler และคณะ, 2563) จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่

ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลและกระบวนการเผาปูนซีเมนต์

แนวทางลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ได้แก่ การใช้เชื้อเพลิงทดแทน การส่งเสริมให้ใช้วัสดุทดแทนปูนเม็ดในผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2559) และการใช้การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (carbon capture and storage : CCS) (Leung และคณะ, 2557) ซึ่งการดักจับและกักเก็บคาร์บอนนั้นกำลังเป็นที่สนใจเพิ่มขึ้นเนื่องจากมองว่าเป็นเทคโนโลยีสำคัญซึ่งช่วยให้สามารถจัดการคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างที่ยังมีการพึ่งพาการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการผลิต ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าภายในปี พ.ศ. 2643 เทคโนโลยีนี้อาจมีส่วนร่วมในการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกมากถึงร้อยละ 15-55 และสามารถลดต้นทุนในการรักษาระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมากถึงร้อยละ 30 ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ได้มีการพัฒนาแนวทางการใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์หรือแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต (IPCC, 2548)

จากการศึกษา พบว่าเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ มีด้วยกันหลายรูปแบบ อาทิ การกักเก็บใต้ดิน การกักเก็บในมหาสมุทร การใช้ในอุตสาหกรรม และการกักเก็บในรูปแบบแร่ ซึ่งพบว่าการกักเก็บในรูปแบบแร่ธาตุเป็นวิธีเดียวในการกักเก็บคาร์บอนแบบถาวรและมีความเสถียร อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งการกักเก็บดังกล่าวสามารถใช้ร่วมกับวัตถุดิบที่มีสภาพความเป็นต่างได้ เช่น ตะกรันเหล็ก กากโลหะกรรม ผุนจากเตาเผาซีเมนต์ และเถ้าลอย เป็นต้น (Bobicki และคณะ, 2555) ซึ่งเถ้าลอยเป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีดังกล่าวเนื่องจากเป็นผลพลอยได้ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียม และมีปริมาณมากจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า โดยได้มีการนำมาทดแทนซีเมนต์หรือแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตอย่างแพร่หลาย ที่ช่วยลดต้นทุนวัสดุและยังช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตได้อีกทางหนึ่งด้วย (Glavind, 2552)

ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการนำเถ้าลอยที่นับวันจะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการนำไปกำจัด ให้สามารถนำเถ้าลอยกลับมาใช้ประโยชน์โดยให้อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นตัวกลางในการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว ที่ซึ่งนำเถ้าลอยมากักเก็บคาร์บอนเพื่อเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ที่นอกจากจะเป็นการช่วยลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ ลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว ยังสามารถพัฒนาสมบัติของปูนซีเมนต์ให้ดีขึ้นได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอย เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
2. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยคาร์บอนเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีต่อความต้องการน้ำและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา เป็นตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
2. ทำการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. วิเคราะห์ขนาดของฟองอากาศที่ใช้ในการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอน ด้วยโปรแกรม ImageJ
4. ศึกษาผลของปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย และเวลากักเก็บ โดยใช้สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำที่ 50,100 และ 200 g/L, อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 25 mL/min
5. เถ้าลอยที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ โดยการกักเก็บคาร์บอนแล้ว เรียกว่า เถ้าลอยคาร์บอน
6. ศึกษาความต้องการน้ำ กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ และดัชนีกำลัง (Strength activity index) สำหรับมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอน ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก
7. ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ คือ 1, 3, 7, 28 และ 56 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ทราบผลของสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ ที่มีผลต่อปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน ในการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์
2. ทำให้ทราบกำลังรับแรงอัด และการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ที่ใช้เถ้าลอยคาร์บอนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การเปลี่ยนแปลงลักษณะอากาศเฉลี่ย (average weather) ในพื้นที่หนึ่ง ซึ่งลักษณะอากาศเฉลี่ย หมายความว่ารวมถึง ลักษณะทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับอากาศ เช่น อุณหภูมิ ฝน ลม เป็นต้น และในความหมายตามกรอบของอนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ FCCC (Framework Convention on Climate Change) การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อันเป็นผลทางตรง หรือทางอ้อมจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ทำให้องค์ประกอบของบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไป นอกเหนือจากความผันแปรตามธรรมชาติ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2563) ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมของมนุษย์ที่มีการปล่อยก๊าซก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) ที่ทั่วโลกให้ความสำคัญ ประกอบด้วย

1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide : CO_2) เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวกน้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม คมนาคมขนส่ง การผลิตไฟฟ้า รวมถึงเกิดจากการเผาป่า เป็นต้น เชื้อเพลิงเหล่านี้มีสารคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อถูกเผาไหม้จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลอยขึ้นสู่บรรยากาศ
2. ก๊าซมีเทน (Methane : CH_4) เกิดจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ เราสามารถพบก๊าซมีเทนตามธรรมชาติได้บริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำ (Swamp/ Wetland) นอกจากนี้ก๊าซมีเทนยังเกิดจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ด้วย เช่น กิจกรรมทางการเกษตร (การปลูกข้าวและเลี้ยงสัตว์) การฝังกลบขยะมูลฝอยในบ่อขยะ การทำเหมืองแร่ และการผลิตถ่านหิน ฯลฯ แม้ในชั้นบรรยากาศจะมีก๊าซมีเทนอยู่น้อย แต่ก๊าซชนิดนี้สามารถดูดซับความร้อนได้มากกว่า CO_2 ถึง 25 เท่า
3. ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide : N_2O) เกิดจากการทำการเกษตร ปศุสัตว์ การย่อยสลายของซากพืชและซากสัตว์ และการใช้ปุ๋ยที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน การเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาคพลังงาน ฯลฯ
4. ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (Hydrofluorocarbons : HFCs) ใช้เป็นสารทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศ และใช้ในอุตสาหกรรมโฟมและสารดับเพลิง
5. ก๊าซเปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (Perfluorocarbons : PFCs) พบในการหลอมอะลูมิเนียมและผลิตสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า

6. ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur hexafluoride: SF_6) นำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าป้องกันการเกิด

ประกายไฟจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือนำมาใช้เพื่อช่วยระบายความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และนิยมนำไปใช้ในกระบวนการผลิตยางรถยนต์ ก๊าซชนิดนี้ถูกระบุว่าเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อนมากที่สุด มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 22,800 เท่า

7. ก๊าซไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (Nitrogen trifluoride : NF_3) เป็นก๊าซที่พบมากในอุตสาหกรรมผลิตวงจรไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือแผงวงจรขนาดเล็กสำหรับคอมพิวเตอร์เช่น โซลาร์เซลล์ จอแอลซีดีที่ใช้ในโทรทัศน์ และโทรศัพท์มือถือ ฯลฯ

ในบรรดาก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศโลก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 76 โดยแบ่งเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินคิดเป็นร้อยละ 65 และเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้ประโยชน์ที่ดินและป่าไม้คิดเป็นร้อยละ 11 รองลงมาคือ ก๊าซมีเทนร้อยละ 16 ก๊าซไนตรัสออกไซด์ร้อยละ 6 และอีกร้อยละ 2 คือ กลุ่มก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน เปอร์ฟลูออโรคาร์บอน ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ และไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์

2.1.1 สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก มีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นการนำเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้ในภาคพลังงาน ขนส่ง และอุตสาหกรรม กิจกรรมต่างๆ ในภาคเกษตร รวมถึงการตัดไม้ทำลายป่า ซึ่งเป็นแหล่งดูดซับคาร์บอนที่สำคัญของโลก ทั้งหมดนี้มีส่วนในการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งทางตรงและทางอ้อม

1. การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง

เป็นกิจกรรมที่เป็นปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง ณ เวลาที่ทำการกิจกรรมนั้น เช่น กิจกรรมจากการเดินทาง และการขนส่ง มีการใช้น้ำมัน ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หนึ่งในก๊าซเรือนกระจก ที่เป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน

2. การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม

เป็นกิจกรรมที่ไม่ได้ปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงในขณะนั้น แต่การกระทำ หรือ พฤติกรรมในชีวิตประจำวัน มีส่วนทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเช่น การใช้ไฟฟ้า เพราะโรงงานผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่ยังใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวก น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงหลัก หรือ การบริโภคสินค้าในชีวิตประจำวัน เช่น การใช้บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง จำพวก

ถุงพลาสติก หรือหลอดเครื่องดื่ม รวมถึงการรับประทานอาหารเหลือทิ้ง เพราะสินค้าและพฤติกรรมในการบริโภคในลักษณะนี้ ล้วนต้องใช้พลังงานและทรัพยากรในทุกขั้นตอน ตั้งแต่ การผลิต การขนส่ง ตลอดจนการจัดจำหน่าย

2.1.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้สภาพภูมิอากาศเป็นแบบสุดโต่ง (Extreme Weather) เช่น อากาศที่ร้อนจัดหรือหนาวจัด น้ำแข็งขั้วโลกละลาย ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น และยังส่งผลทำให้เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติมากมายซึ่งเกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตของมนุษย์โดยตรง เช่น สภาพอากาศรุนแรง อันเนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้น ภัยธรรมชาติต่างๆ มีแนวโน้มว่าจะเกิดบ่อยครั้ง และรุนแรงมากขึ้น เช่น ภัยแล้ง ไฟป่า พายุไต้ฝุ่นโซนร้อน น้ำท่วม และการพังทลายของชั้นดิน เป็นต้น ฤดูกาลผันแปร ฤดูหนาวสั้นลง และฤดูร้อนมาถึงเร็วขึ้น รูปแบบของฝนและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปทำให้วัฏจักรของน้ำเปลี่ยนแปลง ลักษณะการไหลของระบบน้ำผิวดินและระดับน้ำใต้ดินก็จะได้รับผลกระทบด้วย ส่งผลให้พืชพรรณธรรมชาติและสัตว์ในระบบนิเวศน์เปลี่ยนแปลง และความหลากหลายทางชีวภาพที่สัมพันธ์กับการดำรงชีวิตของมนุษย์นั้นเปลี่ยนไป รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศนำมาซึ่งโรคร้าย เช่น ฮีตสโตรก (Heat Stroke) ภาวะเป็นลมเนื่องจากความร้อนสูงเกินไป นับเป็นด้านแรกของภัยสุขภาพยุคโลกร้อน รวมถึงโรคติดต่ออุบัติใหม่ (Emerging Infectious Diseases) เช่น โรคซาร์ส ไข้หวัดนก ไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์ใหม่ 2552 H1N1 ไข้สมองอักเสบนิปาห์ไวรัส เป็นต้น (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2551)

2.2 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น การเผาไม้ ก๊าซถ่านหิน และน้ำมันเพื่อเป็นพลังงาน ที่ส่วนใหญ่ใช้สำหรับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ การตัดไม้ทำลายป่า ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางธรรมชาติ ก็เป็นเหตุให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2551)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก และความหลากหลายทางชีวภาพ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถูกปลดปล่อยทั่วโลกประมาณกว่า 36 พันล้านตันต่อปี มาจากภาคอุตสาหกรรม การก่อสร้าง ขนส่ง และครัวเรือน ซึ่งปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

สำหรับสัดส่วนของแหล่งที่มาหลักในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทยจากข้อมูลของธนาคารโลก ในปี พ.ศ. 2557 มีสัดส่วนดังนี้ (วัฒนวินิจัย, 2562)

1. ภาคการผลิตไฟฟ้า

เนื่องจากไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะการใช้ไฟฟ้าในที่อยู่อาศัย ตลอดจนการขนส่ง การสื่อสาร กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม อันมีผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ทำให้การผลิตไฟฟ้าเป็นภาคส่วนหลักที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสัดส่วนที่มากที่สุด จากการผลิตไฟฟ้าในปีพ.ศ. 2557 สัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นร้อยละ 46.60 ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด

2. ภาคการขนส่ง

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งทุกประเภท ยกเว้นการขนส่งทางเรือและเครื่องบินระหว่างประเทศ นั้นเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ โดยมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปี พ.ศ. 2557 เป็นร้อยละ 24.72 ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด

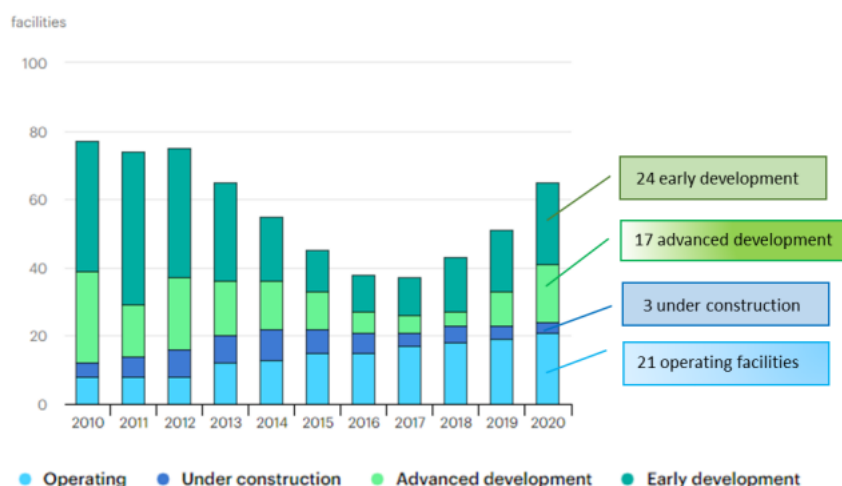
3. ภาคอุตสาหกรรม

ภาคอุตสาหกรรมเป็นภาคส่วนที่มีการผลิตสินค้าและวัตถุดิบในทุกวัน มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งทางตรงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นพลังงานหรือความร้อน ผ่านทางปฏิกิริยาทางเคมี และทางอ้อมจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปีพ.ศ. 2557 มีสัดส่วนในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นร้อยละ 20.89 ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด

2.3 เทคโนโลยีดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization and storage)

เทคโนโลยีการดักจับ ใช้ประโยชน์ และกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture, Utilization and storage; CCUS) เป็นแนวคิดที่มีขึ้นมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2513 แต่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากทั่วโลก โดยเฉพาะหลังจากปี พ.ศ.2558 ดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าการเติบโตของหน่วย CCUS ที่ลดลงตั้งแต่ปี พ.ศ.2553 กลับเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหลังจากปี พ.ศ.2558 ที่ได้มีการประชุม COP21 จากการผลักดันของนานาประเทศ ทั้งภาครัฐและภาคเอกชน เทคโนโลยี CCUS จึงได้เติบโตและขยายวงกว้างมากขึ้น โดยได้รับการสนับสนุนจากเป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศและแรงจูงใจด้านนโยบายใหม่ๆ และเมื่อต้นทุน CCUS ลดลง ทำให้อุตสาหกรรมใหม่และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการใช้

ประโยชน์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือการกำจัดคาร์บอน มีความเป็นไปได้และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์



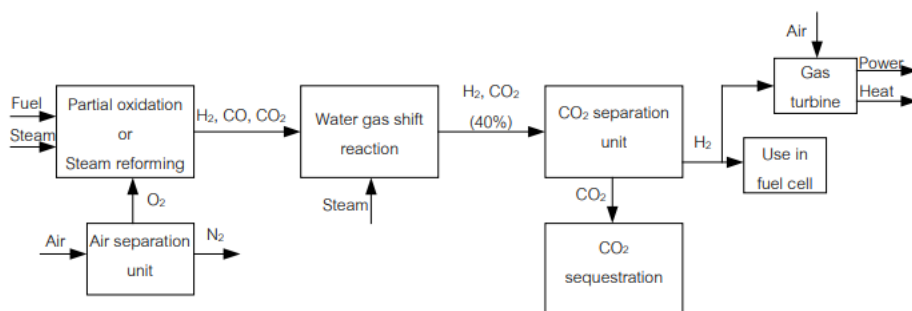
รูปที่ 1 หน่วย CCUS ขนาดใหญ่ (World large-scale CCUS facilities)

เทคโนโลยี CCUS แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกักเก็บ (Carbon Capture and storage, CCS) ส่วนที่สอง คือ การใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ดักจับได้ (Carbon capture and utilization, CCU) (ภัทรพร คิม, 2561)

เทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน ประกอบด้วยสามขั้นตอน คือ การดักจับ การขนส่ง และการจัดเก็บ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยขั้นตอนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งนี้เป็นสิ่งสำคัญ ปัจจุบันเทคโนโลยีการกักเก็บแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture) การกักเก็บหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture) และการกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture) เมื่อดักจับได้แล้วจะต้องมีขนส่งจากแหล่งที่มาไปยังจุดจัดเก็บ จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกฉีดเข้าไปก่อดั้วทางธรณีวิทยา และเก็บไว้ใต้ดิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

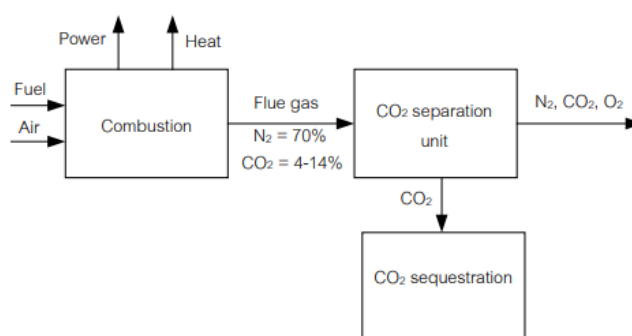
1. การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture) ในกระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนการเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 2 เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) หรือ รีฟอร์มด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ตามลำดับ ซึ่งทำให้ก๊าซสังเคราะห์ คือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เกิดปฏิกิริยา water gas shift ทำให้ได้

ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และได้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้ในกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) หรือทำปฏิกิริยากับอากาศ เพื่อให้เกิดพลังงานใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป



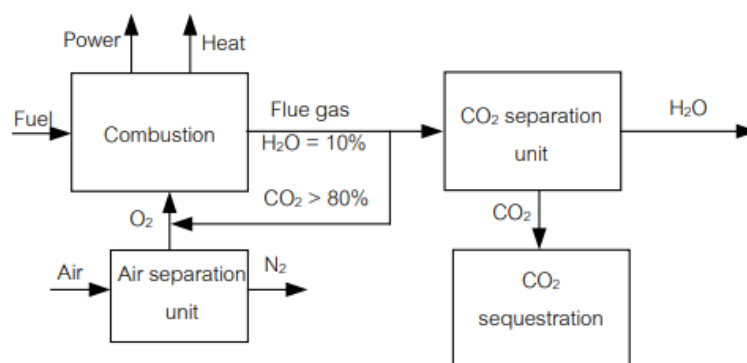
รูปที่ 2 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้

2. การกักเก็บหลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture) ในกระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 เซลล์เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับอากาศตั้งแต่เริ่มต้น ทำให้ได้พลังงานและความร้อน ซึ่งก๊าซที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการนี้ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีมากถึงร้อยละ 70 ในขณะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่เพียงร้อยละ 4-14 ซึ่งหมายความว่าต้องมีการออกแบบเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่ เพื่อที่จะรองรับปริมาตรของก๊าซผสมที่มาก ส่งผลให้ต้นทุนในกระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง นอกจากนี้ เนื่องจากว่าอากาศในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ ทำให้เกิดไนตรัสออกไซด์ ซึ่งจะต้องกำจัดก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศต่อไป ซึ่งการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปล่อยก๊าซผสมสู่ชั้นบรรยากาศ ต้องเลือกวิธีที่สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น ในขณะที่ปล่อยก๊าซอื่นๆ ออกไป



รูปที่ 3 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้

3. การกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture) การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาต่อมาจากการกักเก็บหลังการเผาไหม้ โดยใช้เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนบริสุทธิ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 ทำให้ได้พลังงานและความร่อย ข้อได้เปรียบของการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ คือ ทำให้องค์ประกอบขากออกของก๊าซผสม มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มากถึงร้อยละ 80 ทำให้สามารถเลือกใช้เทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้หลากหลาย การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ ให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการนำก๊าซผสมขากออกมารีไซเคิลไปยังเตาปฏิกรณ์ เพื่อทำให้อุณหภูมิในเตาไม่สูงเกินไป ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของวิธีนี้คือ ออกซิเจนบริสุทธิ์ จะไม่ทำให้เกิดไนตรัสออกไซด์เป็นสารประกอบ อย่างไรก็ตามการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการแยกออกซิเจนออกจากอากาศ ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของเทคโนโลยีกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 3 แบบ สรุปได้ดังตาราง 1 (ธงไทยวิฑูรย์, 2554)



รูปที่ 4 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์

ตารางที่ 1 ข้อได้เปรียบ เสียเปรียบของเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการ	ข้อได้เปรียบ	อุปสรรคในการดำเนินงาน
การกักเก็บก่อนการเผาไหม้	<ul style="list-style-type: none"> - มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มาก ทำให้สามารถเลือกเทคโนโลยีการแยกได้หลากหลาย - ลดค่าใช้จ่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - ยังถือว่าเป็นเรื่องใหม่ ต้องมีการปรับปรุงโรงงานเพื่อใช้เทคโนโลยีนี้ ซึ่งจะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากการปรับเปลี่ยน
การกักเก็บหลังการเผาไหม้	สามารถใช้กับกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่มีอยู่แล้วในปัจจุบันได้	<ul style="list-style-type: none"> - ก๊าซผสมมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เจือจาง ทำให้ต้องใช้เทคนิคการแยกที่มีประสิทธิภาพสูง
การกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงมาก ทำให้สามารถเลือกเทคโนโลยีการแยกได้หลากหลาย	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์จำนวนมากด้วยเทคนิคโครโอเจนิค ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง จึงอาจเป็นข้อจำกัดสูญเสียพลังงานในการลดอุณหภูมิสายโซ่เคิลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: (ธงไทย วิฑูรย์, 2554)

2.3.1 รูปแบบของเทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน

ข้อดี และข้อเสียของเทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน สรุปดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปกระบวนการกักเก็บคาร์บอน

รูปแบบของเทคโนโลยีดักจับและกักเก็บคาร์บอน	ข้อดี	ข้อเสีย
การกักเก็บทางธรณีวิทยา (Geologic sequestration)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถทำได้ในระดับใหญ่ - สามารถรู้ความจุในการกักเก็บได้ - มีการใช้อย่างกว้างขวาง ราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - จำเป็นต้องมีการติดตามตรวจสอบ - สามารถเกิดการรั่วไหลได้
การกักเก็บในมหาสมุทร (Ocean carbon sequestration)	<ul style="list-style-type: none"> - รองรับการกักเก็บได้ในปริมาณมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - กักเก็บได้ชั่วคราว - ก่อให้เกิดผลกระทบต่อจุลชีพในน้ำ
การใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial use)	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ ที่รวมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ที่มีค่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ความสามารถในการกักเก็บมีจำกัด - กักเก็บได้ในระยะเวลาสั้น
การกักเก็บในรูปแร่ (Mineral carbon sequestration)	<ul style="list-style-type: none"> - มีการจัดเก็บแบบถาวร - ได้ผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พลังงานมาก - ค่าใช้จ่ายสูง

ที่มา: (Bobicki และคณะ, 2012)

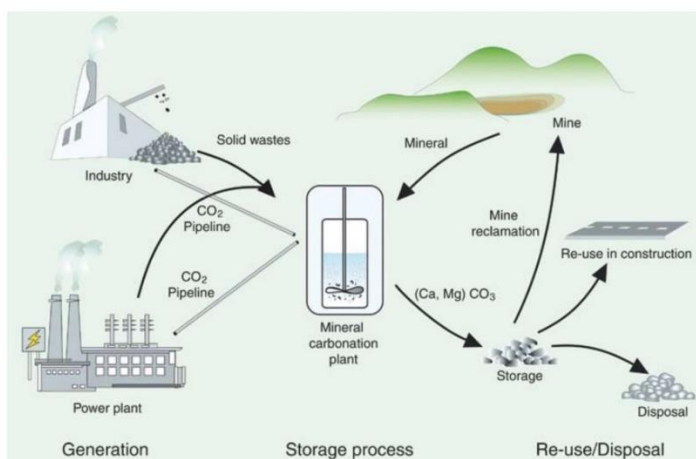
2.3.2 การกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่ (Mineral carbon sequestration)

เทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่ขึ้นอยู่กับกระบวนการผุกร่อนของหินธรรมชาติที่เกิดขึ้น การดักจับคาร์บอนจากการผ่านการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำฝน จะถูกทำให้เป็นกลางด้วยความแตกต่างของแร่เพื่อสร้างแร่ธาตุคาร์บอเนต ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอเนตแร่ยังคงอยู่ตามธรรมชาติในสถานะของแข็ง ดังนั้นความเป็นไปได้ที่คาร์บอเนตแร่จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากการกักเก็บแทบไม่มี ซึ่งหากต้องการดึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากคาร์บอเนตจำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมาก (Lackner และคณะ, 2538) การกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่สามารถทำได้ทั้งในแหล่งกำเนิด (ใต้ดินในการกักตัวทางธรณีวิทยา) หรือนอกแหล่งกำเนิด (เหนือพื้นดินในโรงงานแปรรูปทางเคมี) (Gerdemann และคณะ, 2547)

การกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่มีข้อดีหลายประการ ที่ไม่เพียงเป็นการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างถาวร (Lackner และคณะ, 2538) แต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถขายได้ และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Maroto-Valer และคณะ, 2548) ที่สำคัญกว่านั้นคือการใช้การกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่สามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว หลักการของเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาคาร์บอเนชันของแร่ (Mineral carbonation reaction) โดยจะคายความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในธรรมชาติ เริ่มจากหินคาร์บอเนตและซิลิเกตได้รับการผุกร่อนโดยกรดคาร์บอนิก คาร์บอเนตผุกร่อนเกิดเป็นคาร์บอเนต ในขณะที่ซิลิเกตผุกร่อนเกิดคาร์บอเนตหรือไบคาร์บอเนต ซึ่งการเปลี่ยนคาร์บอเนตให้เป็นไบคาร์บอเนตง่ายกว่าที่จะสร้างคาร์บอเนตจากซิลิเกต อย่างไรก็ตามการสร้างคาร์บอเนตจากซิลิเกตมักเป็นโครงการการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นอกแหล่งกำเนิด เนื่องจากคาร์บอเนตแทบไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นจึงจัดให้มีการจัดเก็บแบบควบคุม ในขณะที่ไบคาร์บอเนตค่อนข้างละลายน้ำได้และต้องเจือจางสู่สิ่งแวดล้อม (Lackner, 2545)

ทั้งโลหะอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ธ ที่อาจเป็นแหล่งของคาร์บอเนต ซึ่งพบว่าแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นอัลคาไลน์เอิร์ธที่อุดมสมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วโลหะจึงถูกเลือกใช้สำหรับวัตถุประสงค์ในการกักเก็บคาร์บอนด้วยแร่ธาตุ ดังนั้นแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไซด์คือวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่ ซึ่งปฏิกิริยาจะสร้างความร้อนมากที่สุด กากของเสียอุตสาหกรรมที่เป็นอัลคาไลน์เป็นแหล่งทางเลือกหนึ่งของวัสดุที่หาได้ง่ายและมีปฏิกิริยาเหมาะสมสำหรับการกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่ เพื่อลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สามารถช่วยสร้างเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่และการใช้งานอาจเป็นก้าวสำคัญสู่การพัฒนาเศรษฐกิจกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนโดยใช้แร่ธาตุจากธรรมชาติ ของเสียที่มีได้รับการพิจารณาสำหรับการกักเก็บด้วย

แร่ ได้แก่ ตะกรันเหล็ก กากของเสียจากคอนกรีต กากของเสียจากกระบวนการแต่งแร่และทำเหมือง
 ถ้ำจากการเผาไหม้ของเสีย และกากของเสียจากโรงงานกระดาษดังรูปที่ 5 (Huijgen และคณะ,
 2546) (IPCC, 2548)



รูปที่ 5 ขั้นตอนของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บคาร์บอนในรูปแร่จากแหล่งที่มาของหินซิลิ
 เกตหรือของเสียจากอุตสาหกรรม

ที่มา: (IPCC, 2548)

2.3.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยี CCS บนพื้นฐานของการใช้พลังงานจาก โรงไฟฟ้าถ่านหิน และพลังงานหมุนเวียน

จากรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน และพลังงาน
 ชนิดอื่น (กักเก็บคาร์บอนและไม่ได้กักเก็บคาร์บอน) รวมถึงการขนส่งกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม
 พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานความร้อนจากโรงไฟฟ้า

Data	Pulverised hard coal		IGCC ^a (hard coal)	Pulverised lignite	NGCC ^b (natural gas)
(A) Without CO ₂ capture					
Power (MW _{el})	700		700	700	700
Operating time (h)	7000		7000	7000	7000
Efficiency (%)	49		50	46	60
Investment cost (€/kW _{el})	950		1400		400
Operating cost (€/kW _{el,a})	48.3		53		34.1
LEC ^c , lower fuel price (ct _{EUR} /kWh _{el})	3.51		4.27		3.56
LEC ^c , higher fuel price (ct _{EUR} /kWh _{el})	4.89		5.66		4.94
Fuel's CO ₂ intensity (g CO ₂ /MJ) ^d	92		92	112	56
Electricity's CO ₂ intensity (g CO ₂ /kWh _{el})	676		662	849	337
Data	Pulverised hard coal		IGCC ^a (hard coal)	Pulverised lignite	NGCC ^b (natural gas)
(B) With CO ₂ capture					
Capturing method	Post-combustion	Oxyfuel	Pre-combustion	Post-combustion	Post-combustion
Scrubber	Chemical (MEA) ^e	Only condensing	Physical (Rectisol)	Chemical (MEA) ^e	Chemical (MEA) ^e
Power (MW _{el})	570	543	590	517	600
Efficiency (%)	40	38	42	34	51
Decrease of efficiency (%-points)	9	11	8	12	9
Investment cost (€/kW _{el})	1750		2100		900
Operating cost (€/kW _{el,a})	80		85		54
LEC ^c , lower fuel price (ct _{EUR} /kWh _{el})	5.52		6.06		5.04
LEC ^c , higher fuel price (ct _{EUR} /kWh _{el})	6.13		6.64		6.16
Capture rate (%)	88	99.5	88	88	88
CO ₂ to store (Mt/a)	3.570	4.249	3.400	5.113	1.704

^a IGCC, integrated gasification combined cycle.
^b NGCC, natural gas combined cycle.
^c LEC, levelised electricity generation costs; interest rate: 10%/a, lifetime: 25 a, annuity: 11%/a.
^d Source: UBA (2003).
^e MEA, monoethanolamine.

^a IGCC, integrated gasification combined cycle.

^b NGCC, natural gas combined cycle.

^c LEC, levelised electricity generation costs; interest rate: 10%/a, lifetime: 25 a, annuity: 11%/a.

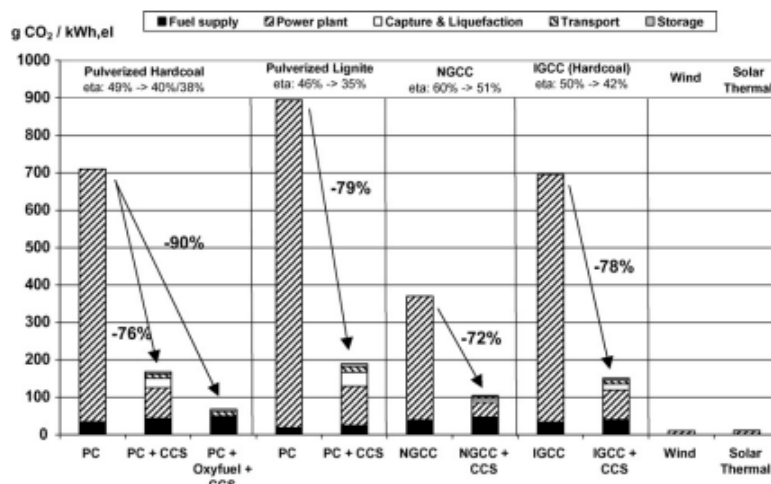
^d Source: UBA (2003).

^e MEA, monoethanolamine.

รูปที่ 6 ข้อมูลโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ติดตั้งในปี พ.ศ. 2563

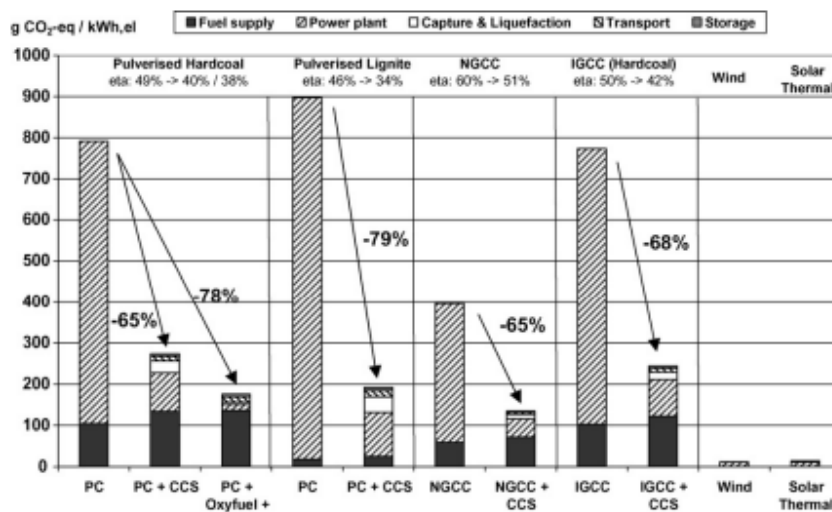
ที่มา: (Viebahn และคณะ, 2550)

จากรูปที่ 7 และ 8 แสดงถึงผลของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดียวกัน โดยค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน (GWP) วัดในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าลดลงจากการดำเนินการด้วยเทคโนโลยี CCS



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการปล่อย CO₂ สำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินแบบบดละเอียด (pulverised coal ; PC) NGCC และ IGCC (แต่ละประเภทรวมและไม่รวม CCS ด้วยอัตราการดักจับ CO₂ ที่ 88% สำหรับหลังการเผาไหม้และก่อนการเผาไหม้ และ 99.5 % สำหรับการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจน) และพลังงานหมุนเวียน (ลม นอกชายฝั่ง และพลังงานแสงอาทิตย์)

ที่มา: (Viebahn และคณะ, 2550)



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (วัดในรูปของ CO₂ เทียบเท่า) สำหรับโรงไฟฟ้า ถ่านหินแบบบดละเอียด (pulverised coal ; PC) NGCC และ IGCC (แต่ละประเภทรวมและไม่รวม CCS ด้วยอัตราการดักจับ CO₂ ที่ 88% สำหรับหลังการเผาไหม้และก่อนการเผาไหม้ และ 99.5 % สำหรับการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจน) และพลังงานหมุนเวียน (ลม นอกชายฝั่ง และพลังงานแสงอาทิตย์) ที่มา: (Viebahn และคณะ, 2550)

วัฏจักรของปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถูกแสดงการใช้เชื้อเพลิง 5 ระยะ ดังนี้ โรงไฟฟ้า (การผลิตกระแสไฟฟ้า), การดักจับและทำให้เป็นของเหลว, การขนส่ง และการจัดเก็บ แม้ว่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถูกปลดปล่อยออกมาเฉพาะที่ปล่อย 88% ซึ่งจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของก่อนและหลังกระบวนการเผาไหม้ (pre- and post-combustion) แสดงให้เห็นว่า การลดลงของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นลดลงถึง 72-79% รวมถึงก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดอยู่ที่ 65-79% ซึ่งการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจน (Oxyfuel combustion) ร่วมกับอัตราการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 99.5% ผลคือ สามารถลดลงถึง 90% สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ 78% สำหรับก๊าซเรือนกระจก ตามลำดับ นี่เป็นเพราะการกักเก็บ การขนส่ง และการจัดเก็บนั้นต้องใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่ถูกปลดปล่อยออกมาในระหว่างห่วงโซ่อุปทานของพลังงานเชื้อเพลิง (อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และการขนส่ง) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้ว เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 1-3% และปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียง 1-4% ซึ่งมีความสัมพันธ์

แตกต่างกับการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ซึ่งส่วนใหญ่ปลดปล่อยในระหว่างกระบวนการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า (Viebahn และคณะ, 2550)

ตามที่ระบุไว้ข้างต้น กล่าวได้ว่า เทคโนโลยี CCS นั้นสามารถดักจับ CO_2 ได้ถึง 85-95% ของ CO_2 ทั้งหมดที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้า (IPCC, 2548) แต่การลดการปล่อยก๊าซสุทธิอยู่ที่ 72 ถึง 90% เนื่องจากการใช้พลังงานในการแยก CO_2 และการปลดปล่อย CO_2 จากกระบวนการผลิตต้นน้ำ (Viebahn และคณะ, 2550)

2.4 เถ้าลอย

เถ้าลอย เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเม็ดละเอียดมาก ลอยปะปนมากับก๊าซความร้อนจากปล่องควันไปสู่ชั้นบรรยากาศ มีประมาณ ร้อยละ 80 ของเถ้าถ่านหินทั้งหมด เป็นผลพลอยได้ในการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับด่างที่อุณหภูมิปกติ แล้วให้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานที่คล้ายกับสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาดังกล่าวของเถ้าลอยว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) จากคุณสมบัติดังกล่าวของเถ้าลอย หากนำไปใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีต จะช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ เพิ่มความสามารถได้ ลดความร้อนและการหดตัวของคอนกรีต นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี จากข้อดีของการใช้เถ้าลอยดังกล่าว จึงได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้งานคอนกรีตที่สามารถช่วยลดต้นทุนได้ โดยการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ เช่น งานหล่อคอนกรีตสำเร็จรูป งานทำคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ หรือในงานคอนกรีตหยาบ (ธีระพงษ์ ศรีเจริญ, 2548)

2.4.1 ประเภทของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 "Specification for Fly ash and Raw or Calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete" ได้จำแนกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิด คือ เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F และเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C

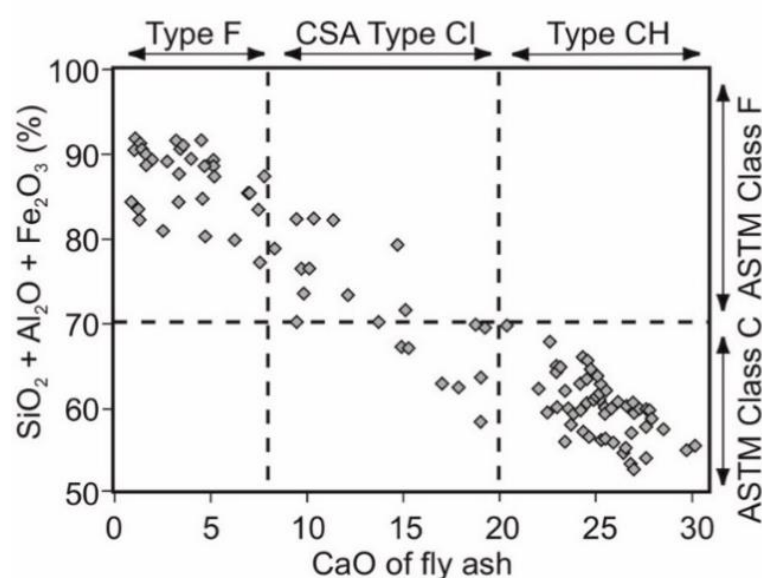
1. เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F

คือ เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินประเภทแอนทราไซต์และบิทูมินัส ที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก บางครั้งจะเรียกเถ้าลอยประเภทนี้ว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ เพราะมีปริมาณแคลเซียมน้อยกว่าร้อยละ

ละ 5 โดยน้ำหนักดังรูปที่ 8 จึงทำให้มีคุณสมบัติในการเป็นซีเมนต์ต่ำหรือแทบจะไม่มี แต่ยังมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าลอยประเภทนี้ในช่วงต้นจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา

2. เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C

คือ เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินประเภทลิกไนต์และซับบิทูมินัส ที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ อยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนักดังรูปที่ 9 บางครั้งเรียกเถ้าลอยประเภทนี้ว่าเป็นเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง เพราะมีปริมาณแคลเซียมอยู่ประมาณร้อยละ 15-23 โดยน้ำหนัก จึงเป็นเถ้าลอยที่มีคุณสมบัติของซีเมนต์และการเป็นวัสดุปอซโซลานในตัวเอง การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการผสมของเถ้าลอยประเภทนี้จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้นเมื่อเทียบกับชั้นคุณภาพ F (ธีระพงษ์ ศรีเจริญ, 2548)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และของปริมาณซิลิกาออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ของเถ้าลอย
ที่มา:(Thomas, 2550)

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแต่ละชั้นคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-01 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีจะมีค่าแตกต่างกันในเชิงปริมาณและคุณภาพตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผาและระบบดักจับเถ้าถ่าน

ตารางที่ 3 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยโดยใช้องค์ประกอบทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพ	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), น้อยที่สุดร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI), มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), มากที่สุดร้อยละ	1.5	1.5

ที่มา: (ธีระพงษ์ ศรีเจริญ, 2548)

2.4.2 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะ เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่เถ้าลอยจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ แม้ว่าจะเป็น Class C หรือ Class F ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้จากการควบคุมการผสมถ่านให้มีปริมาณ CaO และ SO_3 ของถ่านหินให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 เป็นต้นมา ทำให้เถ้าลอยลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C618 เป็น Class C ลักษณะทั่วไปของเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นรูปทรงกลม มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 มิลลิเมตร) ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 ซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยอัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา (ธีระพงษ์ ศรีเจริญ, 2548)

องค์ประกอบทางเคมีแสดงถึงคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันของเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะตั้งแต่ปี พ.ศ.2534-2544 แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะ

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	3.9	2.4	0.8	2.3	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	3.1	2.8	1.0	2.6	0.5
2536	43.1	20.2	13.2	13.0	2.6	2.7	1.3	2.4	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	2.8	1.4	0.9	2.0	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.8	2.5	0.7	2.0	0.9
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.4	2.5	1.2	3.0	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	2.0	1.2	0.6	3.3	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.5	2.7	1.1	2.7	0.1
2542	47.2	22.1	9.1	9.4	2.5	3.3	1.7	1.3	0.1
2543	38.9	22.8	13.4	15.2	2.5	2.3	0.8	3.0	0.1
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	1.5	2.4	1.3	2.7	0.1

ที่มา: (ธีระพงษ์ ศรีเจริญ, 2548)

ข้อกำหนดในการตรวจสอบเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการทำงานแสดงได้ดังตารางที่ 5 ที่กล่าวถึงข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-01

การก่อสร้างงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะ ที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ เนื่องจากมีมาตรฐานในการควบคุมปริมาณสารประกอบเคมีในเถ้าลอยที่คงที่ และมีคุณสมบัติเป็นวัสดุป่อซีเมนต์

ตารางที่ 5 ข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-01

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
ความละเอียด : ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก, max %	34	34
ดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : มากที่สุดร้อยละเมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave มากที่สุดร้อยละ	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)	5	5
ความหนาแน่น มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ	5	5
ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ		
ผลคูณระหว่างร้อยละของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจาก การเผาปริมาณร้อยละของที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (multiple Factor) : มากที่สุด	255	-
การหดตัว (Drying Shrinkage) ของแท่งมอร์ตาร์ที่ 28 วัน ที่แตกต่างจากตัวควบคุมมากที่สุดร้อยละ	0.03	0.03

ที่มา: (ธีระพงษ์ ศรีเจริญ, 2548)

2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาหินปูนหรือดินปูนขาวกับดินเหนียวกับหินดาน จนรวมตัวกันออกมาเป็นเม็ดปูน ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญ ได้แก่ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานอเมริกา ASTM C 150 และมาตรฐานอังกฤษ British Standard BS 1881 ซึ่งตามมาตรฐาน มอก.15 ของไทยได้แบ่งประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทย่อย โดยมีส่วนประกอบทางเคมีดังตารางที่ 6 ตามคุณสมบัติและลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ (อธิกานต์ ชีวงศ์คำ, 2558)

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภท 1

เป็นปูนซีเมนต์มาตรฐาน เหมาะสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ส่วนใหญ่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก อาทิเช่น งานก่อสร้างคานคอนกรีต ทางเท้า ถนน อาคาร สะพาน ท่อระบายน้ำ นอกจากนี้ ยังเหมาะสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น สะพานขนาดใหญ่ สนามกีฬา และอาคารสูง เป็นต้น

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภท 2

เป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลง เพื่อให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตปานกลาง เนื่องจากมีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ ไม่เกินร้อยละ 8 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะต่ำกว่าและเพิ่มขึ้นได้ช้ากว่าประเภทแรก ดังนั้นจึงสามารถลดความร้อนได้ดี เหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับดินหรือน้ำที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงกว่าปกติ แต่ไม่ถึงระดับรุนแรง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ต้องใช้ร่วมกับส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานต่ำ ๆ เพื่อทำให้เนื้อคอนกรีตที่บ่มขึ้น (ลดการซึมผ่าน) และสามารถลดความเสียหายที่เกิดจากซัลเฟตได้ นอกจากนี้ ยังใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ในงานโครงสร้างที่มีความหนาแน่น เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ ฐานรากขนาดใหญ่ และกำแพงดินที่หนามากๆ เป็นต้น เพราะเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในระดับปานกลาง และอัตราการเกิดความร้อนจะช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภท 3 (เกิดแรงสูงเร็ว)

เป็นปูนซีเมนต์ที่มีเนื้อปูนที่บดละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภทที่ 1 เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่า แต่ควรมีการบ่มให้ดี โดยปกติสามารถรับแรงได้เมื่อคอนกรีตมีอายุประมาณ 1-3 วัน จึงนิยมใช้สำหรับงานเร่ง หรือในกรณีที่ต้องการถอดแบบเร็ว มักใช้ในงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปชนิดต่างๆ เช่น แผ่นพื้นอัดแรง เสาเข็มอัดแรง เสาไฟฟ้า เสาและคานสำเร็จรูปสำหรับงานอาคาร คานสะพานสำเร็จรูป หมอนรางรถไฟ เป็นต้น ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจทำให้โครงสร้างนั้นเกิดการแตกร้าวได้

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภท 4 (เกิดความร้อนต่ำ)

เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ โดยเกิดความร้อนน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 และมีการพัฒนากำลั้งช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) เช่น เขื่อน เป็นต้น เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทย ไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปัจจุบันมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมกับสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เป็นต้น ซึ่งสามารถช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นได้

5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภท 5 (ต้านทานซัลเฟตสูง)

ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ มีค่า (C_3A) ไม่เกินร้อยละ 5 เพื่อป้องกันไม่ให้อิทธิพลจากภายนอกเข้ามาทำลายเนื้อคอนกรีต และให้กำลั้งช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เหมาะสำหรับใช้งานก่อสร้างในบริเวณที่มีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรง เช่น ในบริเวณดินเค็มหรือน้ำทะเล ซึ่งต้องใช้ร่วมกับส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานต่ำ ๆ เพื่อให้เนื้อคอนกรีตที่บ่มขึ้นและสามารถลดความเสียหายที่เกิดจากซัลเฟตได้ นอกจากนี้ ปูนประเภทนี้ไม่สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนและสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรงได้ เช่นเดียวกับกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่นๆ

ตารางที่ 6 ปริมาณร้อยละของสารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ

ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาตรฐาน ASTM C 150	type	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO	MgO
Ordinary Portland Cement	I	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
Modified Portland Cement	II	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
High-early Strength Portland Cement	III	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
Low-heat Portland Cement	IV	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Sulfate-resistant Portland cement	V	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

ที่มา: (ธีระพงษ์ ศรีเจริญ, 2548)

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังตารางที่ 7 จะประกอบไปด้วย สารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. สารประกอบออกไซด์หลัก

สารประกอบออกไซด์หลัก (Major Oxides) ที่มีปริมาณรวมกันแล้วได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์กลุ่มนี้

2. สารประกอบออกไซด์รอง

สารประกอบออกไซด์รอง (Minor Oxides) ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) อีกด้วย

ตารางที่ 7 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์	60.0 – 67.0	CaO
ซิลิกอนออกไซด์	17.0 – 25.0	SiO_2
อะลูมิเนียมออกไซด์	3.0 – 8.0	Al_2O_3
เฟอร์ริกออกไซด์	0.5 – 6.0	Fe_2O_3
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	1.0 – 3.0	SO_3
แมกนีเซียมออกไซด์	0.1 – 0.4	MgO
อัลคาไล	0.2 – 1.3	Na_2O
โพแทสเซียมออกไซด์	0.2 – 1.3	K_2O

ที่มา: (อธิกานต์ ธิวงศ์คำ, 2558)

2.5.2 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

สารประกอบออกไซด์ปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของ สารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการเผาและการเย็นลงของเม็ดปูน สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด และรายละเอียดคุณสมบัติด้านต่างๆ ของสารประกอบที่สำคัญใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงดังตารางที่ 8 โดยมีสารประกอบหลักดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 J/g กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซัม โดยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณ C_3S ประมาณร้อยละ 35-55 โดยน้ำหนัก

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยืดยาว เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 J/g เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 J/g การป้องกัน Flash set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณร้อยละ 7-15 โดยน้ำหนัก

4. เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 J/g กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 8 คุณสมบัติด้านต่างๆ ของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	ผลของสารประกอบ			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ช้า	รวดเร็ว	ช้า
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	น้อย	มาก	น้อย
การพัฒนากำลังรับแรง ระยะแรก	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
การพัฒนากำลังรับแรง ระยะหลัง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความทนทานต่อการกัดกร่อนซัลเฟต	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	-

ที่มา: (วินิต ช่อวิเชียร, 2557)

2.5.3 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว (อภิกานต์ จิวงค์คำ, 2558)

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, 3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)₂ หรือ CH) แสดงดังสมการที่ 1



2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกตแต่จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกัน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, 3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, Ca(OH)₂ หรือ CH) แสดงดังสมการที่ 2



3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีทันใดและทำให้เกิดการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วจะก่อให้เกิดแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium aluminate hydrate, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ CAH) แสดงดังสมการที่ 3



4. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่าและมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า แสดงดังสมการที่ 4



2.6 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุ อาจจะมีสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และหรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ชนิดของวัสดุปอซโซลาน มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและปอซโซลานดัดแปลง มีรายละเอียดดังนี้

1. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งานต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อน ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) ภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิไซต์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) และหินปูนปอซโซลาน (Limestone)

2. ปอซโซลานดัดแปลง

เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม เป็นผลพลอยได้หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพ โดยผ่านกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้น ได้แก่ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ที่ได้จากการถลุงเหล็ก เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และซิลิกาฟุม (Silica Fume) ที่ได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ เป็นต้น

2.6.1 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) เกิดขึ้นหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว เพราะ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำปฏิกิริยารวมกับ SiO_2 ที่มีอยู่แล้วในถ่านหินทำให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกต และ Ca(OH)_2 อีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Al_2O_3 จะได้สารแคลเซียมอลูมินไฮเดรต ดังสมการที่ 5 และ 6



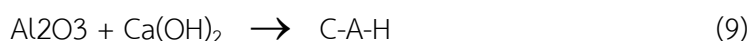
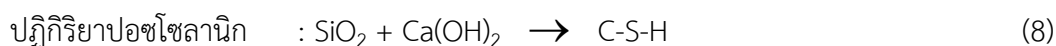
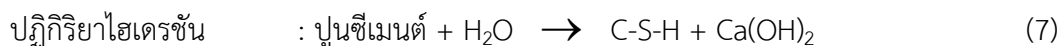
ซึ่งสารประกอบทั้ง 2 ตัว คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินไฮเดรตเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อรวมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดก่อนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จะทำให้ได้ค่าการอัดตัวรวมของซีเมนต์เพสต์ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) เกิดขึ้นตามหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วโดยปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยอิสระ เพราะต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ASTM C 618 ได้นิยามสารปอซโซลานหมายถึง สารซิลิเซียส หรือ สาร อลูมิโน ซิลิเซียส (วินิต ช่อวิเชียร, 2557; ศุภนนท์ บรรจงเกลี้ยง, 2549)

โดยทั่วไปสารปอซโซลาน จะมีสมบัติเป็นวัตถุประสานน้อยมาก แต่ในกรณีที่มีสารปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีที่อุณหภูมิปกติกับต่างอัลคาไลด์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน โดยมาตรฐานได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน โดยมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม และกำหนดให้ขนาดของวัสดุปอซโซลานมีน้ำหนักแห้งบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 และมีอัตราส่วนน้ำหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485

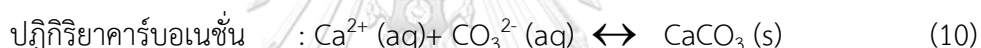
2.7 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

วัสดุปอซโซลานจะช่วยทำให้คอนกรีตมีความทึบสูงขึ้น ลดโพรงช่องว่างในคอนกรีต ทำให้ลดความสามารถในการซึมผ่านและมีการขยายตัวต่ำ ช่วยเพิ่มความทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนโดยวัสดุปอซโซลานจะให้กำลังรับแรงอัดในระยะหลังเมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) อย่างซ้ำๆ ทำให้

ต้องบ่มขึ้นนานกว่าปกติ เพราะต้องรอให้ซีเมนต์เฟสต์มีความเป็นด่างสูงพอที่จะละลายซิลิกาในปอซโซลาน สัดส่วนของปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ทั้งหมด (Elmrabet และคณะ, 2562) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 7 – 9



ถึงแม้ว่าวัสดุปอซโซลานจะช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีตและทำหน้าที่ในการช่วยเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่วัสดุปอซโซลานบางส่วนจะเป็นวัสดุเฉื่อย ส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงระยะแรกลดลงและไม่สามารถทดแทนกำลังที่ลดลงเมื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ดังนั้นจึงมีการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเถ้าลอยในรูปของคาร์บอเนต ดังสมการที่ 10

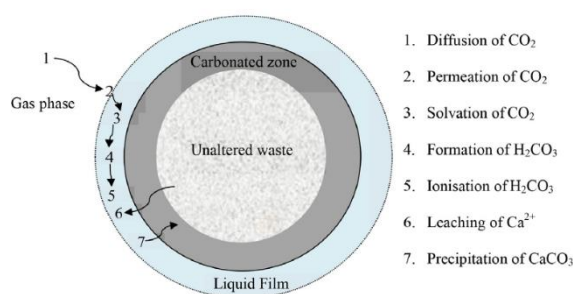
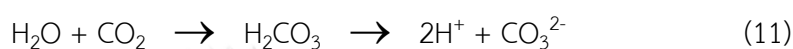


ส่งผลให้กำลังอัดที่อายุช่วงต้นของคอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มมากกว่าคอนกรีตปกติในขณะที่ยังคอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดที่ระยะยาวมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนี้ความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล โดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเล็กมีผลทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมคาร์บอเนตที่มีขนาดใหญ่ (ประกาศิต โสไกร และคณะ, 2561)

2.7.1 ขั้นตอนและกลไกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันในเถ้าลอย

ปฏิกิริยาคาร์บอเนตแสดงได้ดังสมการที่ 18-20 โดยเถ้าลอยประกอบด้วยออกไซด์ของ Ca/Mg และไฮดรอกไซด์ ที่สามารถทำให้เกิดเป็นคาร์บอเนตได้จากการมีอยู่ของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำมีส่วนร่วมในการละลายและการเกิดไฮเดรชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ให้อยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) นอกจากนี้ยังละลาย Ca^{2+} จากเถ้าลอยและเกิดปฏิกิริยากับ CO_3^{2-} จากการทบทวนวรรณกรรมได้ระบุว่าการชะของ Ca^{2+} เป็นส่วนหลักของการจำกัดขั้นตอนของการเกิดคาร์บอเนชันในสารละลาย (aqueous carbonation) เพราะจะไปขัดขวางการแพร่ของ Ca^{2+} ภายในอนุภาคโดยเกิดการก่อตัวของ Ca-depleted silicate ที่บริเวณรอบๆ ของอนุภาค ในชั้นของ solid-liquid interface boundary layer ซึ่งมีผลทำให้อัตราการชะโลหะไอออนลดลง

ในกระบวนการคาร์บอนเนชันในแร่ จำเป็นจะต้องมีปริมาณน้ำที่เหมาะสม ถ้าน้อยหรือมากเกินไปจะไม่เหมาะสมต่อจลนศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยปริมาณน้ำที่มากจะจำกัดการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากจะไปปิดกั้นรูพรุนในของแข็ง ที่ซึ่งกระบวนการแพร่ของ CO_2 ในชั้นของเหลวรอบๆ อนุภาคของแข็ง ที่เป็นบริเวณของการละลายก๊าซและการชะของ Ca^{2+} ในขณะที่ถ้ามีปริมาณน้ำที่น้อยเกินไป จะไม่เพียงพอต่อการสร้างแวดล้อมที่ขึ้นสำหรับการคาร์บอนเนชันในสารละลาย รวมถึงส่งผลไม่ดีต่อการชะ Ca^{2+} จากรูปที่ 10 แสดงถึงการแพร่ของก๊าซเข้าสู่วัสดุ ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยการแพร่และความชื้น (Ukwattage และคณะ, 2558)



รูปที่ 10 ขั้นตอนการเกิดคาร์บอนเนชัน

ที่มา : (Ukwattage และคณะ, 2558)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Chindaprasirt และคณะ, 2547) ศึกษาอิทธิพลความละเอียดของเถ้าลอย 2 ขนาดที่ผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 200 และ 325 ที่มีผลต่อความต้องการน้ำและสมบัติการแข็งตัวของมอร์ต้า พบว่าเถ้าลอยทุกความละเอียดมีผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยเถ้าลอยที่ผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 325 มีความละเอียดและพื้นที่ผิวมากที่สุด จะช่วยลดความต้องการน้ำในส่วนผสมของมอร์ต้าได้ เนื่องจากเถ้าลอยละเอียดเป็นทรงกลมมีผิวเรียบและพื้นที่ผิวมากทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าจึงช่วยในการเพิ่มกำลังได้อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวเติมเต็มช่องว่างในมอร์ต้าทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

(Elmrabet และคณะ, 2562) ศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยที่สัดส่วนร้อยละ 15 25 35 และ 45 พบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยที่สัดส่วนร้อยละ

35 เพื่อลดปริมาณเม็ดปูนและเพิ่มความต้านทาน อัตราไฮดรเจนต่ำทำให้ปูนแข็งตัวช้าซึ่งสามารถก่อสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ ลดความต้องการน้ำและการซึมผ่านช่วยเพิ่มการใช้งาน และปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยถูกกว่าปูนซีเมนต์ปกติ โดยระยะยาวเถ้าลอยที่ละเอียดช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด

(Dananjayan และคณะ, 2559) ศึกษาการกักเก็บคาร์บอนในรูปแบบแห้งทางตรงทั้งทางก๊าซกับของแข็ง (Gas-Solid carbonation) และทางสารละลาย (Aqueous carbonation) โดยใช้ของเสียอัลคาไลน์อุตสาหกรรม (เถ้าลอย Class F) พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมการกักเก็บทางสารละลาย (Aqueous carbonation) มีประสิทธิภาพคาร์บอนเนชันสูงสุดอยู่ที่ 67.87% และสามารถกักเก็บคาร์บอนได้ 50.3 gCo₂/KgFA ส่วนการกักเก็บทางแก๊สกับของแข็ง (Gas-Solid route) มีประสิทธิภาพคาร์บอนเนชันสูงสุดอยู่ที่ 35.53 % และสามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 26.33 gCo₂/KgFA จึงสรุปได้ว่า การกักเก็บคาร์บอนในรูปแบบแห้งทางตรงที่ความดันต่ำสามารถใช้เถ้าลอยในการกักเก็บคาร์บอนได้

(Navisa และคณะ, 2557) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดฟองอากาศ 2.67 1.83 และ 1.45 mm ที่พ่นจากหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.27 0.90 และ 0.70 mm ตามลำดับ ที่มีผลต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำตัวอย่างของกระบวนการเติมอากาศใต้ผิวน้ำ ซึ่งขนาดฟองคำนวณโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ พบว่าที่ความเร็วของก๊าซอยู่ที่ 8 m/s ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจากหัวฉีดขนาดเล็กที่สุดซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงสุด ใช้เวลาในการขึ้นสู่ผิวน้ำมากขึ้น ทำให้เวลาในการอยู่ในน้ำของแต่ละฟองเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กทำให้อยู่ในน้ำได้นานกว่าฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ทำให้อัตราการแพร่ของเฟสก๊าซสู่เฟสของเหลวได้ดีขึ้น

(ประกาศิต โสไกร และคณะ, 2561) ศึกษาขนาดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 2 8 และ 15 micron เพื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กำหนดอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยตกเกรดที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 25 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า คอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดที่ระยะยาวมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล โดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเล็กมีผลทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมคาร์บอเนตที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

(Ji และคณะ, 2560) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำและอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน กำหนดอุณหภูมิ 60 70 80 และ 90 °C อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำ 50 100 และ 200 g/L อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 60 150 250 และ 350 mL/min และอัตราการกวนผสม 500 rpm จากการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำ อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่างๆ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนให้แตกต่างกันไม่มาก แต่จะส่งผลต่อความเร็วของกระบวนการคาร์บอเนชัน นอกจากนี้ พบว่า แคลเซียมในรูปปูนขาวและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าแคลเซียมในรูปของอสนิฐานและผลึกอื่นๆ

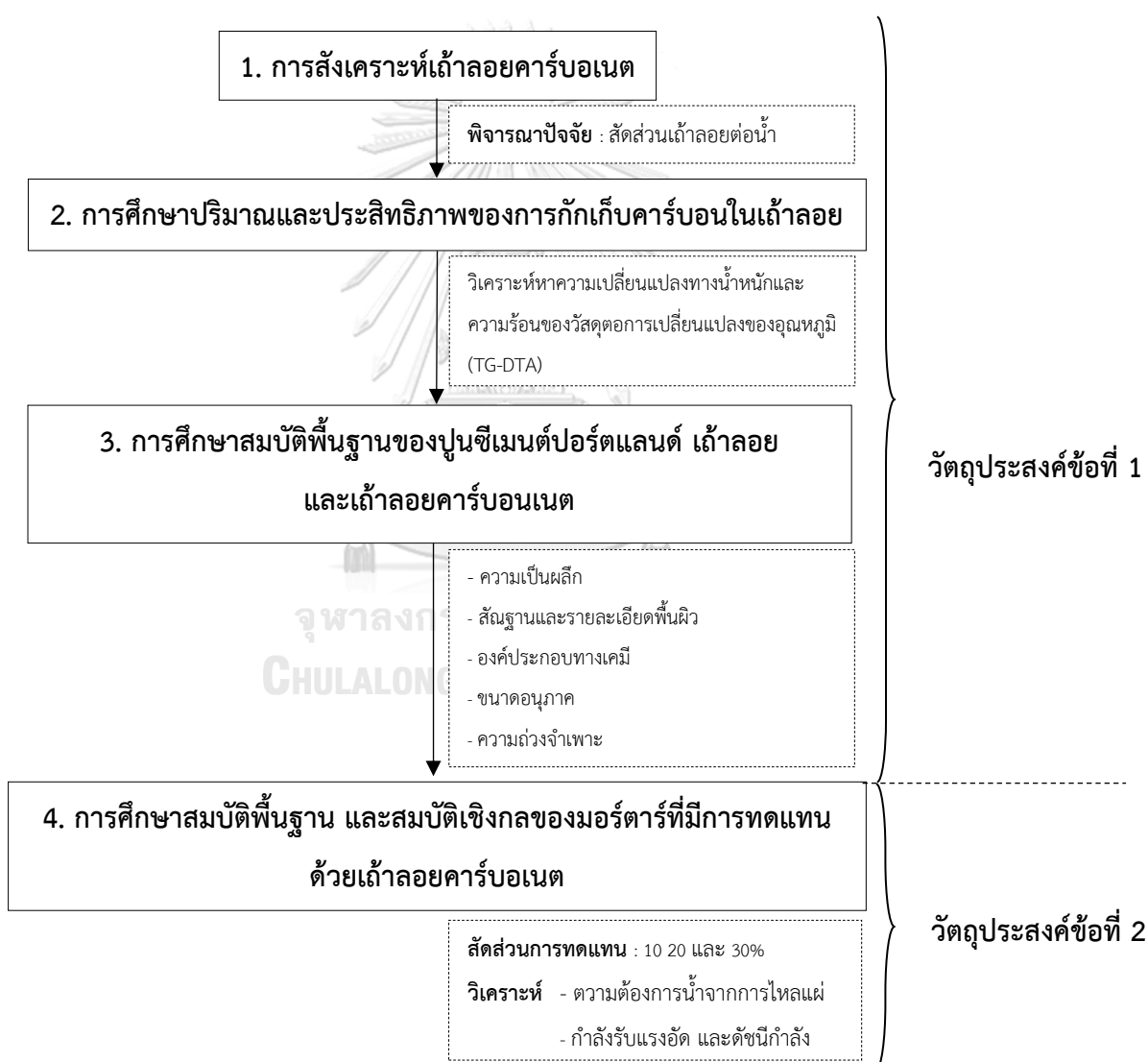
(Ebrahimi และคณะ, 2560) ศึกษาความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนของเถ้าลอยโดยใช้สารละลาย (aqueous carbonation) เพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยจะทำการทดลองสกัด Ca^{2+} จากเถ้าลอย โดยการนำเถ้าลอยผสมน้ำปราศจากไอออนและกวนผสมกันที่เวลา 1 และ 24 ชั่วโมง ก่อนเข้าสู่กระบวนการคาร์บอเนชันเพื่อกักเก็บคาร์บอน โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยที่ 7.5 และ 15 mL/g ซึ่งจากการทดลองการสกัด Ca^{2+} ที่เวลา 1 และ 24 ชั่วโมงก่อน พบว่าความเข้มข้นของ Ca^{2+} ที่สกัดได้มีค่าไม่แตกต่างกัน และพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยที่ 15 mL/g มีประสิทธิภาพการสกัดได้มากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอยที่ 7.5 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าค่าพีเอชที่ 8.3 นั้นเป็นค่าต่ำสุดที่ช่วยป้องกันการละลาย CaCO_3 ให้กลับไปอยู่ในรูปของ Ca^{2+} ซึ่งมีปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนสูงสุดที่ 32 gCO₂/KgFA และ 83.5% ตามลำดับ นอกจากนี้ในงานวิจัย ยังได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยคาร์บอเนตเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยนำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่ 0.4 พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยคาร์บอเนต (CFA) เพิ่มขึ้น

(Jo และคณะ, 2555) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอยทางสารละลาย (aqueous carbonation) ที่ความดันบรรยากาศ โดยการกำหนดปริมาณเถ้าลอยต่อน้ำ 100 140 และ 200 g/L อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 2 4 8 และ 10 mL/min และชนิดของสารละลาย คือ น้ำปราศจากไอออนและน้ำประปา จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนสูงสุด 8 gCO₂/KgFA ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำปราศจากไอออน 100 g/L อัตราการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ 2 mL/min และที่อุณหภูมิ 25 °C

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย การสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต การศึกษาปริมาณและประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย และการศึกษาสมบัติพื้นฐาน และสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ที่มีการทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนเนต โดยในแต่ละขั้นตอนสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 11 โดยรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 11 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ

- เถ้าลอย เป็นตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Original Fly ash; OFA) นำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 micron) (Fly ash; FA) ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เถ้าลอยที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

- มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ใช้เป็นทรายแม่น้ำ (River sand)
- ขวดมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ (Le Chatelier flask) ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ทรายแม่น้ำ

3.1.2 วิธีการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย

การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงวิธีการและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และเถ้าลอยคาร์บอนेट

ที่	การวิเคราะห์	เครื่องมือ/อุปกรณ์	วัสดุ		
			ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	เถ้าลอยคาร์บอนेट
1	องค์ประกอบทางเคมี	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer; XRF)	✓	✓	✓
2	ความเป็นผลึก	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)	-	✓	✓
3	ขนาดอนุภาค	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser particle size distribution analysis; PSD)	-	✓	✓
4	สัณฐานและรายละเอียดพื้นผิว	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)	-	✓	✓
5	ความถ่วงจำเพาะ	ขวดมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ (Le Chatelier flask)	✓	✓	✓
6	ค่าความชื้น (% Moisture content)	อบอุณหภูมิที่ 110 ± 5 °C	-	✓	-
7	น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา, LOI)	เผาที่อุณหภูมิ 750 °C สำหรับเถ้าลอย (ASTM C 311) และ 950 °C สำหรับปูนซีเมนต์ (ASTM C114)	✓	✓	-

3.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาความถ่วงจำเพาะ

(1) จัดเตรียมน้ำในอ่างให้มีอุณหภูมิ 20 °C และควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง

(2) เทน้ำมันก๊าดลงในขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ จนกระทั่งระดับของน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่างขีดบอกปริมาตร 0 และ 1 mL จากนั้นเช็ดปากขวดเลอชาเตอลิเอให้แห้ง

(3) จุ่มขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอในอ่างน้ำ ดังรูปที่ 15 แล้วให้ทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดและน้ำในอ่างเท่ากัน จากนั้นอ่านค่าอุณหภูมิของน้ำ และค่าปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ



รูปที่ 15 จุ่มขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอในอ่างน้ำ

(4) นำตัวอย่าง ที่ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าแล้ว ค่อย ๆ เทใส่ลงในขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ ซึ่งการใส่ตัวอย่าง จะต้องระวังไม่ให้เกาะติดตามคอขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ

(5) หยดใส่ตัวอย่าง เมื่อระดับของน้ำมันก๊าดขึ้นมาอยู่ระหว่างช่วงของขีดบอกปริมาตรส่วนบนของขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศซึ่งอาจเกาะอยู่กับตัวอย่าง โดยวิธีการไล่ฟองอากาศนั้น ให้ปิดปากขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ ด้วยจุกแก้ว แล้วเอียงขวด และหมุนช้า ๆ จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาอีก

(6) จุ่มขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ ในอ่างน้ำอีกครั้ง กระทำเช่นเดียวกับข้อที่ 3. ซึ่งก่อนอ่านค่าปริมาตรทุกครั้ง ผู้ทำการทดลองจะต้องแน่ใจว่าอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิเอเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในอ่าง

(7) ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างครั้งหลัง โดยผลต่างของน้ำหนัก ของการชั่งสองครั้งจะเท่ากับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใส่ลงไปในการทดลอง

(8) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง จากข้อ (2) ถึงข้อ (8)

(9) หา ค่าความหนาแน่น (ρ) จากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น } (\rho) = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \times 100\%$$

โดย M_2 คือ น้ำหนักเริ่มต้น (g)

M_1 คือ น้ำหนักสุดท้าย (g)

V_2 คือ ปริมาตรน้ำมันก๊าดสุดท้ายหลังใส่สาร (mL)

V_1 คือ ปริมาตรน้ำมันก๊าดเริ่มต้น (mL)

(10) หา ค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) จากสูตร

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ (SG)} = \frac{\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ } 4^\circ\text{C}} \times 100\%$$

โดย ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4°C คือ 1 g/cm^3

3.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความชื้น (% Moisture content)

- (1) ชั่งน้ำหนักเบ้าหลอมเปล่า (crucible) และบันทึกน้ำหนัก
- (2) วางตัวอย่างในเบ้าหลอม และชั่งน้ำหนักเบ้าหลอมอีกครั้ง โดยผลต่างระหว่างน้ำหนักใหม่และน้ำหนักเบ้าหลอมเปล่า คือ น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง
- (3) วางตัวอย่างในเตาอบ
- (4) ตั้งเตาเผาให้ได้อุณหภูมิที่ $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- (5) ทิ้งตัวอย่างไว้ในเตาอบ เป็นระยะเวลา 15 ± 4 ชั่วโมง
- (6) ปลอ่ยให้เย็นใน desiccator
- (7) ชั่งน้ำหนักเบ้าหลอมด้วยตัวอย่างอีกครั้ง ลบน้ำหนักเบ้าหลอมเปล่าออกจากน้ำหนักใหม่นี้และนั่นคือน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง

(8) หา % Moisture content จากสูตร

$$\% \text{ Moisture content} = \frac{M_{\text{wet}} - M_{\text{dry}}}{M_{\text{wet}}} \times 100\%$$

โดย M_{wet} คือ น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (g)

M_{dry} คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)

3.1.5 ขั้นตอนการหาน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI)

- (1) ชั่งน้ำหนักเบ้าเปล่า (crucible) และบันทึกน้ำหนัก
- (2) วางตัวอย่างที่อบแห้งในเบ้าหลอมเปล่าและชั่งน้ำหนักเบ้าหลอมอีกครั้งพร้อมกับตัวอย่างที่อยู่ในนั้น น้ำหนักใหม่ลบด้วยน้ำหนักเบ้าหลอมเปล่าคือน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง
- (3) วางตัวอย่างในเตาเผา
- (4) ตั้งเตาเผาให้ได้อุณหภูมิที่ 750 °C สำหรับเถ้าลอย (ASTM C 311) และ 950 °C สำหรับปูนซีเมนต์ (ASTM C114)
- (5) ทิ้งตัวอย่างไว้ในเตาเผา เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
- (6) ปลอ่ยให้เตาเผาและตัวอย่างเย็นลงก่อนนำตัวอย่างออกจากเตาเผา
- (7) ชั่งน้ำหนักเบ้าหลอมด้วยตัวอย่างอีกครั้ง ลบน้ำหนักเบ้าหลอมเปล่าออกจากน้ำหนักใหม่นี้และนั่นคือน้ำหนักหลังเผาของตัวอย่าง
- (8) หาน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา Loss on ignition; LOI จากสูตร

$$LOI = \frac{M_{dry} - M_{fire}}{M_{dry}} \times 100\%$$

โดย M_{dry} คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)

M_{fire} คือ น้ำหนักหลังเผาของตัวอย่าง (g)

3.2 การสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอน

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ
- เถ้าลอย เป็นเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Fly ash; FA) นำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 micron)
- น้ำปราศจากไอออน ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ขวดแก้วขนาด 1000 mL
- หัวกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ diffuser)
- สายยางซิลิโคน
- ชุดถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ความบริสุทธิ์ >99%)

- เครื่องมือวัดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ยี่ห้อ Cheng Xin รุ่น IZM-6T)
- เครื่องวัดพีเอช (ยี่ห้อ METLER TOLEDO รุ่น Five Easy)
- เครื่องกวนสาร
- แท่งแม่เหล็กกวนสาร
- กระจกชากรอง
- ชุดกรองสารและปั๊มสุญญากาศ
- ตู้อบ
- เครื่องเขย่าและตะแกรงร่อน
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต

การติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต แสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับกระบวนการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต

3.2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสถานะของการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต

ในการกระบวนการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต ได้กำหนดตัวแปรต้น ตัวแปรควบคุม และตัวแปรตาม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 10 โดยตัวแปรต้นที่มีอิทธิพลต่อปริมาณและประสิทธิภาพ

การกักเก็บคาร์บอน ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ ความดัน อุณหภูมิ อัตราการกวน ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Ji และคณะ, 2560; Jo และคณะ, 2555) (Huijgen และคณะ, 2549) (Ebrahimi และคณะ, 2560) ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวแปรต้น คือ อัตราส่วน น้ำต่อเถ้าลอย อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ เท่านั้น เพื่อหาสภาวะที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำใดที่ส่งผลให้ ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนสูงที่สุดเพื่อนำเถ้าลอยคาร์บอนนี้ ไปใช้เป็นวัสดุปลูกพืช โขลานทดแทนปูนซีเมนต์

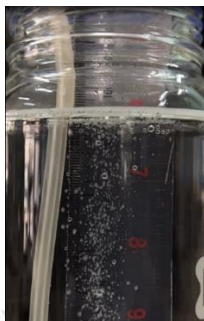
ตารางที่ 10 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสภาวะของการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอน

ตัวแปร	ข้อมูล	ค่าที่ทำการควบคุม	อ้างอิง
ตัวแปรต้น	อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	25 mL/min	(Jo และคณะ, 2555)
	อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ	50, 100 และ 200 g/L	{Jo, 2555 #73 } (Ji และคณะ, 2560)
ตัวแปรควบคุม	อัตราการกวนผสม	500 rpm	(Huijgen และคณะ, 2549) (Ji และคณะ, 2560)
	ค่าพีเอช	8.3	(Jo และคณะ, 2555) (Ebrahimi และคณะ, 2560)
	อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง	
	น้ำปราศจากไอออน		(Jo และคณะ, 2555)
ตัวแปรตาม	ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอย		
	ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอย		
	เวลา		

3.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ขนาดฟองของหัวกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

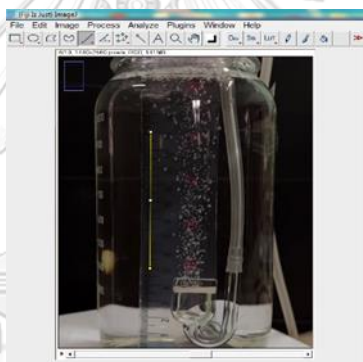
(1) บันทึกวิดีโอขณะทำการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงในน้ำด้วยกล้องถ่ายภาพ ดังรูปที่

17



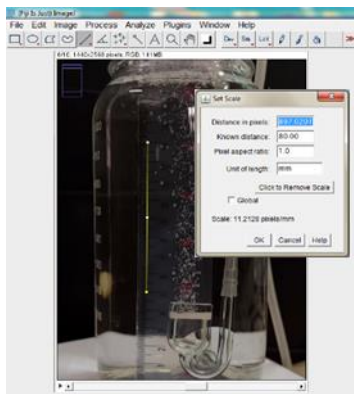
รูปที่ 17 รูปจากการอัดวิดีโอขณะทำการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยกล้องถ่ายภาพ

(2) นำไฟล์วิดีโอ บันทึกลงคอมพิวเตอร์ จากนั้นเปิดไฟล์วิดีโอด้วยโปรแกรม imageJ แล้วจึงลากเส้นลงบนไม้บรรทัดในคลิปวิดีโอที่ได้บันทึกไว้ ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ลากเส้นลงบนไม้บรรทัดในคลิปวิดีโอ

(3) ทำการกำหนดมาตราส่วนในโปรแกรม imageJ ให้ตรงกับบนไม้บรรทัด โดยกดคำสั่ง Set scale ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 กำหนดมาตราส่วนในโปรแกรม imageJ

(4) ทำการเลือกฟอง โดยกดคำสั่ง Multi-point แล้วเลือกจุด 4 ด้านต่อฟอง 1 ฟอง (ด้านซ้าย ด้านขวา ด้านบน และด้านล่าง) ให้ได้อย่างน้อย 100 ฟอง ด้วยรูปที่ 20



รูปที่ 20 ทำการเลือกฟองจนได้ขั้นต่ำ 100 ฟอง

(5) กดคำสั่ง Measure และนำไปคำนวณตามสูตร แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อหาขนาดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.2.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอน

(1) ชั่งน้ำหนักเถ้าลอย และนำมาผสมกับน้ำปราศจากไอออน ที่สัดส่วน 50 100 และ 200 g/L จากนั้นกวนผสมระหว่างเถ้าลอยและน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้แคลเซียมไอออน ถูกชะละลายออกมา และทำการวัดค่าพีเอชเริ่มต้น

(2) เริ่มการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอน โดยเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านหัวกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ลงในขวดที่ได้เตรียมสารผสม ดังที่กล่าวในข้อ (1) เพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยที่ผสมในน้ำปราศจากไอออน

(3) บันทึกค่าพีเอช ที่ระยะเวลาเติมคาร์บอนไดออกไซด์ 5 10 15 30 60 และ 90 นาที และบันทึกระยะเวลาเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ค่าพีเอช 8.3 ของสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำที่ 50 100 และ 200 g/L โดยแต่ละการทดลองจะไม่ต่อเนื่องกันและ ทำจนครบ 3 ซ้ำ

(4) นำสารผสมที่ได้ (Slurry) ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5

(5) จากนั้นนำกระดาษกรองที่มีเถ้าลอยไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายหลังการอบ พักตัวอย่างไว้ให้เย็น จากนั้นเก็บตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์หาความเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนักและความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermo Gravimetric and Differential Thermal Analysis; TG-DTA) เพื่อคำนวณหาปริมาณและประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอยต่อไป

3.3 การศึกษาปริมาณและประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย

3.3.1 การหาปริมาณและประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย

เถ้าลอยที่ผ่านการกักเก็บคาร์บอนแล้ว เรียกว่า เถ้าลอยคาร์บอนेट โดยนำมาวิเคราะห์หาความเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนักและความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermo Gravimetric and Differential Thermal Analysis; TG-DTA) ซึ่งแบ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การระเหยน้ำระหว่างอุณหภูมิ 25 ถึง 100 °C ส่วนที่ 2 การสลายตัวของคาร์บอนอินทรีย์และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) ระหว่างอุณหภูมิ 105 ถึง 500 °C และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บในรูปของคาร์บอนेट สามารถคำนวณได้จากการสูญเสียน้ำหนักจากส่วนที่ 3 คือ การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของคาร์บอนอนินทรีย์ ระหว่างอุณหภูมิ 500 ถึง 1000 °C (Ebrahimi et al., 2560) แล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณ เพื่อหาปริมาณและประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย ดังสมการที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ดังนี้

- สมการที่ 3.1 สำหรับหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย

$$\text{ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนจากการทดลอง (mg CO}_2\text{/g FA)} = \frac{M_{500^\circ\text{C}} - M_{1000^\circ\text{C}}}{M_{105^\circ\text{C}}}$$

โดย $M_{105^\circ\text{C}}$ คือ มวลของเถ้าลอย ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 105°C

$M_{500^\circ\text{C}}$ คือ มวลของเถ้าลอย ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 500 °C

$M_{1000^\circ\text{C}}$ คือ มวลของเถ้าลอย ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C

และประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน (η) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณการกักเก็บคาร์บอนตามทฤษฎี จากสมการ Stenoir's stoichiometric (Nyambura และคณะ, 2554) กับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของการทดลอง ดังสมการที่ 3.2

- สมการที่ 3.2 Stenoir's stoichiometric สำหรับหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนตามทฤษฎี

$$\text{CO}_2 (\%) = 0.785(\% \text{CaO} - 0.7 \times \% \text{SO}_3) + 1.09 \times \% \text{MgO} + 0.71 \times \% \text{Na}_2\text{O} + 0.468 \times \% \text{K}_2\text{O}$$

โดยปริมาณ CaO SO₃ MgO Na₂O และ K₂O ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)

- สมการที่ 3.3 สำหรับหาประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย

$$\text{Carbon Sequestration Efficiency } (\eta) = \frac{\text{Carbon Sequestration (Experiment)}}{\text{Carbon Sequestration (Theory)}} \times 100 \%$$

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของเถ้าลอยคาร์บอน

ภายหลังจากการวิเคราะห์หาปริมาณและประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอยแล้ว นำมาเปรียบเทียบกับสัดส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำที่ 50 100 และ 200 g/L เพื่อหาว่าที่สภาวะใดมีปริมาณและประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนสูงที่สุด จากนั้นนำมาวิเคราะห์สมบัติของเถ้าลอยดังกล่าว ที่ผ่านการกักเก็บคาร์บอนแล้ว ที่ซึ่งเรียกว่า เถ้าลอยคาร์บอน และจะนำไปวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของเถ้าลอย และเถ้าลอยคาร์บอน สำหรับเป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีรายละเอียดของการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยคาร์บอน

ที่	การวิเคราะห์	เครื่องมือ/อุปกรณ์
1	องค์ประกอบทางเคมี	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer; XRF)
2	ความเป็นผลึก	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)
3	ขนาดอนุภาค	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser particle size distribution analysis; PSD)
4	สัณฐานและรายละเอียดพื้นผิว	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)
5	ความถ่วงจำเพาะ	ขวดมาตรฐานเลอชาเตอลิเอ (Le Chatelier flask)

3.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐาน และสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าลอยคาร์บอน

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ยี่ห้อทีพีไอ
- เถ้าลอย เป็นเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Fly ash; FA) นำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 micron)
- เถ้าลอยคาร์บอน (ที่ได้จากการสังเคราะห์ในหัวข้อที่ 1.2)
- มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ใช้ทรายแม่น้ำ (River Sand)

- น้ำประปา ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา ภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ชุดเครื่องเขย่าและตะแกรงร่อน (Sieve shaker and Seive)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก (Precision balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เครื่องผสมมอร์ตาร์
- ชุดแบบหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 cm
- ขวดมาตรฐานเลอชาเตอลีเอ (Le Chatelier flask)
- ชุดอุปกรณ์ทดสอบการไหลตัว
- เครื่องทดสอบหากล้างรับแรงอัด
- ถังบ่มมอร์ตาร์

3.4.2 การเตรียมวัสดุ

3.4.2.1 การเตรียมสัดส่วนการผสมระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าลอยคาร์บอนัต สำหรับการศึกษสมบัติพื้นฐาน และสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ที่มีการทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนัต จะผสมอัตราส่วนของสารเชื่อมประสานระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าลอยคาร์บอนัต ตามสัดส่วน แสดงดังตารางที่ 12 ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวนี้จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความต้องการน้ำ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) ตามมาตรฐาน ASTM C1437 เพื่อหาสัดส่วนที่ให้ค่าการไหลอยู่ระหว่าง $110 \pm 5\%$ จากนั้นจึงนำสัดส่วนที่เป็นไปตามมาตรฐานนี้ ไปวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และดัชนีกำลัง (Strength Index Activity) ต่อไป ตามมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์

ตารางที่ 12 อัตราส่วนการผสมสารเชื่อมประสาน (B)

ตัวอย่าง	อัตราส่วนการผสมสารเชื่อมประสาน (B)		
	ปูนซีเมนต์ (OPC), g	เถ้าลอย (FA), g	เถ้าลอยคาร์บอนेट (CFA), g
OPC100	300	0	0
OPC90FA10	270	30	0
OPC80FA20	240	60	0
OPC70FA30	210	90	0
OPC90CFA10	270	0	30
OPC80CFA20	240	0	60
OPC70CFA30	210	0	90

หมายเหตุ :

OPC100 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานซึ่งไม่ผสม

OPC90FA10 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10

OPC80FA20 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

OPC70FA30 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

OPC90CFA10 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटร้อยละ 10

OPC80CFA20 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटร้อยละ 20

OPC70CFA30 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटร้อยละ 30

3.4.2.2 การเตรียมมอร์ตาร์

- 1) จัดเตรียมหม้อผสม และเทน้ำลงในหม้อผสม ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 หม้อผสม

- 2) ชั่งน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามสัดส่วน ดังตาราง 12 (ผสมเถ้าลอยและเถ้าลอยคาร์บอนेटทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ที่ ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์) ตวงน้ำตามอัตราส่วน

น้ำต่อสารเชื่อมประสาน (W/B) โดยค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง $110 \pm 5\%$ ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม โดยใช้อัตราการกวนผสมช้า (140 ± 5 rpm) เป็นเวลา 30 วินาที

3) เมื่อกวนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ ครบ 30 วินาทีแล้ว จึงใส่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุเชื่อมประสาน 2.75 ลงในหม้อผสมอย่างช้าๆ ภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งระหว่างนี้ใบกวนยังคงกวนอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราความเร็ว (140 ± 5 rpm)

4) หยุดเครื่องผสม จากนั้นเปลี่ยนอัตราการกวนผสมเป็นปานกลาง ซึ่งมีความเร็วในการกวนเท่ากับ 285 ± 10 รอบต่อนาที และผสมด้วยอัตรานี้เป็นเวลา 30 วินาที

5) หยุดการผสมและปล่อยมอร์ตาร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 90 วินาที และในระหว่างเวลา 15 วินาทีแรกให้ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อผสมลงในหม้อ ดังรูปที่ 22 จากนั้นนำภาชนะมาปิดปากหม้อผสมเพื่อกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากหม้อผสมจนครบเวลา 90 วินาที



รูปที่ 22 ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อผสมลงในหม้อ

6) เดินเครื่องกวนผสมต่อด้วยอัตราการกวนปานกลาง (285 ± 10 rpm) เป็นเวลา 1 นาทีเป็นอันเสร็จสิ้นการผสมมอร์ตาร์

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานและสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยคาร์บอน

3.4.3.1 การศึกษาสมบัติการไหลตัว

ในการศึกษาสมบัติการไหลตัวของมอร์ตาร์ ซึ่งต้องหาค่าความต้องการน้ำ (Water requirement) จากการไหลแผ่ (Percent flow) ตามมาตรฐาน ASTM C1437 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1) ทำความสะอาดผิวหน้าของโต๊ะการไหล (Flow table) ให้สะอาดและแห้งจากนั้นวางแบบหล่อรูปกรวย (Flow mold) ลงตรงกลาง

2) ตักมอร์ตาร์ที่ผสมตามสัดส่วน ดังตารางที่ 12 ใส่ในแบบทดสอบการไหลให้มีความสูงประมาณ 25 mm และกระทุ้งด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 20 ครั้ง ให้ทั่วตลอดหน้าตัด เพื่อให้มอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอ

3) ตักมอร์ตาร์ใส่ในแบบอีก 1 ชั้นซึ่งมีความสูงประมาณ 25 mm และกระทุ้งมอร์ตาร์เช่นเดียวกับที่กระทุ้งชั้นที่ 1 สำหรับการใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ให้มีความสูงกว่าแบบเล็กน้อยเพื่อทำการปาดหน้า

4) ภายหลังกระทุ้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้า ดังรูปที่ 23 โดยการลากเกรียงเหล็กที่เก็บบดตั้งฉากกับผิวหน้าของแบบ และปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินออกทิ้งไป โดยใช้วิธีการเลื่อนไป-มาคล้าย ๆ กับการเลื่อยหากมีน้ำไหลออกมาใต้ฐานของแบบให้เช็ดน้ำออก และนำส่วนของมอร์ตาร์ที่ตกข้างแบบออกให้หมด



รูปที่ 23 ปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินออกทิ้ง

5) ยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างช้าๆ ดังรูปที่ 24 ซึ่งเวลาที่ใช้ตั้งแต่ใส่มอร์ตาร์ลงแบบจนถึงเวลาที่ยกแบบออกจากผิวหน้าได้ะ



รูปที่ 24 ยกแบบขึ้นในแนวตั้งอย่างช้าๆ จะได้มอร์ตาร์ตามรูปทรงของแบบ

6) ภายหลังจากยกแบบออกจากมอร์ตาร์ให้ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหลซึ่งจะยกจานของโต๊ะการไหลขึ้นสูง 13 mm และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระจำนวน 25 รอบภายในเวลา 15 วินาที ดังรูปที่ 25 ในขณะที่ทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ให้ยึดโต๊ะการไหลให้แน่น เพื่อป้องกันค่าการไหลที่ทดสอบผิดพลาด



รูปที่ 25 ภายหลังจากการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหลซึ่งจะยกจาน และปล่อยให้ตก จำนวน 25 รอบ

7) มอร์ตาร์ที่อยู่บนจานของโต๊ะการไหลจะแผ่ออกไป โดยเกือบเป็นวงกลมให้ใช้คาลิเปอร์วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ จำนวน 4 ครั้งตรงตำแหน่งซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา (หรือวัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนจานของโต๊ะการไหล) ดังรูปที่ 26 แล้วเทียบค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสี่นี้กับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมเป็นร้อยละ ได้ดังสมการ 3.4

- สมการ 3.4 คำนวณค่าการไหลตัว (Percent flow)

$$\% \text{ Flow} = \frac{(D_1 - D_0)}{D_0} \times 100$$

โดย D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่กระจายบนแผ่นโต๊ะการไหล (mm)

โดยเส้นผ่านศูนย์กลาง วัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนจานของโต๊ะการไหล หลังจากนั้นให้ทำการทดลองซ้ำจนได้ค่าการไหลอยู่ระหว่าง $110 \pm 5\%$ โดยการปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม การทดสอบค่าการไหลให้ใช้มอร์ตาร์ที่ผสมใหม่ทุกครั้งในการทดสอบ จดบันทึกค่าการไหลที่ได้



รูปที่ 26 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ จำนวน 4 ครั้ง ซึ่งมีมุมห่างกัน 45 องศา

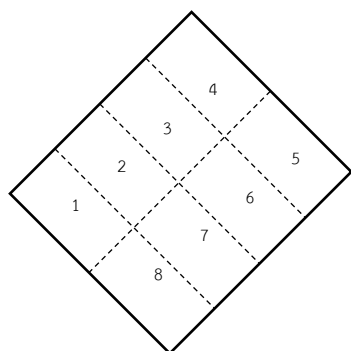
3.4.3.2 การศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และดัชนีกำลัง (Strength Index Activity)

ในการศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และดัชนีกำลัง (Strength Index Activity) จะมีขั้นตอนของการทดลอง ตามมาตรฐาน ASTM C109 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

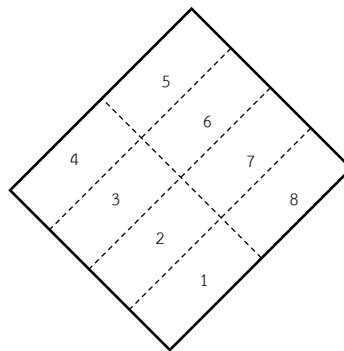
1) ภายหลังจากการทดสอบค่าการไหลแผ่ ให้นำมอร์ตาร์ที่อยู่บนจานทดสอบค่าการไหลแผ่ใส่คั้นหม้อผสมปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อลงไปรวมกันที่กลางหม้อผสมและผสมมอร์ตาร์อีกครั้งเป็นเวลา 15 วินาทีด้วยอัตราการผสมปานกลาง หลังจากการผสมเสร็จให้เขย่าใบกวนเพื่อให้มอร์ตาร์ที่ติดอยู่ตามใบกวนตกลงไปรวมที่ก้นหม้อผสม

2) ทำการหลอมมอร์ตาร์ทั้งหมดลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ cm ตัวอย่างละ 4 ซ้ำมอร์ตาร์ โดยใช้เกรียงเหล็กตักมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อชั้นแรกให้มีความหนาประมาณ 25 mm ซึ่งเป็นความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างมอร์ตาร์ กระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาทีโดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบๆละ 8 ครั้งแต่ละรอบการกระทุ้งจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน

3) เมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จสิ้นทุกตัวอย่างแล้วจึงใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 ซึ่งมีความหนาประมาณ 25 mm จากนั้นทำการกระทุ้งมอร์ตาร์แต่ละตัวอย่างจำนวน 4 รอบๆละ 8 ครั้ง เช่นเดียวกับกรณีของชั้นแรก ตัวรูปที่ 27 (ดังนั้นแต่ละตัวอย่างจึงมีการกระทุ้ง 64 ครั้ง)



การกระทุ้งรอบที่ 1 และ 3



การกระทุ้งรอบที่ 2 และ 4

รูปที่ 27 การกระทุ้งมอร์ตาร์จำนวน 32 ครั้งโดยแบ่งเป็น 4 รอบ ๆ ละ 8 ครั้ง

4) ในแต่ละรอบของการกระทุ้งชั้นที่ 2 อาจมีมอร์ตาร์ล้นออกมานอกขอบของแบบหล่อ ดังนั้นเมื่อเสร็จการกระทุ้งของแต่ละรอบ ดันมอร์ตาร์ที่ล้นออกมาเข้าไปอยู่ในแบบ จากนั้นจึงทำการกระทุ้งในรอบต่อไป ดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 ดันมอร์ตาร์ที่ล้นออกมาเข้าไปอยู่ในแบบจากนั้นทำการกระทุ้งในรอบต่อไป

5) เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งแล้ว มอร์ตาร์ควรมีความสูงกว่าขอบด้านบนของแบบเล็กน้อย ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อ ซึ่งทำได้โดยใช้ขอบเกรียงเหล็กวางในแนวเกือบตั้งฉากกับขอบแบบจากนั้นค่อยๆ เลื่อนเกรียงเหล็กในลักษณะของการเลื่อยไม้ไปตลอดความยาวของแบบหล่อ ซึ่งจะได้มอร์ตาร์ที่ค่อนข้างเรียบและสูงเสมอกับขอบแบบหล่อ ดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 ภายหลังกระทุ้งครบ 2 ชั้นใช้เกรียงปาดผิวหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อ

6) ทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 24 ชั่วโมง ให้ทำการทดสอบทันที ภายหลังจากนำมอร์ตาร์ออกจากแบบหล่อ

7) ทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบที่อายุ 1 3 7 28 และ 56 วัน โดยเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 1 วัน นำมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว ดังรูปที่ 30 เพื่อป้องกันไม่ให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในมอร์ตาร์ละลายออกมาซึ่งจะทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง โดยการทำทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ตามอายุต่างๆยอมให้ความคลาดเคลื่อนของอายุมอร์ตาร์ไม่เกินค่าตามที่ระบุไว้ดังตารางที่ 13



รูปที่ 30 บ่มมอร์ตาร์ในน้ำปูนขาวอิ่มตัว

ตารางที่ 13 อายุมอร์ตาร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

อายุทดสอบ	เวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมให้
24 ชั่วโมง	± 30 นาที
3 วัน	± 1 ชั่วโมง
7 วัน	± 3 ชั่วโมง
28 วัน	± 12 ชั่วโมง

8) เมื่อครบอายุการบ่ม (กรณีมอร์ตาร์ขึ้นมาจากน้ำปูนขาวอิมตัว เช็ดตัวอย่างให้แห้ง เพื่อขจัดน้ำและเม็ดทรายหรือสิ่งที่เกาะติดผิวหน้ามอร์ตาร์ออก) เลือกด้านที่เรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ ดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 ทดสอบการรับน้ำหนักของมอร์ตาร์ด้วยเครื่องทดสอบ

9) ทดสอบการรับน้ำหนักของมอร์ตาร์ โดยนำมอร์ตาร์วางบนเครื่องทดสอบ นำแผ่นแบรีงวาง บนตัวอย่างมอร์ตาร์ให้อยู่ตรงกลางเครื่อง ให้น้ำหนักแก้มอร์ตาร์ด้วยแรงอัดคงที่ 90-180 kg/s จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนัก

10) นำค่าอัตราส่วนร้อยละของกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือเถ้าลอยคาร์บอนเตมาเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่ผสม มาคิดเป็นค่าดัชนีกำลัง เพื่อแสดงถึงความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย ดังสมการ 3.5

- สมการที่ 3.5 สำหรับหาดัชนีกำลังของมอร์ตาร์

$$\text{ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์} = \left(\frac{A}{B} \right) \times 100$$

เมื่อ A = กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน
(MPa)

B = กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่ผสม (MPa)



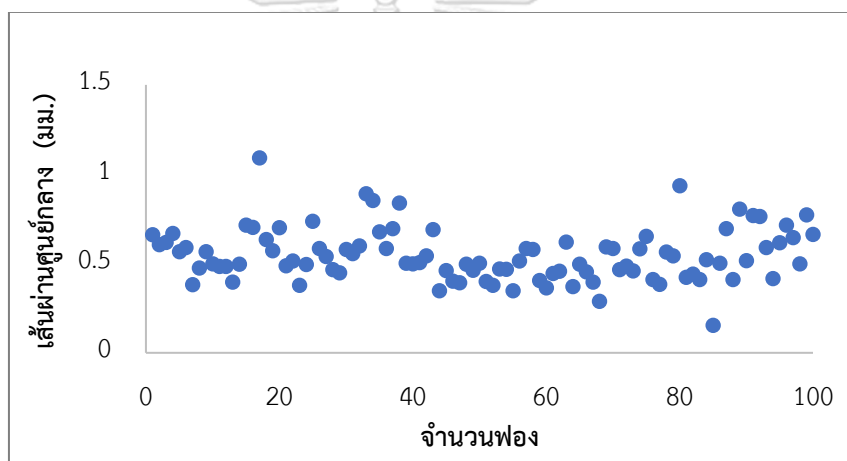
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการดำเนินการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอน

4.1.1 ผลการวิเคราะห์หาขนาดฟองของหัวกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 32 แสดงผลของขนาดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 100 ฟอง ที่เกิดจากหัวกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 25 mL/min โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดฟอง เท่ากับ 0.545 mm (545 micron) ขนาดฟองเล็กสุด เท่ากับ 0.153 mm (153 micron) และขนาดฟองใหญ่ที่สุด เท่ากับ 1.089 mm (1089 micron) ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.147

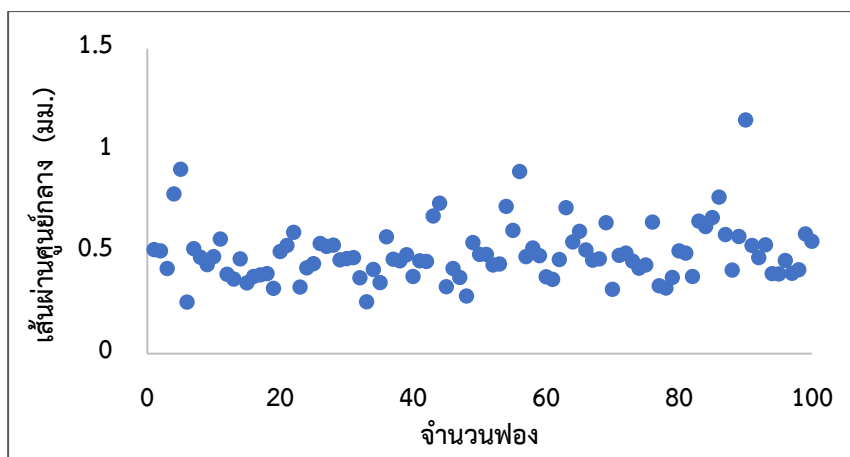


รูปที่ 32 กราฟแสดงขนาดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 100 ฟอง

4.1.2 ผลการวิเคราะห์หาขนาดฟองของหัวกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายหลังการใช้ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอน

จากรูปที่ 33 แสดงผลของขนาดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 100 ฟอง ที่เกิดจากหัวกระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองซ้ำภายหลังจากการใช้หัวกระจายในกระบวนการกักเก็บคาร์บอน พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดฟอง เท่ากับ 0.493 mm (493 micron) ขนาดฟองเล็กสุด เท่ากับ 0.141 mm (141 micron) และขนาดฟองใหญ่ที่สุด เท่ากับ 1.150 mm (1,150 micron) ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.141

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดฟองก่อนนำไปใช้ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอนแล้ว พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดฟองมากนัก



รูปที่ 33 กราฟแสดงขนาดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 100 ฟองภายหลังการใช้ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอน

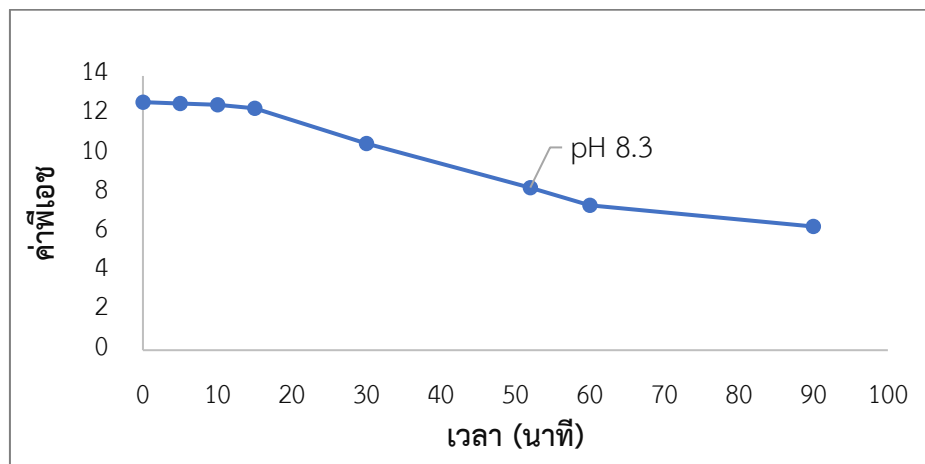
4.1.3 ผลการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาในการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอยเมื่อสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 100 และ 200 g/L และเมื่อค่าพีเอช 8.3 โดยกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 mL/min รายละเอียดของผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.1.3.1 ผลการศึกษาเวลาในการกักเก็บคาร์บอนของเถ้าลอยคาร์บอนเนต

จากการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ลงในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุด้วยสารผสมระหว่างเถ้าลอยและน้ำ ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการกักเก็บคาร์บอน โดยค่าพีเอช ค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และคงที่ ภายหลังจากระยะเวลาการกักเก็บผ่านไป 20 นาที จากนั้นค่าพีเอชจะลดลงอย่างมาก จนกระทั่งระยะเวลาการกักเก็บถึง 60 นาที และหลังจากนั้นจะลดลงเพียงเล็กน้อย โดยค่าพีเอช ที่ระยะเวลาการกักเก็บเริ่มต้นมีค่าเป็น 12.66 จากนั้นลดลง เป็น 12.59 12.53 12.35 10.62 7.40 และ 6.31 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebrahimi et al., 2560 ที่ระบุว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเถ้าลอย เกิดการละลายอย่างต่อเนื่องผ่านกระบวนการไฮเดรชัน ทำให้ค่าพีเอชช่วงต้นประมาณ 11.0 และเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไป สารผสม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำ เกิดเป็นคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ (CO_3^{2-}) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ลดลง เนื่องจากในขณะทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการตกคาร์บอเนต ส่งผลให้ค่าพีเอชลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งค่าพีเอช 8.3 เป็นค่าที่ปฏิกิริยาคาร์บอเนตอิ่มตัว หากค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 8.3

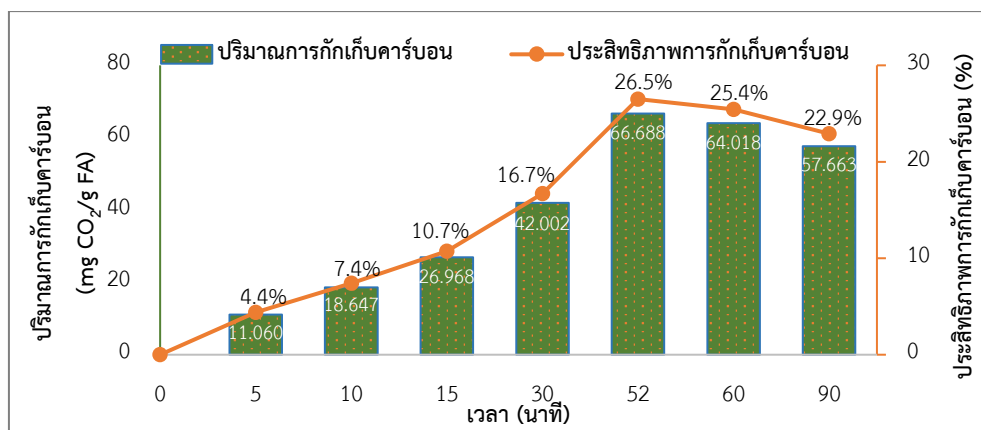
จะส่งผลให้ผลึกแคลไซต์ (CaCO_3) เกิดการละลายกลับสู่สารละลายดั้งเดิม ทั้งนี้ได้ว่า เมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนกระทั่งค่าพีเอช 8.3 แล้ว พบว่า ใช้ระยะเวลาการกักเก็บ 52 นาที ดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช และระยะเวลาในการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราส่วนละลายต่อน้ำ 50 g/L

จากสมการปริมาณการกักเก็บคาร์บอนจากทฤษฎีสูตร Stenoir's stoichiometric ที่ได้จากการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยสามารถกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดร้อยละ 25.161 โดยน้ำหนัก

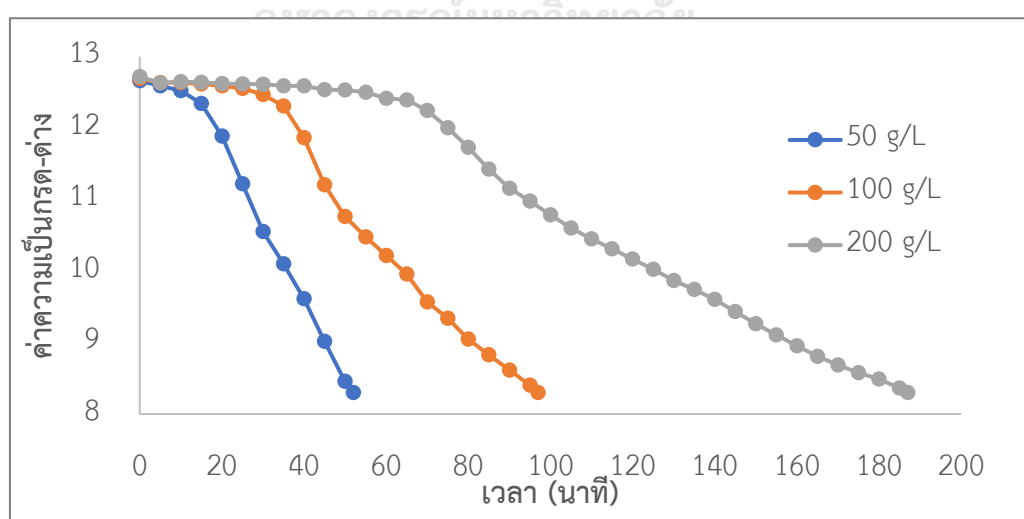
ภายหลังการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L นำไปวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (TG/DTA) เพื่อหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย พบว่า จากรูป 35 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาการกักเก็บ ต่อปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอย จะเห็นได้ว่า ที่พีเอช 8.3 ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนจะสูงที่สุดเท่ากับ 66.69 mgCO_2/gFA และ 26.5% ตามลำดับ ภายหลังจากนั้น ปริมาณการกักเก็บจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebrahimi et al., 2560 ที่ได้มีการศึกษาพีเอช และการนำไฟฟ้า พบว่า ปฏิกริยาคาร์บอนเนชันมีตัวสำหรับการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนตที่พีเอช 8.3 โดยเมื่อต่ำกว่าพีเอช 8.3 แคลเซียมคาร์บอนเนตจะเกิดการละลายกลับไปในรูปแบบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น พีเอช 8.3 จึงเป็นค่าที่เหมาะสม สำหรับใช้หยุดการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต



รูปที่ 35 แสดงปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนที่เวลาต่างๆ และที่ค่าพีเอช 8.3 ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

4.1.3.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำในการกักเก็บคาร์บอนของเถ้าลอยคาร์บอนเนต

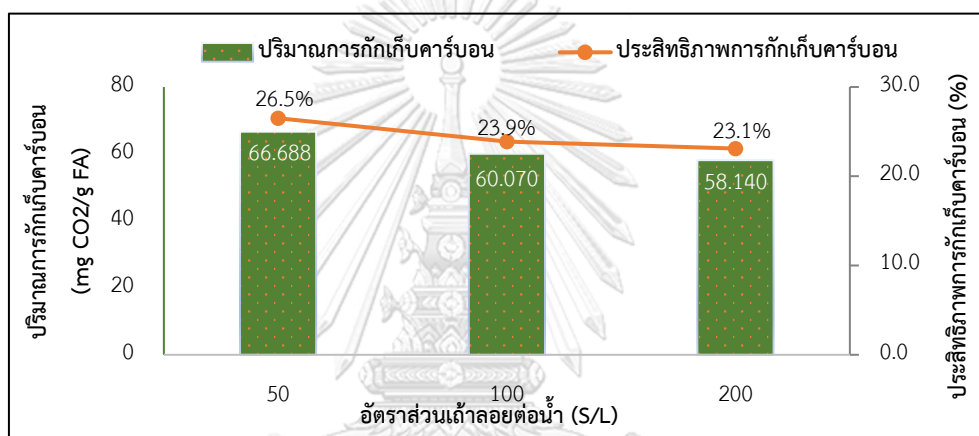
จากการศึกษา การสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุด้วยสารผสมระหว่างเถ้าลอยและน้ำ ที่เพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำเป็น 100 และ 200 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.3 และกำหนดอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 mL/min จะใช้ระยะเวลาการกักเก็บเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำเป็น 97 ± 0.67 นาที และ 187 ± 1.28 นาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebrahimi et al., 2560 และ Ji และคณะ, 2560 แสดงดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 แสดงระยะเวลากักเก็บคาร์บอนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.3 และที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 100 และ 200 กรัมต่อลิตร

ภายหลังการสังเคราะห์เถ้าลอยคาร์บอนเนต ที่วิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (TG/DTA) พบว่า เมื่อเพิ่มเถ้าลอยต่อน้ำจาก 50 เป็น 100 และ 200 กรัมต่อลิตร มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 66.69 เป็น 60.07 และ 58.14 mgCO_2/gFA ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนลดลงจาก 26.5 เป็น 23.9 และ 23.1% ตามลำดับ ดังรูปที่ 37 เนื่องจากปริมาณน้ำที่ลดลง ทำให้การชะละลายของแคลเซียมออกไซด์ และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dananjayan และคณะ, 2559

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L จะมีประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนในเถ้าลอยสูงที่สุด ที่ค่าพีเอช 8.3 ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 26.5%



รูปที่ 37 กราฟแสดงปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน ที่พีเอช 8.3 และสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ ที่ 50 100 และ 200 g/L

4.2 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยคาร์บอนเนตจากการสังเคราะห์

4.2.1 ความเป็นผลึก

ผลการทดสอบการวิเคราะห์ความเป็นผลึก ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) ของเถ้าลอยคาร์บอนเนต (CFA) พบว่า รูปแบบสัญญาณ XRD มุมตกกระทบ 2-theta ในช่วง 20-40 องศา มีลักษณะโค้ง ซึ่งหมายถึงผลึกของออสตราอนจะลดลง และความสูงของพีคของแคลเซียมคาร์บอนเนตสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการกักเก็บเพิ่มขึ้น หมายความว่าแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นของผลึกแคลเซียมคาร์บอนเนตมาจากแคลเซียมของผลึกออสตราอน ดังนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ Phase Quantitative พบว่า เมื่อระยะเวลาการกักเก็บคาร์บอนเพิ่ม ส่งผลให้ ไม่พบผลึกของ Lime Portlandite และ Ettringite ซึ่งบ่งบอกได้ว่า ผลึกดังกล่าวนี้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคาร์บอนเนต นอกจากนี้ ความเข้มข้นของผลึก anhydrite

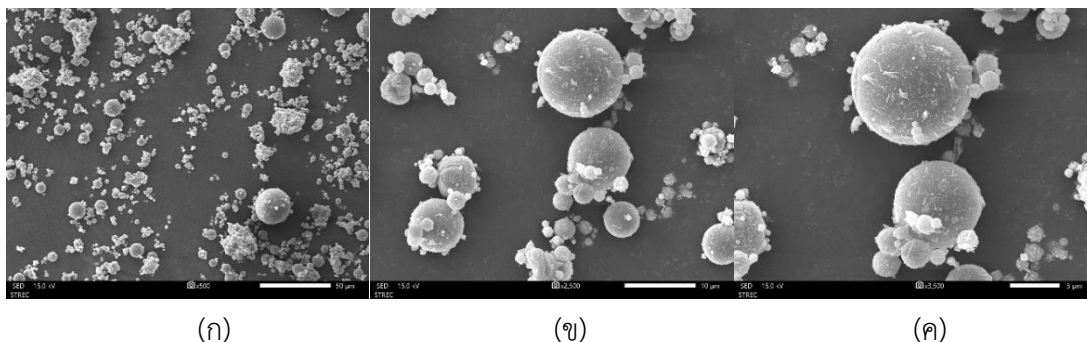
brownmillerite และ amorphous ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเถ้าลอย (FA) ดังนั้นผลึก Lime Portlandite และ Ettringite จึงไวต่อปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ มากกว่าผลึก anhydrite brownmillerite และ amorphous ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ji และคณะ, 2560

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเถ้าลอยก่อนเติมคาร์บอนไดออกไซด์ มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 3.57 โดยน้ำหนัก เมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหล 25 mL/min และสัดส่วน เถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L เป็นเวลา 5 10 15 20 30 52 (ที่พีเอช 8.3) 60 และ 90 นาที พบว่า ระยะเวลาการกักเก็บที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 6.79 10.93 11.98 17.33 27.81 22.28 และ 25.62 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และการเพิ่มสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ จาก 50 g/L เป็น 100 และ 200 g/L ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลดลง เป็นร้อยละ 27.81 25.31 และ 24.49 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนในเถ้า ลอย ที่กล่าวในหัวข้อ 4.2.2.1 และ 4.2.2.2

4.2.2 สัณฐานและรายละเอียดผิว

ผลการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของเถ้าลอย และเถ้าลอยคาร์บอเนต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 500 2,500 และ 3,500 เท่า ที่สภาวะการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอัตราการไหล 25 mL/min และสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L จากรูปที่ 38 พบว่า โดยทั่วไปเถ้าลอย (FA) มีลักษณะเป็นทรงกลม และผิวเรียบ แต่เมื่อเถ้าลอยมีการกักเก็บคาร์บอน ส่งผลทำให้ผิวขรุขระ และจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการกักเก็บที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 39-45 นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์หาสัณฐานและรายละเอียดผิวที่การกักเก็บคาร์บอนที่พีเอชต่ำกว่า 8.3 พบว่าพื้นผิวของเถ้าลอยคาร์บอเนต มีลักษณะขรุขระที่น้อยลงตามค่าพีเอชที่ลดลง มีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิว จะลดลงเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 8.3

ในส่วนของเถ้าลอยคาร์บอเนต ที่สภาวะการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอัตราการไหล 25 mL/min และสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 100 และ 200g/L จากรูปที่ 43 และ รูปที่ 46-47 พบว่า พื้นผิวของเถ้าลอยคาร์บอเนต มีลักษณะขรุขระเช่นกัน

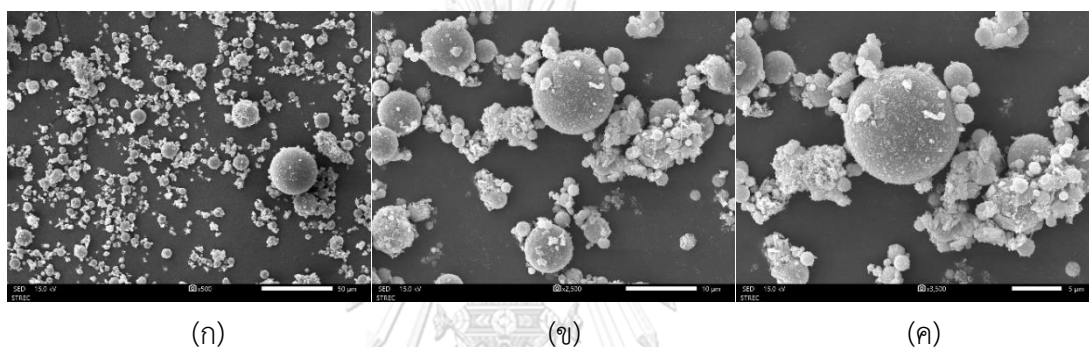


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 38 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอย โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

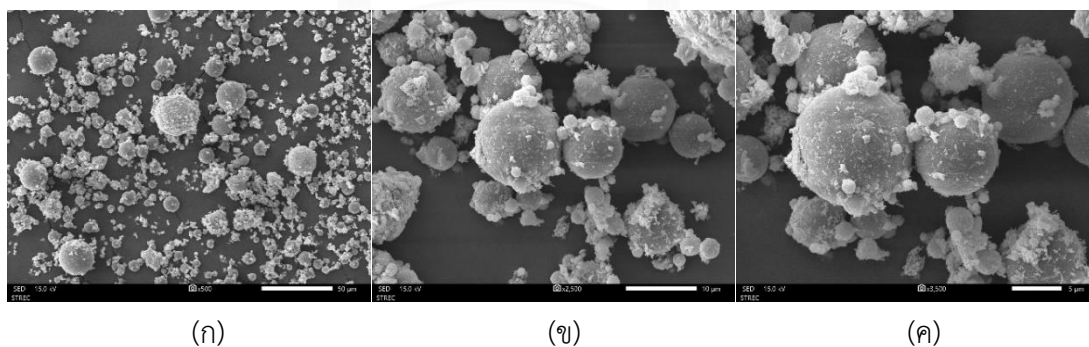


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 39 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 5 นาที ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

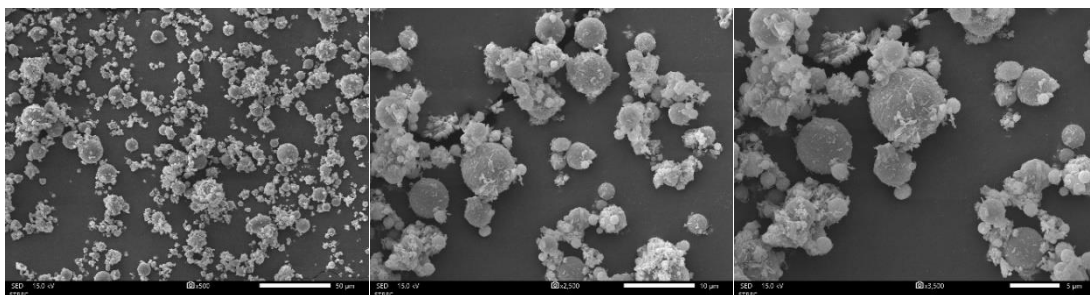


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 40 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 10 นาที ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

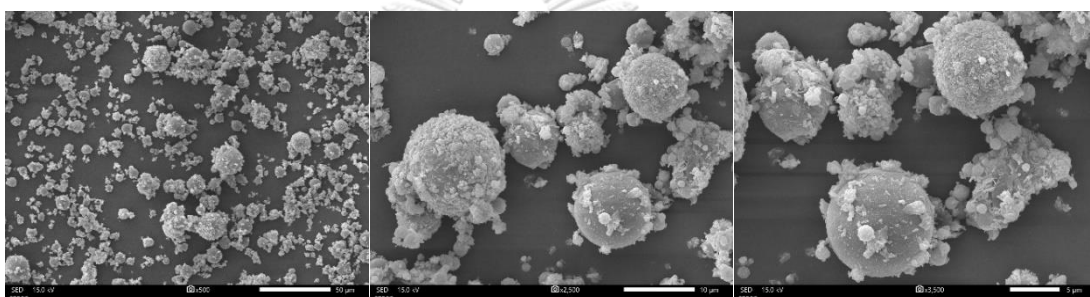


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 41 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเม็ดลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 15 นาที่ ที่อัตราเม็ดลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

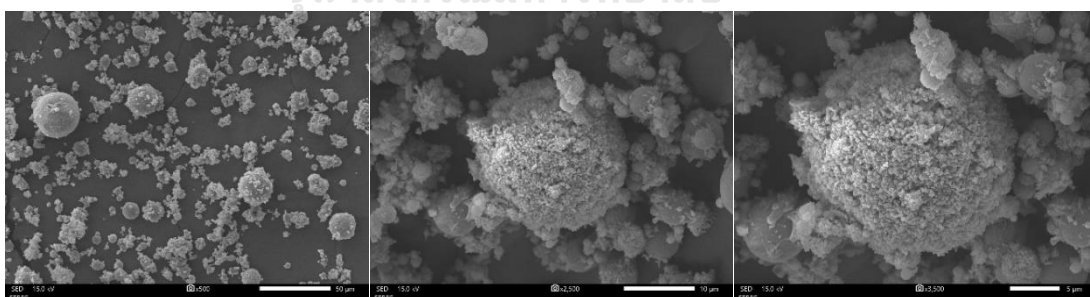


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 42 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเม็ดลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 30 นาที่ ที่อัตราเม็ดลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

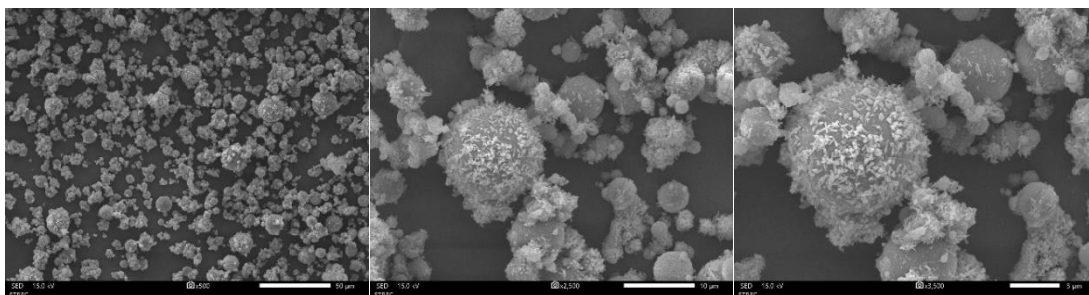


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 43 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเม็ดลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 52 นาที่ (pH 8.3) ที่อัตราเม็ดลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

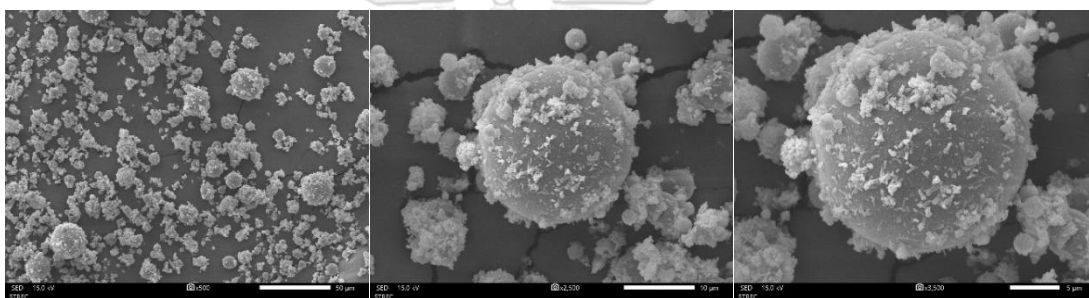


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 44 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 60 นาที่ ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

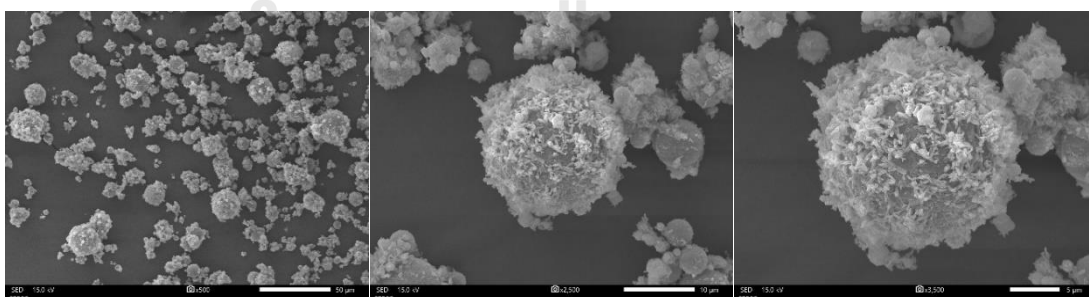


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 45 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 90 นาที่ ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

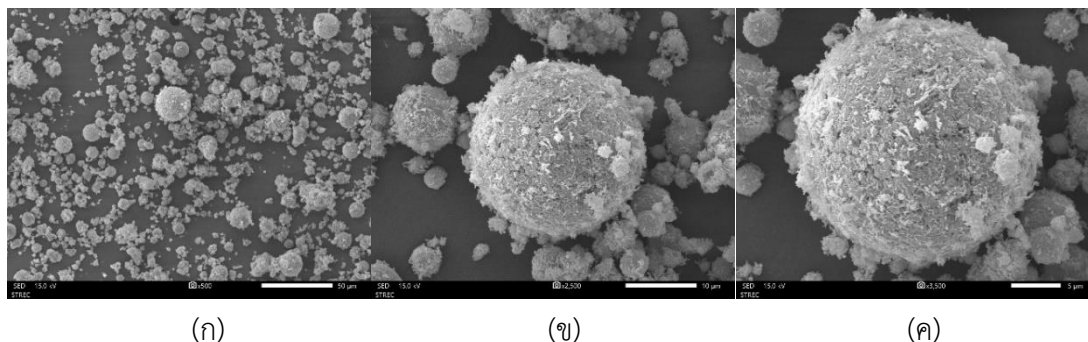


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 46 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ค่าพีเอช 8.3 ที่อัตราเถ้าลอยต่อน้ำ 100 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า



รูปที่ 47 ภาพถ่ายขยายกำลังขยายรายละเอียดพื้นผิวของแก้วลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ค่าพีเอช 8.3 ที่อัตราแก้วลอยต่อน้ำ 200 g/L โดยวิธี Scanning electronic microscope (SEM) ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 2,500 เท่า และ (ค) 3,500 เท่า

4.3 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ แก้วลอย และแก้วลอยคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ และแก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และแก้วลอยคาร์บอนจากที่กล่าวในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 (ที่สัดส่วนแก้วลอยต่อน้ำ 50 g/L และพีเอช 8.3 ที่มีปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงที่สุด) ทางด้านองค์ประกอบทางเคมี ขนาดของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ และน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI) เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 14 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์และแก้วลอย

ที่	การวิเคราะห์	หน่วย	ปูนซีเมนต์ (OPC)	แก้วลอย (FA)	แก้วลอยคาร์บอน (CFA)
1	องค์ประกอบทางเคมี				
	- ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	%	19.50	25.70	25.10
	- อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	%	3.96	12.60	11.90
	- ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	%	3.01	14.40	14.40
	- แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	%	64.60	30.30	30.20
	- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	%	0.34	0.29	0.22
	- สตรอนเทียมออกไซด์ (SrO)	%	-	0.14	0.14
	- โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	%	0.44	1.99	1.71
	- แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	%	1.76	2.66	2.88
	- แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	%	-	0.16	0.17

ที่	การวิเคราะห์	หน่วย	ปูนซีเมนต์ (OPC)	เถ้าลอย (FA)	เถ้าลอยคาร์บอนेट (CFA)
	- ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	%	3.43	7.44	5.38
	- (P_2O_5)	%	0.11	0.36	0.51
	- คลอไรด์ (Cl)	%	0.17	-	-
	- โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	%	0.32	2.30	1.78
	- แบเรียมออกไซด์ (BaO)	%	-	0.14	-
2	ขนาดอนุภาค	อภิปรายดังตารางที่ 15			
3	ความถ่วงจำเพาะ (SG)	-	3.17	2.89	2.83
4	ค่าความชื้น	%	-	0.12	-
5	น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (LOI)	%	2.20	1.42	-

4.3.1 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer) พบว่า องค์ประกอบทางเคมี ค่าเป็นไปตามมาตรฐาน (ASTM C150) ยกเว้น ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ที่มีค่าเกินมาตรฐานกำหนด ไว้เพียงร้อยละ 0.43

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ใช้ในการทดลอง และเถ้าลอยคาร์บอนेट (CFA) ที่ได้จากการกักเก็บคาร์บอน จัดเป็นเถ้าลอยชนิด C (Class C type) เนื่องจากมีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกัน มีค่าเป็น 52.7% และ 51.4 % ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามการแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยโดยใช้องค์ประกอบทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C618 ที่ระบุว่าเถ้าลอยชนิด C (Class C type) มีองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวรวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ เถ้าลอยชนิด F (Class F type) จะต้องมียังองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวรวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

จากองค์ประกอบทางเคมีที่แสดงดังตารางที่ 14 พบว่า เถ้าลอยและเถ้าลอยคาร์บอนेटมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งเมื่อนำมาบดเป็นผงละเอียด ผสมน้ำ จะทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในอุณหภูมิปกติ มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสาน

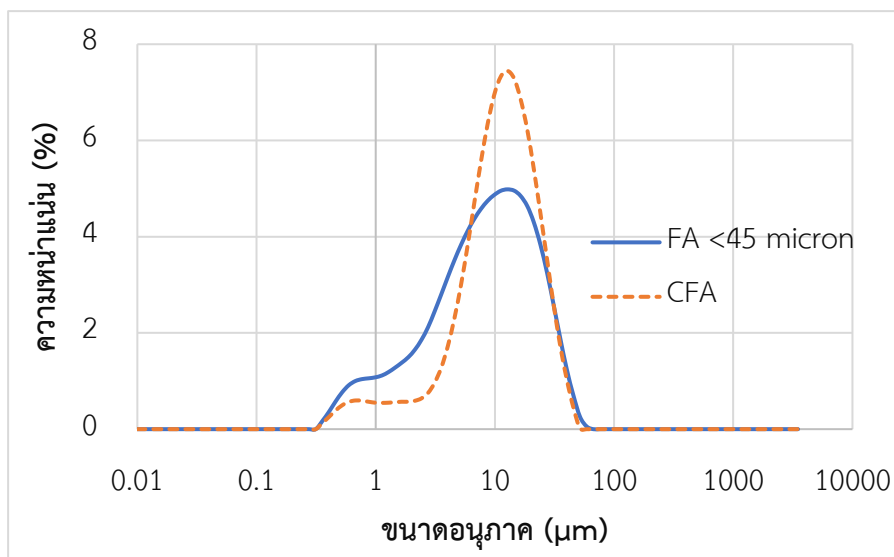
ที่ดี อีกทั้งเถ้าลอยมีอนุภาคที่กลมและขนาดเล็กมาก เมื่อนำไปทดแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะช่วยเสริมให้คอนกรีตรับแรงได้มากขึ้น โดยที่เถ้าลอยนั้นจะไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของเนื้อปูนซีเมนต์ ให้เนื้อคอนกรีตแน่นและทึบขึ้น ส่งผลให้ ความชื้นและความเค็มภายในเนื้อปูนได้ยากขึ้น ทำให้คอนกรีตทนการกัดกร่อน ความเค็ม และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าลอยมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับร้อยละ 7.44 และ 2.30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ามาตรฐาน ASTM C618 ที่กำหนดเพียงร้อยละ 2.44 และ 0.80 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเถ้าลอยคาร์บอนมี องค์ประกอบของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับร้อยละ 5.38 และ 1.78 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ามาตรฐาน ASTM C618 ที่กำหนดเพียงร้อยละ 0.38 และ 0.28 โดยน้ำหนัก ตามลำดับโดยส่วนเกิดซัลเฟอร์ไตรออกไซด์อาจส่งผลกระทบต่อระยะการก่อตัวที่นานขึ้น และ ส่วนเกินโซเดียมออกไซด์ อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของปูนซีเมนต์และคอนกรีต

4.3.2 ขนาดของอนุภาค

จากรูปที่ 48 ผลการวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคเถ้าลอยที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 และ เถ้าลอยคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 15 พบว่า ขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง 10% (D_{10}) ขนาดอนุภาคที่ ตำแหน่ง 50% (D_{50}) ขนาดอนุภาคที่ตำแหน่ง 90% (D_{90}) และ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($D[4,3]$) ของเถ้า ลอยเท่ากับ 1.56 9.19 27.37 และ 12.20 (μm) ตามลำดับ และเถ้าลอยคาร์บอนเท่ากับ 3.59 12.07 26.90 และ 13.93 (μm) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเถ้าลอยผ่านการกักเก็บคาร์บอนส่งผลให้ การกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดแคบและสูงขึ้น โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.93 (μm) ตารางที่ 15 ขนาดของอนุภาคเถ้าลอย ที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 และเถ้าลอยคาร์บอน

สมบัติทางกายภาพ		เถ้าลอย (FA)	เถ้าลอยคาร์บอน (CFA)
ขนาดของอนุภาค	$D_{10} (\mu\text{m})$	1.56	3.59
	$D_{50} (\mu\text{m})$	9.19	12.07
	$D_{90} (\mu\text{m})$	27.37	26.90
	$D[4,3] (\mu\text{m})$	12.20	13.93



รูปที่ 48 การกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอย ที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 และเถ้าลอยคาร์บอนเนต

4.3.3 ความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) เถ้าลอย (FA) และเถ้าลอยคาร์บอนเนต (CFA) พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.17 2.89 และ 2.83 ตามลำดับ

4.3.4 น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI)

ผลการทดสอบหาค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) เท่ากับ 2.2% โดยน้ำหนัก เป็นไปตามมาตรฐาน (ASTM C150) และเถ้าลอย (FA) เท่ากับ 1.42% โดยน้ำหนัก เป็นไปตามมาตรฐาน (ASTM C618)

4.4 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐาน และสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนเนต

4.4.1 ส่วนคละของทราย

ผลการทดสอบหาส่วนคละของทรายด้วยวิธีร่อนตะแกรง (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C778 แสดงดังตารางที่ 16 โดยผลการทดสอบมีส่วนคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C778

ตารางที่ 16 ส่วนคละทราย

ขนาด ตะแกรง	ขนาดช่อง เปิด (mm)	น้ำหนัก ตะแกรง (g)	น้ำหนัก ตะแกรง และ ทราย (g)	น้ำหนัก ค้าง (%)	ร้อยละ ค้าง (%)	ร้อยละ ค้าง สะสม (%)	ร้อยละ ผ่าน สะสม (%)
เบอร์ 16	1.18	417.89	417.89	0	0	0	100
เบอร์ 30	0.60	389.65	389.65	0	0	0	100
เบอร์ 50	0.30	345.00	557.08	210.12	71	71	29
เบอร์ 100	0.15	335.01	416.54	83.52	27	98	2
ถาดรอง	-	367.40	373.79	6.39	2	-	0
น้ำหนักมวลรวมละเอียด = 300.00 g							

4.4.2 สมบัติมอร์ตาร์

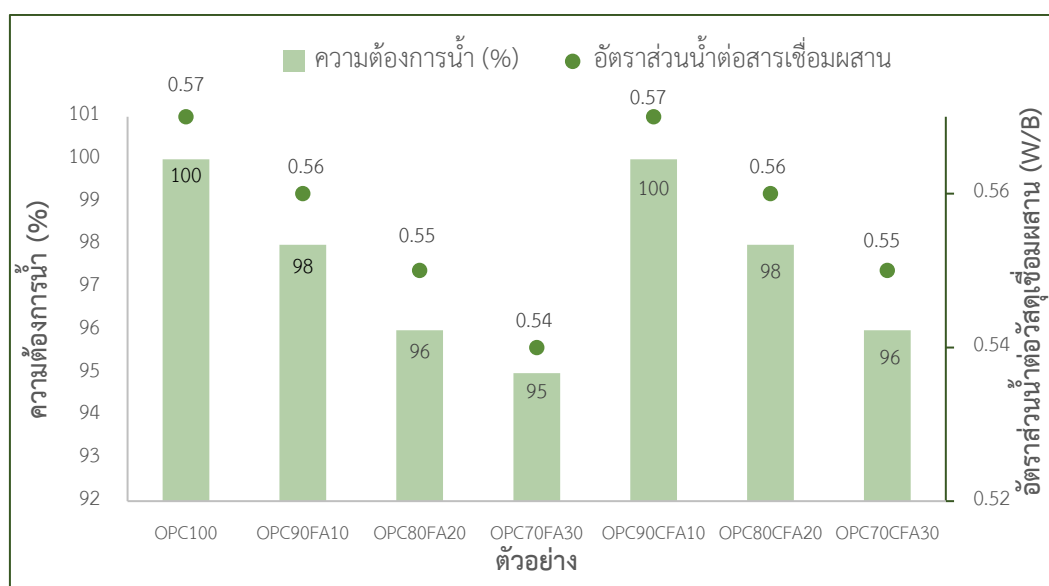
4.4.2.1 ความต้องการน้ำ (Water requirement)

ผลการทดสอบความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ ที่ทำจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC100) พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) เท่ากับ 0.57 โดยน้ำหนัก

และเมื่อทดสอบหาความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ ที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย เมื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) เท่ากับ 0.56 0.55 และ 0.54 โดยน้ำหนัก ซึ่งความต้องการน้ำลดลงเป็นร้อยละ 98 96 และ 95 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC100) ทั้งนี้เถ้าลอยมีลักษณะทรงกลมและผิวเรียบ จึงส่งผลให้ความสามารถในการเทได้ (Workability) เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อทดสอบความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยคาร์บอนेट (CFA) เมื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า ความต้องการน้ำลดลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยคาร์บอนेटเพิ่มขึ้น ยกเว้น การทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ความต้องการน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC100) ส่วนการทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) เท่ากับ 0.57

0.56 และ 0.55 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และค่าความต้องการน้ำลดลงเป็นร้อยละ 98 และ 96 ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ดังรูปที่ 49 เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่า ของลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยคาร์บอนที่พบ มีรูปร่างทรงกลมและผิวขรุขระ ในขณะที่เถ้าลอย มีลักษณะรูปร่างทรงกลมและผิวเรียบ จึงทำให้ความต้องการน้ำ (Water requirement) ของมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยเถ้าลอยคาร์บอน มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยเถ้าลอย (Chindaprasirt และคณะ, 2547)



รูปที่ 49 กราฟเปรียบเทียบความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (OPC100) และมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าลอยคาร์บอน (CFA) ที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

4.4.2.2 กำลังรับแรงอัดและค่าดัชนีกำลัง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ปั่นที่อายุ 1 3 7 28 และ 56 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 8.48 16.67 20.40 29.96 และ 30.40 MPa ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 50 และตารางที่ 17 สามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูป และตารางที่ และสามารถสรุปได้ดังนี้

- ที่อายุ 1 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 8.19 7.40 และ 6.08 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 97 88 และ 72 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- ที่อายุ 3 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 14.32 14.12 และ 13.88 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 86 85 และ 83 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- ที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 19.61 18.63 และ 16.48 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 96 91 และ 81 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- ที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 27.85 28.88 และ 23.44 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 93 96 และ 79 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- และที่อายุ 56 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 27.65 28.44 และ 25.89 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 91 94 และ 99 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนต ร้อยละ 10 20 และ 30 แสดงดังรูป ตารางที่ และสามารถสรุปได้ดังนี้

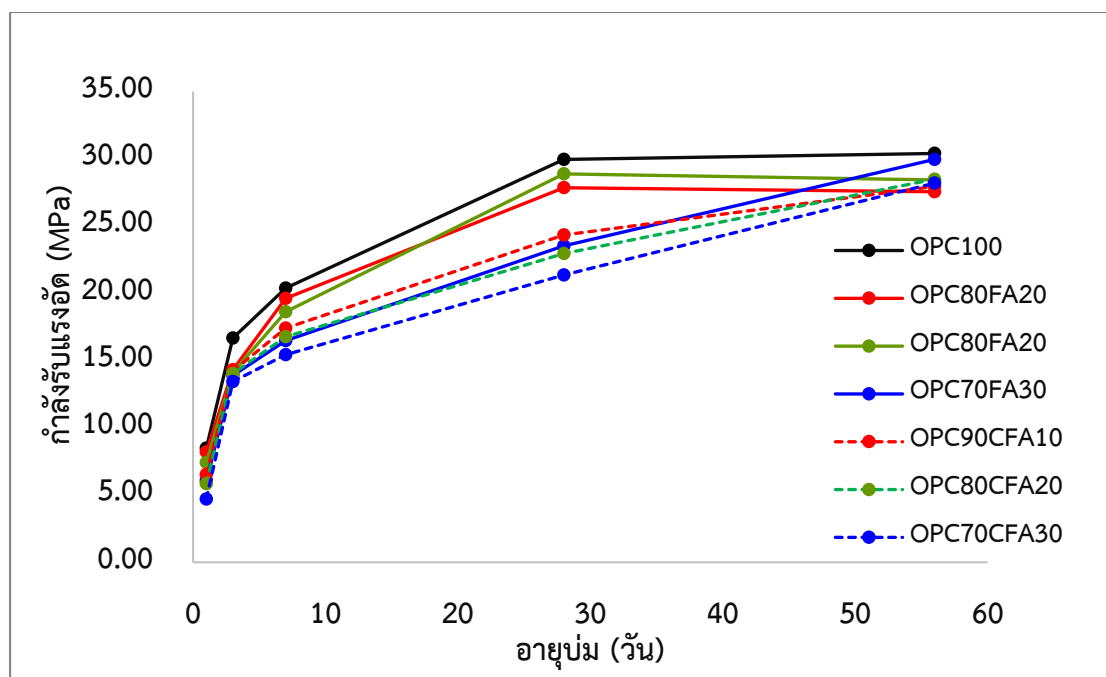
- ที่อายุ 1 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 6.52 5.83 และ 4.71 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 77 69 และ 56 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- ที่อายุ 3 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 14.22 14.02 และ 13.44 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 85 84 และ 81 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- ที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 17.41 16.77 และ 15.45 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 85 82 และ 76 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- ที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 24.32 22.95 และ 21.28 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 81 77 และ 71 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ

- และที่อายุ 56 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 27.95 28.49 และ 28.19 MPa ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังคิดเป็นร้อยละ 92 94 และ 93 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC100) ตามลำดับ



รูปที่ 50 กราฟผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ทดแทนด้วย เถ้าลอย (FA) และเถ้าลอยคาร์บอน (CFA)

ตารางที่ 17 ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าดัชนีกำลัง

อัตราส่วนผสม	กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (MPa) - ค่าดัชนีกำลัง (%)				
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน
OPC100	8.48 - 100	16.67 - 100	20.40 - 100	29.96 - 100	30.35 - 100
OPC90FA10	8.19 - 97	14.32 - 86	19.61 - 96	27.85 - 93	27.56 - 91
OPC80FA20	7.40 - 87	14.12 - 85	18.63 - 91	28.88 - 96	28.44 - 94
OPC70FA30	6.08 - 72	13.88 - 83	16.48 - 81	23.54 - 79	29.96 - 99
OPC90CFA10	6.52 - 77	14.22 - 85	17.41 - 85	24.33 - 81	27.95 - 92
OPC80CFA20	5.83 - 69	14.02 - 84	16.77 - 82	22.95 - 77	28.49 - 94
OPC80CFA30	4.71 - 56	13.44 - 80.6	15.45 - 76	21.28 - 71	28.19 - 93

จะเห็นได้ว่า การเพิ่มร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอย และเถ้าลอยคาร์บอนेट ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุทดสอบเดียวกันลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebrahimi และคณะ, 2560 นำเถ้าลอยคาร์บอนेटทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งการทดแทนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) น้อยลง ทำให้กำลังรับแรงอัด มีอัตราการพัฒนาที่ลดลงตามไปด้วย (Özen และคณะ, 2559) และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัด จากการใช้เถ้าลอยและเถ้าลอยคาร์บอนेटทดแทนในร้อยละที่เท่ากัน และอายุทดสอบเดียวกัน พบว่าการทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटทั้งหมด ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าการทดแทนด้วยเถ้าลอย ซึ่งเป็นผลมาจากแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอยที่มีปริมาณมากกว่าในเถ้าลอยคาร์บอนेट ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูงกว่า และระหว่างการผลิตได้แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (C_2SH_2) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3AH_6) มากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น (Zhu และคณะ, 2564) อีกทั้งแคลเซียมคาร์บอนेटในเถ้าลอยคาร์บอนेटจะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) หรือจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) (ประกาศิต โสไกร และคณะ, 2561)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटที่สัดส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ของทุกสัดส่วนของการทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนेटมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งเป็นไปตามเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM 618 ที่สามารถนำไปใช้งานได้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยศึกษาผลของประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอย เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าลอยคาร์บอนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีต่อความต้องการน้ำและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

5.1.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ พบว่า ปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าเถ้าลอยและเถ้าลอยคาร์บอน สำหรับองค์ประกอบทางเคมี พบว่า ปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C150 ยกเว้นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ที่มีค่าเกินมาตรฐานกำหนดไว้ เพียง 0.43 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C150 อีกด้วย

สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีองค์ประกอบทางเคมี ที่ระบุได้ว่าเป็นเถ้าลอยชนิด C เนื่องจากมีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมีค่ามากกว่า 50% รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 ยกเว้นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ที่มีค่าเกินมาตรฐานกำหนดไว้ เพียงร้อยละ 2.44 โดยน้ำหนัก และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มีค่าเกินมาตรฐานร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เถ้าลอยยังมีปริมาณความชื้น และน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618

สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยคาร์บอน พบว่า เถ้าลอยจากการสังเคราะห์มีองค์ประกอบทางเคมี ที่ระบุได้ว่าเป็นเถ้าลอยชนิด C เนื่องจากมีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมีค่ามากกว่า 50% รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 ยกเว้นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ที่มีค่าเกินมาตรฐานกำหนดไว้ เพียงร้อยละ 0.38 โดยน้ำหนัก และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มีค่าเกินมาตรฐานร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก

5.1.2 ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอย

ปริมาณ และ ประสิทธิภาพการกักเก็บ คาร์บอนไดออกไซด์จากการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 25 mL/min และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำที่ 50 g/L พบว่า ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการกักเก็บ

คาร์บอนไดออกไซด์ แต่จะลดลงหลังค่าพีเอช 8.3 เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการละลายกลับไปในรูปแบบของแคลเซียมไอออน ดังนั้นค่าพีเอช 8.3 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้หยุดการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จากการเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำจาก 50 g/L เป็น 100 และ 200 g/L เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 25 mL/min เพื่อให้ค่าพีเอช เท่ากับ 8.3 พบว่า ปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง จากการเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ลดลง ทำให้การชะละลายของแคลเซียมออกไซด์ และการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงด้วย ดังนั้นจึงเลือกเถ้าลอยที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำจาก 50 g/L เนื่องจากมีปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนสูงที่สุด 66.69 mgCO₂/gFA และ 26.5% ตามลำดับ

5.1.3 สมบัติของมอร์ตาร์

ความต้องการน้ำ (Water requirement) จากการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM C1437 พบว่า ค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ลดลง เมื่อเพิ่มร้อยละการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยและเถ้าลอยคาร์บอเนต ซึ่งควรต้องมีการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) มากขึ้นเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่เป็นไปตามมาตรฐาน และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) จากการใช้เถ้าลอยและเถ้าลอยคาร์บอเนตในร้อยละการทดแทนที่เท่ากัน พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยคาร์บอเนตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) ที่มากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย มีความเป็นไปได้จากลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยคาร์บอเนตที่พบ มีรูปร่างทรงกลมและมีผิวขรุขระ ในขณะที่เถ้าลอย มีลักษณะรูปร่างทรงกลมและมีผิวเรียบ

กำลังรับแรงอัดและดัชนีกำลัง พบว่า มอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอเนตทุกสัดส่วนของการทดแทน ให้กำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าการทดแทนด้วยเถ้าลอย ซึ่งเป็นผลมาจาก แคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอยมีปริมาณมากกว่าในเถ้าลอยคาร์บอเนต ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูงกว่า และระหว่างกระบวนการบ่มเกิดไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิงเกตไฮเดรต (C₂SH₂) และไตรแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C₃AH₆) มากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อีกทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตในเถ้าลอยคาร์บอเนตจะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) หรือจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) และเมื่อพิจารณาดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอเนตที่สัดส่วนร้อยละ 10 20

และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังรับแรงอัดและดัชนีกำลังเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM 618 ที่ทุกสัดส่วนของการทดแทนด้วยเถ้าลอยคาร์บอนที่สามารถนำไปใช้งานได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเถ้าลอย แบบเติมฟอง มีความชัดเจนและ สามารถเข้าใจกลไกต่าง ๆ ได้มากยิ่งขึ้น เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีแนวทาง ศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนในถังปฏิกรณ์แบบแบบที่ละเท
2. ศึกษาผลของปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนด้วยเถ้าลอยที่การเติมสารเติมแต่ง
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์อื่นๆเพิ่มเติม
4. ศึกษาการนำไปใช้สำหรับงานฉาบ



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- Bobicki, E. R., Liu, Q., Xu, Z., & Zeng, H. (2555). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 302-320. doi:10.1016/j.pecs.2011.11.002
- Bosoaga, A., Masek, O., & Oakey, J. E. (2552). CO₂ capture technologies for cement industry. *Energy Procedia*, 1(1), 133-140. doi:10.1016/j.egypro.2009.01.020
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., & Sirivivatnanon, V. (2547). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1087-1092. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.021
- Czigler, T., Reiter, S., Schulze, P., & Somers, K. (2563). Laying the foundation for zero-carbon cement. แหล่งที่มา: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/laying-the-foundation-for-zero-carbon-cement> [15 มกราคม 2564]
- Dananjayan, R. R. T., Kandasamy, P., & Andimuthu, R. (2559). Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4173-4182. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.145
- Ebrahimi, A., Saffari, M., Milani, D., Montoya, A., Valix, M., & Abbas, A. (2560). Sustainable transformation of fly ash industrial waste into a construction cement blend via CO₂ carbonation. *Journal of Cleaner Production*, 156, 660-669. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.037
- Elmrabet, R., El Harfi, A., & El Youbi, M. S. (2562). Study of properties of fly ash cements. *Materials Today: Proceedings*, 13, 850-856. doi:10.1016/j.matpr.2019.04.048
- Gerdemann, S. J., Dahlin, D. C., K., O. C. W., Penner, L. R., & Rush, E. G. (2547). *Ex-situ and in-situ mineral carbonation as a means to sequester carbon dioxide*. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.osti.gov/biblio/895240> [5 มีนาคม 2564]
- Gibbs, M. J., Soyka, P., & Conneely, D. (2544). CO₂ emissions from cement production. *Good practice guidance and uncertainty management in National Greenhouse gas inventories*, 175, 182.

- Glavind, M. (2552). Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction. In *Sustainability of construction materials* (pp. 120-147). Elsevier. doi:10.1533/9781845695842.120
- Huijgen, W. J., Witkamp, G.-J., & Comans, R. N. (2549). Mechanisms of aqueous wollastonite carbonation as a possible CO₂ sequestration process. *Chemical Engineering Science*, 61(13), 4242-4251.
- Huijgen, W. J. J., & Comans, R. N. J. (2003). Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Literature Review.
- IPCC (2548). *Carbon Dioxide capture and storage*. Metz, B., Davidson, O., Heleen de Coninck, & Loos, M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, pp. 442.
- Ji, L., Yu, H., Wang, X., Grigore, M., French, D., Gözükar, Y. M., . . . Zeng, M. (2560). CO₂ sequestration by direct mineralisation using fly ash from Chinese Shenfu coal. *Fuel Processing Technology*, 156, 429-437.
- Jo, H. Y., Kim, J. H., Lee, Y. J., Lee, M., & Choh, S.-J. (2555). Evaluation of factors affecting mineral carbonation of CO₂ using coal fly ash in aqueous solutions under ambient conditions. *Chemical Engineering Journal*, 183, 77-87.
- Lackner, K. S. (2545). Carbonate chemistry for sequestering fossil carbon. *Annual review of energy and the environment*, 27(1), 193-232.
doi:10.1146/annurev.energy.27.122001.083433
- Lackner, K. S., Wendt, C. H., Butt, D. P., Joyce Jr., E. L., & Sharp, D. H. (2538). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*, 20(11), 1153-1170.
doi:10.1016/0360-5442(95)00071-N
- Leung, D. Y. C., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2557). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443. doi:10.1016/j.rser.2014.07.093
- Maroto-Valer, M. M., Fauth, D. J., Kuchta, M. E., Zhang, Y., & Andrésen, J. M. (2548). Activation of magnesium rich minerals as carbonation feedstock materials for CO₂ sequestration. *Fuel Processing Technology*, 86(14-15), 1627-1645.
doi:10.1016/j.fuproc.2005.01.017

- Navisa, J., Sravya, T., Swetha, M., & Venkatesan, M. (2557). Effect of Bubble Size on Aeration Process. *Asian Journal of Scientific Research*, 7(4), 482-487.
doi:10.3923/ajsr.2014.482.487
- Nyambura, M. G., Mugeru, G. W., Felicia, P. L., & Gathura, N. P. (2554). Carbonation of brine impacted fractionated coal fly ash: Implications for CO₂ sequestration. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 655-664.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.008>
- Plaza, M. G., Martínez, S., & Rubiera, F. (2563). CO₂ Capture, use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations. *Energies*, 13(21), 5692.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2560). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. แหล่งที่มา: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- Thomas, M. (2550). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf [1 มกราคม 2564]
- Ukwattage, N. L., Ranjith, P., Yellishetty, M., Bui, H. H., & Xu, T. (2558). A laboratory-scale study of the aqueous mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration. *Journal of Cleaner Production*, 103, 665-674.
- กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. (2563). คู่มือกิจกรรมสิ่งแวดล้อมศึกษา การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://eservice.deqp.go.th/storage/Media/C202006251368.pdf>
- ธงไทย วิฑูรย์. (2554). เทคโนโลยีการกักเก็บและการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล วิศวกรรมสาร มข.,
- ธีระพงษ์ ศรีเจริญ. (2548). กำลังอัดประลัย การหดตัวแบบแห้ง และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยกองทิ้งที่เหมืองแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ประกาศิต โสไกร, กิตติคุณ มั่งคั่ง, สถาพร ปกป้อง, จุฬาลักษณ์ ชาญกุล, & ญัฐ มากุล. (2561). ผลกระทบของความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าลอยตกเกรด. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร, 13(1).
- ภัทรพร คิม. (2561). การนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์: สถานการณ์ อุปสรรค และความท้าทาย. แหล่งที่มา: [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://chem.eng.chula.ac.th/wp-content/uploads/2021/03/3_BCGeTEC_Newsletter_Feb-2021.pdf

- วราทิพย์ วัฒนวินิจัย. (2562). การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยระยะ 10 ปี จากปัจจัยการเติบโตทางเศรษฐกิจ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแหล่งกำเนิด และการเปลี่ยนแปลงของประชากร. (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต). สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2557). คอนกรีตเทคโนโลยี. บริษัท นิวไทยมิตรการพิมพ์ (1996) จำกัด.
- ศุภานนท์ บรรจงเกลี้ยง. (2549). ศักยภาพของผงแก้วในการเป็นปอซโซลาน. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.[ออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/14814> [15 กุมภาพันธ์ 2564]
- สันติชัย อาภรณ์ศรี. (2563). ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก. แหล่งที่มา: <https://themomentum.co/world-emissions/> [18 พฤษภาคม 2564]
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2551). ลดโลกร้อนด้วยตัวเรา. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/6220-green-the-earth> [4 มกราคม]
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. (2559). ศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในประเทศไทย. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/Article/2016/Article_MA%20plan_Cement_Final.pdf [10 กุมภาพันธ์ 2564]
- อธิกานต์ ธิวงค์คำ. (2558). คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. แหล่งที่มา: <http://www.repository.rmutt.ac.th/dspace/handle/123456789/2919> [25 กุมภาพันธ์ 2564]



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์การคำนวณ

การวิเคราะห์หาขนาดฟอง

การวิเคราะห์หาขนาดฟอง โดยการวิเคราะห์จากภาพถ่าย จากการสุ่มอากาศจำนวนอย่างน้อย 100 ฟอง และใช้โปรแกรม imageJ ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ค่า l และ h คือ ความกว้างและความสูงของฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังต่อไปนี้

หา ความกว้างของฟองคาร์บอนไดออกไซด์ จากสูตร

$$l = \text{SQRT} ((X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2)$$

โดย X_1, X_2 คือ จุดแกน x ของฟองด้านซ้าย และขวา ตามลำดับ

Y_1, Y_2 คือ จุดแกน y ของฟองด้านซ้าย และขวา ตามลำดับ

จะได้

$$\begin{aligned} l &= \text{SQRT} ((61.088 - 61.710)^2 + (112.709 - 112.775)^2) \\ &= 0.625 \end{aligned}$$

หา ความสูงของฟองคาร์บอนไดออกไซด์ จากสูตร

$$h = \text{SQRT} ((X_3 - X_4)^2 + (Y_3 - Y_4)^2)$$

โดย X_3, X_4 คือ จุดแกน x ของฟองด้านบน และล่าง ตามลำดับ

Y_3, Y_4 คือ จุดแกน y ของฟองด้านบน และล่าง ตามลำดับ

จะได้

$$\begin{aligned} h &= \text{SQRT} ((61.399 - 61.332)^2 + (112.331 - 113.064)^2) \\ &= 0.736 \end{aligned}$$

หา เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองคาร์บอนไดออกไซด์ จากสูตร

$$\begin{aligned} dB &= ((l^2) \times h)^{1/3} \\ &= ((0.625^2) \times 0.736)^{1/3} \\ &= 0.660 \text{ mm} \end{aligned}$$

หา เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองคาร์บอนไดออกไซด์ จากสูตร

$$dB_{เฉลี่ย} = \frac{((l_1)^2 \times h_1)^{1/3} + \dots + ((l_{100})^2 \times h_{100})^{1/3}}{100}$$

$$= 0.545 \text{ mm (545 } \mu\text{m)}$$

การวิเคราะห์หาค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

ยกตัวอย่างกรณีใช้ ค่าจากการวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนักและความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (TG-DTA) ของเถ้าลอย พบว่าน้ำหนักที่เหลือของเถ้าลอยคาร์บอนที่อุณหภูมิ 105 500 และ 1000 °C เท่ากับ 14.350 14.144 และ 14.071 mg ตามลำดับ สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ จากสูตร ดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (mg CO}_2\text{/g FA)} = \frac{m_{500^\circ\text{C},0} - m_{1000^\circ\text{C},0}}{m_{105^\circ\text{C},0}}$$

โดย $M_{105^\circ\text{C}}$ คือ มวลของเถ้าลอย ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 105°C

$M_{500^\circ\text{C}}$ คือ มวลของเถ้าลอย ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C

$M_{1000^\circ\text{C}}$ คือ มวลของเถ้าลอย ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์} &= \frac{(14.144 - 14.071) \text{ mg CO}_2}{14.350 \text{ mg FA}} \times \frac{1000 \text{ mg FA}}{1 \text{ g FA}} \\ &= 5.057 \text{ mg CO}_2\text{/g FA} \end{aligned}$$

ค่าจากการวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนักและความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (TG-DTA) ของเถ้าลอยคาร์บอนที่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 25 mL/min จนค่าพีเอช 8.3 และค่าสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำที่ 50 g/L พบว่าน้ำหนักที่เหลือของเถ้าลอยคาร์บอนที่อุณหภูมิ 105 500 และ 1000 °C เท่ากับ 19.628 19.268 และ 17.852 mg ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวมีการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ส่วนได้แก่ การกักเก็บจากสิ่งแวดล้อมและการกักเก็บจากกระบวนการคาร์บอนชั่น ดังนั้นการกักเก็บจากสิ่งแวดล้อมของเถ้าลอยคาร์บอน ($m'_{500^\circ\text{C}} - m'_{1000^\circ\text{C}}$) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 (m'_{500^{\circ}\text{C}} - m'_{1000^{\circ}\text{C}}) &= \frac{m_{105^{\circ}\text{C}} - (m_{500^{\circ}\text{C}} - m_{1000^{\circ}\text{C}})}{m_{105^{\circ}\text{C},0} - (m_{500^{\circ}\text{C},0} - m_{1000^{\circ}\text{C},0})} \times (m_{500^{\circ}\text{C},0} - m_{1000^{\circ}\text{C},0}) \\
 &= \frac{19.628 - (19.268 - 17.852)}{14.350 - (14.144 - 14.071)} \times (14.144 - 14.071) \\
 &= 0.093 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

โดย $M_{105^{\circ}\text{C}}$ คือ มวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 105°C

$M_{500^{\circ}\text{C}}$ คือ มวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 500°C

$M_{1000^{\circ}\text{C}}$ คือ มวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1000°C

จากนั้น คำนวณหาปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการคาร์บอนชั่น

จากสูตร

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (mg CO}_2\text{/g FA)} &= \frac{(m_{500^{\circ}\text{C}} - m_{1000^{\circ}\text{C}}) - (m'_{500^{\circ}\text{C}} - m'_{1000^{\circ}\text{C}})}{m_{105^{\circ}\text{C}}} \\
 &= \frac{(1.408 - 0.093) \text{ mg CO}_2}{19.628 \text{ mg FA}} \times \frac{1000 \text{ mg FA}}{1 \text{ g FA}} \\
 &= 67.013 \text{ mg CO}_2\text{/g FA}
 \end{aligned}$$

โดยหาร้อยละโดยน้ำหนักได้

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (wt.\%)} &= \frac{(m_{500^{\circ}\text{C}} - m_{1000^{\circ}\text{C}}) - (m'_{500^{\circ}\text{C}} - m'_{1000^{\circ}\text{C}})}{m_{105^{\circ}\text{C}}} \\
 &= \frac{(1.408 - 0.093) \text{ mg}}{19.628 \text{ mg}} \times 100\% \\
 &= 6.701 \%
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

ยกตัวอย่างกรณีจากการทดลอง ใช้ค่าปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ของถ้ำลอยคาร์บอนเนตที่ค่าความเป็นกรดต่าง 8.3 ค่าอัตราส่วนถ้ำลอยต่อน้ำปราศจากไอออนที่ 50 g/L และอัตราการไหล 25 mL/min เท่ากับ 6.701% สามารถนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

จากสูตร

$$\text{ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ } (\eta) = \frac{\text{ปริมาณการกักเก็บจากการทดลอง}}{\text{ปริมาณการกักเก็บจากทฤษฎี}} \times 100 \%$$

จาก สมการปริมาณการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จากทฤษฎี

$$\text{CO}_2 (\%) = 0.785 (\% \text{Cao} - 0.7 \times \% \text{SO}_3) + 1.09 \% \text{MgO} + 0.71 \times \% \text{Na}_2\text{O} + 0.468 \times \% \text{K}_2\text{O}$$

จะได้

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 (\%) &= 0.785 (30.3\% - 0.7 \times 7.44\%) + 1.09 \times 2.66\% + 0.71 \times 2.3\% + 0.468 \times 1.99\% \\ &= 25.161 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ } (\eta) &= \frac{6.701 \%}{25.161\%} \times 100 \% \\ &= 26.6 \% \end{aligned}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์หาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ยกตัวอย่างหา ค่าค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) จากสูตร ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น } (\rho) = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \times 100\%$$

โดย M_2 คือ น้ำหนักเริ่มต้น (g)

M_1 คือ น้ำหนักสุดท้าย (g)

V_2 คือ ปริมาตรน้ำมันก๊าดสุดท้ายหลังใส่สาร (mL)

V_1 คือ ปริมาตรน้ำมันก๊าดเริ่มต้น (mL)

$$\begin{aligned}\text{ความหนาแน่น (}\rho\text{)} &= \frac{65 - 0}{21.3 - 0.8} \times 100\% \\ &= 3.171 \text{ g/mL}\end{aligned}$$

จะได้ ค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) จากสูตร

$$\begin{aligned}\text{ความถ่วงจำเพาะ (SG)} &= \frac{\text{ความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (g/mL)}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C (g/mL)}} \times 100\% \\ &= \frac{3.171 \text{ (g/mL)}}{1 \text{ (g/mL)}} \times 100\% \\ &= 3.17\end{aligned}$$

การวิเคราะห์หาค่าความชื้น (% Moisture content)

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของเถ้าลอย พบว่า น้ำหนักเปียกของเถ้าลอย และ น้ำหนักแห้งของเถ้าลอย เท่ากับ 2.0062 และ 2.0038 g ตามลำดับ สามารถนำค่ามาคำนวณหาปริมาณความชื้นของเถ้าลอย จากสูตร

$$\begin{aligned}\% \text{ Moisture content} &= \frac{\text{น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (g)} - \text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)}}{\text{น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (g)}} \times 100\% \\ &= \frac{2.0062 - 2.0038}{2.0062} \times 100\% \\ &= 0.120\%\end{aligned}$$

การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI)

ยกตัวอย่าง การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาของปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 950 °C พบว่า น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง และ น้ำหนักหลังเผาของตัวอย่าง เท่ากับ 1.001 และ 0.022 g ตามลำดับ สามารถนำค่ามาคำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา จากสูตร

$$\begin{aligned}
 \text{LOI} &= \frac{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)} - \text{น้ำหนักหลังเผาของตัวอย่าง (g)}}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)}} \times 100\% \\
 &= \frac{1.001 - 0.022}{1.001} \times 100\% \\
 &= 2.198\%
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์หาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลแผ่ (Percent flow)

ยกตัวอย่างกรณีใช้อัตราส่วนผสมสารเชื่อมประสาน (W/B) ที่ 0.57 ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานซึ่งไม่ผสม (OPC100) 300 g ทราย 825 g และน้ำ 171 g มาผสมและหาการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C1437 สามารถนำมาคำนวณหาการไหลตัว (Percent flow) จากสูตร

$$\% \text{ Flow} = \frac{(D_1 - D_0)}{D_0} \times 100 \%$$

โดย D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย (Flow mold) ; mm

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่กระจายบนแผ่นโต๊ะการไหล; mm

จะได้

$$\% \text{ Flow} = \frac{(210.25 \text{ mm} - 100 \text{ mm})}{100 \text{ mm}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ Flow} = 110.25 \%$$

การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย

ยกตัวอย่างกรณีใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่ผสม (OPC100) ขนาด 5 x 5 x 5 cm จำนวน 4 ตัวอย่าง ที่อายุการบ่ม 1 วัน ได้ค่าแรงอัดเฉลี่ย ด้วยเครื่องทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 2150 2050 2250 และ 2200 kg สามารถนำมาคำนวณหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย จากสูตร

$$\text{กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm}^2\text{)} = \frac{\text{แรงอัดเฉลี่ย (kg)}}{\text{พื้นที่รับแรง (cm}^2\text{)}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2150 \text{ kg}}{25 \text{ cm}^2} \\
 &= 86 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

จะได้ กำลังอัดเฉลี่ย จำนวน 4 ตัวอย่าง มีค่าเป็น 86 82 90 88 และ 86 kg/cm² และ นำมา คำนวณค่าเฉลี่ย จากสูตร

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm}^2\text{)} &= \frac{\text{ผลบวกของกำลังอัดเฉลี่ยแต่ละตัวอย่าง (kg/cm}^2\text{)}}{\text{จำนวนตัวอย่าง}} \\
 &= \frac{86 + 82 + 90 + 88 + 86}{4} \\
 &= 87 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 8.48 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าดัชนีกำลัง

ยกตัวอย่าง ค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่ผสม (OPC100) และค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 1 วัน เท่ากับ 8.48 และ 8.19 MPa ตามลำดับ สามารถนำมาคำนวณหาค่าดัชนีกำลัง จากสูตร

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์} &= \frac{\text{กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์}}{\text{กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่ผสม}} \times 100 \% \\
 &= \frac{8.48 \text{ MPa}}{8.19 \text{ MPa}} \times 100 \% \\
 &= 97 \%
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ลำดับ	รายการ	การทดลองครั้งที่		
		1	2	3
1	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (mL)	0.8	1.0	0.4
2	อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก ($^{\circ}\text{C}$)	27.7	27.7	27.7
3	น้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่เริ่มต้น (g)	65	65	65
4	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (mL)	21.3	18.9	20.9
5	อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง ($^{\circ}\text{C}$)	27.7	27.7	27.7
6	น้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่เหลือ (g)	0	8.2	0
7	น้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ใช้ (g)	65	56.8	65
8	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่ (mL)	20.5	17.9	20.5
9	ความหนาแน่น (g/mL)	3.171	3.173	3.171
10	ความถ่วงจำเพาะ	3.171	3.173	3.171
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย		3.17		

ตารางที่ ก.2 ผลการหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเถ้าลอย

ลำดับ	รายการ	การทดลองครั้งที่		
		1	2	3
1	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (mL)	0.8	1.0	1.0
2	อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก ($^{\circ}\text{C}$)	27.7	27.7	27.7
3	น้ำหนักของเถ้าลอยที่เริ่มต้น (g)	65	65	60
4	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (mL)	18.3	21.5	18.8
5	อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง ($^{\circ}\text{C}$)	27.7	27.7	27.7
6	น้ำหนักของเถ้าลอยที่เหลือ (g)	14.8	5.9	8.4
7	น้ำหนักของเถ้าลอยที่ใช้ (g)	50.2	59.1	51.6
8	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่ (mL)	17.4	20.5	17.8
9	ความหนาแน่น (g/mL)	2.885	2.883	2.899
10	ความถ่วงจำเพาะ	2.885	2.883	2.899
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย		2.89		

ตารางที่ ก.3 ผลการหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเถ้าลอยคาร์บอนเนต

ลำดับ	รายการ	การทดลองครั้งที่		
		1	2	3
1	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (mL)	0.6	0.5	0.5
2	อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก (°C)	27.7	27.7	27.7
3	น้ำหนักของเถ้าลอยคาร์บอนเนตที่เริ่มต้น (g)	65	65	55.5
4	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (mL)	19.5	18.2	20.0
5	อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง (°C)	27.7	27.7	27.7
6	น้ำหนักของเถ้าลอยคาร์บอนเนตที่เหลือ (g)	11.7	14.8	0.0
7	น้ำหนักของเถ้าลอยคาร์บอนเนตที่ใช้ (g)	53.3	50.2	55.5
8	ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่ (mL)	18.9	17.7	19.5
9	ความหนาแน่น (g/mL)	2.820	2.836	2.846
10	ความถ่วงจำเพาะ	2.820	2.836	2.846
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย		2.83		

ตารางที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์หาค่าความชื้น (%Moisture content) ของเถ้าลอย

ลำดับที่	รายการ	การทดลองครั้งที่		
		1	2	3
1	น้ำหนักของถ้วยเผาเปล่า (g)	75.01	74.05	74.58
2	น้ำหนักเปียกของเถ้าลอย (g)	2.0062	2.0030	2.0018
3	น้ำหนักรวมก่อนอบแห้ง (g)	77.0162	76.0530	76.5818
4	น้ำหนักรวมหลังอบแห้ง (g)	77.0138	76.0508	76.5792
5	น้ำหนักแห้งของเถ้าลอย (g)	2.0038	2.0008	1.9992
6	ค่าความชื้น (%)	0.120%	0.110%	0.130%
ค่าความชื้นเฉลี่ย (%)		0.12%		

ตารางที่ ก.5 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI) ของเถ้า
ลอย

ลำดับที่	รายการ	การทดลองครั้งที่		
		1	2	3
1	น้ำหนักของถ้วยเผาเปล่า (g)	35.1279	29.1365	32.5436
2	น้ำหนักแห้งของเถ้าลอย (g)	1.001	1.000	1.004
3	น้ำหนักรวมก่อนหลังเผา ง (g)	36.1289	30.1365	33.5476
4	น้ำหนักรวมหลังหลังเผา (g)	36.1147	30.1224	33.5334
5	น้ำหนักหลังเผาของเถ้าลอย (g)	0.9868	0.9859	0.9898
6	น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา ที่ 750 °C (%)	1.419%	1.420%	1.414%
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผาเฉลี่ย (%)		1.42%		

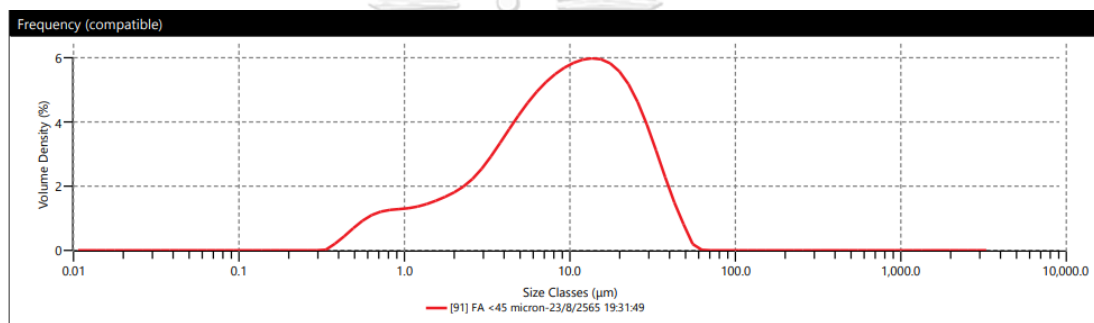
ตารางที่ ก.6 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI) ของ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ลำดับที่	รายการ	การทดลองครั้งที่		
		1	2	3
1	น้ำหนักของถ้วยเผาเปล่า (g)	35.1279	29.1365	32.5436
2	น้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ (g)	1.001	1.000	1.000
3	น้ำหนักรวมก่อนเผา (g)	36.1289	30.1365	33.5436
4	น้ำหนักรวมหลังเผา (g)	36.1069	30.1147	33.5253
5	น้ำหนักหลังเผาของปูนซีเมนต์ (g)	0.9790	0.9782	0.9817
6	น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา ที่ 950 °C (%)	2.198%	2.180%	2.221%
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผาเฉลี่ย (%)		2.20%		

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



Sample Sample Name FA <45 micron Sample detail File Name 650808-3382	Instrument Instrument Type Mastersizer3000 Instrument Serial No. MAL1099267 Accessory Name Hydro MV
Conditions Particle Name Fly ash (FA) Particle Refractive Index 1.560 Particle Absorption Index 1.000 Dispersant Name Water Dispersant Refractive Index 1.330 Analysis Model General Purpose Scattering Model Mie Laser Obscuration 16.43 % Ultrasound Achieved 0 % Stirrer Speed Achieved 1600 rpm Particle Notes	Result Result Units Volume Concentration 0.0083 % Uniformity 0.857 Span 2.798 Specific Surface Area 528.7 m ² /kg Weighted Residual 0.54 % Dv (10) 1.55 µm Dv (50) 9.17 µm Dv (90) 27.2 µm D [4,3] 12.1 µm D [3,2] 3.97 µm



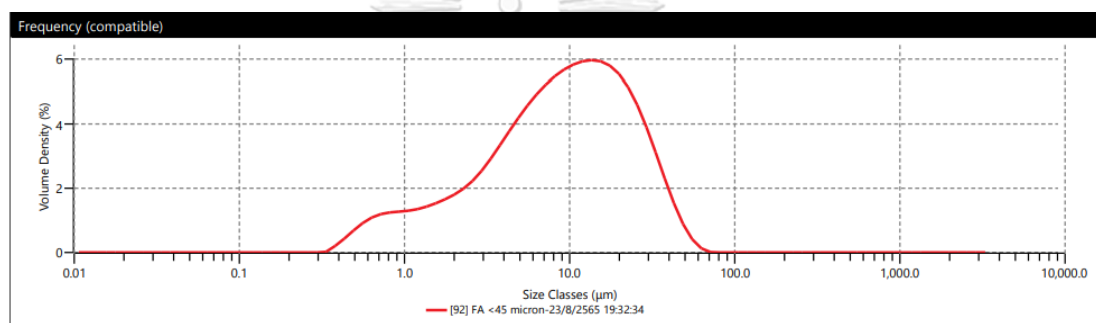
Result table									
Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0876	0.00	0.767	1.05	6.72	4.37	58.9	0.00
0.0114	0.00	0.0995	0.00	0.872	1.07	7.64	4.58	66.9	0.00
0.0129	0.00	0.113	0.00	0.991	1.09	8.68	4.75	76.0	0.00
0.0147	0.00	0.128	0.00	1.13	1.13	9.86	4.87	86.4	0.00
0.0167	0.00	0.146	0.00	1.28	1.20	11.2	4.96	98.1	0.00
0.0189	0.00	0.166	0.00	1.45	1.29	12.7	4.99	111	0.00
0.0215	0.00	0.188	0.00	1.65	1.39	14.5	4.97	127	0.00
0.0244	0.00	0.214	0.00	1.88	1.50	16.4	4.87	144	0.00
0.0278	0.00	0.243	0.00	2.13	1.65	18.7	4.66	163	0.00
0.0315	0.00	0.276	0.00	2.42	1.85	21.2	4.33	186	0.00
0.0358	0.00	0.314	0.00	2.75	2.11	24.1	3.86	211	0.00
0.0407	0.00	0.357	0.17	3.12	2.43	27.4	3.27	240	0.00
0.0463	0.00	0.405	0.36	3.55	2.79	31.1	2.60	272	0.00
0.0526	0.00	0.460	0.58	4.03	3.15	35.3	1.90	310	0.00
0.0597	0.00	0.523	0.77	4.58	3.50	40.1	1.23	352	0.00
0.0679	0.00	0.594	0.92	5.21	3.83	45.6	0.68	400	0.00
0.0771	0.00	0.675	1.01	5.92	4.12	51.8	0.13	454	0.00

รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบหาขนาดเฉลี่ย ครั้งที่ 1

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



Sample	Instrument
Sample Name FA <45 micron Sample detail File Name 650808-3382	Instrument Type Mastersizer3000 Instrument Serial No. MAL1099267 Accessory Name Hydro MV
Conditions	Result
Particle Name Fly ash (FA) Particle Refractive Index 1.560 Particle Absorption Index 1.000 Dispersant Name Water Dispersant Refractive Index 1.330 Analysis Model General Purpose Scattering Model Mie Laser Obscuration 16.32 % Ultrasound Achieved 0 % Stirrer Speed Achieved 1600 rpm Particle Notes	Result Units Volume Concentration 0.0083 % Uniformity 0.868 Span 2.820 Specific Surface Area 525.3 m ² /kg Weighted Residual 0.50 % Dv (10) 1.56 µm Dv (50) 9.23 µm Dv (90) 27.6 µm D [4,3] 12.3 µm D [3,2] 3.99 µm



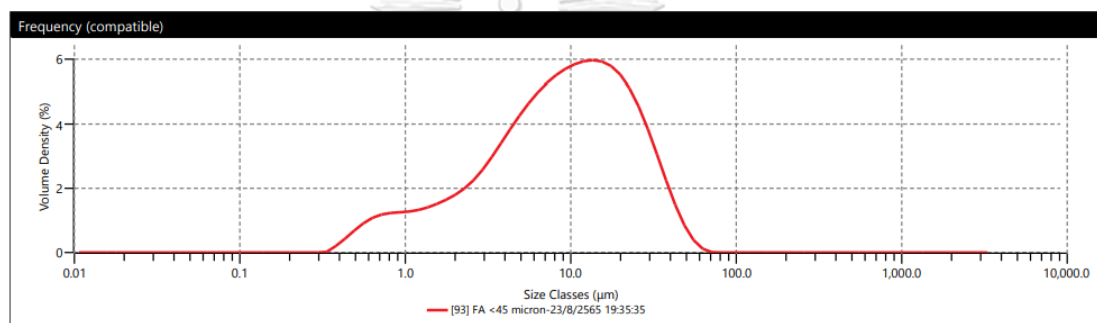
Result table									
Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0876	0.00	0.767	1.04	6.72	4.35	58.9	0.09
0.0114	0.00	0.0995	0.00	0.872	1.06	7.64	4.56	66.9	0.00
0.0129	0.00	0.113	0.00	0.991	1.08	8.68	4.73	76.0	0.00
0.0147	0.00	0.128	0.00	1.13	1.12	9.86	4.86	86.4	0.00
0.0167	0.00	0.146	0.00	1.28	1.19	11.2	4.95	98.1	0.00
0.0189	0.00	0.166	0.00	1.45	1.28	12.7	4.98	111	0.00
0.0215	0.00	0.188	0.00	1.65	1.38	14.5	4.95	127	0.00
0.0244	0.00	0.214	0.00	1.88	1.50	16.4	4.84	144	0.00
0.0278	0.00	0.243	0.00	2.13	1.65	18.7	4.63	163	0.00
0.0315	0.00	0.276	0.00	2.42	1.85	21.2	4.30	186	0.00
0.0358	0.00	0.314	0.00	2.75	2.11	24.1	3.84	211	0.00
0.0407	0.00	0.357	0.17	3.12	2.43	27.4	3.26	240	0.00
0.0463	0.00	0.405	0.36	3.55	2.78	31.1	2.60	272	0.00
0.0526	0.00	0.460	0.57	4.03	3.14	35.3	1.92	310	0.00
0.0597	0.00	0.523	0.77	4.58	3.49	40.1	1.27	352	0.00
0.0679	0.00	0.594	0.91	5.21	3.81	45.6	0.73	400	0.00
0.0771	0.00	0.675	1.00	5.92	4.10	51.8	0.33	454	0.00

รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบหาขนาดเฉลี่ย ครั้งที่ 2

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



Sample Sample Name FA <45 micron Sample detail File Name 650808-3382	Instrument Instrument Type Mastersizer3000 Instrument Serial No. MAL1099267 Accessory Name Hydro MV
Conditions Particle Name Fly ash (FA) Particle Refractive Index 1.560 Particle Absorption Index 1.000 Dispersant Name Water Dispersant Refractive Index 1.330 Analysis Model General Purpose Scattering Model Mie Laser Obscuration 15.96 % Ultrasound Achieved 0 % Stirrer Speed Achieved 1600 rpm Particle Notes	Result Result Units Volume Concentration 0.0081 % Uniformity 0.866 Span 2.813 Specific Surface Area 524.1 m ² /kg Weighted Residual 0.52 % Dv (10) 1.58 µm Dv (50) 9.16 µm Dv (90) 27.3 µm D [4,3] 12.2 µm D [3,2] 4.00 µm



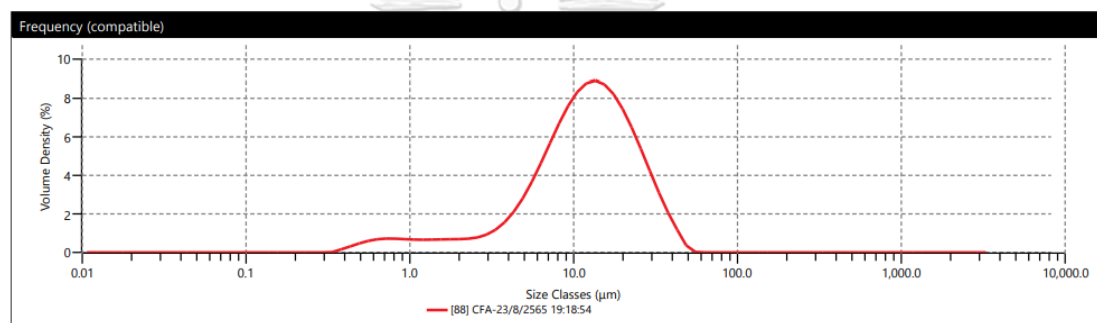
Result table									
Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0876	0.00	0.767	1.03	6.72	4.39	58.9	0.08
0.0114	0.00	0.0995	0.00	0.872	1.04	7.64	4.59	66.9	0.00
0.0129	0.00	0.113	0.00	0.991	1.06	8.68	4.75	76.0	0.00
0.0147	0.00	0.128	0.00	1.13	1.10	9.86	4.87	86.4	0.00
0.0167	0.00	0.146	0.00	1.28	1.17	11.2	4.95	98.1	0.00
0.0189	0.00	0.166	0.00	1.45	1.26	12.7	4.98	111	0.00
0.0215	0.00	0.188	0.00	1.65	1.37	14.5	4.95	127	0.00
0.0244	0.00	0.214	0.00	1.88	1.49	16.4	4.84	144	0.00
0.0278	0.00	0.243	0.00	2.13	1.65	18.7	4.62	163	0.00
0.0315	0.00	0.276	0.00	2.42	1.87	21.2	4.27	186	0.00
0.0358	0.00	0.314	0.00	2.75	2.14	24.1	3.80	211	0.00
0.0407	0.00	0.357	0.17	3.12	2.48	27.4	3.22	240	0.00
0.0463	0.00	0.405	0.36	3.55	2.84	31.1	2.56	272	0.00
0.0526	0.00	0.460	0.57	4.03	3.20	35.3	1.87	310	0.00
0.0597	0.00	0.523	0.76	4.58	3.55	40.1	1.23	352	0.00
0.0679	0.00	0.594	0.91	5.21	3.87	45.6	0.69	400	0.00
0.0771	0.00	0.675	0.99	5.92	4.15	51.8	0.31	454	0.00

รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบหาขนาดเฉลี่ย ครั้งที่ 3

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



Sample Sample Name CFA Sample detail File Name 650808-3382	Instrument Instrument Type Mastersizer3000 Instrument Serial No. MAL1099267 Accessory Name Hydro MV
Conditions Particle Name Fly ash (FA) Particle Refractive Index 1.560 Particle Absorption Index 1.000 Dispersant Name Water Dispersant Refractive Index 1.330 Analysis Model General Purpose Scattering Model Mie Laser Obscuration 15.71 % Ultrasound Achieved 0 % Stirrer Speed Achieved 1600 rpm Particle Notes	Result Result Units Volume Concentration 0.0117 % Uniformity 0.582 Span 1.918 Specific Surface Area 362.0 m ² /kg Weighted Residual 0.50 % Dv (10) 3.57 µm Dv (50) 12.0 µm Dv (90) 26.7 µm D [4,3] 13.8 µm D [3,2] 5.80 µm



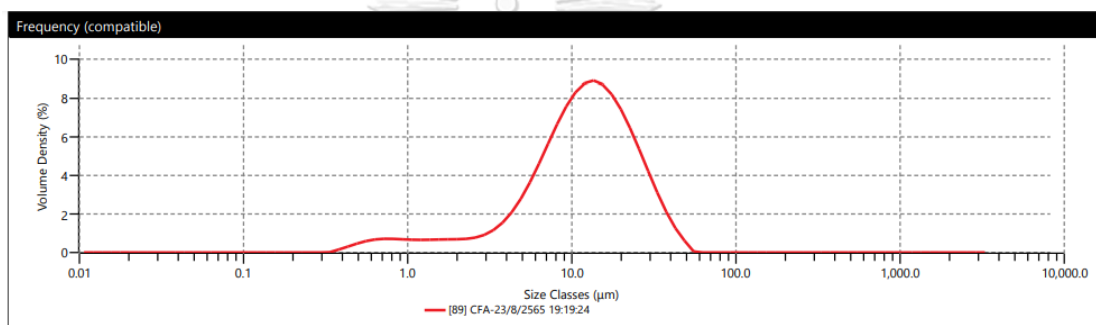
Result table									
Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0876	0.00	0.767	0.59	6.72	4.73	58.9	0.00
0.0114	0.00	0.0995	0.00	0.872	0.57	7.64	5.59	66.9	0.00
0.0129	0.00	0.113	0.00	0.991	0.55	8.68	6.35	76.0	0.00
0.0147	0.00	0.128	0.00	1.13	0.55	9.86	6.96	86.4	0.00
0.0167	0.00	0.146	0.00	1.28	0.55	11.2	7.34	98.1	0.00
0.0189	0.00	0.166	0.00	1.45	0.56	12.7	7.45	111	0.00
0.0215	0.00	0.188	0.00	1.65	0.57	14.5	7.29	127	0.00
0.0244	0.00	0.214	0.00	1.88	0.57	16.4	6.87	144	0.00
0.0278	0.00	0.243	0.00	2.13	0.59	18.7	6.23	163	0.00
0.0315	0.00	0.276	0.00	2.42	0.64	21.2	5.42	186	0.00
0.0358	0.00	0.314	0.00	2.75	0.76	24.1	4.49	211	0.00
0.0407	0.00	0.357	0.13	3.12	0.97	27.4	3.53	240	0.00
0.0463	0.00	0.405	0.26	3.55	1.29	31.1	2.58	272	0.00
0.0526	0.00	0.460	0.39	4.03	1.74	35.3	1.71	310	0.00
0.0597	0.00	0.523	0.50	4.58	2.33	40.1	0.99	352	0.00
0.0679	0.00	0.594	0.57	5.21	3.04	45.6	0.27	400	0.00
0.0771	0.00	0.675	0.60	5.92	3.86	51.8	0.00	454	0.00

รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบหาขนาดเฉลี่ยคาร์บอนेट ครั้งที่ 1

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



Sample Sample Name CFA Sample detail File Name 650808-3382	Instrument Instrument Type Mastersizer3000 Instrument Serial No. MAL1099267 Accessory Name Hydro MV
Conditions Particle Name Fly ash (FA) Particle Refractive Index 1.560 Particle Absorption Index 1.000 Dispersant Name Water Dispersant Refractive Index 1.330 Analysis Model General Purpose Scattering Model Mie Laser Obscuration 15.65 % Ultrasound Achieved 0 % Stirrer Speed Achieved 1600 rpm Particle Notes	Result Result Units Volume Concentration 0.0117 % Uniformity 0.587 Span 1.928 Specific Surface Area 360.1 m ² /kg Weighted Residual 0.47 % Dv (10) 3.59 µm Dv (50) 12.1 µm Dv (90) 26.9 µm D [4,3] 14.0 µm D [3,2] 5.83 µm



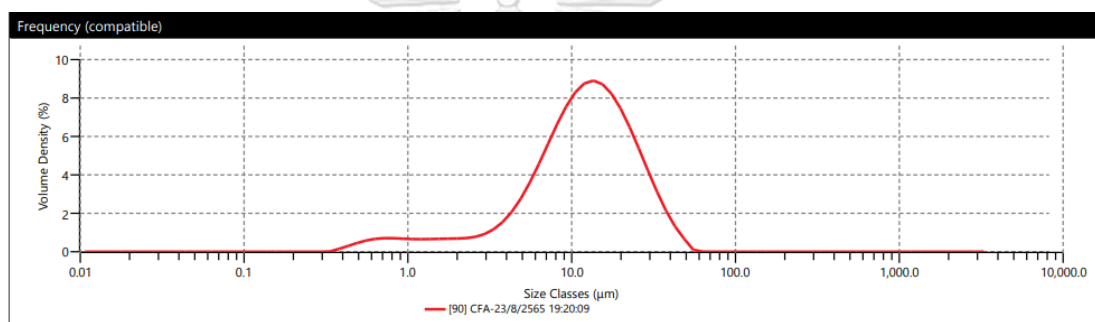
Result table									
Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0876	0.00	0.767	0.59	6.72	4.71	58.9	0.00
0.0114	0.00	0.0995	0.00	0.872	0.57	7.64	5.56	66.9	0.00
0.0129	0.00	0.113	0.00	0.991	0.55	8.68	6.34	76.0	0.00
0.0147	0.00	0.128	0.00	1.13	0.55	9.86	6.94	86.4	0.00
0.0167	0.00	0.146	0.00	1.28	0.55	11.2	7.32	98.1	0.00
0.0189	0.00	0.166	0.00	1.45	0.56	12.7	7.44	111	0.00
0.0215	0.00	0.188	0.00	1.65	0.57	14.5	7.28	127	0.00
0.0244	0.00	0.214	0.00	1.88	0.57	16.4	6.86	144	0.00
0.0278	0.00	0.243	0.00	2.13	0.59	18.7	6.21	163	0.00
0.0315	0.00	0.276	0.00	2.42	0.64	21.2	5.40	186	0.00
0.0358	0.00	0.314	0.00	2.75	0.75	24.1	4.48	211	0.00
0.0407	0.00	0.357	0.13	3.12	0.96	27.4	3.52	240	0.00
0.0463	0.00	0.405	0.25	3.55	1.28	31.1	2.59	272	0.00
0.0526	0.00	0.460	0.39	4.03	1.73	35.3	1.74	310	0.00
0.0597	0.00	0.523	0.50	4.58	2.31	40.1	1.03	352	0.00
0.0679	0.00	0.594	0.57	5.21	3.02	45.6	0.51	400	0.00
0.0771	0.00	0.675	0.60	5.92	3.84	51.8	0.00	454	0.00

รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบหาขนาดเฉลี่ยคาร์บอนัต ครั้งที่ 2

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



Sample Sample Name CFA Sample detail File Name 650808-3382	Instrument Instrument Type Mastersizer3000 Instrument Serial No. MAL1099267 Accessory Name Hydro MV
Conditions Particle Name Fly ash (FA) Particle Refractive Index 1.560 Particle Absorption Index 1.000 Dispersant Name Water Dispersant Refractive Index 1.330 Analysis Model General Purpose Scattering Model Mie Laser Obscuration 15.56 % Ultrasound Achieved 0 % Stirrer Speed Achieved 1600 rpm Particle Notes	Result Result Units Volume Concentration 0.0117 % Uniformity 0.589 Span 1.930 Specific Surface Area 358.0 m ² /kg Weighted Residual 0.39 % Dv (10) 3.61 µm Dv (50) 12.1 µm Dv (90) 27.1 µm D [4,3] 14.0 µm D [3,2] 5.86 µm



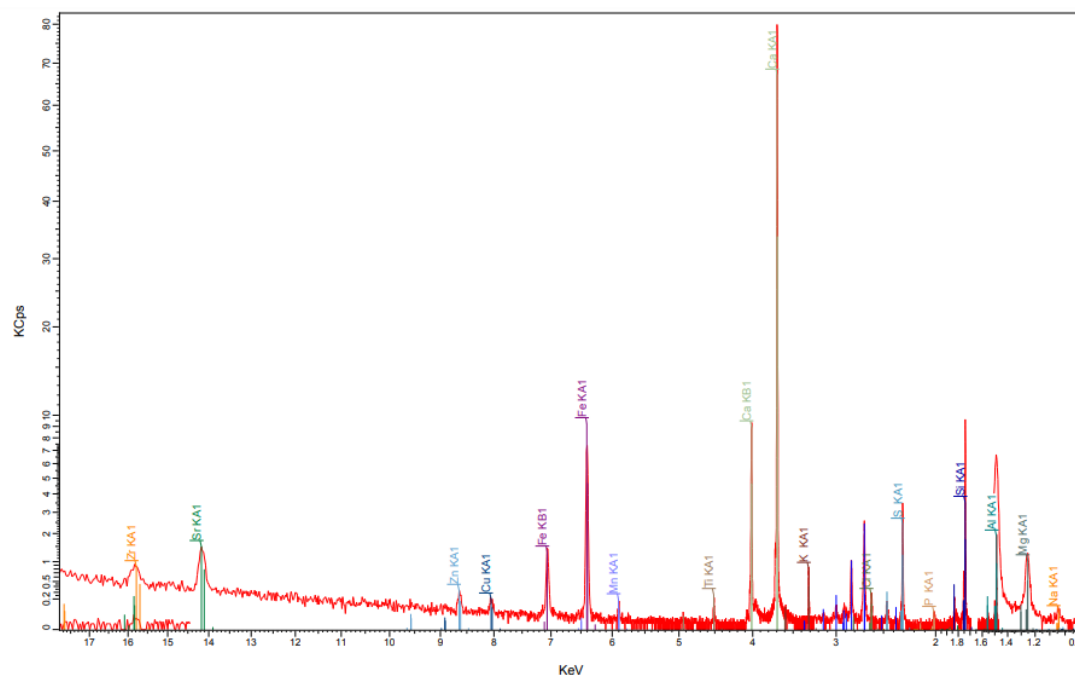
Result table											
Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0876	0.00	0.767	0.59	6.72	4.67	58.9	0.00	516	0.00
0.0114	0.00	0.0995	0.00	0.872	0.57	7.64	5.53	66.9	0.00	586	0.00
0.0129	0.00	0.113	0.00	0.991	0.55	8.68	6.31	76.0	0.00	666	0.00
0.0147	0.00	0.128	0.00	1.13	0.54	9.86	6.93	86.4	0.00	756	0.00
0.0167	0.00	0.146	0.00	1.28	0.55	11.2	7.32	98.1	0.00	859	0.00
0.0189	0.00	0.166	0.00	1.45	0.56	12.7	7.45	111	0.00	976	0.00
0.0215	0.00	0.188	0.00	1.65	0.57	14.5	7.29	127	0.00	1110	0.00
0.0244	0.00	0.214	0.00	1.88	0.57	16.4	6.87	144	0.00	1260	0.00
0.0278	0.00	0.243	0.00	2.13	0.59	18.7	6.23	163	0.00	1430	0.00
0.0315	0.00	0.276	0.00	2.42	0.64	21.2	5.41	186	0.00	1630	0.00
0.0358	0.00	0.314	0.00	2.75	0.75	24.1	4.49	211	0.00	1850	0.00
0.0407	0.00	0.357	0.12	3.12	0.96	27.4	3.53	240	0.00	2100	0.00
0.0463	0.00	0.405	0.25	3.55	1.27	31.1	2.60	272	0.00	2390	0.00
0.0526	0.00	0.460	0.38	4.03	1.71	35.3	1.77	310	0.00	2710	0.00
0.0597	0.00	0.523	0.49	4.58	2.29	40.1	1.08	352	0.00	3080	0.00
0.0679	0.00	0.594	0.56	5.21	2.99	45.6	0.56	400	0.00	3500	0.00
0.0771	0.00	0.675	0.59	5.92	3.80	51.8	0.05	454	0.00		

รูปที่ ก.7 ผลการทดสอบหาขนาดเฉลี่ยคาร์บอนเนต ครั้งที่ 3

Eval2 V2.5.500 Admin 8/16/2022 3:09:06 PM
 Sample: 650808-3383-Cement
 Measured on 8/10/2022 2:12:52 PM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac8mm

CaO	SiO2	Al2O3	SO3	Fe2O3	MgO	K2O	TiO2	Na2O	Cl	P2O5
78.8 KCps	9.6 KCps	1.9 KCps	3.4 KCps	7.3 KCps	1.2 KCps	0.7 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps
64.6 %	19.5 %	3.96 %	3.43 %	3.01 %	1.76 %	0.441 %	0.336 %	0.321 %	0.167 %	0.112 %

MnO	SrO	ZnO	CuO	ZrO2	As2O3	Pd	Dy2O3	PbO	Intensity Scal	Compton
0.1 KCps	1.1 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.4 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps		
627 PPM	365 PPM	276 PPM	164 PPM	64.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	1.055	49 %

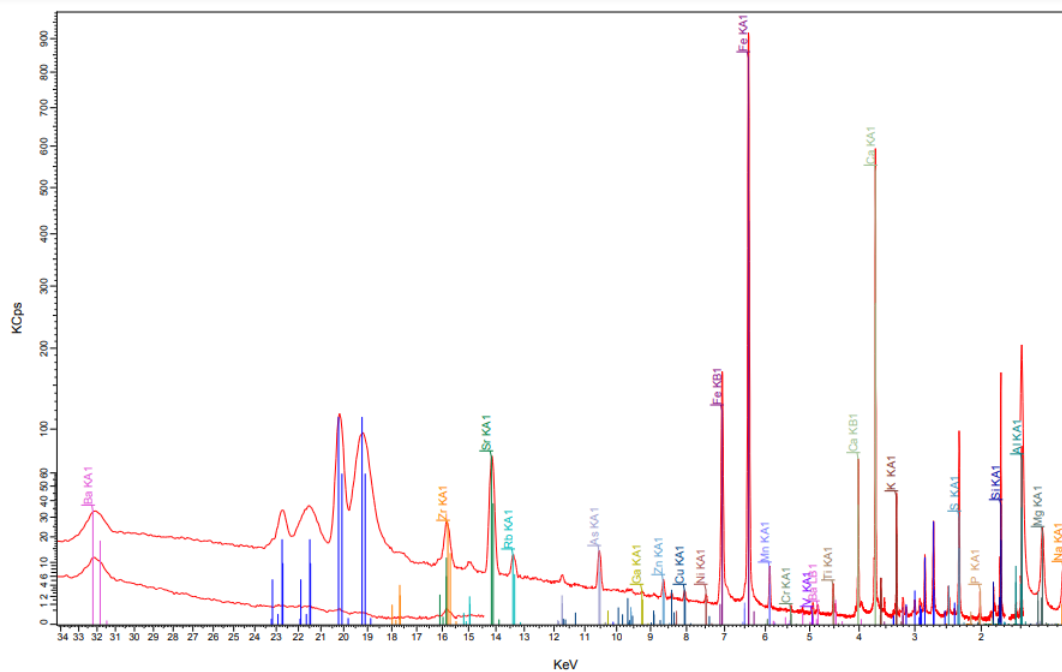


รูปที่ ก.8 ผลการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

Eval2 V2.5.500 Admin 8/16/2022 3:07:12 PM
 Sample: 650808-3383-FA
 Measured on 8/10/2022 1:55:05 PM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO
587.7 KCps	167.0 KCps	910.6 KCps	83.6 KCps	97.1 KCps	21.8 KCps	7.6 KCps	45.3 KCps	2.7 KCps	4.0 KCps	8.0 KCps
30.3 %	25.7 %	14.4 %	12.6 %	7.44 %	2.66 %	2.30 %	1.99 %	0.355 %	0.291 %	0.158 %

BaO	SrO	As ₂ O ₃	V ₂ O ₅	ZnO	Rb ₂ O	CuO	ZrO ₂	NiO	Cr ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃
0.9 KCps	67.1 KCps	10.7 KCps	0.5 KCps	3.3 KCps	6.3 KCps	1.3 KCps	18.5 KCps	1.0 KCps	0.3 KCps	0.5 KCps
0.138 %	0.135 %	444 PPM	231 PPM	209 PPM	127 PPM	108 PPM	102 PPM	100 PPM	87.1 PPM	27.7 PPM



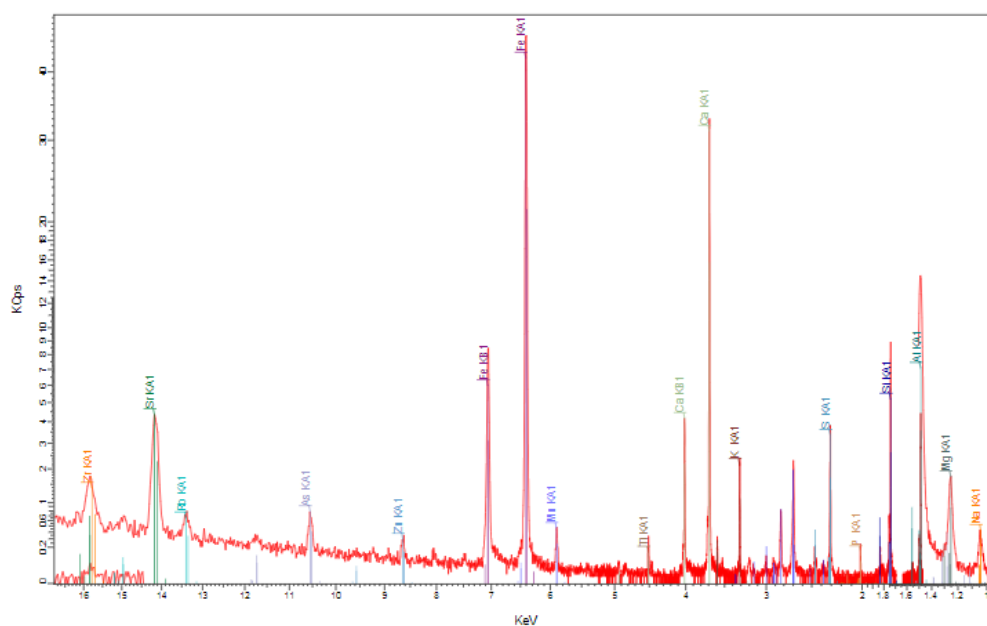
รูปที่ ก.9 ผลการทดสอบหองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอย

Eval2 V2.5.500 Admin 10/31/2022 10:17:43 AM
 Sample: 652610-4360
 Measured on 10/28/2022 4:41:20 PM
 Sample measured by Admin
 Measurement method: Best Detection-Vac8mm

CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO
33.1 KCps	9.0 KCps	45.9 KCps	4.4 KCps	3.9 KCps	1.5 KCps	0.3 KCps	2.2 KCps	0.2 KCps	0.2 KCps	0.4 KCps
30.2 %	25.1 %	14.4 %	11.9 %	5.38 %	2.88 %	1.78 %	1.71 %	0.513 %	0.219 %	0.171 %

SrO	As ₂ O ₃	ZnO	Rb ₂ O	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	CuO	Y ₂ O ₃	MoO ₃	TeO ₂
3.9 KCps	0.5 KCps	0.2 KCps	0.4 KCps	1.2 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.3 KCps
0.130 %	419 PPM	267 PPM	121 PPM	115 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM

ตัวอย่างที่ค่า %LOI = 5.5%



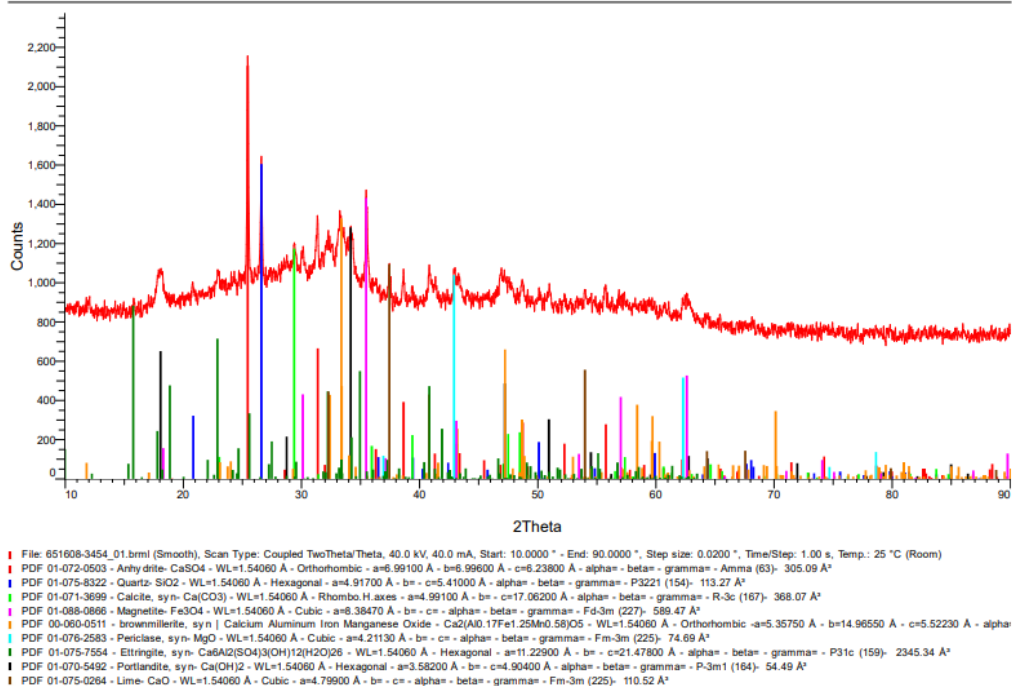
652610-4360

Eval2 V2.5.500 Admin 10/31/2022 10:18:07 AM

รูปที่ ก.10 ผลการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยคาร์บอน

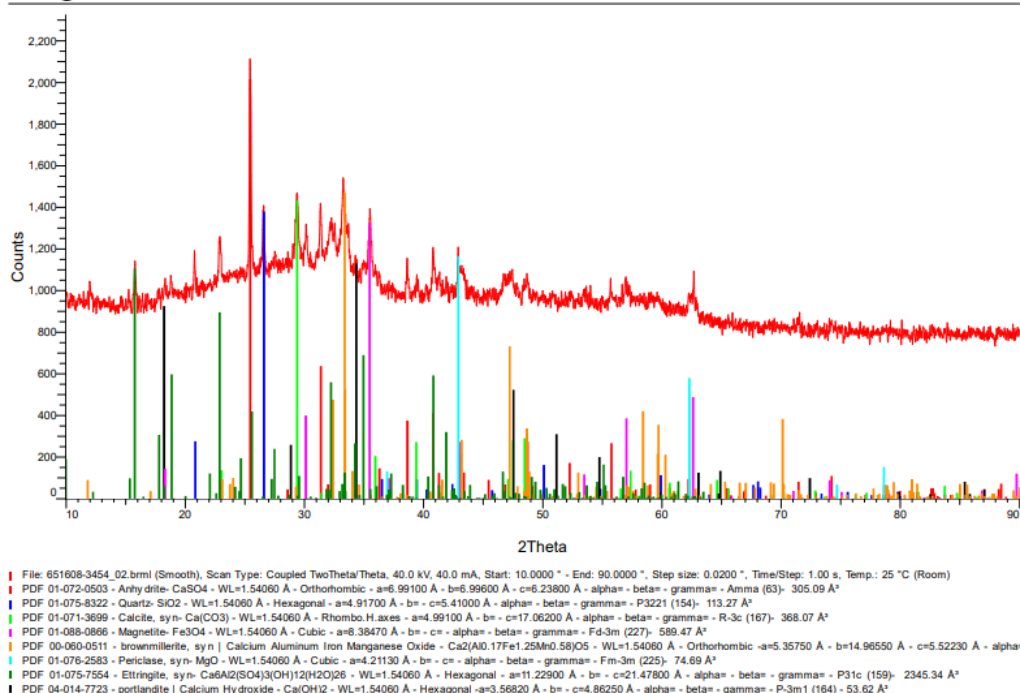
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Fresh FA

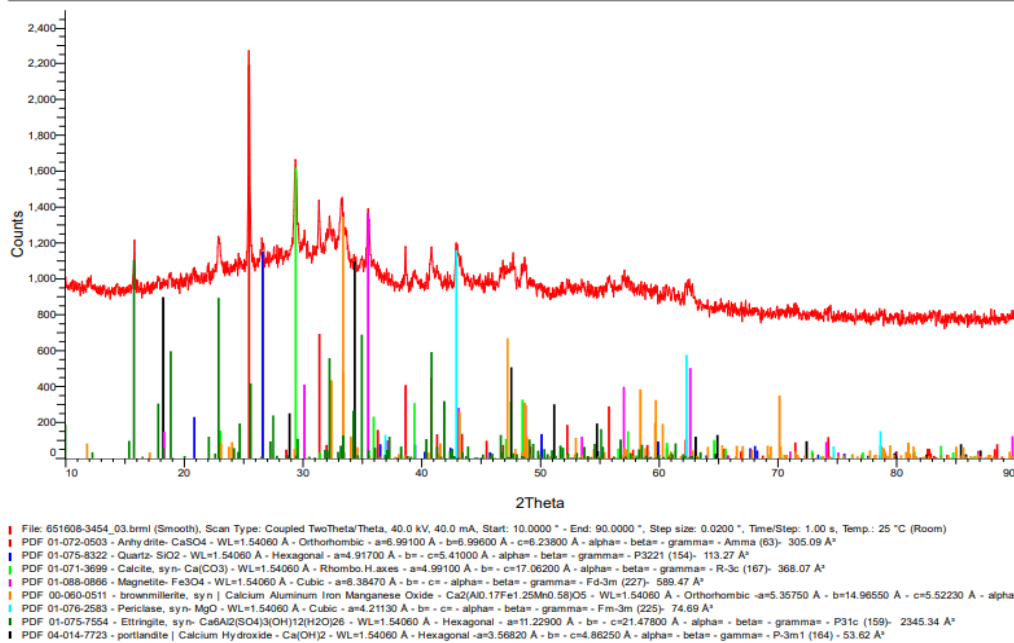


รูปที่ ก.11 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกความเป็นผลึกของเถ้าลอย

CFA@5 min

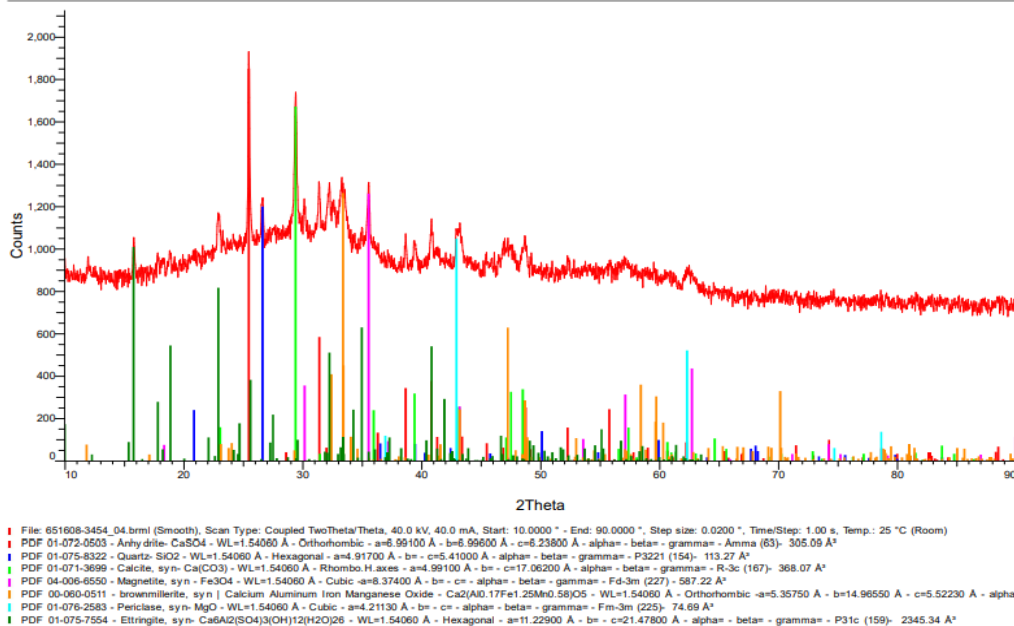
รูปที่ ก.12 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 5 นาที
ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

CFA@10 min



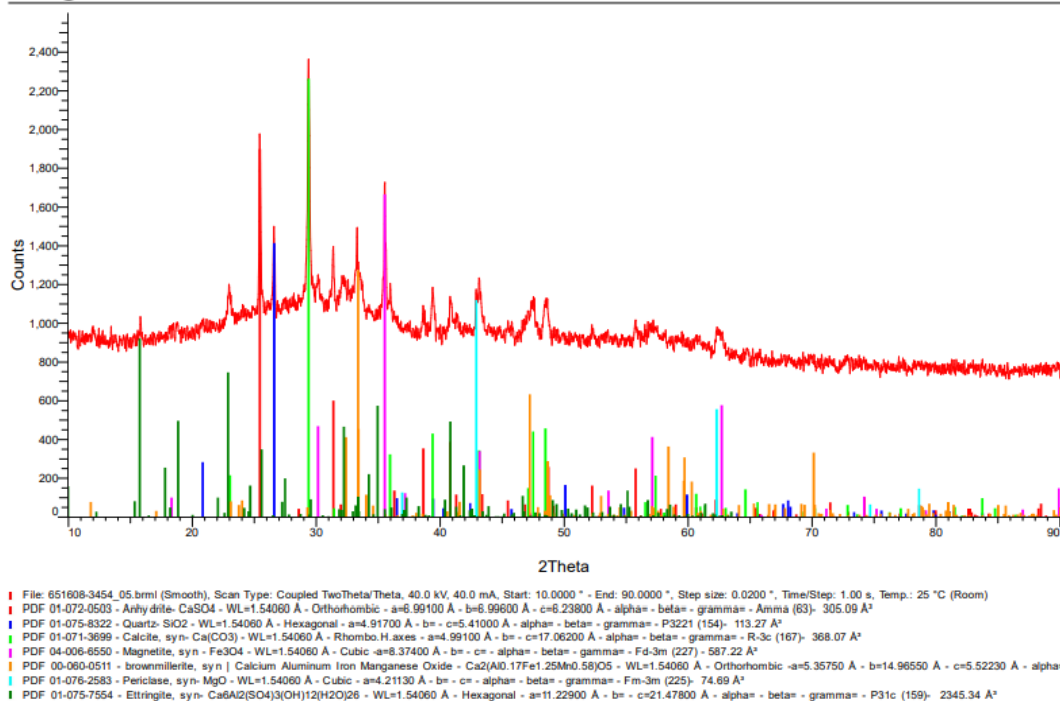
รูปที่ ก.13 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 10 นาที ที่
สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

CFA@15 min

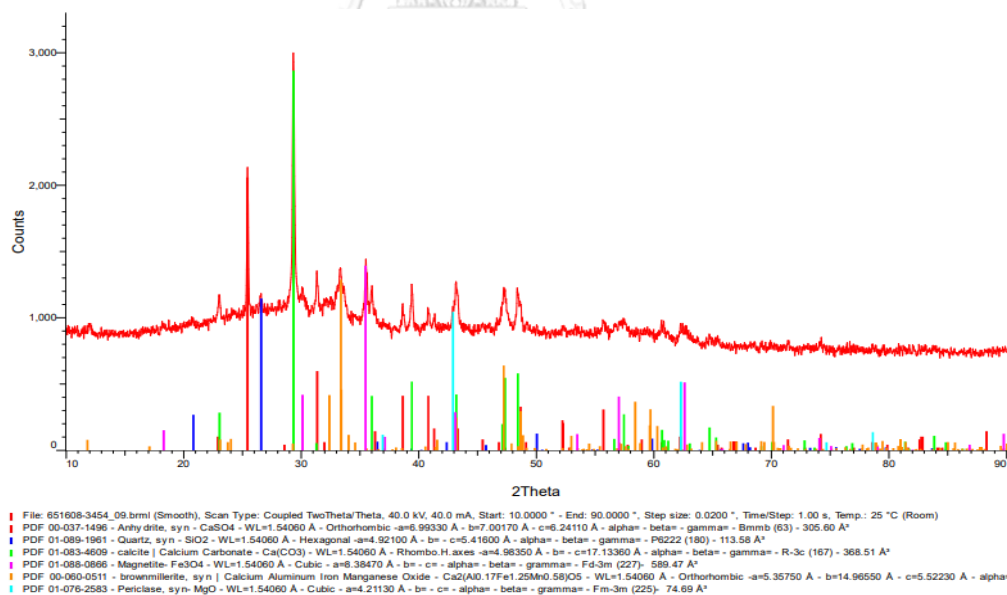


รูปที่ ก.14 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 15 นาที ที่
สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

CFA@30 min

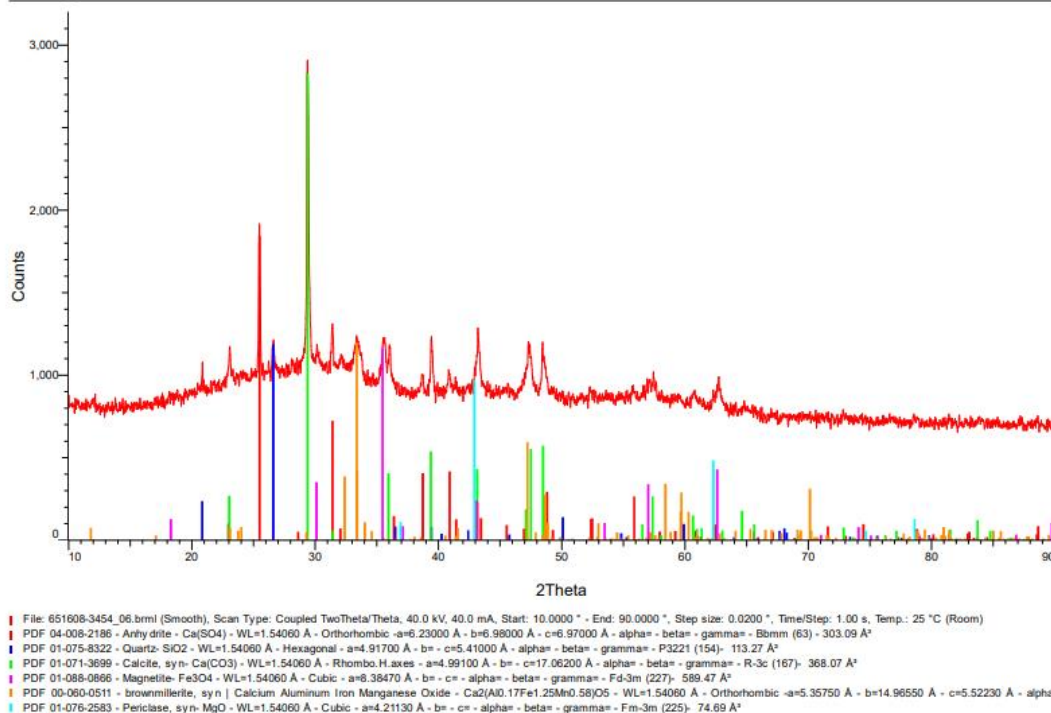


รูปที่ ก.15 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 30 นาที ที่
สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



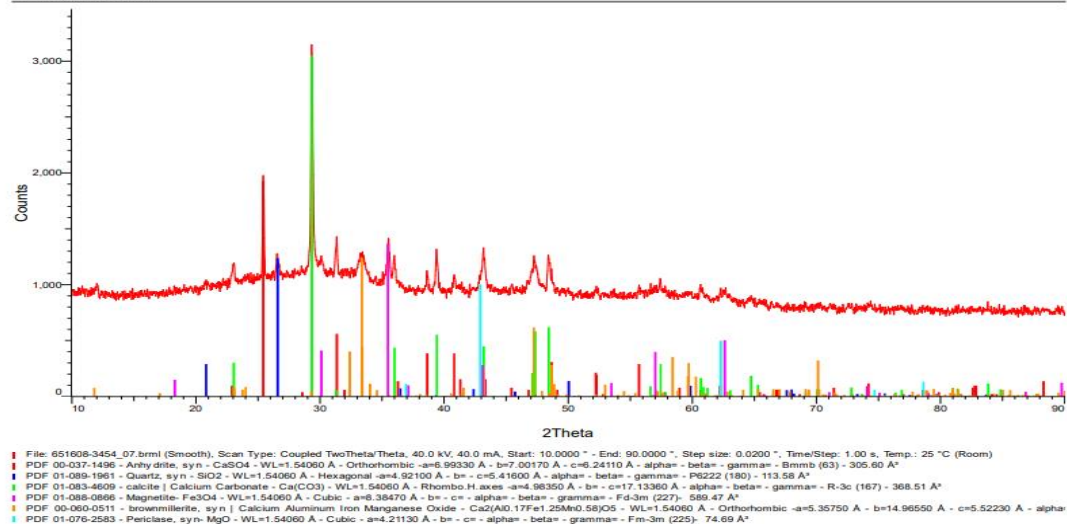
รูปที่ ก.16 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 52 นาที
(pH8.3) ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

CFA@60 min

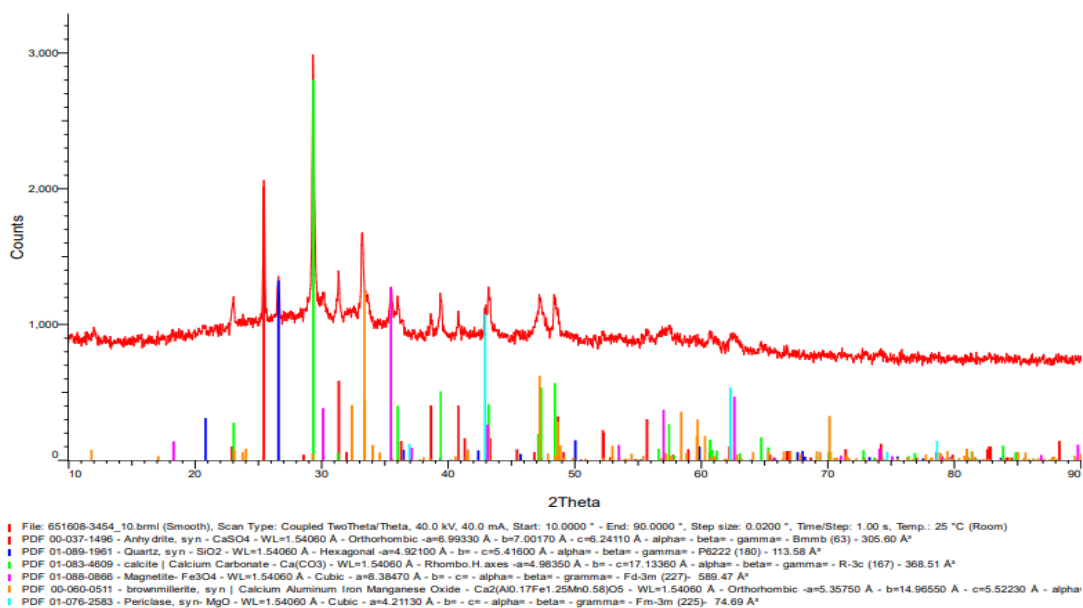


รูปที่ ก.17 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 60 นาที ที่
สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

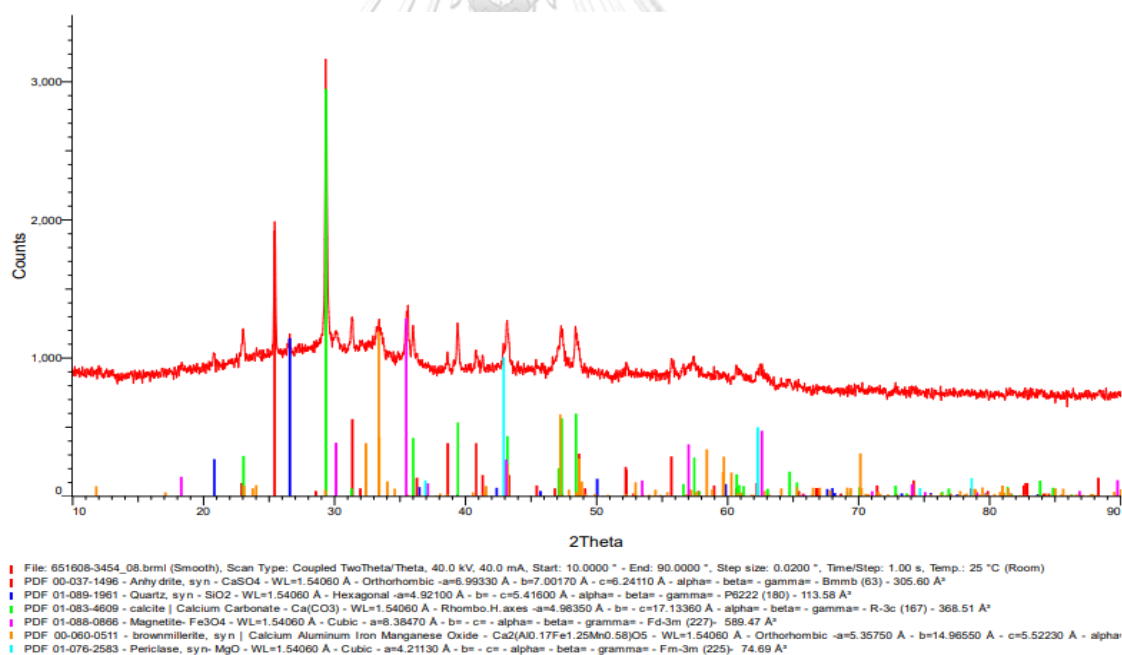
CFA@90 min



รูปที่ ก.18 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 90 นาที ที่
สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



รูปที่ ก.19 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จน pH8.3 ที่
สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 100 g/L



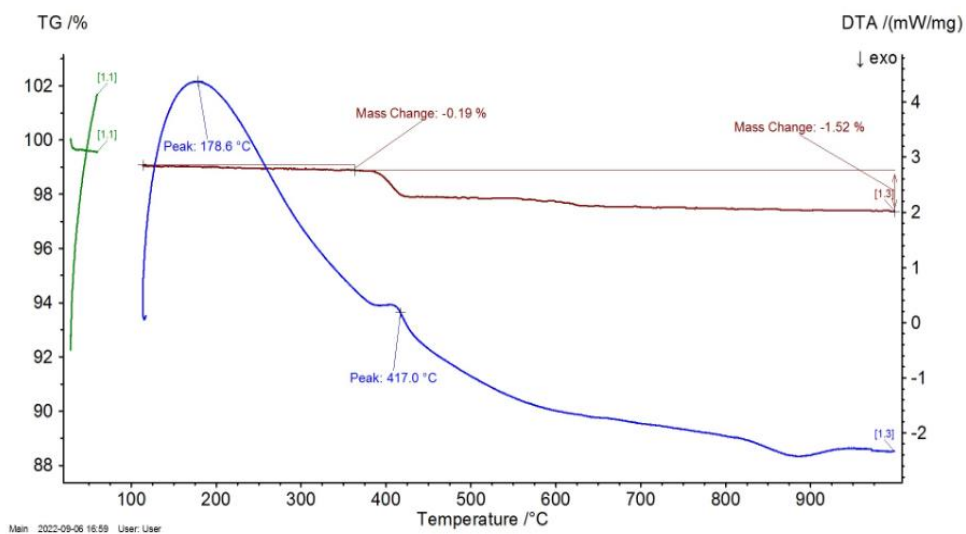
รูปที่ ก.20 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จน pH8.3 ที่
สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 200 g/L

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาต่างๆ ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

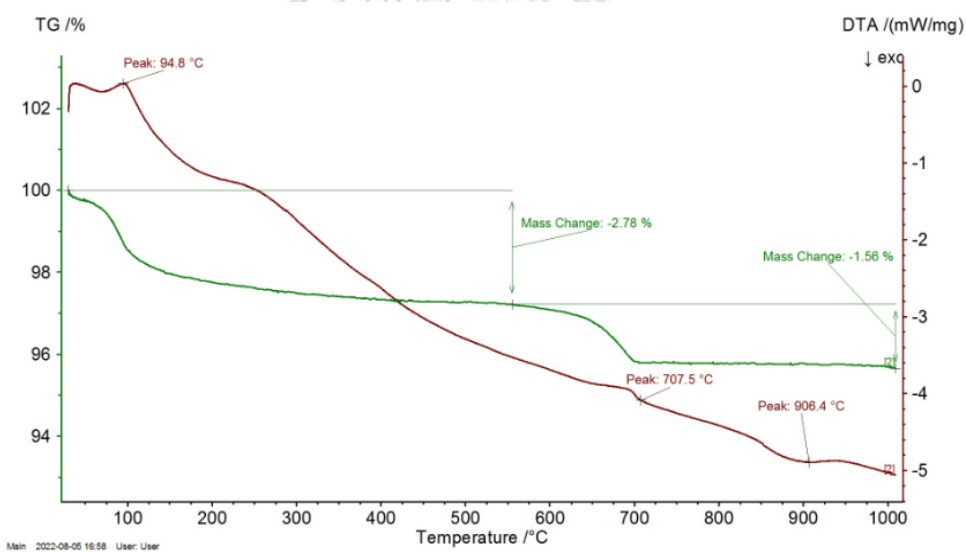
ผลึก	%โดยน้ำหนัก							
	fresh FA	5 min	10 min	15 min	30 min	52 min	60 min	90 min
Calcite	3.57	6.79	10.93	11.98	17.33	27.81	22.28	25.62
Lime	1.62	-	-	-	-	-	-	-
Portlandite	7.03	0.39	0.18	-	-	-	-	-
Ettringite	3.12	9.17	8.32	7.66	4.65	-	-	-
Magnetite	4.64	5.33	4.77	4.2	5.69	5.23	4.4	5.03
Periclase	1.88	2.05	2.42	2.03	2.13	1.91	2.01	1.74
Quartz	4.76	3.33	2.32	2.55	3.65	2.81	2.3	2.82
Anhydrite	8.65	8.26	8.42	7.58	7.75	8.7	6.37	7.4
Brownmillerite	4.04	5.16	4.08	3.92	4.13	5.42	3.47	4.14
Amorphous	60.7	58.91	58.58	60.09	54.67	48.1	59.18	53.24

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบหาความเป็นผลึกของเถ้าลอยที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 100 และ 200 g/L

Phase	%(w/w)		
	50g/L	100g/L	200g/L
Calcite	27.81	25.31	24.49
Lime	-	-	-
Portlandite	-	-	-
Ettringite	-	-	-
Magnetite	5.23	4.04	4.9
Periclase	1.91	1.38	1.85
Quartz	2.81	3.25	1.99
Anhydrite	8.7	8.25	7.25
Brownmillerite	5.42	5.4	3.57
Amorphous	48.1	52.37	55.96

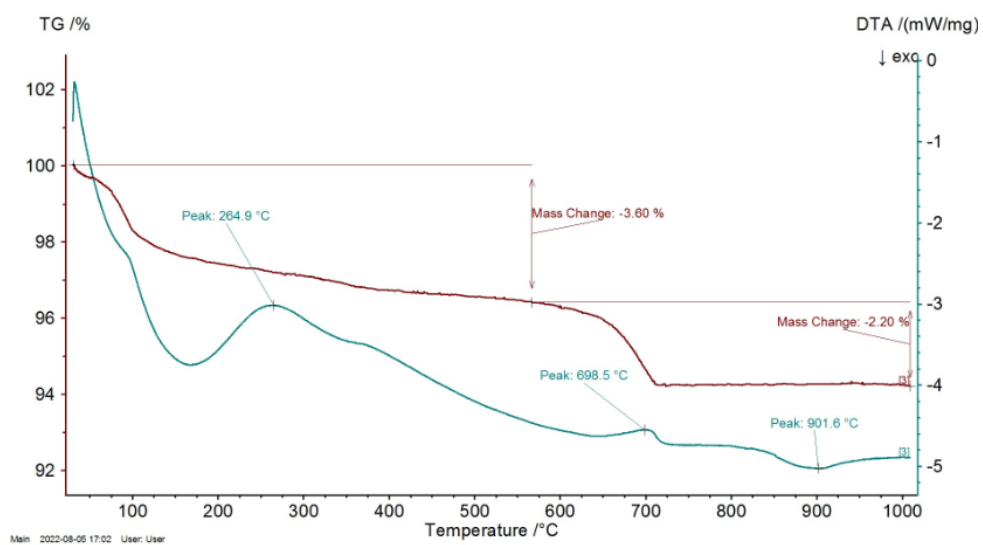


รูปที่ ก.21 แสดงกราฟ TG-DTA ของเถ้าลอย

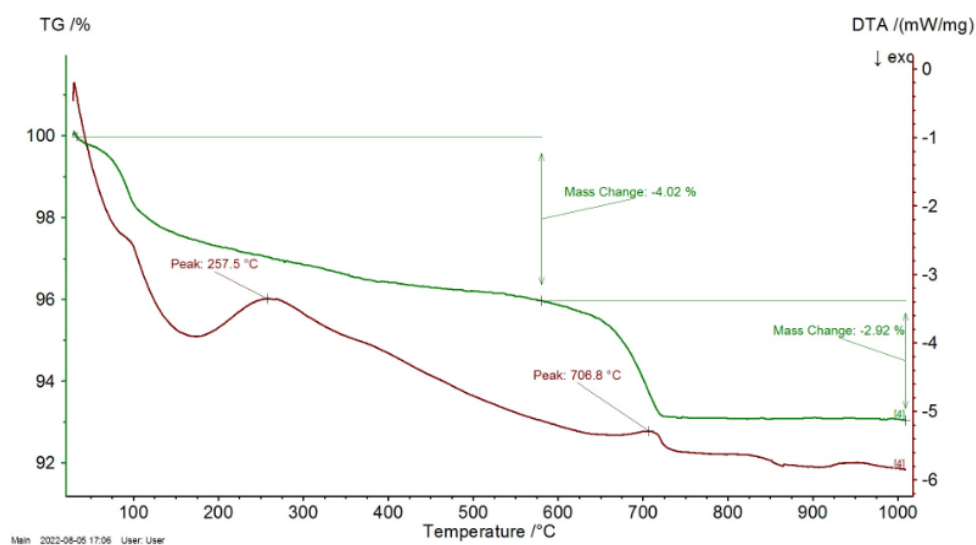


รูปที่ ก.22 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 5 นาที ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ

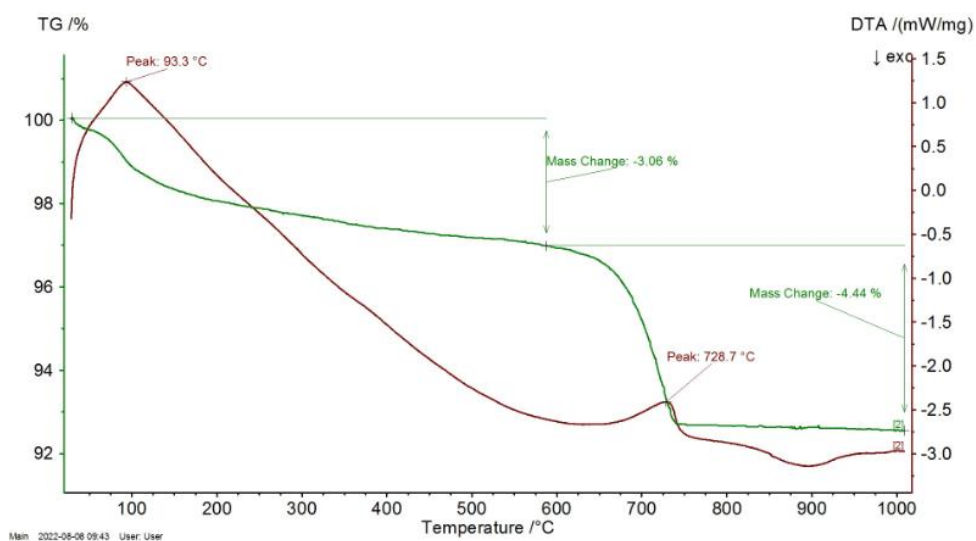
50 g/L



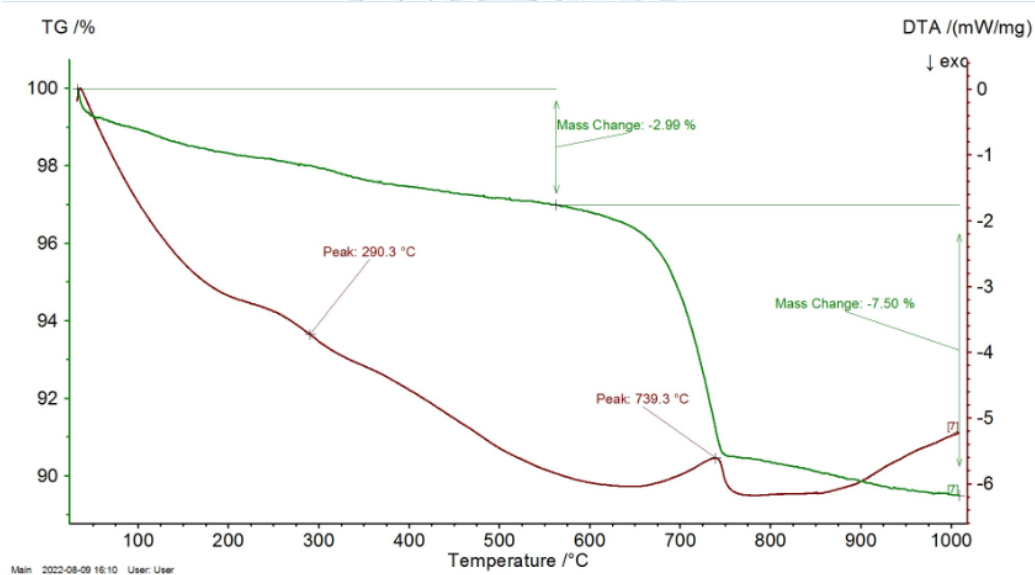
รูปที่ ก.23 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 10 นาที ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



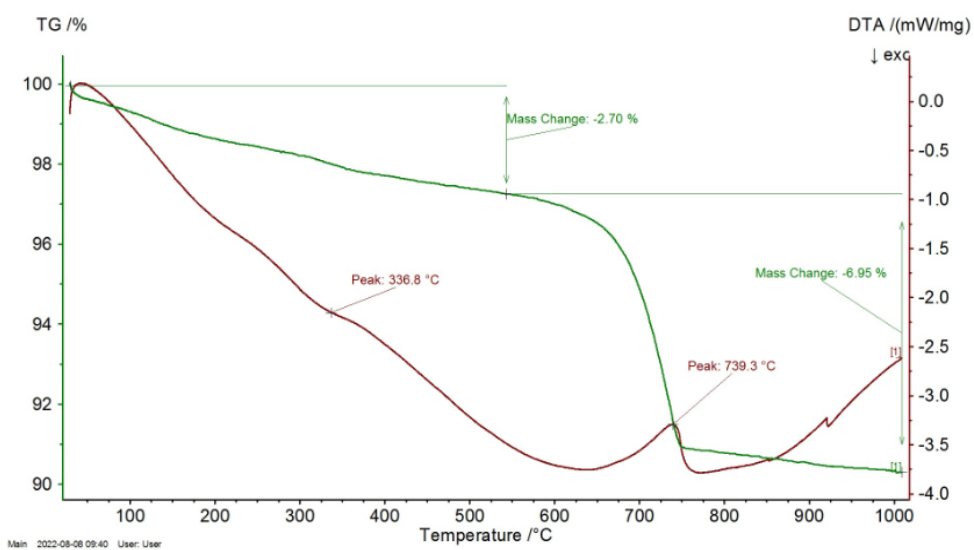
รูปที่ ก.24 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 15 นาที ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



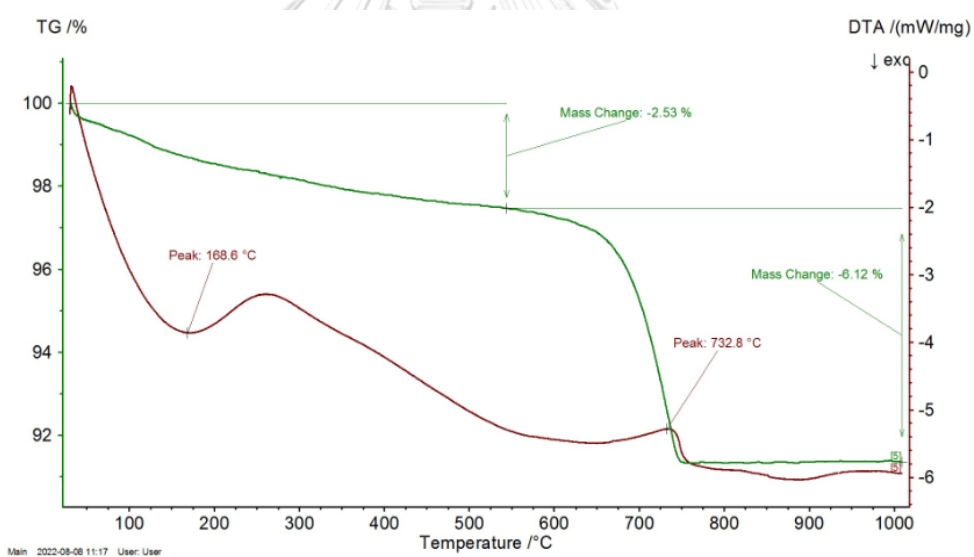
รูปที่ ก.25 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 30 นาที ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



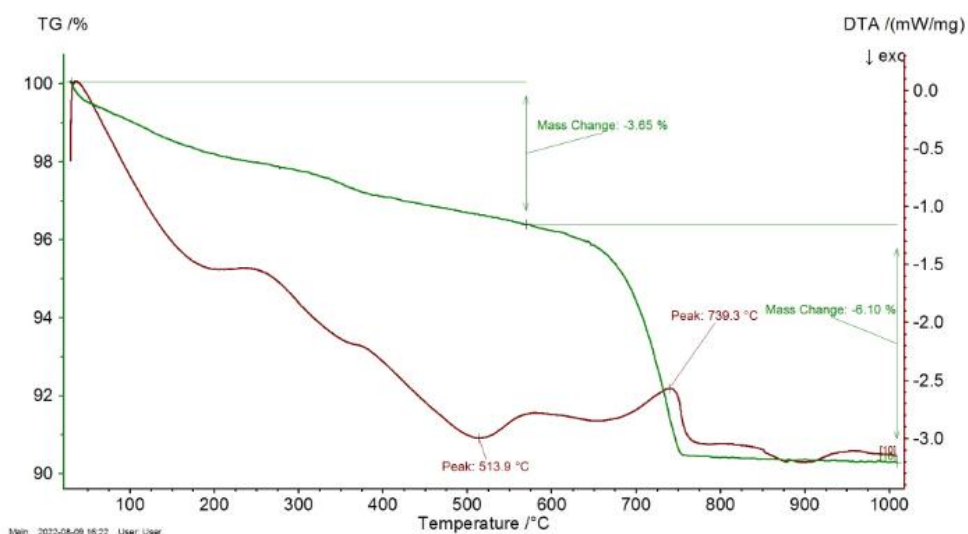
รูปที่ ก.26 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 52 นาที (pH8.3) ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



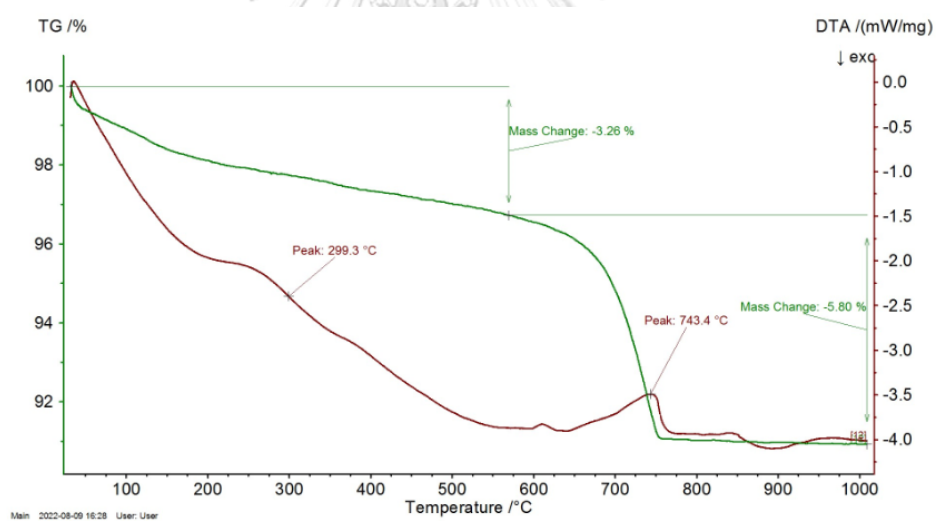
รูปที่ ก.27 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 60 นาที ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



รูปที่ ก.28 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ 90 นาที ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L



รูปที่ ก.29 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จน pH8.3 ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อ
น้ำ 100 g/L



รูปที่ ก.30 กราฟ TG-DTA ของเถ้าลอยที่กักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จน pH8.3 ที่สัดส่วนเถ้าลอยต่อ
น้ำ 200 g/L

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนักและความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (TG-DTA)

ตัวอย่าง	น้ำหนักเริ่มต้น (mg)	ร้อยละโดยน้ำหนักตัวอย่าง (%)			น้ำหนักตัวอย่าง (mg)		
		ที่ 105 °C	ที่ 500°C	ที่ 1000 °C	ที่ 105 °C	ที่ 500°C	ที่ 1000 °C
เกลือลอย	14.452	99.29332	97.86881	97.36667	14.35	14.144	14.071
CFA 5 นาที่	20.939	98.44240	97.27302	95.69197	20.613	20.368	20.037
CFA 10 นาที่	19.709	98.20324	96.57010	94.25152	19.355	19.033	18.576
CFA 15 นาที่	21.141	98.19677	96.20642	93.07507	20.76	20.339	19.677
CFA 30 นาที่	21.689	98.80586	97.19212	92.56337	21.43	21.08	20.076
CFA 52 นาที่ (pH 8.3)	19.787	99.19676	97.33663	90.22108	19.628	19.260	17.852
	20.835	98.90554	97.16823	89.51760	20.607	20.245	18.651
	19.900	99.36190	97.75377	91.28140	19.773	19.453	18.165
CFA 60 นาที่	21.528	99.27509	97.38955	90.32419	19.628	19.260	17.852
	20.210	99.29873	97.59030	90.48986	20.607	20.245	18.651
	21.447	99.30016	97.89248	91.57917	19.773	19.453	18.165
CFA 90 นาที่	21.057	99.19738	97.56376	91.37104	20.888	20.544	19.24
100 g/L (pH 8.3)	20.695	98.44385	95.21624	88.60111	20.373	19.705	18.336
	20.549	98.99788	96.70057	90.29150	20.343	19.871	18.554
	20.080	99.08407	97.25856	91.06244	19.896	19.530	18.285
200 g/L (pH 8.3)	21.489	98.85967	97.01705	90.93024	21.244	20.848	19.540
	21.553	98.83537	96.92386	90.79475	21.302	20.890	19.569
	22.245	98.74901	96.89199	90.46078	21.967	21.554	20.123

ตารางที่ ก.10 ผลการหาขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย 100 ฟอง

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
1	1	61.088	112.709	7	0.625	0.736	0.660
	2	61.710	112.775	7			
	3	61.399	112.331	7			
	4	61.332	113.064	7			
2	5	62.310	112.820	7	0.533	0.779	0.605
	6	62.843	112.842	7			
	7	62.621	112.464	7			
	8	62.576	113.242	7			
3	9	61.643	111.531	7	0.558	0.755	0.617
	10	62.199	111.575	7			
	11	61.954	111.220	7			
	12	61.932	111.975	7			
4	13	61.776	109.753	7	0.578	0.888	0.667
	14	62.354	109.753	7			
	15	62.065	109.398	7			
	16	62.043	110.286	7			
5	17	61.576	107.509	7	0.489	0.756	0.566
	18	62.065	107.509	7			
	19	61.865	107.064	7			
	20	61.843	107.82	7			
6	21	62.821	109.198	7	0.511	0.778	0.588
	22	63.332	109.220	7			
	23	63.132	108.798	7			
	24	63.087	109.575	7			
7	25	63.576	111.509	7	0.335	0.489	0.380
	26	63.910	111.531	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	27	63.754	111.331	7			
	28	63.776	111.820	7			
	29	64.776	112.464	7			
	30	65.176	112.442	7			
8	31	64.976	112.131	7	0.401	0.666	0.475
	32	64.976	112.797	7			
	33	66.376	112.064	7			
	34	66.843	112.109	7			
9	35	66.687	111.731	7	0.469	0.819	0.565
	36	66.510	112.531	7			
	37	66.843	112.909	7			
	38	67.310	112.864	7			
10	39	67.132	112.642	7	0.469	0.555	0.496
	40	67.110	113.197	7			
	41	69.643	112.109	7			
	42	70.065	112.220	7			
11	43	69.932	111.953	7	0.436	0.591	0.483
	44	69.732	112.509	7			
	45	71.465	111.798	7			
	46	71.932	111.820	7			
12	47	71.776	111.575	7	0.468	0.515	0.483
	48	71.71	112.086	7			
	49	37.023	115.355	7			
	50	37.401	115.400	7			
13	51	37.223	115.178	7	0.381	0.426	0.395
	52	37.290	115.599	7			
	53	31.461	73.913	7			
	54	31.461	73.913	7			
14	53	31.461	73.913	7	0.470	0.548	0.495

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	54	31.928	73.969	7			
	55	31.728	73.736	7			
	56	31.661	74.280	7			
15	57	75.643	116.820	7	0.650	0.863	0.714
	58	76.287	116.909	7			
	59	76.021	116.442	7			
	60	75.843	117.286	7			
16	61	68.865	118.153	7	0.641	0.837	0.701
	62	69.487	118.308	7			
	63	69.221	117.886	7			
	64	69.065	118.708	7			
17	65	73.776	118.797	7	0.958	1.409	1.090
	66	74.732	118.864	7			
	67	74.154	118.02	7			
	68	74.309	119.42	7			
18	69	72.909	107.420	7	0.563	0.800	0.633
	70	73.465	107.509	7			
	71	73.176	107.064	7			
	72	73.154	107.864	7			
19	73	73.932	107.575	7	0.466	0.851	0.570
	74	74.398	107.575	7			
	75	74.221	107.131	7			
	76	74.109	107.975	7			
20	77	73.643	105.82	7	0.566	1.072	0.700
	78	74.198	105.931	7			
	79	73.976	105.309	7			
	80	73.865	106.375	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
21	81	60.954	115.420	7	0.446	0.580	0.486
	82	61.399	115.397	7			
	83	61.221	115.153	7			
	84	61.176	115.731	7			
22	85	60.910	117.397	7	0.467	0.622	0.514
	86	61.376	117.375	7			
	87	61.132	117.131	7			
	88	61.110	117.753	7			
23	89	60.399	118.642	7	0.355	0.423	0.376
	90	60.754	118.642	7			
	91	60.599	118.486	7			
	92	60.576	118.908	7			
24	93	60.643	126.108	7	0.424	0.669	0.494
	94	61.065	126.153	7			
	95	60.888	125.886	7			
	96	60.843	126.553	7			
25	97	60.799	124.553	7	0.646	0.956	0.736
	98	61.443	124.597	7			
	99	61.132	124.019	7			
	100	61.154	124.975	7			
26	101	62.332	124.642	7	0.491	0.823	0.583
	102	62.821	124.597	7			
	103	62.643	124.219	7			
	104	62.621	125.042	7			
27	105	62.710	127.175	7	0.423	0.876	0.539
	106	63.132	127.153	7			
	107	62.865	126.753	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	108	62.999	127.619	7			
28	109	62.599	129.197	7	0.449	0.497	0.464
	110	63.043	129.13	7			
	111	62.799	128.93	7			
	112	62.887	129.419	7			
29	113	63.421	128.353	7	0.378	0.628	0.448
	114	63.799	128.353	7			
	115	63.599	128.086	7			
	116	63.687	128.708	7			
30	117	60.821	130.064	7	0.533	0.675	0.577
	118	61.354	130.086	7			
	119	61.154	129.753	7			
	120	61.043	130.419	7			
31	121	63.132	130.686	7	0.489	0.711	0.554
	122	63.621	130.664	7			
	123	63.421	130.286	7			
	124	63.399	130.997	7			
32	125	68.621	129.486	7	0.557	0.689	0.598
	126	69.176	129.53	7			
	127	68.843	129.108	7			
	128	68.843	129.797	7			
33	129	68.643	126.731	7	0.912	0.845	0.889
	130	69.554	126.775	7			
	131	69.110	126.375	7			
	132	69.065	127.219	7			
34	133	70.621	126.419	7	0.777	1.026	0.853
	134	71.398	126.442	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	135	70.932	125.842	7			
	136	71.021	126.864	7			
35	137	71.710	125.464	7	0.628	0.782	0.676
	138	72.332	125.553	7			
	139	72.065	125.108	7			
	140	71.865	125.864	7			
36	141	64.999	125.553	7	0.537	0.689	0.584
	142	65.532	125.619	7			
	143	65.243	125.219	7			
	144	65.221	125.908	7			
37	145	63.087	125.553	7	0.645	0.805	0.694
	146	63.732	125.553	7			
	147	63.443	125.242	7			
	148	63.354	126.042	7			
38	149	63.154	123.131	7	0.800	0.921	0.838
	150	63.954	123.131	7			
	151	63.710	122.664	7			
	152	63.576	123.575	7			
39	153	60.310	122.175	7	0.466	0.581	0.501
	154	60.776	122.175	7			
	155	60.510	121.820	7			
	156	60.576	122.397	7			
40	157	62.088	121.242	7	0.513	0.467	0.497
	158	62.599	121.286	7			
	159	62.399	121.020	7			
	160	62.376	121.486	7			
41	161	74.532	123.242	7	0.475	0.570	0.505

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	162	75.006	123.271	7			
	163	74.798	123.094	7			
	164	74.709	123.657	7			
42	165	75.598	124.931	7	0.505	0.622	0.541
	166	76.102	124.901	7			
	167	75.835	124.694	7			
	168	75.835	125.316	7			
43	169	74.028	121.760	7	0.652	0.771	0.689
	170	74.680	121.760	7			
	171	74.384	121.375	7			
	172	74.354	122.145	7			
44	173	69.732	120.516	7	0.327	0.389	0.347
	174	70.058	120.486	7			
	175	69.880	120.368	7			
	176	69.939	120.753	7			
45	177	70.087	122.145	7	0.415	0.563	0.459
	178	70.502	122.145	7			
	179	70.324	121.908	7			
	180	70.324	122.471	7			
46	181	65.554	120.664	7	0.357	0.504	0.401
	182	65.910	120.694	7			
	183	65.791	120.427	7			
	184	65.791	120.931	7			
47	185	64.724	120.131	7	0.326	0.564	0.391
	186	65.050	120.131	7			
	187	64.932	119.805	7			
	188	64.902	120.368	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
48	189	57.021	118.975	7	0.478	0.534	0.496
	190	57.495	119.034	7			
	191	57.317	118.768	7			
	192	57.288	119.301	7			
49	193	67.302	120.620	7	0.416	0.565	0.461
	194	67.717	120.649	7			
	195	67.539	120.323	7			
	196	67.495	120.886	7			
50	197	66.650	120.057	7	0.460	0.593	0.501
	198	67.110	120.057	7			
	199	66.873	119.790	7			
	200	66.873	120.383	7			
51	201	65.643	116.338	7	0.370	0.460	0.398
	202	66.013	116.353	7			
	203	65.850	116.160	7			
	204	65.850	116.620	7			
52	205	68.932	113.953	7	0.388	0.358	0.377
	206	69.317	113.909	7			
	207	69.110	113.805	7			
	208	69.065	114.160	7			
53	209	67.317	116.116	7	0.459	0.489	0.469
	210	67.776	116.101	7			
	211	67.510	115.879	7			
	212	67.495	116.368	7			
54	213	76.843	115.509	7	0.444	0.515	0.467
	214	77.287	115.509	7			
	215	77.021	115.286	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	216	77.087	115.797	7			
55	217	77.087	120.953	7	0.314	0.423	0.347
	218	77.398	120.908	7			
	219	77.243	120.731	7			
	220	77.265	121.153	7			
56	221	73.865	120.531	7	0.468	0.620	0.514
	222	74.332	120.553	7			
	223	74.198	120.286	7			
	224	74.043	120.886	7			
57	225	64.910	103.220	7	0.535	0.692	0.583
	226	65.443	103.175	7			
	227	65.176	102.842	7			
	228	65.110	103.531	7			
58	229	66.799	105.264	7	0.535	0.673	0.577
	230	67.332	105.309	7			
	231	67.065	104.931	7			
	232	66.976	105.598	7			
59	233	67.576	104.153	7	0.359	0.511	0.404
	234	67.932	104.109	7			
	235	67.776	103.909	7			
	236	67.776	104.42	7			
60	237	70.887	100.531	7	0.312	0.488	0.362
	238	71.198	100.553	7			
	239	71.065	100.376	7			
	240	71.043	100.864	7			
61	241	71.932	98.931	7	0.355	0.689	0.443
	242	72.287	98.931	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	243	72.176	98.598	7			
	244	72.154	99.287	7			
62	245	73.621	99.464	7	0.378	0.667	0.456
	246	73.998	99.442	7			
	247	73.798	99.109	7			
	248	73.798	99.776	7			
63	249	78.043	99.753	7	0.577	0.711	0.619
	250	78.620	99.776	7			
	251	78.376	99.487	7			
	252	78.354	100.198	7			
64	253	78.465	104.775	7	0.356	0.401	0.370
	254	78.820	104.753	7			
	255	78.643	104.575	7			
	256	78.665	104.975	7			
65	257	77.043	102.153	7	0.467	0.556	0.495
	258	77.509	102.176	7			
	259	77.332	101.953	7			
	260	77.332	102.509	7			
66	261	76.109	98.309	7	0.446	0.467	0.453
	262	76.554	98.331	7			
	263	76.354	98.153	7			
	264	76.354	98.620	7			
67	265	77.132	96.798	7	0.403	0.378	0.394
	266	77.532	96.753	7			
	267	77.376	96.598	7			
	268	77.376	96.976	7			
68	269	77.709	96.398	7	0.275	0.311	0.287

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	270	77.976	96.331	7			
	271	77.887	96.220	7			
	272	77.887	96.531	7			
69	273	71.598	101.998	7	0.600	0.577	0.593
	274	72.198	102.020	7			
	275	71.887	101.776	7			
	276	71.865	102.353	7			
70	277	64.043	94.235	7	0.564	0.622	0.583
	278	64.606	94.265	7			
	279	64.369	93.998	7			
	280	64.369	94.620	7			
71	281	66.265	93.791	7	0.446	0.504	0.465
	282	66.710	93.761	7			
	283	66.502	93.553	7			
	284	66.502	94.057	7			
72	285	65.821	92.250	7	0.475	0.504	0.484
	286	66.295	92.279	7			
	287	66.117	91.983	7			
	288	66.117	92.487	7			
73	289	63.480	92.339	7	0.446	0.482	0.458
	290	63.925	92.368	7			
	291	63.806	92.191	7			
	292	63.717	92.665	7			
74	293	62.295	90.887	7	0.505	0.771	0.581
	294	62.799	90.916	7			
	295	62.621	90.531	7			
	296	62.621	91.302	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
75	297	60.365	92.265	7	0.534	0.970	0.652
	298	60.899	92.265	7			
	299	60.543	91.820	7			
	300	60.621	92.787	7			
76	301	59.399	92.520	7	0.433	0.367	0.410
	302	59.832	92.509	7			
	303	59.588	92.365	7			
	304	59.610	92.731	7			
77	305	60.421	91.076	7	0.389	0.367	0.382
	306	60.810	91.087	7			
	307	60.599	90.887	7			
	308	60.599	91.254	7			
78	309	59.388	89.976	7	0.456	0.856	0.563
	310	59.843	90.009	7			
	311	59.610	89.620	7			
	312	59.599	90.476	7			
79	313	60.621	89.398	7	0.484	0.678	0.542
	314	61.099	89.320	7			
	315	60.799	89.031	7			
	316	60.788	89.709	7			
80	317	62.976	87.531	7	0.824	1.200	0.934
	318	63.799	87.576	7			
	319	63.399	86.998	7			
	320	63.421	88.198	7			
81	321	61.199	88.287	7	0.400	0.468	0.422
	322	61.599	88.287	7			
	323	61.443	88.065	7			

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	324	61.488	88.531	7			
82	325	60.843	87.287	7	0.400	0.534	0.440
	326	61.243	87.287	7			
	327	61.043	87.131	7			
	328	61.043	87.665	7			
83	329	60.954	86.376	7	0.357	0.541	0.410
	330	61.310	86.398	7			
	331	61.176	86.220	7			
	332	61.088	86.754	7			
84	333	67.154	88.309	7	0.444	0.714	0.520
	334	67.598	88.309	7			
	335	67.354	87.931	7			
	336	67.421	88.642	7			
85	337	77.899	89.220	7	0.067	0.800	0.153
	338	77.899	89.287	7			
	339	77.749	88.954	7			
	340	78.115	89.665	7			
86	341	64.665	89.242	7	0.422	0.702	0.500
	342	65.087	89.242	7			
	343	64.999	88.865	7			
	344	64.865	89.554	7			
87	345	68.265	90.042	7	0.622	0.866	0.695
	346	68.887	90.020	7			
	347	68.465	89.665	7			
	348	68.487	90.531	7			
	349	67.954	86.376	7	0.357	0.541	0.410
	350	68.310	86.398	7			

พ้องที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	351	68.176	86.220	7			
	352	68.088	86.754	7			
89	353	67.910	94.376	7	0.711	1.025	0.803
	354	68.621	94.376	7			
	355	68.310	93.953	7			
	356	68.243	94.976	7			
90	357	65.176	96.931	7	0.469	0.623	0.516
	358	65.643	96.976	7			
	359	65.399	96.642	7			
	360	65.421	97.265	7			
91	361	64.199	96.776	7	0.672	1.001	0.767
	362	64.865	96.865	7			
	363	64.576	96.398	7			
	364	64.532	97.398	7			
92	365	73.198	93.776	7	0.689	0.935	0.763
	366	73.887	93.753	7			
	367	73.509	93.331	7			
	368	73.465	94.265	7			
93	369	73.021	95.376	7	0.511	0.779	0.588
	370	73.532	95.376	7			
	371	73.309	95.087	7			
	372	73.265	95.865	7			
94	373	76.798	95.131	7	0.357	0.558	0.414
	374	77.154	95.153	7			
	375	76.976	94.931	7			
	376	77.021	95.487	7			
95	377	76.221	92.242	7	0.602	0.644	0.615

ตารางที่ ก.11 ผลการหาขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ย 100 ฟองภายหลังจากการใช้ในกระบวนการกักเก็บคาร์บอน

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
1	1	32.860	98.339	4	0.509	0.516	0.511
	2	33.368	98.364	4	0.335	1.216	0.515
	3	33.127	98.131	4	0.516	0.484	0.505
	4	33.118	98.647	4	1.216	0.385	0.829
2	5	32.694	97.507	4	0.484	0.551	0.505
	6	33.177	97.532	4	0.385	1.917	0.658
	7	32.877	97.290	4	0.551	0.410	0.499
	8	32.910	97.840	4	1.917	0.287	1.018
3	9	31.040	98.264	4	0.410	0.438	0.419
	10	31.450	98.259	4	0.287	3.563	0.664
	11	31.256	98.048	4	0.438	0.758	0.526
	12	31.239	98.486	4	3.563	0.535	1.894
4	13	27.776	99.325	4	0.758	0.844	0.786
	14	28.531	99.391	4	0.535	4.138	1.058
	15	28.175	98.992	4	0.844	0.865	0.851
	16	28.131	99.835	4	4.138	0.597	2.170
5	17	26.977	95.861	4	0.865	1.000	0.908
	18	27.842	95.861	4	0.597	12.429	1.642
	19	27.443	95.417	4	1.000	0.246	0.627
	20	27.398	96.416	4	12.429	0.166	2.947
6	21	39.743	97.859	4	0.246	0.268	0.253
	22	39.987	97.893	4	0.166	2.766	0.423
	23	39.876	97.770	4	0.268	0.467	0.323
	24	39.899	98.037	4	2.766	0.407	1.460
7	25	37.212	98.692	4	0.467	0.629	0.516
	26	37.678	98.725	4	0.407	2.014	0.693

พ้องที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	27	37.501	98.359	4	0.629	0.466	0.569
	28	37.401	98.980	4	2.014	0.315	1.085
8	29	38.977	97.726	4	0.466	0.488	0.473
	30	39.443	97.737	4	0.315	1.384	0.516
	31	39.244	97.493	4	0.488	0.370	0.445
	32	39.233	97.981	4	1.384	0.347	0.873
9	33	38.899	96.638	4	0.370	0.616	0.438
	34	39.266	96.682	4	0.347	3.089	0.720
	35	39.133	96.361	4	0.616	0.422	0.543
	36	39.044	96.971	4	3.089	0.382	1.539
10	37	35.958	97.104	4	0.422	0.611	0.477
	38	36.379	97.082	4	0.382	3.560	0.804
	39	36.157	96.771	4	0.611	0.482	0.565
	40	36.135	97.382	4	3.560	0.523	1.879
11	41	39.677	97.027	4	0.482	0.770	0.563
	42	40.154	97.093	4	0.523	1.861	0.799
	43	39.965	96.605	4	0.770	0.345	0.589
	44	39.887	97.371	4	1.861	0.292	1.003
12	45	40.476	95.606	4	0.345	0.500	0.390
	46	40.820	95.583	4	0.292	3.689	0.679
	47	40.631	95.361	4	0.500	0.352	0.445
	48	40.631	95.861	4	3.689	0.224	1.449
13	49	44.067	94.518	4	0.352	0.400	0.367
	50	44.417	94.484	4	0.224	5.005	0.630
	51	44.267	94.318	4	0.400	0.483	0.426
	52	44.250	94.718	4	5.005	0.294	1.946
14	53	39.754	92.519	4	0.483	0.433	0.466
	54	40.237	92.536	4	0.294	2.974	0.636
	55	40.037	92.320	4	0.433	0.318	0.391

ห้องที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	56	40.037	92.753	4	2.974	0.230	1.268
15	57	42.652	91.337	4	0.318	0.417	0.348
	58	42.968	91.370	4	0.230	7.504	0.736
	59	42.852	91.171	4	0.417	0.375	0.403
	60	42.818	91.587	4	7.504	0.301	2.567
16	61	35.358	90.779	4	0.375	0.391	0.380
	62	35.733	90.788	4	0.301	1.278	0.487
	63	35.525	90.571	4	0.391	0.341	0.374
	64	35.533	90.962	4	1.278	0.263	0.754
17	65	36.058	89.797	4	0.341	0.500	0.388
	66	36.399	89.813	4	0.263	1.699	0.490
	67	36.249	89.597	4	0.500	0.333	0.437
	68	36.241	90.097	4	1.699	0.215	0.853
18	69	36.682	88.456	4	0.333	0.546	0.393
	70	37.015	88.473	4	0.215	0.713	0.321
	71	36.890	88.298	4	0.546	0.300	0.447
	72	36.815	88.839	4	0.713	0.215	0.478
19	73	37.473	88.565	4	0.300	0.369	0.322
	74	37.773	88.565	4	0.215	4.030	0.571
	75	37.648	88.390	4	0.369	0.466	0.399
	76	37.598	88.756	4	4.030	0.350	1.785
20	77	38.331	92.719	4	0.466	0.585	0.503
	78	38.797	92.736	4	0.350	1.443	0.562
	79	38.580	92.461	4	0.585	0.512	0.560
	80	38.530	93.044	4	1.443	0.416	0.954
21	81	38.114	91.662	4	0.512	0.576	0.533
	82	38.622	91.728	4	0.416	1.644	0.658
	83	38.372	91.395	4	0.576	0.533	0.561
	84	38.347	91.970	4	1.644	0.450	1.067

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
22	85	36.982	92.886	4	0.533	0.746	0.596
	86	37.515	92.877	4	0.450	1.134	0.612
	87	37.231	92.528	4	0.746	0.297	0.549
	88	37.245	93.274	4	1.134	0.298	0.726
23	89	38.089	94.031	4	0.297	0.396	0.327
	90	38.385	94.060	4	0.298	0.713	0.398
	91	38.206	93.822	4	0.396	0.350	0.380
	92	38.193	94.218	4	0.713	0.393	0.585
24	93	37.531	93.952	4	0.350	0.609	0.421
	94	37.881	93.968	4	0.393	1.002	0.537
	95	37.702	93.618	4	0.609	0.404	0.531
	96	37.744	94.226	4	1.002	0.352	0.707
25	97	36.753	94.376	4	0.404	0.529	0.442
	98	37.157	94.372	4	0.352	3.964	0.789
	99	36.973	94.072	4	0.529	0.501	0.520
	100	36.957	94.601	4	3.964	0.417	1.871
26	101	33.537	92.597	4	0.501	0.635	0.542
	102	34.037	92.569	4	0.417	18.226	1.469
	103	33.765	92.253	4	0.635	0.478	0.577
	104	33.721	92.886	4	18.226	0.432	5.234
27	105	38.944	110.348	4	0.478	0.644	0.528
	106	39.421	110.371	4	0.432	1.139	0.596
	107	39.177	110.015	4	0.644	0.477	0.583
	108	39.177	110.659	4	1.139	0.444	0.832
28	109	38.067	110.404	4	0.477	0.666	0.533
	110	38.544	110.415	4	0.444	1.998	0.733
	111	38.278	110.060	4	0.666	0.434	0.577
	112	38.289	110.726	4	1.998	0.316	1.081
29	113	36.291	110.726	4	0.434	0.522	0.461

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	114	36.724	110.704	4	0.316	2.373	0.619
	115	36.524	110.459	4	0.522	0.426	0.488
	116	36.524	110.981	4	2.373	0.370	1.277
30	117	37.445	108.794	4	0.426	0.567	0.468
	118	37.867	108.739	4	0.370	1.587	0.601
	119	37.623	108.461	4	0.567	0.460	0.529
	120	37.656	109.027	4	1.587	0.357	0.965
31	121	36.846	107.662	4	0.460	0.500	0.473
	122	37.301	107.728	4	0.357	2.691	0.700
	123	37.090	107.440	4	0.500	0.333	0.437
	124	37.057	107.939	4	2.691	0.261	1.236
32	125	39.466	106.740	4	0.333	0.467	0.373
	126	39.799	106.729	4	0.261	1.499	0.467
	127	39.632	106.529	4	0.467	0.244	0.376
	128	39.621	106.996	4	1.499	0.173	0.729
33	129	38.267	107.640	4	0.244	0.279	0.255
	130	38.511	107.640	4	0.173	2.542	0.423
	131	38.389	107.518	4	0.279	0.411	0.317
	132	38.422	107.795	4	2.542	0.292	1.235
34	133	39.699	105.597	4	0.411	0.422	0.415
	134	40.110	105.608	4	0.292	5.773	0.789
	135	39.921	105.386	4	0.422	0.349	0.396
	136	39.921	105.808	4	5.773	0.211	1.917
35	137	39.205	111.536	4	0.349	0.352	0.350
	138	39.554	111.536	4	0.211	1.851	0.436
	139	39.405	111.386	4	0.352	0.519	0.400
	140	39.438	111.736	4	1.851	0.367	1.079
36	141	37.589	111.653	4	0.519	0.704	0.575
	142	38.106	111.703	4	0.367	6.704	0.966

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	143	37.873	111.420	4	0.704	0.451	0.607
	144	37.789	112.119	4	6.704	0.255	2.253
37	145	35.774	105.725	4	0.451	0.493	0.465
	146	36.224	105.758	4	0.255	1.680	0.477
	147	36.091	105.541	4	0.493	0.399	0.460
	148	35.991	106.024	4	1.680	0.306	0.953
38	149	34.326	105.797	4	0.399	0.599	0.457
	150	34.725	105.797	4	0.306	2.078	0.580
	151	34.526	105.564	4	0.599	0.491	0.561
	152	34.503	106.163	4	2.078	0.337	1.134
39	153	35.525	104.354	4	0.491	0.477	0.486
	154	36.013	104.409	4	0.337	5.090	0.834
	155	35.780	104.165	4	0.477	0.354	0.432
	156	35.769	104.642	4	5.090	0.297	1.974
40	157	30.679	104.659	4	0.354	0.438	0.380
	158	31.029	104.609	4	0.297	5.640	0.792
	159	30.795	104.426	4	0.438	0.467	0.448
	160	30.862	104.859	4	5.640	0.297	2.115
41	161	26.899	108.872	4	0.467	0.438	0.457
	162	27.365	108.905	4	0.297	2.303	0.588
	163	27.232	108.639	4	0.438	0.469	0.448
	164	27.165	109.072	4	2.303	0.315	1.187
42	165	25.755	107.251	4	0.469	0.422	0.453
	166	26.222	107.295	4	0.315	6.713	0.874
	167	26.022	107.051	4	0.422	0.617	0.479
	168	26.022	107.473	4	6.713	0.481	2.788
43	169	28.398	101.195	4	0.617	0.816	0.677
	170	29.014	101.162	4	0.481	9.571	1.303
	171	28.747	100.762	4	0.816	0.691	0.772

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	172	28.747	101.578	4	9.571	0.503	3.585
44	173	20.849	96.172	4	0.691	0.847	0.740
	174	21.537	96.238	4	0.503	8.663	1.299
	175	21.204	95.861	4	0.847	0.320	0.612
	176	21.137	96.705	4	8.663	0.165	2.312
45	177	28.731	92.536	4	0.320	0.351	0.330
	178	29.047	92.486	4	0.165	4.301	0.489
	179	28.930	92.370	4	0.351	0.408	0.369
	180	28.897	92.719	4	4.301	0.318	1.806
46	181	26.358	89.247	4	0.408	0.442	0.419
	182	26.766	89.264	4	0.318	0.839	0.440
	183	26.541	89.039	4	0.442	0.300	0.389
	184	26.507	89.480	4	0.839	0.325	0.611
47	185	26.849	88.714	4	0.300	0.582	0.374
	186	27.149	88.723	4	0.325	0.436	0.358
	187	26.990	88.440	4	0.582	0.250	0.439
	188	26.999	89.022	4	0.436	0.195	0.333
48	189	27.382	88.814	4	0.250	0.367	0.284
	190	27.632	88.806	4	0.195	7.398	0.656
	191	27.507	88.656	4	0.367	0.532	0.415
	192	27.532	89.022	4	7.398	0.376	2.741
49	193	34.859	88.001	4	0.532	0.577	0.547
	194	35.391	88.001	4	0.376	1.111	0.540
	195	35.125	87.735	4	0.577	0.468	0.538
	196	35.103	88.312	4	1.111	0.347	0.754
50	197	35.058	89.422	4	0.468	0.533	0.489
	198	35.525	89.444	4	0.347	6.077	0.902
	199	35.258	89.222	4	0.533	0.488	0.518
	200	35.280	89.755	4	6.077	0.315	2.265

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
51	201	30.085	86.602	4	0.488	0.488	0.488
	202	30.573	86.602	4	0.315	10.345	1.008
	203	30.329	86.403	4	0.488	0.425	0.466
	204	30.351	86.891	4	10.345	0.278	3.099
52	205	40.279	89.797	4	0.425	0.459	0.436
	206	40.703	89.822	4	0.278	3.055	0.618
	207	40.487	89.647	4	0.459	0.425	0.447
	208	40.520	90.105	4	3.055	0.359	1.497
53	209	38.106	88.232	4	0.425	0.474	0.441
	210	38.530	88.207	4	0.359	7.372	0.984
	211	38.272	87.957	4	0.474	0.683	0.536
	212	38.289	88.431	4	7.372	0.437	2.875
54	213	37.273	81.129	4	0.683	0.816	0.725
	214	37.956	81.129	4	0.437	3.101	0.840
	215	37.623	80.846	4	0.816	0.584	0.730
	216	37.623	81.662	4	3.101	0.330	1.470
55	217	34.526	81.829	4	0.584	0.652	0.606
	218	35.108	81.779	4	0.330	2.949	0.685
	219	34.859	81.562	4	0.652	0.836	0.708
	220	34.809	82.212	4	2.949	0.554	1.689
56	221	33.876	85.009	4	0.836	1.032	0.897
	222	34.709	84.943	4	0.554	5.318	1.177
	223	34.326	84.543	4	1.032	0.452	0.784
	224	34.342	85.575	4	5.318	0.328	2.101
57	225	31.695	80.963	4	0.452	0.533	0.477
	226	32.144	81.013	4	0.328	3.319	0.710
	227	31.978	80.730	4	0.533	0.471	0.512
	228	31.961	81.263	4	3.319	0.337	1.548
58	229	35.258	80.880	4	0.471	0.633	0.520

พ้องที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	230	35.724	80.813	4	0.337	0.546	0.396
	231	35.541	80.530	4	0.633	0.482	0.578
	232	35.541	81.163	4	0.546	0.319	0.456
59	233	36.008	81.446	4	0.482	0.482	0.482
	234	36.490	81.462	4	0.319	3.935	0.737
	235	36.241	81.263	4	0.482	0.383	0.447
	236	36.224	81.745	4	3.935	0.190	1.432
60	237	35.391	77.899	4	0.383	0.366	0.377
	238	35.774	77.899	4	0.190	1.431	0.372
	239	35.658	77.749	4	0.366	0.383	0.372
	240	35.641	78.115	4	1.431	0.260	0.811
61	241	36.890	77.416	4	0.383	0.333	0.366
	242	37.273	77.433	4	0.260	0.864	0.388
	243	37.107	77.233	4	0.333	0.418	0.359
	244	37.107	77.566	4	0.864	0.361	0.645
62	245	37.506	78.332	4	0.418	0.567	0.463
	246	37.923	78.365	4	0.361	1.785	0.614
	247	37.723	78.065	4	0.567	0.635	0.589
	248	37.739	78.632	4	1.785	0.612	1.249
63	249	37.839	76.850	4	0.635	0.917	0.718
	250	38.472	76.900	4	0.612	3.310	1.074
	251	38.172	76.367	4	0.917	0.550	0.773
	252	38.206	77.283	4	3.310	0.391	1.623
64	253	40.620	79.547	4	0.550	0.550	0.550
	254	41.170	79.531	4	0.391	3.063	0.776
	255	40.920	79.231	4	0.550	0.568	0.556
	256	40.920	79.781	4	3.063	0.374	1.519
65	257	38.405	81.529	4	0.568	0.676	0.602
	258	38.972	81.562	4	0.374	1.821	0.634

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	259	38.772	81.246	4	0.676	0.477	0.602
	260	38.655	81.912	4	1.821	0.412	1.110
66	261	38.206	80.147	4	0.477	0.587	0.511
	262	38.672	80.247	4	0.412	3.031	0.801
	263	38.455	79.897	4	0.587	0.417	0.524
	264	38.389	80.480	4	3.031	0.224	1.271
67	265	39.771	77.782	4	0.417	0.558	0.460
	266	40.187	77.816	4	0.224	1.416	0.414
	267	40.087	77.616	4	0.558	0.400	0.500
	268	39.987	78.165	4	1.416	0.338	0.878
68	269	39.771	79.564	4	0.400	0.633	0.466
	270	40.171	79.581	4	0.338	7.374	0.944
	271	39.987	79.298	4	0.633	0.602	0.622
	272	39.954	79.930	4	7.374	0.479	2.964
69	273	33.016	77.433	4	0.602	0.736	0.643
	274	33.615	77.488	4	0.479	2.697	0.852
	275	33.271	77.155	4	0.736	0.277	0.532
	276	33.204	77.888	4	2.697	0.218	1.167
70	277	34.004	75.312	4	0.277	0.411	0.316
	278	34.281	75.323	4	0.218	1.869	0.447
	279	34.170	75.135	4	0.411	0.456	0.425
	280	34.148	75.545	4	1.869	0.355	1.074
71	281	34.903	77.255	4	0.456	0.544	0.484
	282	35.358	77.288	4	0.355	6.213	0.922
	283	35.136	77.011	4	0.544	0.455	0.513
	284	35.125	77.555	4	6.213	0.342	2.363
72	285	28.930	78.032	4	0.455	0.583	0.494
	286	29.380	78.099	4	0.342	1.147	0.512
	287	29.147	77.849	4	0.583	0.386	0.508

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	288	29.147	78.432	4	1.147	0.337	0.762
73	289	30.029	77.699	4	0.386	0.633	0.455
	290	30.412	77.649	4	0.337	1.699	0.578
	291	30.229	77.366	4	0.633	0.367	0.528
	292	30.213	77.999	4	1.699	0.329	0.983
74	293	30.179	76.300	4	0.367	0.550	0.420
	294	30.546	76.317	4	0.329	4.014	0.757
	295	30.412	76.017	4	0.550	0.421	0.503
	296	30.412	76.567	4	4.014	0.247	1.585
75	297	26.516	75.601	4	0.421	0.468	0.436
	298	26.932	75.667	4	0.247	3.991	0.625
	299	26.766	75.484	4	0.468	0.583	0.504
	300	26.732	75.951	4	3.991	0.483	1.974
76	301	25.450	79.731	4	0.583	0.799	0.648
	302	26.033	79.714	4	0.483	2.502	0.836
	303	25.683	79.381	4	0.799	0.317	0.587
	304	25.667	80.180	4	2.502	0.190	1.060
77	305	28.064	79.464	4	0.317	0.368	0.333
	306	28.381	79.464	4	0.190	3.592	0.507
	307	28.264	79.314	4	0.368	0.335	0.357
	308	28.231	79.681	4	3.592	0.189	1.346
78	309	24.667	80.130	4	0.335	0.300	0.323
	310	25.000	80.164	4	0.189	1.981	0.413
	311	24.867	80.030	4	0.300	0.349	0.316
	312	24.867	80.330	4	1.981	0.213	0.941
79	313	26.333	81.662	4	0.349	0.433	0.375
	314	26.682	81.662	4	0.213	2.499	0.484
	315	26.516	81.529	4	0.433	0.526	0.462
	316	26.499	81.962	4	2.499	0.331	1.274

พ้องที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
80	317	28.997	81.912	4	0.526	0.467	0.505
	318	29.513	82.012	4	0.331	8.638	0.982
	319	29.263	81.795	4	0.467	0.470	0.468
	320	29.247	82.262	4	8.638	0.307	2.840
81	321	31.461	73.913	4	0.470	0.548	0.495
	322	31.928	73.969	4	0.307	0.775	0.418
	323	31.728	73.736	4	0.548	0.369	0.480
	324	31.661	74.280	4	0.775	0.315	0.575
82	325	31.484	75.035	4	0.369	0.404	0.380
	326	31.850	75.079	4	0.315	2.041	0.588
	327	31.606	74.879	4	0.404	0.566	0.452
	328	31.661	75.279	4	2.041	0.544	1.314
83	329	33.271	74.024	4	0.566	0.867	0.653
	330	33.837	74.013	4	0.544	1.137	0.696
	331	33.493	73.591	4	0.867	0.610	0.771
	332	33.537	74.457	4	1.137	0.478	0.852
84	333	33.038	75.479	4	0.610	0.655	0.625
	334	33.648	75.479	4	0.478	6.519	1.141
	335	33.371	75.090	4	0.655	0.584	0.630
	336	33.382	75.745	4	6.519	0.546	2.853
85	337	34.675	69.356	4	0.584	0.882	0.670
	338	35.258	69.390	4	0.546	1.803	0.813
	339	34.925	68.957	4	0.882	0.666	0.803
	340	34.942	69.839	4	1.803	0.633	1.271
86	341	33.343	69.007	4	0.666	1.032	0.771
	342	34.009	68.990	4	0.633	1.988	0.927
	343	33.643	68.474	4	1.032	0.555	0.839
	344	33.626	69.506	4	1.988	0.397	1.162
87	345	32.894	67.658	4	0.555	0.651	0.585

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	346	33.443	67.741	4	0.397	4.027	0.859
	347	33.227	67.408	4	0.651	0.349	0.529
	348	33.077	68.041	4	4.027	0.273	1.643
88	349	35.958	70.855	4	0.349	0.566	0.410
	350	36.307	70.872	4	0.273	0.778	0.387
	351	36.141	70.655	4	0.566	0.517	0.549
	352	36.141	71.221	4	0.778	0.393	0.620
89	353	36.907	71.355	4	0.517	0.717	0.577
	354	37.423	71.388	4	0.393	14.786	1.318
	355	37.190	71.071	4	0.717	1.068	0.819
	356	37.190	71.788	4	14.786	0.910	5.838
90	357	38.389	86.525	4	1.068	1.335	1.150
	358	39.455	86.591	4	0.910	1.620	1.103
	359	38.872	85.892	4	1.335	0.550	0.993
	360	38.955	87.224	4	1.620	0.367	0.987
91	361	39.987	85.975	4	0.550	0.500	0.533
	362	40.537	85.992	4	0.367	1.192	0.543
	363	40.304	85.709	4	0.500	0.451	0.483
	364	40.270	86.208	4	1.192	0.315	0.765
92	365	39.571	85.242	4	0.451	0.518	0.473
	366	40.021	85.276	4	0.315	2.378	0.618
	367	39.854	85.009	4	0.518	0.467	0.500
	368	39.821	85.526	4	2.378	0.412	1.326
93	369	37.456	85.775	4	0.467	0.704	0.535
	370	37.923	85.775	4	0.412	1.369	0.615
	371	37.639	85.476	4	0.704	0.367	0.567
	372	37.723	86.175	4	1.369	0.283	0.810
94	373	37.290	84.876	4	0.367	0.450	0.393
	374	37.656	84.909	4	0.283	11.039	0.960

ฟองที่	จุดที่	X	Y	รูปที่	L	h	dB
	375	37.473	84.693	4	0.450	0.362	0.419
	376	37.473	85.143	4	11.039	0.299	3.317
95	377	29.633	92.915	4	0.362	0.458	0.392
	378	29.995	92.927	4	0.299	21.571	1.246
	379	29.807	92.694	4	0.458	0.445	0.453
	380	29.807	93.152	4	21.571	0.299	5.181
96	381	36.402	113.690	4	0.445	0.489	0.459
	382	36.846	113.712	4	0.299	1.427	0.503
	383	36.646	113.490	4	0.489	0.381	0.450
	384	36.646	113.979	4	1.427	0.285	0.834
97	385	37.023	115.355	4	0.381	0.426	0.395
	386	37.401	115.400	4	0.285	8.143	0.870
	387	37.223	115.178	4	0.426	0.378	0.409
	388	37.290	115.599	4	8.143	0.299	2.706
98	389	29.297	117.154	4	0.378	0.490	0.412
	390	29.674	117.176	4	0.299	7.221	0.864
	391	29.474	116.954	4	0.490	0.534	0.504
	392	29.519	117.442	4	7.221	0.453	2.869
99	393	28.392	124.575	4	0.534	0.716	0.589
	394	28.925	124.608	4	0.453	2.591	0.810
	395	28.658	124.242	4	0.716	0.534	0.649
	396	28.658	124.958	4	2.591	0.402	1.392
100	397	27.260	127.139	4	0.534	0.590	0.552
	398	27.792	127.089	4	0.402	130.370	2.763
	399	27.476	126.840	4	0.590	0.000	0.000
	400	27.643	127.406	4	130.370	0.000	0.000

ตารางที่ ก.12 ผลของค่าพีเอช ต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายต่อน้ำ (S/L) 50 g/L

เวลา (นาทื)	ค่าค่าพีเอชของการทดลองที่			ค่าพีเอชเฉลี่ย
	1	2	3	
0	12.67	12.65	12.67	12.66
5	12.59	12.56	12.62	12.59
10	12.53	12.50	12.55	12.53
15	12.30	12.34	12.40	12.35
30	10.51	10.53	10.62	10.55
60	7.43	7.40	7.38	7.40
90	6.34	6.31	6.29	6.31

ตารางที่ ก.13 ผลของเวลาที่ใช้ในการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ pH 8.3 ที่อัตราส่วนละลายต่อน้ำ (S/L) 50 g/L

เวลา (นาทื)	ค่าค่าพีเอชของการทดลองที่			ค่าพีเอชเฉลี่ย
	1	2	3	
0	12.67	12.65	12.67	12.66
5	12.59	12.56	12.62	12.59
10	12.53	12.50	12.55	12.53
15	12.30	12.34	12.40	12.35
30	10.51	10.53	10.62	10.55
35	10.06	10.09	10.15	10.10
40	9.58	9.61	9.65	9.61
45	9.07	8.99	8.99	9.02
50	8.49	8.46	8.43	8.46
51.52	-	8.30	-	8.30
52.10	-	-	8.30	
52.21	8.30	-	-	

ตารางที่ ก.14 ผลของเวลาที่ใช้ในการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ pH 8.3 ที่อัตราส่วนغلลยต่อ
น้ำ (S/L) 200 g/L

เวลา (นาทื)	ค่าพีเอชของการทดลองที่			ค่าพีเอชเฉลี่ย
	1	2	3	
0	12.73	12.72	12.71	12.72
5	12.61	12.64	12.64	12.63
10	12.64	12.65	12.66	12.65
15	12.62	12.64	12.66	12.64
20	12.59	12.63	12.65	12.62
25	12.58	12.62	12.65	12.62
30	12.59	12.61	12.64	12.61
35	12.56	12.59	12.62	12.59
40	12.57	12.58	12.62	12.59
45	12.46	12.56	12.60	12.54
50	12.49	12.53	12.58	12.53
55	12.43	12.52	12.56	12.50
60	12.23	12.51	12.51	12.42
65	12.27	12.46	12.45	12.39
70	12.04	12.37	12.33	12.25
75	11.73	12.13	12.16	12.01
80	11.40	11.85	11.94	11.73
85	11.08	11.59	11.61	11.43
90	10.76	11.27	11.45	11.16
95	10.73	11.00	11.21	10.98
100	10.57	10.76	11.03	10.79

เวลา (นาทื)	ค่าพีเอชของการทดลองที่			ค่าพีเอชเฉลี่ย
	1	2	3	
105	10.40	10.52	10.89	10.60
110	10.25	10.45	10.66	10.45
115	10.12	10.32	10.50	10.31
120	9.97	10.20	10.34	10.17
125	9.83	10.08	10.17	10.03
130	9.66	9.95	10.00	9.87
135	9.47	9.80	9.96	9.74
140	9.38	9.62	9.81	9.60
145	9.25	9.44	9.62	9.44
150	9.10	9.25	9.44	9.26
155	8.97	9.09	9.26	9.11
160	8.84	8.95	9.08	8.96
165	8.71	8.81	8.91	8.81
170	8.62	8.71	8.73	8.69
175	8.55	8.61	8.58	8.58
180	8.45	8.52	8.50	8.49
185	8.36	8.40	8.33	8.36
185.47	8.30	-	-	8.30
187.06	-	8.30	8.30	
188.00	-	-	-	

ตารางที่ ก.15 ผลของการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ pH 8.3 ของ อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ (S/L) 50 100 และ 200 g/L

S/L (กรัมต่อลิตร)	การทดลองครั้งที่	เวลาที่ pH 8.3 (นาที)	เวลาเฉลี่ย (นาที)
50	1	52.21	52
	2	51.52	
	3	52.10	
100	1	96.10	97
	2	96.38	
	3	97.38	
200	1	185.47	187
	2	187.06	
	3	188.00	

ตารางที่ ก.16 ผลของปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ต่อระยะเวลาการกักเก็บ ที่ อัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 mL/min และสัดส่วนเถ้าลอยต่อน้ำ 50 g/L

ตัวอย่าง	ปริมาณการกักเก็บ คาร์บอนไดออกไซด์ (mg CO ₂ /gFA)	ร้อยละโดย น้ำหนัก (%)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ โดย น้ำหนัก (%)	ประสิทธิภาพการกัก เก็บ คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
เถ้าลอย	5.057	0.506	-	-
CFA 5 นาที	16.061	1.606	-	4.4
CFA 10 นาที	23.610	2.361	-	7.4
CFA 15 นาที	31.889	3.189	-	10.7
CFA 30 นาที	46.847	4.685	-	16.7
CFA 52 นาที (pH 8.3)	67.013	6.701	6.669	26.5
	72.663	7.266		
	60.388	6.039		
CFA 60 นาที	66.448	6.645	6.402	25.4
	66.786	6.679		
	58.818	5.882		
CFA 90 นาที	62.428	6.243	-	22.9

ตารางที่ ก.17 ผลของปริมาณและประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ของการเพิ่มเถ้าลอย
 ต่อน้ำจาก 50 g/L เป็น 100 และ 200 g/L เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 25
 mL/min เพื่อให้ค่าพีเอช 8.3

S/L (g/L)	การ ทดลอง ครั้งที่	ปริมาณการกักเก็บ คาร์บอนไดออกไซด์ (mg CO ₂ /gFA)	ร้อยละโดย น้ำหนัก (%)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ โดย น้ำหนัก (%)	ประสิทธิภาพ การกักเก็บ คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
50	1	67.013	6.701	6.669	26.5
	2	72.663	7.266		
	3	60.388	6.039		
100	1	62.456	6.246	6.007	23.9
	2	59.986	5.999		
	3	57.769	5.777		
200	1	56.800	5.680	5.814	23.1
	2	57.246	5.725		
	3	60.375	6.038		

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบหาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 (OPC100)

W/B	วัดครั้งที่	ค่าการไหลที่วัดได้ (mm)	ค่าการไหลที่วัดได้ เฉลี่ย (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)	ค่าการไหลผ่าน (%)
0.57	1	215	210.25	100.00	110.25
	2	206			
	3	209			
	4	211			
0.56	1	200	199.50	100.00	99.50
	2	195			
	3	198			
	4	205			
0.55	1	178	181.00	100.00	81.00
	2	181			
	3	180			
	4	185			

ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบหาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (OPC90FA10)

W/B	วัดครั้งที่	ค่าการไหลที่วัดได้ (mm)	ค่าการไหลที่วัดได้ เฉลี่ย (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)	ค่าการไหลผ่าน (%)
0.56	1	209	208.25	100.00	108.25
	2	207			
	3	209			
	4	208			
0.55	1	200	200.00	100.00	100.00
	2	203			
	3	195			
	4	202			

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบหาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 (OPC80FA20)

W/B	วัดครั้งที่	ค่าการไหลที่วัดได้ (mm)	ค่าการไหลที่วัดได้ เฉลี่ย (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)	ค่าการไหลผ่าน (%)
0.55	1	217	212.50	100.00	112.50
	2	210			
	3	210			
	4	213			

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบหาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (OPC70FA30)

W/B	วัดครั้งที่	ค่าการไหลที่วัดได้ (mm)	ค่าการไหลที่วัดได้ เฉลี่ย (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)	ค่าการไหลผ่าน (%)
0.55	1	220	217.50	100.00	117.50
	2	215			
	3	220			
	4	215			
0.54	1	210	208.50	100.00	108.50
	2	209			
	3	207			
	4	208			
0.53	1	195	199.25	100.00	99.25
	2	200			
	3	195			
	4	207			

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบหาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนตร้อยละ 10 (OPC90CFA10)

W/B	วัดครั้งที่	ค่าการไหลที่วัดได้ (mm)	ค่าการไหลที่วัดได้ เฉลี่ย (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)	ค่าการไหลผ่าน (%)
0.57	1	215	209.75	100.00	109.75
	2	210			
	3	209			
	4	205			
0.56	1	200	199.25	100.00	99.25
	2	201			
	3	198			
	4	198			
0.55	1	195	196.75	100.00	96.75
	2	201			
	3	196			
	4	195			

ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบหาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนตร้อยละ 20 (OPC80CFA20)

W/B	วัดครั้งที่	ค่าการไหลที่วัดได้ (mm)	ค่าการไหลที่วัดได้ เฉลี่ย (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)	ค่าการไหลผ่าน (%)
0.56	1	206	207	100	107
	2	201			
	3	209			
	4	212			
0.55	1	188	189	100	89
	2	190			
	3	187			
	4	191			

ตารางที่ ก.24 ผลการทดสอบหาค่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ (Water requirement) จากการไหลผ่าน (Percent flow) การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยคาร์บอนตร้อยละ 20 (OPC80CFA20)

W/B	วัดครั้งที่	ค่าการไหลที่วัดได้ (mm)	ค่าการไหลที่วัดได้ เฉลี่ย (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานของแบบหล่อรูปกรวย (mm)	ค่าการไหลผ่าน (%)
0.55	1	204	208	100	108
	2	208			
	3	207			
	4	213			
0.54	1	196	201	100	101
	2	205			
	3	205			
	4	198			

ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย อายุการบ่ม 1 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่าง ที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	2150	86	87	8.48
			2	2050	82		
			3	2250	90		
			4	2200	88		
OPC90 FA10	10		1	1950	78	84	8.19
			2	2250	90		
			3	2250	90		
			4	1900	76		
OPC80 FA20	20		1	1850	74	76	7.40
			2	1800	72		
			3	1900	76		
			4	2000	80		
OPC70 FA30	30		1	1650	66	62	6.08
			2	1450	58		
			3	1400	56		
			4	1700	68		

ตารางที่ ก.26 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย อายุการบ่ม 3 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	3800	152	170	16.67
			2	4500	180		
			3	4500	180		
			4	4200	168		
OPC90 FA10	10		1	4050	162	146	14.32
			2	4100	164		
			3	3300	132		
			4	3150	126		
OPC80 FA20	20		1	3550	142	144	14.12
			2	3200	128		
			3	4000	160		
			4	3650	146		
OPC70 FA30	30		1	3600	144	142	13.88
			2	3850	154		
			3	3200	128		
			4	3500	140		

ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย อายุการ
บ่ม 7 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	4950	198	208	20.40
			2	5500	220		
			3	5100	204		
			4	5250	210		
OPC90 FA10	10		1	4900	196	200	19.61
			2	5200	208		
			3	4800	192		
			4	5100	204		
OPC80 FA20	20		1	4700	188	190	18.63
			2	5000	200		
			3	4700	188		
			4	4600	184		
OPC70 FA30	30		1	4250	170	168	16.48
			2	4450	178		
			3	4100	164		
			4	4000	160		

ตารางที่ ก.28 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย อายุการบ่ม 28 วัน

อัตราส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัดประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	7650	306	306	29.96
			2	7600	304		
			3	7650	304		
			4	7700	308		
OPC90 FA10	10		1	7300	292	284	27.85
			2	7000	280		
			3	7350	294		
			4	6750	270		
OPC80 FA20	20		1	7500	300	295	28.88
			2	7400	296		
			3	6950	278		
			4	7600	304		
OPC70 FA30	30		1	5900	236	240	23.54
			2	5800	232		
			3	6500	260		
			4	5800	232		

ตารางที่ ก.29 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย อายุการบ่ม 56 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัดประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	7700	308	310	30.40
			2	7650	306		
			3	8000	320		
			4	7650	306		
OPC90 FA10	10		1	7150	286	281	27.56
			2	7300	292		
			3	6800	272		
			4	6850	274		
OPC80 FA20	20		1	7300	292	290	28.44
			2	7300	292		
			3	6900	276		
			4	7500	300		
OPC70 FA30	30		1	7600	304	306	29.96
			2	7800	312		
			3	7450	298		
			4	7700	308		

ตารางที่ ก.30 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย
คาร์บอนต อายุการบ่ม 1 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	2150	86	87	8.48
			2	2050	82		
			3	2250	90		
			4	2200	88		
OPC90 CFA10	10		1	1750	70	67	6.52
			2	1700	68		
			3	1650	66		
			4	1550	62		
OPC80 CFA20	20		1	1400	56	60	5.83
			2	1650	66		
			3	1500	60		
			4	1400	56		
OPC70 CFA30	30		1	1000	40	48	4.71
			2	1300	52		
			3	1250	50		
			4	1250	50		

ตารางที่ ก.31 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย
คาร์บอนต อายุการบ่ม 3 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	3800	152	170	16.67
			2	4500	180		
			3	4500	180		
			4	4200	168		
OPC90 CFA10	10		1	3600	144	145	14.22
			2	3750	150		
			3	3350	134		
			4	3800	152		
OPC80 CFA20	20		1	3650	146	143	14.02
			2	3350	134		
			3	3600	144		
			4	3700	148		
OPC70 CFA30	30		1	3700	148	137	13.44
			2	3500	140		
			3	3100	124		
			4	3400	136		

ตารางที่ ก.32 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย
คาร์บอนต อายุการบ่ม 7 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทนที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	4950	198	208	20.40
			2	5500	220		
			3	5100	204		
			4	5250	210		
OPC90 CFA10	10		1	4100	164	178	17.41
			2	4500	180		
			3	4850	194		
			4	4300	172		
OPC80 CFA20	20		1	4200	168	171	16.77
			2	4500	180		
			3	4700	188		
			4	3700	148		
OPC70 CFA30	30		1	3950	158	158	15.45
			2	3700	148		
			3	3650	146		
			4	4450	178		

ตารางที่ ก.33 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย
คาร์บอนต อายุการบ่ม 28 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทน ที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	7650	306	306	29.96
			2	7600	304		
			3	7600	304		
			4	7700	308		
OPC90 CFA10	10		1	6350	254	248	24.32
			2	6350	254		
			3	6000	240		
			4	6100	244		
OPC80 CFA20	20		1	5850	236	234	22.95
			2	6100	244		
			3	5550	222		
			4	5900	236		
OPC70 CFA30	30		1	5800	232	217	21.28
			2	6100	208		
			3	5550	220		
			4	5200	208		

ตารางที่ ก.34 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงอัดมอร์ตาร์ของมอร์ตาร์ที่ทดแทนด้วยเถ้าลอย
คาร์บอนต อายุการบ่ม 56 วัน

อัตรา ส่วนผสม	ร้อยละ การ แทน ที่	ขนาด (cm ³)	ตัวอย่างที่	แรงอัด ประลัย (kg)	กำลังอัด ประลัย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (kg/cm ²)	ค่าเฉลี่ย ย (MPa)
OPC100	0	5 x 5 x 5	1	7700	308	310	30.40
			2	7650	306		
			3	8000	320		
			4	7650	306		
OPC90 CFA10	10		1	7200	308	285	27.95
			2	6850	306		
			3	7100	320		
			4	7350	306		
OPC80 CFA20	20		1	7200	288	291	28.49
			2	7050	282		
			3	7300	292		
			4	7500	300		
OPC70 CFA30	30		1	6500	260	288	28.19
			2	6950	278		
			3	7400	296		
			4	7900	316		

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สวิต วิเศษคุณธรรม
วัน เดือน ปี เกิด	11 กุมภาพันธ์ 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยรังสิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 3 ซอยศาลธนบุรี 44/1 แขวงบางหว้า เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160

