



การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติกากเถ้าขังข้าวโพดด้วยความร้อนสำหรับเป็น
วัสดุทดแทนซีเมนต์

INVESTIGATION ON THE HEAT TREATED OF WASTE CORN COB
ASH AS SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS

นายจักรกฤษณ์ คงทนแท้ รหัส 53360118
นายเตชิต ธนภพฐากุล รหัส 53360255
นายสมชาย ชัยปลื้ม รหัส 53360699

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
ฉบับที่รับ..... 40.ก.ค. 2558.....
เลขทะเบียน..... 1689 7794.....
เลขเรียกหนังสือ..... ๑๕.....
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ๑216๑


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ปีการศึกษา 2556

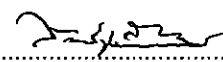


ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติกากเก้าอี้ข้างข้าวโพดด้วยความร้อนสำหรับเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายจักรกฤษณ์ คงทนแท้	รหัส	53360118
	นายเตชิต ธนภพฐากุล	รหัส	53360255
	นายสมชาย ชัยปลื้ม	รหัส	53360699
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม		
ปีการศึกษา	2556		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงการงาน
(ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชเจริญ)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติกากเถ้าซึ่งข้าวโพดด้วยความร้อนสำหรับเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์	
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายจักรกฤษณ์ คงทนแท้	รหัส 53360118
	นายเดชิต ธนภพฐากุล	รหัส 53360255
	นายสมชาย ชัยปลื้ม	รหัส 53360699
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2556	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเถ้าซึ่งข้าวโพดให้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ การศึกษาได้เน้นเกี่ยวกับผลกระทบของการปรับปรุงคุณสมบัติเถ้าซึ่งข้าวโพดโดยใช้ความร้อนเพื่อปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี, คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเถ้าซึ่งข้าวโพด ผลที่ได้คือเถ้าซึ่งข้าวโพดที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีสัดส่วนของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ประมาณ 72% ซึ่งสามารถจัดให้เป็นประเภทผลิตปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C 618 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าซิลิกาอสัณฐานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้น ความต้องการน้ำ, ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial Sitting Time) และระยะเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Sitting Time) ของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละของการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าซึ่งข้าวโพดหรือเถ้าซึ่งข้าวโพดที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ใส่เถ้าซึ่งข้าวโพดที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วลงไปแทนที่ 20% มีความสามารถในการรับแรงอัด 106% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน

Project title Investigations on the heat treated of waste corn cob ash as supplementary cementing materials

Name Mr. Juggrit Kongtonta ID. 53360118
Mr. Tachit Thanaphopthkur ID. 53360255
Mr. Somchai Chaipluem ID. 53360699

Project advisor Dr. Phongthorn Julphunthong

Major Civil Engineering

Department Civil Engineering and Environmental Engineering

Academic year 2013

Abstract

This work investigates the development of waste corn cob ash as supplementary cement replacement materials. The study focused on the effects of heat treatment on chemical composition, physical properties and engineering properties of corn cob ash. The results suggest corn cob ash which heat treated at 600°C for 4 h shows percentage of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ around 72%, which can be classified as Class N calcined natural pozzolan as prescribed by ASTM C618. The XRD patterns indicated that the amorphous silica phase increased with increasing calcining temperatures. The water requirement, initial setting time and final setting time of specimens increased with increasing replacement percentage of raw or treated corn cob ash. The sample with 20% replacing of treated corn cob ash exhibited 106% of compressive strength as compared to reference sample.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และคำแนะนำในการแก้ไข ปัญหา รวมถึงคำชี้แนะในขั้นตอนการทำงานจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ อาจารย์เป็นอย่างสูง



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายสมชาย ชัยปลื้ม

นายจักรกฤษณ์ คงทนแท้

นายเตชิต ธนภพฐากุล

เมษายน 2557

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	4
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	5
1.5 ขั้นตอนในการทำโครงการ.....	5
1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	6
1.7 งบประมาณ.....	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	8
2.1 องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์.....	8
2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials).....	16
2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุปอซโซลาน.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	33
3.1 มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง.....	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
3.4 การเตรียมวัสดุ.....	34
3.5 วิธีการทดลอง.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	40
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	52



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานรูปแบบต่างๆ.....	4
1.2 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	6
2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	10
2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	11
2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก.....	12
2.4 เวลาที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ.....	16
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย.....	18
2.6 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย.....	18
2.7 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก.....	20
2.8 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันเตาถลุงเหล็ก.....	20
2.9 องค์ประกอบทางเคมีของ Microsilica (MS).....	22
2.10 ลักษณะทางกายภาพของ Microsilica (MS).....	23
2.11 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ.....	25
2.12 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย.....	27
3.1 ส่วนผสมปูนซีเมนต์เพสต์.....	35
3.2 ส่วนผสมมอร์ต้าสำหรับมอร์ต้า 9 ก้อน.....	38
4.1 องค์ประกอบทางเคมี , ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ พื้นที่ผิวของ OPC , CCA และ CCA600	43
4.2 Water/binder ratio, เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาก่อตัว ระยะปลาย (Final Setting Time) ของ Cement Paste และ ปูนซีเมนต์ผสมCCA,CCA600 ที่ร้อยละต่างๆ.....	46
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่มีส่วนผสม (CCA) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	47
4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่มีส่วนผสม CCA 600 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนที่ตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย (ข้อมูล พ.ศ.2556).....	3
2.1 หลักการทำงานของเครื่อง XRD.....	31
4.1 กราฟ TGA-DTA ของถ่านซังข้าวโพด.....	40
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	42
4.3 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของถ่านซังข้าวโพด.....	44
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ากับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ของ CCA.....	48
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ากับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ของ CCA600.....	49

บทที่ 1

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันพร้อมสัดส่วนผสม คือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) หรือเรียกว่าเพสต์ (Paste) ประกอบด้วยปูนซีเมนต์, น้ำและฟองอากาศ มอร์ตาร์ (Mortar) ประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์ผสมทราย และคอนกรีต (Concrete) ประกอบด้วยมอร์ตาร์ผสมกับหิน โดยมีน้ำเป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยาเมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำลงไปเทในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นก็แปรสภาพเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีต

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

กระทรวงพลังงานได้วางแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าระหว่างปีพ.ศ.2555-2564 โดยใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังงานน้ำ และ พลังงานจากกากของอุตสาหกรรมเกษตรจำพวกชีวมวลหรือขยะจากชุมชน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2555-2564 จึงวางกรอบนโยบายเพิ่มอัตราการผลิตกระแสไฟฟ้าจากชีวมวลจาก 1,751.86 MW ในปัจจุบันเป็น 3,630 MW และเพิ่มอัตราการผลิตกระแสไฟฟ้าจากขยะจาก 13.45 MW ในปัจจุบันเป็น 160 MW ในปี พ.ศ.2564 จากข้อมูลในรูปที่ 1.1 พบว่าปัจจุบันมีการจัดตั้งโรงไฟฟ้าจากชีวมวลกระจายอยู่ในภูมิภาคต่างๆทั่วประเทศกว่า 100 โรง เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นฐานเศรษฐกิจจากการเกษตร ทำให้มีผลิตภัณฑ์จากกากชีวมวลจำนวนมากในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น แกลบ, ชานอ้อย หรือ กากปาล์มน้ำมัน อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวลค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหินหรือพลังงานนิวเคลียร์ (ตารางที่ 1.1) ทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานชีวมวลถูกจำกัดด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้น แนวทางสำคัญประการหนึ่งในการเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังชีวมวล ก็คือการสร้างมูลค่าเพิ่มจากเศษเหลือของการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น การนำเถ้าแกลบที่เหลือจากการเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

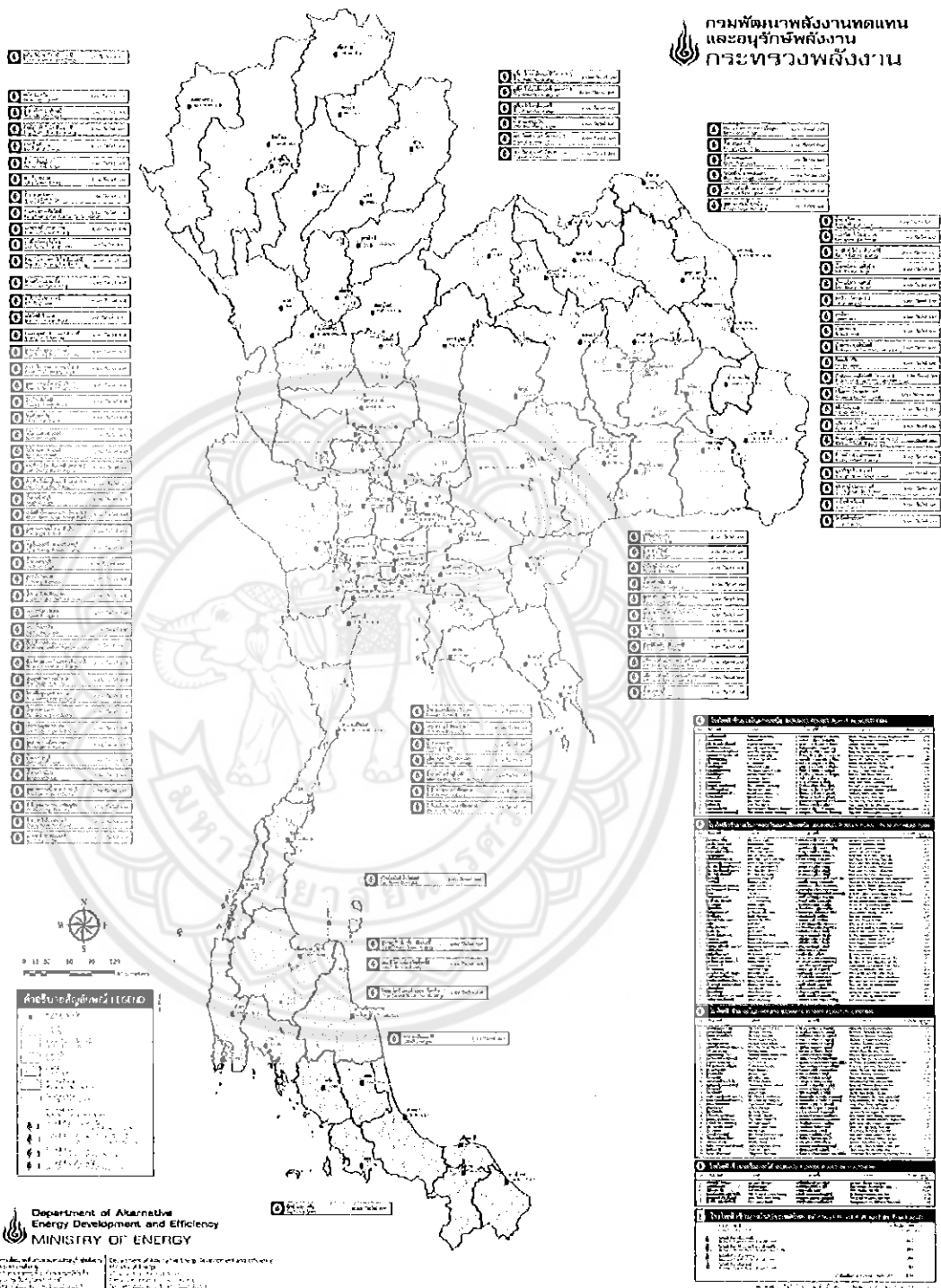
มาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง, อุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ย หรือ อุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งนอกจากจะเป็นการสร้างมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ให้กับการผลิต กระแสไฟฟ้าจากชีวมวลแล้ว ยังเป็นการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากชีวมวลหรือขยะอีกด้วย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของถ่านซังข้าวโพดรวมถึงสมบัติทางวิศวกรรมของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ต้าที่มีการผสมถ่านซังข้าวโพดในอัตราส่วนต่างๆ



แผนที่แสดงที่ตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย MAP OF BIOMASS POWER PLANT IN THAILAND

กรมพัฒนาพลังงานทดแทน
และอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



รูปที่ 1.1 แผนที่ตั้งโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย (ข้อมูล พ.ศ.2556)

ตารางที่ 1.1 ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานรูปแบบต่างๆ

ต้นทุน/หน่วยไฟฟ้า	บาท/Kwh*
1. แสงอาทิตย์	12.50
2. ลม	5.20
3. ชยะ	3-5
4. ชีวมวล	3-3.50
5. นิวเคลียร์	2.79
6. ถ่านหิน	2.94
7. พลังงานความร้อนร่วม (Gas Existing)	3.96
8. พลังงานความร้อนร่วม (Marginal Gas)	4.34
9. กังหันแก๊ส	13.65

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2553

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมจากซังข้าวโพดซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า มาสร้างประโยชน์ในงานคอนกรีต
- 1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของเจ้าซังข้าวโพดที่ได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเจ้าซังข้าวโพดในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต
- 1.2.4 เพื่อนำผลงานวิจัยที่ได้ไปเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ รวมถึงถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่กลุ่มเป้าหมาย

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ทำให้ทราบถึงความสามารถ และศักยภาพในการเป็นวัสดุปอซโซลานของเจ้าซังข้าวโพดจากโรงไฟฟ้าชีวมวล เพื่อนำไปสู่การศึกษาความสามารถในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงลึกอื่นๆของคอนกรีตต่อไป

1.3.2 สามารถสร้างแนวทางใหม่ในการลดการใช้ซีเมนต์ในงานก่อสร้าง

1.3.3 สร้างแนวทางใหม่ในการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลซึ่งข้าวโพด ซึ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ของการสร้างโรงไฟฟ้าพลังชีวมวล

1.3.4 สามารถเผยแพร่ความรู้ในการพัฒนาวัสดุปอซโซลานในวารสารวิชาการที่ได้รับการยอมรับ และถ่ายทอดองค์ความรู้ที่ได้สู่ภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมคอนกรีต, อิฐบล็อก หรือ อิฐมวลเบาต่อไป

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

ศึกษาคุณสมบัติมอร์ต้าที่ได้จากการผสมเถ้าซึ่งข้าวโพด วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ต้า และระยะเวลาการก่อตัวที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้ง

1.5 ขั้นตอนในการทำโครงการ

1.5.1 เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ

1.5.2 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของเถ้าซึ่งข้าวโพดแล้วปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน

1.5.3 ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าซึ่งข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20 และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าซึ่งข้าวโพดที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment) ในอัตราส่วนร้อยละ 5,10,15,20

1.5.4 ทำการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าซึ่งข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20 และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าซึ่งข้าวโพดที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment) ในอัตราส่วนร้อยละ 5,10,15,20

1.5.5 ทำการหลอมมอร์ต้าผสมเถ้าซึ่งข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 0,5,10,15,20 และมอร์ต้าผสมเถ้าซึ่งข้าวโพดที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment) ในอัตราส่วนร้อยละ 5,10,15,20

1.5.6 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่อายุ 1,3,7,28 วัน เทียบกับกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่ไม่ได้ผสมเถ้าซึ่งข้าวโพด

1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรม	พ.ศ. 2556				พ.ศ. 2557			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ค้นคว้ารวบรวมข้อมูลและติดต่อซื้อวัสดุ	██████████							
2.ตรวจสอบความพร้อมของห้องปฏิบัติการ	██████████							
3.เตรียมวัสดุในการผสมมอร์ต้า			██████████					
4.ดำเนินการวิจัย					██████████			
5.ศึกษาผลการทดลองของมอร์ต้าผสมเถ้าซึ่งข้าวโพด					██████████			
6.สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง							██████████	
7.จัดทำรายงานวิจัย						██████████		

1.7 งบประมาณ

1. ค่าวัสดุสำนักงาน	200	บาท
2. ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์	800	บาท
3. ค่าวัสดุก่อสร้าง	500	บาท
4. ค่าวัสดุน้ำมันหรือเชื้อเพลิงและหล่อลื่น	500	บาท
5. ค่าจ้างถ่ายเอกสารหรือจัดทำรูปเล่ม	1,000	บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น	3,000	บาท

(สามพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ : ขออนุมัติถ้วนเฉลี่ยทุกรายการ



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 องค์ประกอบทางเคมีและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

2.1.1 ประวัติ

จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้ตั้งแต่สมัยอียิปต์,กรีก และโรมันคำว่าซีเมนต์มาจากภาษาลาติน มีความหมาย คือ วัสดุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะเป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความเปลี่ยนแปลงทางเคมีก่อให้เกิดความสามารถในการยึดเกาะส่วนต่างๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

เมื่ออาณาจักรโรมันเสื่อมลง การใช้ปูนซีเมนต์ก็สิ้นสุดลงด้วย และความก้าวหน้าที่สำคัญก็เกิดขึ้นอีกครั้งใน พ.ศ.2367 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นซีเมนต์จนประสบความสำเร็จโดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีสีเหลืองปนเทา บริเวณเมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ จึงเรียกวัสดุนี้ว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และได้จดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก

ปลายศตวรรษที่ 19 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้อย่างมากในประเทศอังกฤษ ได้ถูกส่งไปจำหน่ายยังประเทศต่างๆทั่วโลก รวมทั้งได้เปิดโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกประเทศอังกฤษขึ้น เช่นในประเทศฝรั่งเศส พ.ศ. 2383 ประเทศเยอรมัน พ.ศ.2398 และสหรัฐอเมริกา พ.ศ.2414 เป็นต้น

2.1.2 กรรมวิธีการผลิต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

- Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
- Argillaceous Material ได้แก่ ซิลิกา, อลูมินาซึ่งอยู่ในรูปของดินดำ ดินเหนียว และ

ดินดาน

- Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก สีลาแลง

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์มี 2 วิธีด้วยกันคือ

- กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)
- กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก วัสดุที่ใช้ได้แก่ ดินสอพองและดินเหนียว ถูกนำมาผสมกันด้วยอัตราส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยผสมแล้วนำไปบดให้ละเอียดก่อนป้อนเข้าสู่หม้อเผา ส่วนกรรมวิธีการผลิตแบบแห้งนั้นวัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่นั้นได้แก่ หินปูน หินดินดานจะถูกนำมาผสมกันแบบแห้งแล้วนำไปบดให้ละเอียดจากนั้นก็ถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผา

เมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบถูกบดได้ที่แล้วจะถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผาแบบหมุน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้ วัตถุดิบต่างๆ จะถูกหลอมรวมกันเป็นเม็ดปูน (Clinker) ที่ไว้ให้เย็นตัวลง จากนั้นนำปูนเม็ดที่เย็นตัวลงแล้วนี้มาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ในขณะที่ทำการบดจะทำการเติมยิปซัมลงไปประมาณ 3-6% เพื่อหน่วงเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ กรรมวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือกรรมวิธีการผลิตแบบแห้งซึ่งขั้นตอนในการผลิตจะไม่ยุ่งยากเหมือนกรรมวิธีการผลิตแบบเปียก

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบต่างๆถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง, ซิลิกา, อลูมินา และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิบซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO_2	17 – 25
Al_2O_3	3 – 8
Fe_2O_3	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5 – 1.3
TiO_2	0.1 – 0.4
P_2O_5	0.1 – 0.2
SO_3	1 – 3

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \bullet \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \bullet \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \bullet \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \bullet \text{Al}_2\text{O}_3 \bullet \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

เราสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์ได้โดยประมาณ จากผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ชนิดต่างๆ และอัตราส่วนการรวมตัวทางเคมีของสารประกอบนั้นๆ โดยใช้สูตรคำนวณของ Bogue ดังนี้

$$\text{C}_3\text{S} = 4.07 (\text{CaO}) - 7.60 (\text{SiO}_2) - 6.72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43 (\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2.85 (\text{SO}_3))$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.87 (\text{SiO}_2) - 0.754 (\text{C}_3\text{S})$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.04 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

ตัวเลขนอกวงเล็บคือ เปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ในเนื้อของซีเมนต์ทั้งหมด และปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้คำนวณหาปริมาณต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก

ออกไซด์ต่างๆ (%) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		สารประกอบหลักคำนวณจากสมการของ Bogue
CaO	64.73	$C_3S = 4.07 \times (64.73 - 1.60) - 7.60$
SiO ₂	21.20	$x(21.20) - 6.72 \times (5.22) - 1.43 \times ((3.08) -$
Al ₂ O ₃	5.22	$2.85 \times (2.01))$
Fe ₂ O ₃	3.08	$= 50.6\%$
MgO	1.04	$C_2S = 2.87 \times (21.20) - 0.754 \times (50.6)$
SO ₃	2.01	$= 22.7\%$
Na ₂ O	0.19	
K ₂ O	0.42	$C_3A = 2.65 \times (5.22) - 1.69 \times (3.08)$
Loss of Ignition	1.45	$= 8.6\%$
Insoluble Residue	0.66	
Free Lime	1.60	$C_4AF = 3.04 \times (3.08)$ $= 9.4\%$

2.1.4 สารประกอบหลัก

2.1.4.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S)

C₃S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสี่เทาเข็ม คุณสมบัติ C₃S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C₃S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C₃S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55 %

2.1.4.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลั้งอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลั้งอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 %

2.1.4.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลั้งอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลั้งอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15 %

2.1.4.4 เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลั้งอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10 %

2.1.5 สารประกอบรอง

2.1.5.1 ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เกิดกำลั้งอัดสูงสุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่ใส่ขึ้นอยู่กับ

- อัลคาไลน์ออกไซด์ ได้แก่ Na_2O และ K_2O
- ปริมาณ C_3A
- ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2.1.5.2 Free Lime (CaO)

Free Lime เกิดขึ้นได้สองกรณี คือ

- เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด
- ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่างๆไม่สมบูรณ์

2.1.5.3 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี MgCO_3 ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมละลายเป็นเม็ดปูน ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO คือปริมาณจะเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการไม่ยุบตัว

2.1.5.4 อัลคาไลน์ออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$)

อัลคาไลน์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวได้ ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่อัลคาไลน์ต่ำๆ

2.1.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัว และแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในสองลักษณะคือ

- อาศัยการละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิด ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่
- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะโดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก ของซีเมนต์แต่ละประเภท

2.1.6.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานและสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ (C_3S)



ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ (C_2S)

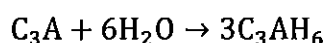


จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะสำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่จะเกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

2.1.6.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว นิยมใส่ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ (C_3A) ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A และ C_2S เป็นส่วนใหญ่แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้

หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ C_3A กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มากจากการเพิ่ม ปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะทำให้ Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะเกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

2.1.6.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ



เวลาที่ใช้เพื่อบรรลุ 80 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เวลาที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณภาพบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น

เมื่อผสมวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตสารประกอบออกไซด์ในวัสดุปอซโซลาน เช่น SiO_2 , Al_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และได้สารประกอบของวัสดุเชื่อมประสาน CSH และ CAH แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหยาบ วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยในปริมาณค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้เช่นเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง

ตัวอย่างวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีต

2.2.1 เถ้าลอย (Pulverized Fuel Ash(PFA))

2.2.1.1 กรรมวิธีการผลิต

เถ้าลอยเป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียด ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ถ่านหินที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้ประกอบด้วย สารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่นๆ เช่น ดินดาน,ดินเหนียว,ซัลไฟต์ และคาร์บอนเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาคุณสมบัติของสารประกอบต่างๆในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการทำให้เย็น เถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอลูมินา

2.2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ออกไซด์	% โดยน้ำหนัก ของเถ้าลอย
SiO ₂	48
Al ₂ O ₃	26
Fe ₂ O ₃	10
CaO	3
MgO	2
SO ₃	0.7
Na ₂ O	1.0
K ₂ O	3.0
ออกไซด์อื่นๆ	1.3
Loss of lignition	5

2.2.1.3 ลักษณะทางกายภาพ

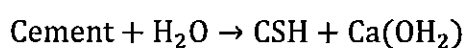
ตารางที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอย

คุณสมบัติ	เถ้าลอย
ความละเอียด (ตร.ชม/กรัม).	3,800
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลบ.ชม.)	900
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลบ.ชม.)	2.3
สี	เทาอ่อนถึงเทาเข้มหรือบางครั้งสีน้ำตาล

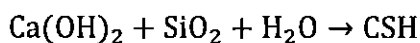
2.2.1.4 ลักษณะการทำงาน

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบ 2 ชนิด คือ

CHS และ Ca(OH)₂ ดังสมการ



CSH ทำหน้าที่เป็นการเชื่อมในส่วนผสมของคอนกรีตจับตัวกัน ส่วน Ca(OH)_2 ที่เกิดขึ้นนี้ประมาณ 25% โดยปริมาตร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใดๆ ในบางครั้งยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีตด้วย เช่น ทำให้เกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าคอนกรีต หรือเกิดเป็นฟิล์มบนผิวมวลรวม ทำให้เกิดการจับยึดระหว่างมวลรวมและมอร์ต้าไม่ดีนัก แต่เมื่อใส่เถ้าลอยเป็นส่วนผสม SiO_2 ที่มีอยู่จำนวนมากในเถ้าลอยจะทำให้ปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 และก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นดังสมการ



CSH ซึ่งทำหน้าที่เป็นกาวที่เพิ่มขึ้นนี้ จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตได้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังอัด, ความต้านทาน, การต้านการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

2.2.1.5 คุณสมบัติและการใช้งาน

- ปรับปรุงความสามารถเทได้ของคอนกรีตทำให้คอนกรีตลื่นไหลเข้าแบบได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ เถ้าลอย ซึ่งมีรูปร่างกลม
- ลดการเยิ้ม และแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีตสด
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดลง ซึ่งลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่
- เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตที่มีอายุมากกว่า 28 วัน
- ปริมาณน้ำที่ใช้ลดลงเมื่อต้องการความสามารถเทได้เท่ากัน,ปฏิกิริยาระหว่าง เถ้าลอย กับ Ca(OH)_2 ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง

2.2.2 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Ground Granular Blast Furnace Slag)

2.2.2.1 กรรมวิธีการผลิต

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม Slag ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการรวมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกา และอลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่าน Coke

คุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็ก และองค์ประกอบทางเคมีของ Slag ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม ผู้ผลิตจะทำการ

ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของ Slag อยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุงตัดแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบ และสภาพการทำงานของเตาเผา Slag ที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเข้าหลอม จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำ ผลก็คือ Slag ส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลมที่มีองค์ประกอบที่ค่อนข้างแน่นอน

2.2.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ออกไซด์	% โดยน้ำหนักของตะกรันเตาถลุงเหล็ก
SiO ₂	37
Al ₂ O ₃	11
Fe ₂ O ₃	0.3
CaO	40
MgO	7
SO ₃	0.3
Na ₂ O	0.4
K ₂ O	0.7
ออกไซด์อื่นๆ	2.3
Loss of Ignition	-

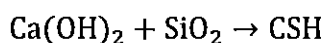
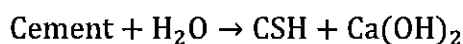
2.2.2.3 ลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ 2.8 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันเตาถลุงเหล็ก

คุณสมบัติ	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
ความละเอียด (ตร.ซม/กรัม)	3,500
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1,200
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลบ.ซ.)	2.9
สี	ขาว

2.2.2.4 ลักษณะการทำงาน

เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กมีองค์ประกอบทางเคมีของ CaO อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันของตะกรันเตาถลุงเหล็กจะใกล้เคียงกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ทั่วไป แต่เกิดช้ากว่า หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง SiO₂ ของตะกรันเตาถลุงเหล็กกับ Ca(OH)₂ ทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นอีกดังสมการต่อไปนี้



2.2.2.5 คุณสมบัติและการใช้งาน

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นส่วนผสมมีดังนี้

- ปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ผสม Slag จะช้ากว่าคอนกรีตทั่วไปส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาต่ำทำให้เหมาะกับงานโครงสร้างที่มีปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน
- คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟต , น้ำทะเลและสารเคมีได้
- ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น มีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี
- เพิ่มกำลังอัดและกำลังดัดให้คอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กทำได้สองลักษณะโดยปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง

25%-65%

2.2.3 Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

2.2.3.1 กรรมวิธีการผลิต

MS เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิต โดยการนำเอาวัตถุดิบอันได้แก่ หินควอร์ต ถ่าน และเหล็ก หลอมรวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัวได้ เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก โดยมีขนาดเล็กกว่าเม็ดซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า หลังจากนั้นจะถูกส่งไปบรรจุในไซโล และแยกใส่ถุงออกจำหน่าย คุณสมบัติของ MS จะแตกต่างจากเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็ก คือ MS ในแหล่งเดียวกันจะมีความผันแปรด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบสำหรับขบวนการผลิต Silicon ค่อนข้างบริสุทธิ์มาก

2.2.3.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของ Microsilica (MS)

ออกไซด์	% โดยน้ำหนัก MS
SiO ₂	92
Al ₂ O ₃	0.7
Fe ₂ O ₃	1.2
CaO	0.2
MgO	0.2
SO ₃	-
Na ₂ O	1.2
K ₂ O	1.9
ออกไซด์อื่นๆ	2.6
Loss of Ignition	-

2.2.3.3 ลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ 2.10 ลักษณะทางกายภาพของ Microsilica (MS)

คุณสมบัติของ	MS
ความละเอียด (ตร.ซม./กรัม)	150,000
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	240 , 600 (อัดตัวแน่น)
ความต้งจำเพาะ (กรัม/ลบ.ซ.)	2.2
สี	เทาดำ

2.2.3.4 ลักษณะการทำงาน

เนื่องจาก MS มีปริมาณ SiO_2 อยู่ถึงกว่า 90% ปฏิกริยาของ MS ในส่วนผสมคอนกรีตจะเหมือนกับของ PFA หรือแก้วลอย แต่อัตราการเกิดปฏิกริยาจะเร็วมาก เนื่องจาก MS มีความละเอียดสูงมากส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลายเป็นไปได้เร็วกว่าคอนกรีตทั่วไป

นอกจากปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นแล้ว MS ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยผลทางกายภาพอีกด้านหนึ่งกล่าวคือ MS เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงมาก เป็นผลดีทั้งด้านกำลังอัดและความทนทาน

2.2.3.5 คุณสมบัติและการใช้งาน

- ลดการเยิ้ม และการแยกตัวของคอนกรีตสด
- เพิ่มกำลังอัด ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้น และระยะยาว
- เพิ่มความหนาแน่น ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากส่งผลให้มีความทนทานสูง การซึมผ่านของน้ำ และอากาศเป็นไปได้ยาก
- ข้อคำนึงในการใช้ MS คอนกรีตที่ผสม MS ความสามารถเทได้จะลดลงอย่างมาก จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก และ มีแนวโน้มจะเกิด Plastic Shrinkage Crack มากกว่าคอนกรีตปกติ ดังนั้นจึงควรวางวิธีป้องกัน

2.2.4 เถ้าแกลบ (Rice husk ash)

2.2.4.1 กรรมวิธีการผลิต

การเผาแกลบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเผาแกลบผสมดินเหนียวหรือปูนขาวที่เหลือจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือกระดาษในอัตราส่วนที่เท่ากัน การเผาเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ (Boiler) ในโรงสี การเผาแกลบอย่างต่อเนื่องสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ พบว่าแกลบที่ได้มีคุณสมบัติต่างกันไปบ้าง เถ้าแกลบเทาขาวได้จากการเผาที่นาน และมีอากาศพอเพียง ส่วนเถ้าแกลบดำได้จากการเผาที่มีอากาศไม่พอเพียงหรือมีเวลาในการเผาต่ำ

เถ้าแกลบดำได้จากการเผาแกลบเพื่อให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำในโรงสีและเรียกแกลบนี้ว่าแกลบดำโรงสี (black boiler ash) อุณหภูมิของการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีไม่คงที่ขึ้นอยู่กับวิธีการป้อนแกลบช่วงเวลากการเผา และขนาดของเตาเผา อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 800 องศาเซลเซียส และอาจสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาของการเผาไม่นานนัก คุณสมบัติของแกลบที่ได้จากการเผาโดยวิธีนี้มีความแตกต่างกันมาก โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเผา ถ้าเผาช่วงเวลาสั้นแกลบที่ได้จะผ่านการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมี Loss on ignition สูง แกลบที่ได้โดยวิธีนี้มี Loss on ignition ต่ำสามารถนำมาบดผสมปูนซีเมนต์ปอซโซลานทำคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงที่ดีได้

เถ้าแกลบเทาขาวส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาในที่โล่งหรือในเตาขนาดเล็ก อุณหภูมิในการเผาขึ้นอยู่กับขนาดของแกลบ ถ้าเป็นกองใหญ่มาก อุณหภูมิอาจสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเป็นกองเล็กอุณหภูมิสูงเพียง 550 องศาเซลเซียส ถ้าเผาโดยกองติดดิน การเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ เนื่องจากอากาศไม่สามารถเข้าไปช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีได้ เมื่อเผาเสร็จแล้วการเก็บเถ้าแกลบก็ทำได้ยากและมักมีสิ่งเจือปน เช่น เศษดินและหินติดมาด้วย นอกจากนี้การเผาในที่มืดทำให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายได้ การเผาในที่โล่งควรเผาโดยยกพื้นบนตะแกรง และเพื่อให้อุณหภูมิของการเผาไม่สูงเกินไปควรใช้แกลบเพียงครั้งละ 20 กิโลกรัม หรือหนึ่งกระสอบ ซึ่งจะให้อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบที่ได้มีสีเทาขาวและสามารถใช้ทำเป็นวัสดุปอซโซลานได้ดี

2.2.4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

สารประกอบ	เถ้าแกลบ	เถ้าแกลบเทาขาว	เถ้าแกลบดำโรงสี
SiO ₂	86.9 - 97.3	88.3	89.9
Al ₂ O ₃	NA	0.4	0.5
Fe ₂ O ₃	0 - 0.6	3.3	1.8
CaO	0.2 - 1.5	0.5	0.5
K ₂ O	0.6 - 2.5	2.7	1.4
Na ₂ O	0 - 1.5	0.1	0.1
MgO	0.1 - 1.9	0.2	0.2
SO ₃	0.1 - 1.1	0.1	0.1
LOI	NA	3.7	3.7

2.2.4.3 ลักษณะทางกายภาพ

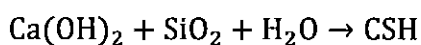
1. ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5-20 ไมครอน
2. เเผที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06
3. เเผที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.20
4. เเผที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.30

2.2.4.4 ลักษณะการทำงาน

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบ 2 ชนิด คือ CHS และ Ca(OH)₂ ดังสมการ

CSH ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตให้จับตัวกัน ส่วน Ca(OH)₂ ที่เกิดขึ้นนี้ประมาณ 25% โดยปริมาตร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใดๆในบางครั้งยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีตด้วย เช่น ทำให้เกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าคอนกรีต หรือเกิดเป็นฟิล์มบนผิวมวลรวม ทำให้เกิด

การจับยึดระหว่างมวลรวม และมอร์ต้าไม่ตึ้นัก แต่เมื่อใส่เถ้าแกลบ เป็นส่วนผสม SiO_2 ที่มีอยู่จำนวนมากใน เถ้าเถ้าแกลบนี้ จะทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 และก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้นดังสมการ



2.2.4.5 คุณสมบัติและการใช้งาน

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตสด เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ การก่อตัวระยะต้นเพิ่มขึ้นไม่มากนักแต่ระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก เถ้าแกลบทำให้การเยิ้ม น้ำของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนสูงจึงสามารถดึงน้ำไม่ให้ลอยขึ้นสู่ผิวหน้าได้ดี

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วการใช้เถ้าแกลบในส่วนผสมคอนกรีตทำให้การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น แต่การทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีของคอนกรีตดีขึ้น คุณสมบัติด้านอื่นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังรับแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ

2.2.5 เถ้าชานอ้อย

2.2.5.1 กรรมวิธีการผลิต

เถ้าชานอ้อยหลังจากผ่านกระบวนการที่บอ้อยแล้วสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ ความร้อนที่ได้นำไปใช้ในการผลิตพลังงานไอน้ำ โดยพลังงานไอน้ำที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ได้แก่ ใช้เป็นพลังงานไอน้ำในการขับกังหันเพื่อสร้างพลังงานกลในการที่บอ้อย และใช้การขับกังหันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงาน โรงงานผลิตน้ำตาลนอกจากจะเผาชานอ้อยเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงานแล้วยังสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อขายให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อย่างไรก็ตามปัญหาที่ตามมาจากการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงคือเถ้าชานอ้อย ซึ่งมีการพบว่ามีการนำเถ้าชานอ้อยไปใช้ประโยชน์น้อยมาก ดังนั้นจึงก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากต่อโรงงานผลิตน้ำตาลในการกำจัดเถ้าชานอ้อย เถ้าชานอ้อยยังก่อให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมบริเวณโดยรอบ เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นฝุ่นผงน้ำหนักเบา พุ้งกระจายได้ง่าย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าชานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือ ซิลิกอนออกไซด์ ในปริมาณสูงซึ่งส่วนใหญ่ไม่เป็นผลึกจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

2.2.5.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่นำมาจากแหล่งผลิต 3 จังหวัดในประเทศไทยมีดังนี้

ตารางที่ 2.12 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย

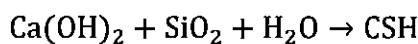
องค์ประกอบทางเคมี %	จากลพบุรี	จากราชบุรี	จากนครสวรรค์
SiO ₂	59.3	67.1	54.5
Al ₂ O ₃	4.5	4.5	6.0
Fe ₂ O ₃	3.4	3.4	3.2
CaO	14.8	3.6	15.4
MgO	1.8	2.1	1.4
K ₂ O	2.7	4.3	0.1
SO ₃	1.6	1.6	0.1
Loss On Ignition	9.1	13.7	19.4

2.2.5.3 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะและอนุภาคของเถ้าชานอ้อยก่อนและหลังบด พบว่าเถ้าชานอ้อยก่อนบด มีลักษณะรูปร่างเป็นผิวขรุขระมีเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนและมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดเฉลี่ยอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอน ส่วนเถ้าชานอ้อยหลังบดมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอนขนาดอนุภาคและรูพรุนลดลง เมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยก่อนบด เถ้าชานอ้อยก่อนทำการบดพบว่ามีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.01-2.11 และหลังจากปรับปรุงคุณภาพในการบดแล้วพบว่ามีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 2.10-2.32 การที่ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นภายหลังจากการบด เนื่องจากอนุภาคที่เป็นรูพรุนลดลง ความถ่วงจำเพาะจึงเพิ่มขึ้น

2.2.5.4 ลักษณะการทำงาน

จะคล้ายกับเถ้าแกลบคือ SiO_2 จะไปทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ดังสมการต่อไปนี้



2.2.5.5 คุณสมบัติและการใช้งาน

คอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10,20,30 โดยน้ำหนักที่อายุการบ่ม 7 วันสามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 378,358,341 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งเป็นกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีค่ากำลังอัดที่ 7 วันเท่ากับ 337 กก/ซม² และยิ่งพบว่าที่อายุ 90 วันส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20 สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 577 กก/ซม² ซึ่งเป็นกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีค่ากำลังอัดที่ 90 วันเท่ากับ 508 กก/ซม²

อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 ขึ้นไปจะทำให้กำลังอัดคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ประโยชน์ของเถ้าขานอ้อยหลักๆ ก็คือช่วยเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีต

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุพอลิโพรพิลีน

2.3.1 X-ray Fluorescence (XRF)

XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์, ธรณีวิทยา, สิ่งแวดล้อม, ทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือ Fluorescence ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่า ในตัวอย่างที่ทดสอบนั้น มีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray Photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่ารังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปลำรังสีขนานไปยัง Diffracting Crystal ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่แน่นอนเช่น ควอทซ์ , ลิเทียม-ฟลูออไรด์ , โมกา ฯลฯ โดย Diffracting Crystal จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ (X-ray Detector) โดยปกติ Diffracting Crystal จะทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก Colimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจวัด

2.3.2 Brunauer Paul Hugh Emmett and Edward Teller(BET)

บรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นก๊าซไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับ กับความดันสัมพัทธ์ ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น

เป็นเครื่องที่ออกแบบมาเพื่องานวัดพื้นที่ผิวโดยเฉพาะ เครื่องนี้เป็นเครื่องที่ทำการวัดโดยอัตโนมัติ การไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวดังกล่าวกระทำโดยการให้ความร้อนและ "ทำสุญญากาศ" ตัวเครื่องเองมีระบบตรวจสอบว่าการไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวเสร็จสมบูรณ์หรือยังด้วยการ "วัดความดัน" ซึ่งถ้าหากพื้นผิวยังมีก๊าซใด ๆ ดูดซับเอาไว้อยู่ ก๊าซที่คายออกมาจะทำให้ความดันของระบบสูงกว่าสุญญากาศ ถ้าหากยังทำสุญญากาศไม่ได้ระดับที่เหมาะสม เครื่องก็จะยังไม่เริ่มการวิเคราะห์ จะเริ่มวิเคราะห์ก็ต่อเมื่อทำสุญญากาศได้ระดับแล้วเท่านั้น ส่วนต้องใช้เวลาทำสุญญากาศนั้นนานเท่าใดก็

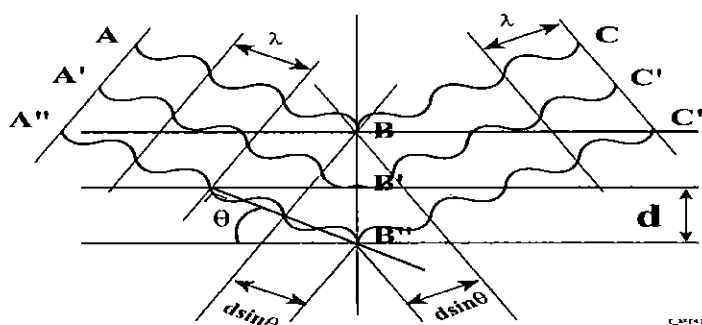
ขึ้นอยู่กับตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวสูง อาจต้องใช้เวลาทำสุญญากาศอย่างน้อย 8-12 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวดำ อาจใช้เวลาทำสุญญากาศเพียงแค่ 2 ชั่วโมง

เมื่อทำสุญญากาศได้ที่แล้วก็จะเปลี่ยนจากการให้ความร้อนมาเป็นการหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว (ตรงนี้ต้องทำการเปลี่ยนอุปกรณ์กันเองจากถังให้ความร้อนมาเป็นถังไนโตรเจนเหลว) เครื่องก็จะเริ่มฉีดก๊าซไนโตรเจนไปยังตัวอย่างตามปริมาตรที่กำหนดไว้ ซึ่งจะพบว่าตัวอย่างจะดูดซับก๊าซไนโตรเจนเอาไว้และจะบันทึกปริมาณก๊าซตัวอย่างดูดซับเอาไว้ พอดูดซับเอาไว้จนอิ่มตัวก็จะทำการไล่ก๊าซออก ดังนั้นในการวิเคราะห์จะมีข้อมูลในระหว่างการดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) ปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับหรือคายซับสามารถนำมาใช้คำนวณพื้นที่ผิว และพฤติกรรม การดูดซับและการคายซับที่ความดันต่าง ๆ กันจะถูกใช้คำนวณขนาดรูพรุน ข้อมูลที่เครื่องวัดได้นั้นจะนำไปคำนวณพื้นที่ผิว

2.3.3 X-ray Diffractometer (XRD)

XRD เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin \theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยเครื่อง XRD เป็นเครื่องที่ติดตั้ง Detector ที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็ว และให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเครื่อง XRD

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาค่าประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหา ปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่าง ว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยการใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

2.3.4 Thermogravimetric Analysis (TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือก๊าซที่มีความว่องไว เช่น ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

2.3.5 Differential Thermal Analysis(DTA)

DTAเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของวัสดุตัวอย่าง เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อน โดยวิธีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถ แบ่งปฏิกิริยา ได้เป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนออกมาสู่ภายนอก (Exothermic reaction) และ ปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนจากภายนอก (Endothermic reaction)

การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องวัดความแตกต่าง ของอุณหภูมิของสารตัวอย่าง และสารเปรียบเทียบ โดยจะได้รับความร้อนเท่าๆกัน ถ้าอุณหภูมิของสารตัวอย่าง เริ่มต่างไป จากอุณหภูมิของสารเปรียบเทียบ เครื่องก็จะจับการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ และสามารถเพิ่ม หรือ ลดปริมาณความร้อน ที่ป้อนให้กับสารเปรียบเทียบ เพื่อควบคุมสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ ให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นศูนย์ (Null balance)ค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาที่เครื่องต้องจ่ายไฟฟ้าไปให้กับ Heating Elementเพื่อรักษาสภาพ ให้ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นศูนย์นั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่ตัวอย่างปล่อยออกต่อหน่วยเวลา ถ้าเครื่องต้องจ่ายไฟฟ้า ให้กับสารตัวอย่าง เป็นปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนจากภายนอก ส่วนถ้าเครื่องต้องจ่ายไฟฟ้า ให้กับสารเปรียบเทียบนั้น เป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนออกมาสู่ภายนอก

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง วิธีการและขั้นตอนการทดลองซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดในโครงการวิจัยนี้ โดยก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมการเกี่ยวกับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อความรวดเร็วและยังช่วยให้การดำเนินงานในการทำโครงการวิจัยเป็นไปตามแผนที่วางไว้ อีกทั้งการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ดี และการทำการทดลองที่เป็นขั้นตอนย่อมจะทำให้ผลการทดลองที่ได้มีประสิทธิภาพตามจุดประสงค์ที่วางไว้

3.1 มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

3.1.1 ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

3.1.2 ASTM C191 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle)

3.1.3 ASTM C187 Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง

3.2.2 ถาดอลูมิเนียม

3.2.3 ตู้อบ

3.2.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.2.5 เครื่องร่อนทราย

3.2.6 แบบหล่อมอเตอร์ดำเพื่อทดสอบกำลังอัด ขนาด 5x5x5 cm

3.2.7 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.2.8 เกรียง

3.2.9 กระบอกดวงน้ำ

3.2.10 เครื่องผสมมอเตอร์ดำ

3.2.11 เครื่องทดสอบไคแคต

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.3.2 ทรายแม่น้ำคัดส่วนสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำเบอร์ 100

3.3.3 ฝ้าซังข้าวโพดที่ได้จากบริษัท เจริญโภคภัณฑ์ (CPF) พิชญ์โลก

3.3.4 น้ำสะอาด

3.4 การเตรียมวัสดุ

3.4.1 ทราย นำทรายที่จะใช้มาล้างน้ำให้สะอาดจากนั้นอบให้แห้ง แล้วก็ร่อนให้ได้ขนาดที่ต้องการนั้นก็คือผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำเบอร์ 100

3.4.2 ฝ้าซังข้าวโพด นำฝ้าซังข้าวโพดที่ได้จากโรงงานมาอบให้แห้งแล้วบดด้วยเครื่องบดให้ละเอียด จากนั้นแบ่งครึ่ง ครึ่งหนึ่งเก็บไว้ในที่แห้ง ส่วนอีกครึ่งนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เสร็จแล้วก็นำไปเก็บไว้ในที่แห้ง

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมโดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

3.5.1.1 ชั่งปูนซีเมนต์และเถ้าซังข้าวโพดตามตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมปูนซีเมนต์เพสต์

ร้อยละการแทนที่ของ เถ้าซังข้าวโพด	ปูนซีเมนต์(กรัม)	เถ้าซังข้าวโพด (กรัม)	น้ำ
0%	650.0	0	แล้วแต่กำหนด
5%	617.5	32.5	แล้วแต่กำหนด
10%	585.0	65.0	แล้วแต่กำหนด
15%	552.5	97.5	แล้วแต่กำหนด
20%	520.0	130.0	แล้วแต่กำหนด

ตวงน้ำตามปริมาณที่กำหนด ปริมาณน้ำที่กำหนดอาจเริ่มต้นเพื่อให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ตกลงอย่างอิสระและจมลงในซีเมนต์เพสต์น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นก็เพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเข็มไวแคตจมลงมากกว่า 10 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองต้องมีอย่างน้อยสามค่า

3.5.1.2 ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่องผสม

3.5.1.3 ใส่ น้ำที่เตรียมไว้ลงในหม้อผสมจนหมด

3.5.1.4 ใส่ปูนซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมเถ้าลงไป ในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำแล้วทิ้งไว้ 30 วินาที เมื่อครบ 30 วินาที แล้วจึงเดินเครื่องผสมโดยใช้อัตราช้า (140 ± 5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

3.5.1.5 หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างที่หยุดนี้ให้ปาดปูนซีเมนต์ที่ติดข้างหม้อลงยังก้นหม้อ

3.5.1.6 เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง (285 ± 10 รอบต่อวินาที) เป็นเวลา 1 นาที

3.5.1.7 ให้ผู้ทดสอบใส่ถุงมือสองข้าง นำซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสม จากนั้นป้อนให้เป็นก้อนกลมๆ โยนสลั้มือในแนวราบจำนวน 6 ครั้ง

3.5.1.8 นำซีเมนต์เพสต์ใส่ยังแบบรูปกรวยโดยใส่จากด้านฐานเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ออกไปอีกด้านหนึ่ง

3.5.1.9 ปาดซีเมนต์เพสต์ที่เกินออกมาทางด้านปลายกรวยด้วยเกรียงเหล็ก โดยปาดเพียงครั้งเดียว เมื่อปาดเสร็จแล้วหากผิวหน้ายังไม่เรียบให้ใช้เกรียงปาดแต่งผิวหน้าเบาๆ จากนั้นนำไปวางบนเครื่องทดสอบไวแคต

3.5.1.10 เลื่อนเข็มไวแคตลงมาจากกระทั่งสัมผัสกับผิวหน้าซีเมนต์เพสต์แล้วยึดก้านเข็มไวแคตให้แน่น จากนั้นปรับสเกลบอกระยะ

3.5.1.11 คลายสกรูเพื่อให้เข็มตกอย่างอิสระและจมเข้าไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบ 30 วินาทีแล้วให้หมุนสกรูยึดก้านเข็มไวแคต แล้วอ่านค่าว่าเข็มนั้นจมลงในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นระยะเท่าไร ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติคือปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จมลงในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาที และได้ระยะจม 10 มิลลิเมตร เมื่ออ่านค่าแล้วพบว่าเข็มไวแคตจมไม่ถึง 10 มิลลิเมตร ครั้งต่อไปก็เพิ่มน้ำ แต่ถ้าอ่านค่าแล้วพบว่าเข็มไวแคตจมเกิน 10 มิลลิเมตร ครั้งต่อไปก็ลดน้ำลง อย่างน้อยต้องให้ได้ 3 ค่า เมื่อได้ปริมาณน้ำชื้นเหลือปกติแล้วก็เอาไปหาระยะเวลาการก่อตัวต่อไป ส่วนซีเมนต์ผสมเด็านั้นก็ทำเหมือนกัน

3.5.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

3.5.2.1 ชั่งปูนซีเมนต์และแฉ่ำเหมือนกันกับการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ดวงน้ำตามที่ได้จากการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3.5.2.2 ทำการผสมซีเมนต์เหมือนกันกับการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3.5.2.3 ปรับเครื่องทดสอบไวแคตโดยการปรับก้านเข็มและใส่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

3.5.2.4 นำซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วโยนสลักมือ 6 ครั้งนำไปใส่แบบกรวยปาดหน้าให้เรียบจากนั้นทิ้งไว้ในที่มีความชื้นสูง 30 นาที

3.5.2.6 เมื่อครบ 30 นาที จึงนำตัวอย่างไปวางบนเครื่องทดสอบไวแคตปรับระยะเข็มให้ลงมาสัมผัสกับผิวหน้าซีเมนต์เพสต์ปรับสเกลระยะให้เป็นศูนย์

3.5.2.6 ปลดปล่อยให้เข็มไวแคตตกลงอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาที เมื่อครบแล้วให้ยึดก้านเข็มไวแคตแล้วอ่านค่าระยะจนทำการทดสอบหาระยะจมทุกๆ 15 นาทีจนกระทั่งได้ระยะจมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ระหว่างการทดสอบอย่าให้มีการสั่นสะเทือน ระยะห่างระหว่างจุดทดสอบต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร

3.5.2.6 ระยะเวลาการก่อดัวเริ่มต้นคือระยะเวลาที่ซีเมนต์เริ่มสัมผัสกับน้ำ จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตถูกปล่อยให้จมลงอย่างอิสระเป็นเวลา 30 นาที และจมลงได้ระยะ 25 มิลลิเมตร ส่วนเวลาการก่อดัวระยะปลายคือระยะเวลาที่ซีเมนต์เริ่มสัมผัสกับน้ำ จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตไม่สามารถจมลงได้

3.5.3 การทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า

3.5.3.1 ทาน้ำมันเครื่องภายในแบบหล่อต่างๆ

3.5.3.2 เตรียมส่วนผสมตามตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมมอร์ต้าสำหรับมอร์ต้า 9 ก้อน

ร้อยละการแทนที่ ของเถ้าซัง ข้าวโพด	ปูนซีเมนต์(กรัม)	เถ้าซังข้าวโพด (กรัม)	ทราย(กรัม)	น้ำ(มิลลิลิตร)
0%	740	0	2,035	359
5%	703	37	2,035	359
10%	666	74	2,035	359
15%	629	111	2,035	359
20%	592	148	2,035	359

3.5.3.3 ประกอบหม้อผสมและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่อง

3.5.3.4 ใส่น้ำลงในหม้อผสม จากนั้นใส่ปูนซีเมนต์แล้วเดินเครื่องผสมโดยใช้อัตราซ้ำ (140±5รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

3.5.3.5 เมื่อครบแล้วจึงใส่ทรายลงไปอย่างช้าๆภายในเวลา 30 วินาที

3.5.3.6 หยุดเครื่องผสม แล้วเปลี่ยนอัตราการผสมเป็นปานกลาง (285±10รอบต่อวินาที) และผสมด้วยอัตรานี้เป็นเวลา 30 วินาที

3.5.3.7 หยุดเครื่องผสมแล้วปล่อยมอร์ต้าทิ้งไว้ 90 วินาที โดยต้องหาภาชนะมาปิด เพื่อป้องกันความชื้นระเหยออก

3.5.3.8 เดินเครื่องด้วยอัตราเร็วปานกลางอีก 1 นาทีเป็นอันเสร็จสิ้นการผสมมอร์ต้า

3.5.3.9 นำมอร์ต้ามาใส่แบบหล่อที่เตรียมไว้โดยใช้เกรียงตักมอร์ต้าลงในแบบชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร กระทั่งมอร์ต้าด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่างภายในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบ รอบละ 8 ครั้งเมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จ จึงใส่มอร์ต้าชั้นที่ 2 ให้เต็มแล้วกระทุ้งเหมือนเดิม รวมทั้งหมด 64 ครั้งต่อ 1 ก้อน แล้วใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าส่วนที่เกินออกมาออก

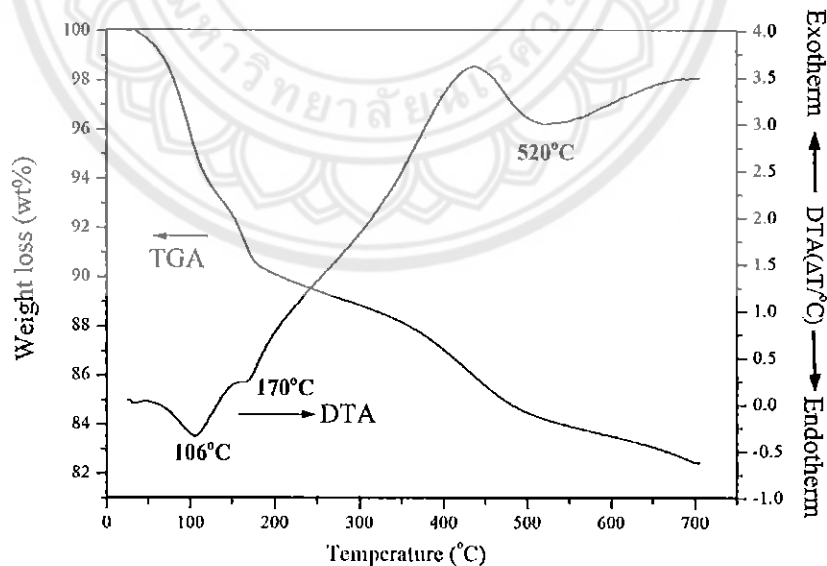
3.5.3.10 ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก แล้วนำไปบ่มโดยการแช่น้ำ ทำการทดสอบกำลังอัด ที่ 1,3,7,28 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลังอัดให้เช็ดด้วยผ้าให้แห้ง และเลือกด้านที่เรียบที่สุด สองด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงอัด



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

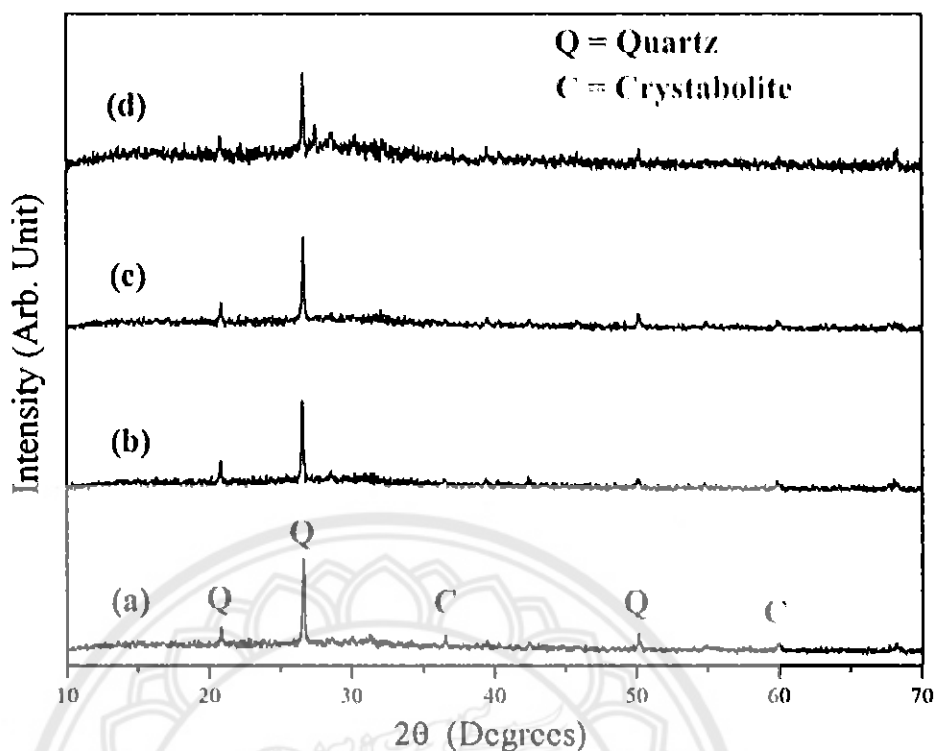
รูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ TGA-DTA ของถ้ำซังข้าวโพด จากกราฟ TGA แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุอยู่ 3 ช่วงหลัก การสูญเสียน้ำหนักช่วงแรกเกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิ 30-137 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการเกิด Endothermic peak ที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส จากกราฟ DTA การสูญเสียน้ำหนักในช่วงนี้เกิดจากการระเหยของน้ำและสสารที่มีน้ำหนักเบาในวัสดุ การสูญเสียน้ำหนักในช่วงที่สองเกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิ 137-382 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการเกิด Endothermic Peak ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากกราฟ DTA การสูญเสียน้ำหนักในช่วงนี้เกิดจากกระบวนการ Depolymerization ของ Polysaccharides ในถ้ำซังข้าวโพด [6] การสูญเสียน้ำหนักในช่วงที่สามเกิดขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการเกิด Endothermic Peak ที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส จากกราฟ DTA การสูญเสียน้ำหนักในช่วงนี้เกิดจากการระเหยของคาร์บอนและการฟอร์มตัวของซิลิกาในรูปอสัณฐาน [7]



รูปที่ 4.1 กราฟ TGA-DTA ของถ้ำซังข้าวโพด

องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ (OPC) แก้วซังข้าวโพด (CCA) และแก้วซังข้าวโพดเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (CCA600) จะเปรียบเทียบในตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ CCA แสดงให้เห็นว่า CCA มี $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 68.11% ซึ่งต่ำกว่าความต้องการทางเคมีของข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618 ผลิตภัณฑ์ปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน (ซึ่งผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ต้องสูงกว่า 70%) อย่างไรก็ตามหลังจากปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (CCA600) ร้อยละของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้นเป็น 71.87% และมีองค์ประกอบของ SO_3 น้อยกว่า 4% ซึ่งสามารถจัดเป็นผลิตภัณฑ์ปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C618 การเพิ่มขึ้นของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ใน CCA600 เนื่องมาจากการระเหยของธาตุองค์ประกอบบางอย่าง เช่น คาร์บอน, แคลเซียม และ แมกนีเซียมในระหว่างการปรับปรุงคุณสมบัติด้วย (Heat Treatment) ความร้อน ทำให้อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ต่อองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากของตัวอย่างแก้วซังข้าวโพด (CCA) , แก้วซังข้าวโพดที่เผาที่อุณหภูมิ 200,400,600 องศาเซลเซียส (CCA200,CCA400,CCA600 ตามลำดับ) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในกรณี CCA การเกิด diffraction peaks ความเข้มสูงที่ $2\theta = 22^\circ$, 28° และ 50° แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของควอตซ์ อ้างอิงจากฐานข้อมูล (JCPDS No: 79-1915) การเกิด Intensity Peaks ความเข้มปานกลางเกิดที่ $2\theta = 36^\circ$ and 60° ซึ่งสอดคล้องกับ Crystabollite อ้างอิงจากฐานข้อมูล (JCPDS No: 89-3434) หลังจากที้นำ CCA มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200,400,600 องศาเซลเซียส ความเข้มของ Diffraction Peak มีแนวโน้มต่ำลงแสดงให้เห็นว่าซิลิกาใน CCA ถูกเปลี่ยนจาก Crystalline Silica เป็น Amorphous Phase ซิลิกาอสัณฐาน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษาสอดคล้องกับการวิเคราะห์, ตรวจสอบและข้อเสนอของ P.K.Jal et al. [8]

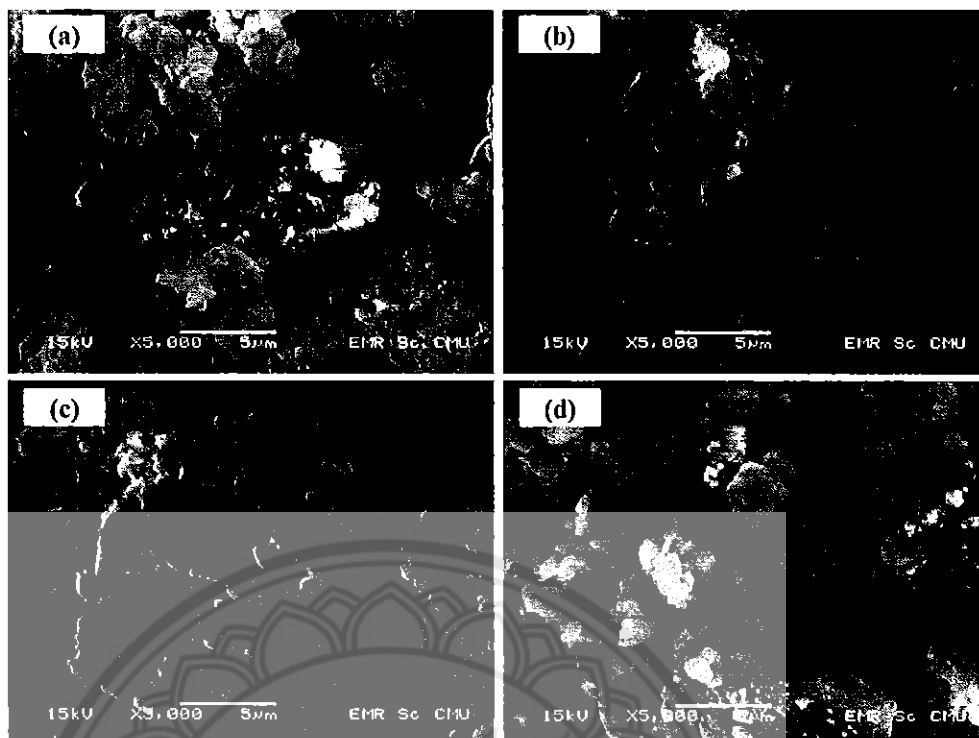


รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ (a) แก้วซังข้าวโพด (b) แก้วซังข้าวโพดเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (c) แก้วซังข้าวโพดเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ (d) แก้วซังข้าวโพดเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของ CCA และ CCA ที่เผาแล้วด้วยอุณหภูมิที่ต่างต่างกัน แสดงใน รูปที่ 4.3 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคของ CCA พบว่าเป็นรูปทรงเหลี่ยมและเกิดการกระจายอนุภาคค่อนข้างสูง รูปที่ 4.3 (b) แสดงให้เห็นว่าเมื่อ CCA ได้รับความร้อนในการเผาที่ 200 องศาเซลเซียส อนุภาคขนาดใหญ่ของแก้วเริ่มมีการแตกตัวจากกันเป็นอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคขนาดเล็กเริ่มหลอมและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแสดงในรูปที่ 4.3 (c) รูปที่ 4.3 (d) เมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคและจับเป็นก้อนใหญ่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF และ XRD แสดงให้เห็นว่า CCA600 มีองค์ประกอบของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ สูงกว่า CCA และมีเฟสของซิลิกาอสัณฐานสูงกว่า CCA ปัจจัยเหล่านี้ ทำให้สรุปได้ว่า CCA600 น่าจะเหมาะสมมากกว่า CCA ในการใช้เป็นวัสดุ Pozzalan ดังนั้น CCA600 จึงถูกเลือก ในการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ เปรียบเทียบ กับ CCA

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี ,ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ พื้นที่ผิวของ OPC , CCA และ CCA600

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ซีเมนต์ (OPC)	เถ้าซังข้าวโพด (CCA)	เถ้าซังข้าวโพดเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (CCA600)
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.71	60.09	63.91
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	5.16	3.99	4.01
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3.22	4.03	3.95
Calcium oxide (CaO)	66.23	5.18	4.13
Magnesium oxide (MgO)	0.95	3.12	2.91
Potassium oxide (K ₂ O)	0.48	14.73	12.12
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.19	-	-
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.14	0.82	0.88
Phosphorus pentoxide (P ₂ O ₅)	-	6.72	6.49
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	-	68.11	71.87
Mean grain size (µm)	15.37	23.56	28.45
BET specific surface area (m ² /kg)	3,200	9,050	7,441



รูปที่ 4.3 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคของ (a) แก้วซังข้าวโพด (b),(c),(d)แก้วซังข้าวโพดที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200,400,600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของแก้วซังข้าวโพดทำการทดสอบโดยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM C187 ผลที่ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ CCA หรือ CCA600 เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ (OPC) จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากจากความพรุนและพื้นที่ผิวของ CCA และ CCA600 มากกว่า OPC ส่วน ความต้องการน้ำของ CCA กับ CCA600 จะแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามข้อกำหนดสำหรับมาตรฐานวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต (ASTM C618) ได้กำหนดปริมาณน้ำที่เหมาะสมไว้ต้องไม่เกิน 115% ของตัวอย่างอ้างอิงซึ่งในกรณีการวิจัยนี้ค่ามาตรฐานของปริมาณน้ำที่เหมาะสมต้องไม่เกิน 30.87% ดังนั้นสิ่งนี้จึงเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ CCA หรือ CCA600 เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ในงานคอนกรีต

อัตราส่วน Water/Binder ที่ Normal Consistency ถูกนำมาใช้ในการทดสอบหาเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ (Initial Sitting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ (Final Sitting Time) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในกรณีของ CCA เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์

เพสต์ (Initial Sitting Time) เพิ่มขึ้นจาก 115 เป็น 271 นาที และเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Sitting Time) เพิ่มขึ้นจาก 223 เป็น 405 นาที การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการก่อตัวเนื่องจากการเพิ่มแทนที่ ของ CCA หรือ CCA600 สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุสองประการ ประการแรกคือการเพิ่มเปอร์เซ็นต์การแทนที่ของ CCA หรือ CCA600 ก็จะไปลดปริมาณซีเมนต์ซึ่งจะทำให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ช้าลงส่งผลให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น อีกประการคือเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นซ้ำทำให้ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลงทำให้น้ำระเหยได้ช้า จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของ CCA แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่คล้ายกันกับ ซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของ CCA600

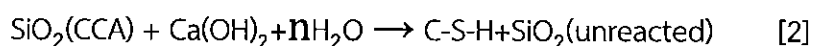
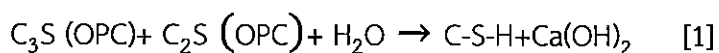


ตารางที่ 4.2 Water/binder ratio, เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Sitting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Sitting Time) ของ Cement Paste และ ปูนซีเมนต์ผสม CCA,CCA600 ที่ร้อยละต่างๆ

ตัวอย่าง	% เถ้าที่แทนที่	อัตราส่วน Water/binder ที่ normal consistency	เวลาการก่อตัว เริ่มต้น (นาท)	เวลาการก่อตัวระยะ ปลาย(นาท)
Reference	0	26.84	115	223
CCA	5	28.80	183	314
	10	30.98	222	349
	15	34.05	252	387
	20	35.77	271	405
CCA600	5	28.44	175	306
	10	32.48	229	370
	15	34.26	261	377
	20	36.43	270	414

กำลังอัดมอร์ต้าที่ใช้ CCA และCCA600 เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละต่างๆแสดงในตารางที่ 4.3,รูปที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.4,รูปที่ 4.5 ตามลำดับ ในกรณีตัวอย่างที่ใช้ CCA เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์กำลังรับแรงอัดระยะสั้นที่อายุ 24 ชั่วโมง หรือ 3 วัน ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ CCA ทำให้ปริมาณ OPC ลดลง ซึ่งทำให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ล้วน และตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วย CCA มีค่าลดลงเมื่อการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 28 วันการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดนี้เกิดจากปฏิกิริยา

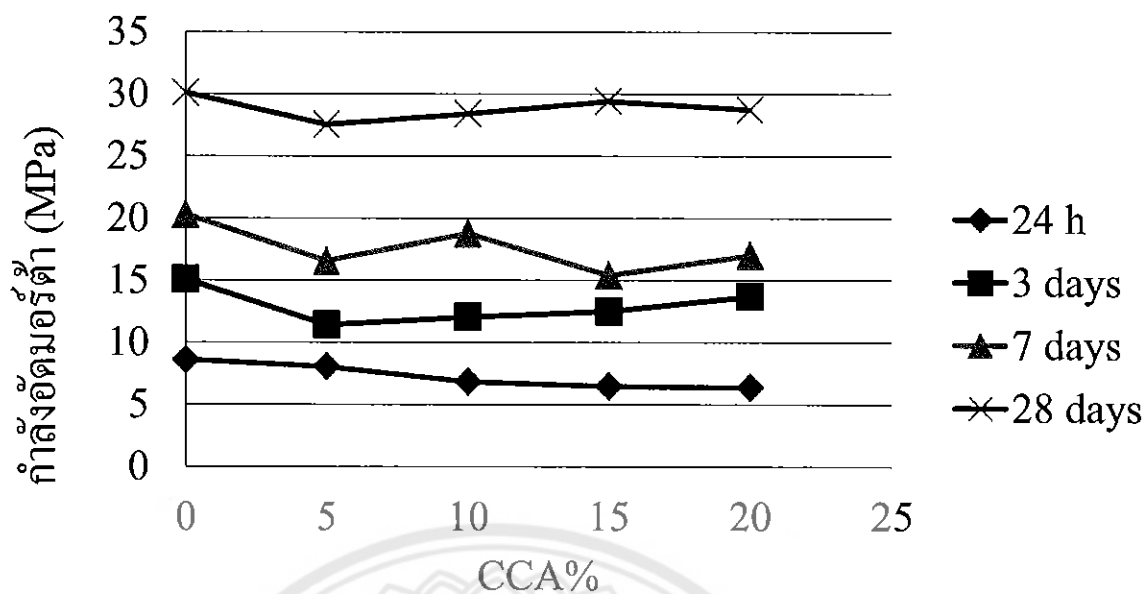
ปอซโซลานีกระหว่างซิลิกาอสัณฐานจาก CCA กับ Ca(OH)_2 ในซีเมนต์เพสต์ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ากับการใช้ CCA600 เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ (รูปที่ 4.5) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่คล้ายกันกับการใช้ CCA เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ CCA600 อยู่ 20% ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของ CCA600 ทั้งนี้อาจเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานีกระหว่างซิลิกาอสัณฐาน และ Ca(OH)_2 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ CCA, CCA600 อยู่ 20% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหา pozzolanic activity index ได้เท่ากับ 95% และ 106% ซึ่งมากกว่าค่าที่ ASTM C618 กำหนดไว้คือ 75% แสดงให้เห็นว่า CCA และ CCA600 เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่มีส่วนผสม (CCA) ที่อัตราส่วนต่างๆ

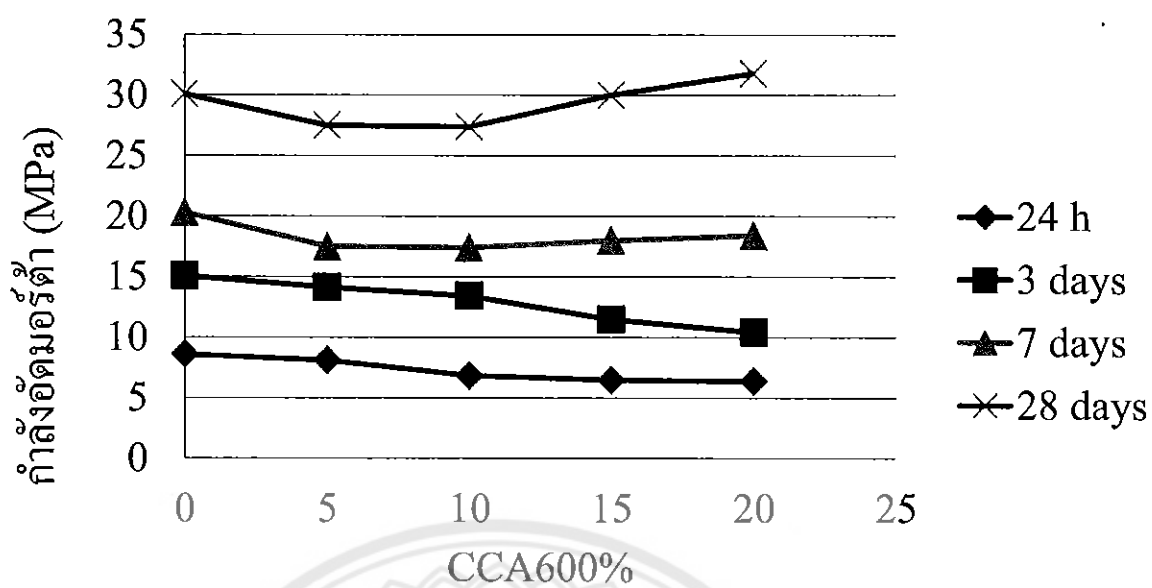
% แก้วซังข้าวโพด (CCA)	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด (MPa)
0	8.6	15.08	20.32	30.1
5	8.05	11.41	16.55	27.53
10	6.83	12.05	18.77	28.41
15	6.47	12.5	15.4	29.42
20	6.37	13.7	17	28.74



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ากับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ของ CCA

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่มีส่วนผสม CCA 600 ที่อัตราส่วนต่างๆ

% เถ้าซังข้าวโพด (CCA 600)	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด (MPa)	กำลังอัด (MPa)
0	8.6	15.08	20.32	30.1
5	8.1	14.12	17.5	27.5
10	6.83	13.41	17.4	27.4
15	6.47	11.47	18	30
20	6.37	10.43	18.4	31.8



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ากับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ของ CCA600



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบต่างๆที่ได้ดำเนินการมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ และซิลิกาอสัณฐานมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา

5.2 แก้วซึ่งข้าวโพดที่ได้รับการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุพอลิโซลาน

5.3 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการใช้ CCA หรือ CCA600 ทำให้เกิดความตึงเครียดน้ำ , เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อระยะปลาย(Final Setting Time) ของ Cement Paste เพิ่มขึ้น

5.4 ค่า Pozzolanic Activity Index ซึ่งคำนวณจากค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ CCA , CCA600 อยู่ 20% ที่อายุการบ่ม 28 วัน เป็น 95% และ 106 % ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า CCA หรือ CCA600 ที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนที่อุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโซลาน

บรรณานุกรม

1. ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล , ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 3
2. ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล , ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ มาตรฐาน และคอนกรีต
3. CPAC ,คอนกรีตเทคโนโลยี
4. AdesanyaDA,Raheem AA. Development of corn cob ash blended cement
Constr Build Mater2009;23(1): 347-52.
5. Subramaniam KV, Gromotka R, Shah SP, Olba K, Hill R. Influence of ultrafine fly ash on the early age response and the shrinkage cracking potential of concrete. ASCE J Mater Civil Eng 2005;17(1): 45-53.
6. Ramadhansyah PJ, Mahyun AW, Salwa MZM, Bakar BH, Johari MA, Ibrahim M H. Thermal analysis and pozzolanic index of rice husk ash at different grinding time. In Proc. ICASCE 2012, Bina Nusantara University, Jakarta, Indonesia; 2012.
7. Mohanraj K, Kannan S, Barathan S, Sivakumar G. Preparation and characterization of nano SiO₂ from corn cob ash by precipitation method. Optoelectron Adv Mat2012;4(6):394-97.
8. Jal PK, Sudarshan M, Saha A, Patel S, Mishra BK. Synthesis and characterization of nanosilica prepared by precipitation method. J Colloids Surfaces 2004;240(1-3):173-78.

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ

1.ชื่อ นายสมชาย ชัยปลื้ม

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 153/1 หมู่ 10 ตำบลตะเบา อำเภอมือง จังหวัดเพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเพชรพิทยาคม
กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
ชั้นปีที่ 4

2.ชื่อ นายจักรกฤษณ์ คงทนแท้

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 115หมู่ 11 ตำบลบ้านโคก อำเภอมือง จังหวัดเพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเพชรพิทยาคม
กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
ชั้นปีที่ 4

3.ชื่อ นายเดชิต ธนภพฐากุล

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 9 หมู่ 1 ตำบลสามแยก อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบึงสามพันพิทยาคม
กำลังศึกษาอยู่ที่มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
ชั้นปีที่ 4

