



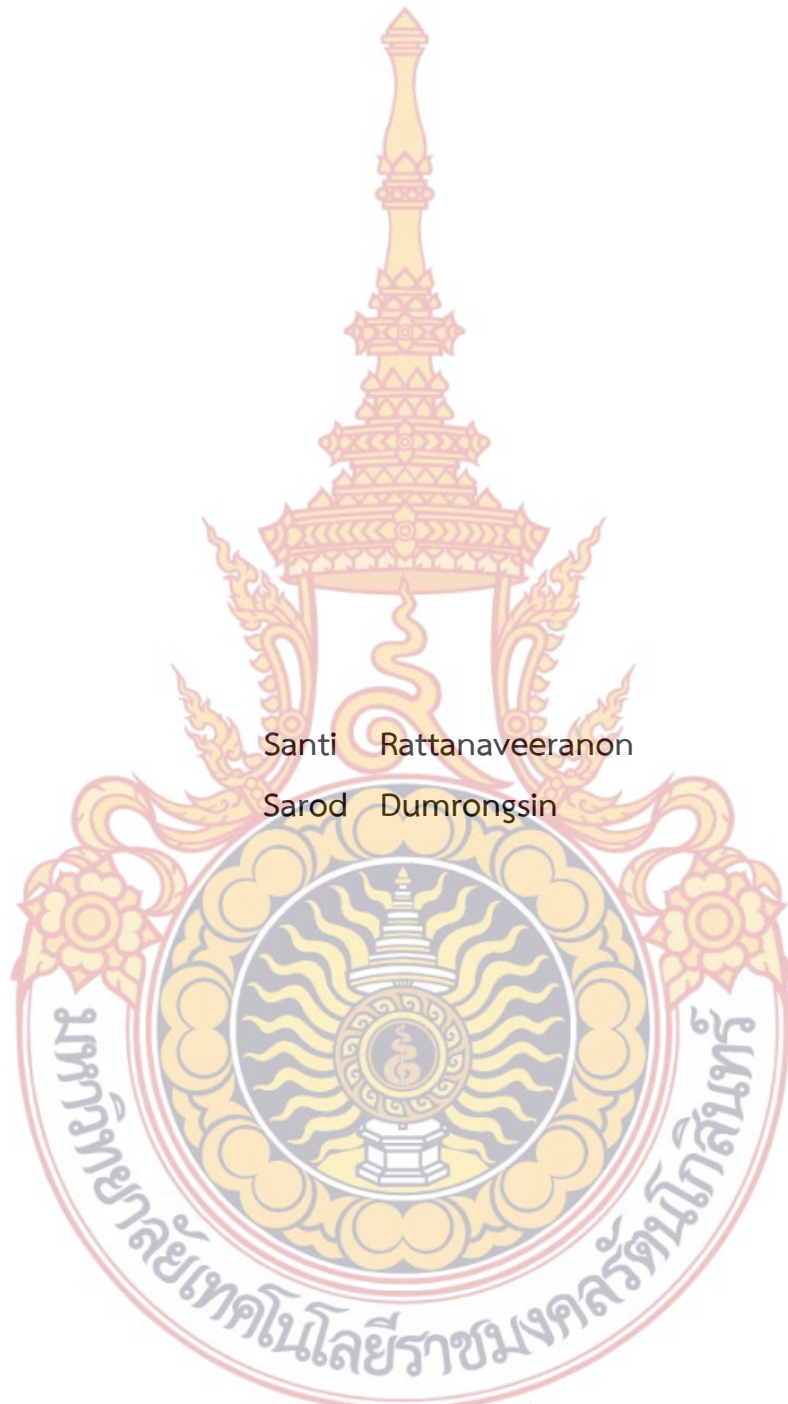
ผลของการเติมซีเมนต์เข้าในซีเมนต์เชิงพาณิชย์ที่มีต่อผลแรงค้ำงในชิ้นงาน

สันติ รัตน์วีรนนท์
สาโรจน์ ดำรงศิลป์

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประจำปีงบประมาณ 2558

The Effect to Bending Strength Samples from Adding the Sugarcane

Bagasse Ash in Commercial Cement



Santi Rattanaveeranon

Sarod Dumrongsin

Granted by Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal 2015

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงจนถึงวันนี้ได้เพราะได้รับความอนุเคราะห์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษาวิจัยในโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณบริษัทประจวบอุตสาหกรรม จำกัด อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรีที่อนุเคราะห์ให้เข้างานอ้อยเพื่อนำมาศึกษาในโครงการนี้โดยไม่คิดมูลค่า

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

คณะผู้จัดทำ
มิถุนายน 2559



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ	Social 020/2558	
ชื่อโครงการ	ผลของการเติมซีเมนต์ในซีเมนต์เชิงพาณิชย์ที่มีต่อผลแรงค้ำงใน ชิ้นงาน	
ชื่อผู้วิจัย	นายสันติ	รัตน์วีรนนท์
	ผศ.สาโรจน์	ดำรงศิลป์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของเถ้าชานอ้อย และคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์
เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบเคมี และขนาดของอนุภาค
ของเถ้าชานอ้อยก่อนบดและหลังบด การทดสอบคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ได้แก่ กำลังรับแรงอัด
และแรงค้ำง โดยทำการควบคุมปริมาณน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อย) โดยอัตราส่วน
($w/(C+SCBA) = 0.38$ ตัวแปรหลักที่ใช้คือ อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก
ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าในส่วนของกำลังอัดที่แทนที่ด้วยเถ้าชาน
อ้อย 10% รับกำลังได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ที่มีเถ้าชานอ้อยผสมอยู่ มีค่ากำลังอัด
เท่ากับ 674.14 ksc. และกำลังค้ำงที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อย 20% รับกำลังได้ดีที่สุด มีค่ากำลังค้ำง 62.37
ksc. เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ที่มีเถ้าชานอ้อยผสมอยู่ และซีเมนต์เพสต์ธรรมดาและเมื่อเติมวัสดุ
ทดแทนผงบดละเอียดพบว่าที่ผงยางบด 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังค้ำงสูงสุดเท่ากับ 8058.95
 ± 1315.94 ksc ในทำนองเดียวหากเติมน้ำยั้งขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังค้ำงสูงสุด
เท่ากับ 7563.10 ± 998.13 ksc เมื่อเปรียบเทียบพบว่ายางบดละเอียดให้ค่ากำลังค้ำงสูงกว่าน้ำยั้งขึ้นใน
สัดส่วนการเติมที่เท่ากัน

คำสำคัญ: เถ้าชานอ้อย, ซีเมนต์เพสต์, โครงสร้างทางจุลภาค, วัสดุปอชโซลาน

E-mail Address : santi.r@rmutr.ac.th
ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม 2557 - มิถุนายน 2559

Abstract

Code of project: The Effect to Bending Strength Samples from Adding the Sugar Cane Bagasse Ash in Commercial Cement

Research name: Mr.Santi Rattanaveeranon
Asst. Prof. Sarod Dumrongsil

The purpose of this research Investigated the characteristics of bagasse ash and mechanical properties of the cement paste bagasse ashes. To study the physical properties, chemical compositions and particle sizes, respectively for ground and original bagasse ash, respectively. To test the mechanical properties of the cement paste with. compressive strength and bending strength. Controlling the amount of water to the powder material. (ash, cement and bagasse ash) the ratio $(W/(C + SCBA) = 0.38$ weight of ash could be calculate. The ration weight of substituted bagasse ash into cement weight at 0, 10, 20, 30, 40 respectively. The results showed that the compressive strength of the replaced bagasse ash 10% was the best. Compared with other ingredients with bagasse ash is mixed. The compressive strength of the 674.14 ksc. and bending strength replaced with bagasse ash at 20% was the optimal condition. The bending strength was 62.37 ksc. compared with other ingredients with bagasse ash were mixed and a normal cement paste. Finally, we used the optimal condition from above experiments then adding fine rubber powder at 5 percent by weight, it found that the maximum bending strength of 8058.95 ± 1315.94 ksc. similarly, adding latex rubber concentration at 10 percent by weight, it found that the maximum bending strength of 7563.10 ± 998.13 ksc. To compare as the rubber powder has a better bending strength than latex rubber when they used the same ratio.

Keyword: Sugar Cane Bagasse Ash, Cement paste, Microstructure, Pozzolan Materials

E-mail Address : santi.r@rmutr.ac.th

Period of project : October 2014 - June 2016

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 การดำเนินงานของโครงการ	3
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ	21
3.1 การศึกษาหาข้อมูลในการทำโครงการ	21
3.2 การเตรียมวัสดุ	21
3.3 การทดสอบ	25
3.4 ทดสอบกำลังรับแรงอัด	32
3.5 ทดสอบกำลังรับแรงดัด	32
3.5.4 การเติมวัสดุทดแทนผงยางบดละเอียดและน้ำยางข้นเพื่อกำลังอัดของชิ้นงาน	33
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลอง	39
4.1 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของเก้าชานอ้อย	39
4.2 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของซีเมนต์เพสต์ผสมเก้าชานอ้อย 10% ที่อายุ 28 วัน	44
4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	47

4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์กำลังตัดของซีเมนต์เพสต์	49
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาโครงการ	52
5.1 สรุปผลการศึกษา	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	55
ประวัติผู้จัดทำ	59
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดสอบกำลังอัดซีเมนต์เพสต์	61
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดสอบกำลังตัดซีเมนต์เพสต์	68



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ระยะเวลาในการศึกษาโครงการ	4
2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	6
4 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายวัสดุปอซโซลาน (ASTM C618)	8
5 แสดงจำนวนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ทดสอบกำลังอัด	32
6 แสดงปริมาณธาตุที่อยู่ในเถ้าชานอ้อย	38
7 แสดงหมู่ฟังก์ชันของธาตุๆ ในเถ้าชานอ้อย	41
8 แสดงปริมาณธาตุที่อยู่ในเถ้าชานอ้อย	40
9 แสดงแรงดัดสูงสุดของซีเมนต์เพสต์ที่แปรค่าซีเถ้าชานอ้อย	47
10 แสดงแรงกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ที่แปรค่าซีเถ้าชานอ้อย	47
11 แสดงกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ที่แปรค่าซีเถ้าชานอ้อย	49
12 แสดงกำลังดัดของซีเมนต์ที่เติมวัสดุผสมจากวัสดุทดแทน	49
ผ-1 ตารางสรุปแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	62
ผ-2 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์มาตรฐาน (PC) ksc	63
ผ-3. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย (CBA-1) ksc	64
ผ-4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย (CBA-2) ksc	65
ผ-5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย (CBA-3) ksc	66
ผ-6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย (CBA-4) ksc	67
ผ-7 ตารางสรุปแสดงผลการทดสอบกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์	69

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธี X-ray Diffactometer: XRD	10
2	เครื่องการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุ X-ray Fluorescence :XRF	11
3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	12
4	แสดงอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ที่มีต่อสสาร	13
5	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer	14
6	แสงเลเซอร์ที่เดินทางผ่านอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย	15
7	เครื่อง Particle size distribution analyzer	17
8	เครื่อง Ball milled	22
9	กระป๋องขนาด 17 ลิตร	23
10	ขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร	23
11	ลูกกลมโลหะขนาด 9, 12 และ 15 มิลลิเมตร	23
12	แสดงการใส่ลูกกลมโลหะ	24
13	แสดงการใส่เก้าขานอ้อย	24
14	นำขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในถังขนาด 17 ลิตร	24
15	นำถังที่ปิดผนึกแล้วติดตั้งบนเครื่อง Ball mill	25
16	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น D8 DISCOVER	25
17	เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ของสารตัวอย่างยี่ห้อ Thermo รุ่น 470	26
18	เครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL	26
19	เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer ยี่ห้อ PHILIP รุ่น PW2400	27
20	Laser Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Malvern	27
21	เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์	29
22	เครื่องชั่งน้ำหนัก	29
23	แบบหล่อซีเมนต์เพสต์ ขนาด 25x25x25 มิลลิเมตร ³	30
24	เครื่องทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	30
25	แสดงการผสมซีเมนต์เพสต์	30
26	แสดงการกระทุ้งซีเมนต์เพสต์	31
27	ก้อนตัวอย่างหลังถอดแบบหล่อ	31
28	แสดงการบ่มก้อนตัวอย่างทดสอบ	31

29	เครื่องทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	33
30	แบบหล่อซีเมนต์เพสต์	34
31	แสดงการผสมซีเมนต์เพสต์	34
32	แสดงการกระทุ้งซีเมนต์เพสต์	35
33	ก้อนตัวอย่างหลังถอดแบบหล่อ	35
34	ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร	35
35	แสดงการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบค่ากำลังอัด	35
36	ตัวอย่างชิ้นงานหลังการทดสอบกำลังอัด	36
37	แสดงสัดส่วนผสมระหว่างผงยางบดละเอียดกับผงมอร์ตาร์	36
38	แสดงน้ำยางข้นที่ใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์มอร์ตาร์	37
39	แสดงซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมระหว่างน้ำยางข้นยางบดละเอียด	37
40	แสดงการหล่อขึ้นรูปซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมระหว่างน้ำยางข้นและยางบดละเอียด	38
41	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยก่อนบด	39
42	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยหลังบดละเอียดด้วยวิธีบดละเอียด (ball milled) นาน 24 ชั่วโมง	39
43	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยหลังบดละเอียดด้วยวิธี ball milled นาน 24 ชั่วโมง	40
44	กราฟเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคก่อนและหลังบดละเอียด	40
45	กราฟของการทดสอบ Transform Infrared Spectrometer: FT-IR	41
46	การทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธี XRD	43
47	โครงสร้างผลึกของควอตซ์และโพแทสเซียมโซเดียมอลูมิโนซิลิเกต (Skorina, 2015)	43
48	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยกำลังขยาย 100 เท่า	44
49	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย กำลังขยาย 1000 เท่า	44
50	ภาพถ่ายขยายอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยกำลังขยาย 5000 เท่า	45
51	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย	45
52	กราฟของการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ระหว่างซีเถ้าชานอ้อยกับวัสดุปอซโซลาน	46
53	กราฟแห่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ	48
54	แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์	48

- 55 กราฟแห่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 49
- 56 กราฟแห่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมยางบดละเอียดและผสมน้ำยางชั้นด้วยสัดส่วน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ 50
- 57 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพื่ออธิบายการจับตัวน้ำยางชั้นและผงยางบดละเอียดกับซีเมนต์มอร์ต้า (Jamshidi, 2013) 51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการค้าก่อสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ตาร์ ซึ่งได้มาจากกระบวนการเผาสารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นสารประกอบหลักโดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ ประมาณ 1400-1600 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิต เริ่มตั้งแต่การระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดให้ละเอียด อนึ่งผลกระทบจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุทดแทนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งได้แก่ วัสดุปอซโซลาน ที่เป็นผลพลอยได้ (by product) จากอุตสาหกรรมต่างๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์ให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย [7]

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการผลิตพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ยางพารา เป็นต้น ซึ่งน้ำตาลที่ผลิตจากอ้อย ได้มีการส่งออกเป็นอันดับต้นๆ ของโลก อ้อยที่ส่งเข้าโรงงานแปรรูปเป็นในกระบวนการผลิตน้ำตาล อ้อย 1 ตัน จะเหลือกากหรือขานอ้อยออกมาประมาณ 290 กิโลกรัม ในปี 2555 ไทยผลิตอ้อยทั้งหมด 98.4 ล้านตัน เมื่อนำไปผลิตน้ำตาลจะเหลือเป็นขานอ้อย 28.54 ล้านตันต่อปี [8] ถ้านำขานอ้อยเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อป้อนให้กับโรงงานผลิตน้ำตาลอีกทีหนึ่ง ซึ่งจะเหลือเถ้าขานอ้อยประมาณ 1 ล้านตัน บางส่วนเกษตรกรนำไปทำปุ๋ย และส่วนใหญ่ใช้ถมที่และกองอยู่ เถ้าขานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไป เมื่อนำไปบดเถ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับเถ้าแกลบหรือปาล์มน้ำมันหลังผ่านการบดทั่วไป คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าขานอ้อยก่อนบด สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยพบว่าเถ้าขานอ้อยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับเถ้าแกลบบดละเอียดและเถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ SO_3 ต่ำ แต่ปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20-30 การที่ LOI ของเถ้าขานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป [1]

ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาไตรออกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมินาซิลิเกตไฮเดรต (C_2ASH_8) และแคลเซียม

อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (C_4AH_{13}) นักวิจัยได้ศึกษาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วยการแทนที่วัสดุปอซโซลานเพิ่มขึ้นลดลงเมื่อความละเอียดสูงขึ้น การลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน [11]

โดยทางกลุ่มผู้วิจัยมีความสนใจในการนำเอาเถ้าชานอ้อยที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณของเสีย (waste) ที่ออกมาจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมได้ ชานอ้อยเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล จากนั้นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลจึงใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ชานอ้อยถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีเพราะสร้างปัญหาต่อสภาพแวดล้อมน้อยเนื่องจากมีปริมาณกำมะถันต่ำจึงไม่ก่อให้เกิดฝนกรด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะเฉพาะของเถ้าชานอ้อย และศึกษาคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์ โดยการแทนเถ้าชานอ้อยแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยแปรค่าเถ้าชานอ้อยในช่วง 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อันจะเป็นแนวทางในการเลือกอัตราส่วนของการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยในซีเมนต์เพสต์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นคอนกรีตต่อไป โดยการทดสอบจะทำการศึกษาคูณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของเถ้าชานอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
2. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนแสงเลเซอร์ (Particle size analyzer: LPS)
3. เพื่อศึกษาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารของเถ้าชานอ้อยและซีเมนต์เพสต์ ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR)
4. เพื่อศึกษาสารประกอบของเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence :XRF)
5. เพื่อศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก/สารประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffactometer :XRD)
6. คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
7. การวิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR) ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ใช้เส้นใยแก้วแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก
2. ทดสอบแรงอัด (Compression Test) ตัวอย่างขนาด 25x25x25 มิลลิเมตร ที่อายุการทดสอบ 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ
3. การทดสอบแรงดัด (Bending Test) ตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ที่อายุการทดสอบ 28 วัน
4. เส้นใยแก้วจากโรงงานผลิตน้ำตาล จังหวัดกาญจนบุรี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดการใช้ปูนซีเมนต์ลง โดยใช้เส้นใยแก้วแทนเป็นตัวแทนเพิ่มความแข็งแรง ทำให้ลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน
2. ลดปัญหาภาวะสิ่งแวดล้อมจากการเหลือทิ้งของเส้นใยแก้ว
3. สามารถนำเส้นใยแก้วซึ่งเป็นของเหลือใช้จากการผลิตไฟฟ้าไปใช้เป็นวัสดุแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเพิ่มมูลค่าเส้นใยแก้วให้มีมูลค่าสูงขึ้น

1.5 การดำเนินงานของโครงการ

ในการศึกษาโครงการ มีวิธีการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์
3. จัดเตรียมตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบ
4. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ
5. วิเคราะห์ผลสรุปผลการทดสอบ

1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานโครงการ

ระยะเวลาในการศึกษาโครงการรวมทั้งสิ้น 12 เดือน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระยะเวลาในการศึกษาโครงการ

ลำดับ	รายการ								
		ต.ค.-ธ.ค.		ม.ค.-มี.ค.		เม.ย.-มิ.ย.		ก.ค.-ก.ย.	
1.	รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←→							
2.	จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	←→							
3.	เตรียมตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบ			←→					
4.	ทดสอบและบันทึกผล			←→					
5.	สรุปผลและจัดทำงานวิจัยฉบับสมบูรณ์							←→	

หมายเหตุ: แผนการดำเนินงาน อาจเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) เมื่อผสมกับน้ำจะสามารถก่อตัว และแข็งตัวได้ พร้อมกับมีความร้อนเกิดขึ้น โดยที่ระยะเวลาการก่อตัวและปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของปูนซีเมนต์เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) เมื่อนำทรายผสมเข้ากับซีเมนต์เพสต์จะได้มอร์ตาร์ (mortar) เมื่อนำหินผสมกับมอร์ตาร์จะได้คอนกรีต (concrete) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการผสมส่วนต่างๆ เช่น หินปูน (lime stone) หรือดินปูนขาว (marl) กับดินเหนียว (clay) หรือหินดินดาน (shale) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลัก 4 ส่วน คือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) 3CaOSiO_2 (C_3S)
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) 2CaOSiO_2 (C_2S)
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ (C_3A)
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetrecalciumaluminoferrite) $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

ตารางที่ 2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mindess and Yong, 1981)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	3CaO SiO_2	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	2CaO SiO_2	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

สารประกอบแต่ละชนิดสามารถปรับปริมาณเพื่อทำให้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ ได้ตามความต้องการใช้งาน

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ปริญญาและชัย, 2547, น. 290)

ลำดับ	สารประกอบเคมี	ปริมาณ (%)
1	Silicon dioxide (SiO ₂)	20
2	Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	5
3	Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3
4	Calcium oxide (CaO)	60
5	Magnesium oxide (MgO)	1.1
6	Sulfur trioxide (SO ₃)	2.4
7	ออกไซด์อื่นๆ	1.5
8	Loss On Ignition (LOI)	2

2.1.3 ซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์มีหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม เช่น หิน กรวด และทราย หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ และให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

2.1.4 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ มีช่องว่างหรือโพรงมาก พบเอททริงไกต์มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่าง ที่อายุ 28 วัน ผลผลิตไฮเดรชัน ประกอบด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซัลโฟเฟอร์ไรต์ และส่วนประกอบย่อยอื่นอีกไม่มาก ขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน ซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นยิ่งขึ้น

2.1.5 น้ำ

มีหน้าที่หลักคือ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) กับปูนซีเมนต์ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ และเคลือบหินทรายให้เปียกเพื่อให้

ซีเมนต์เพสต์สามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ นอกเหนือจากหน้าที่หลักแล้ว น้ำยังใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ และใช้บ่มคอนกรีตอีกด้วย

2.1.6 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าขานอ้อย เถ้ากลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานจะนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านกำลังอัด และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดอาจส่งผลดีต่อคอนกรีตแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยมีองค์ประกอบทางแร่ธาตุที่อยู่ในรูปไม่เป็นผลึกและความละเอียดของปอซโซลานคือปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยหรือปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานเมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกันกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2-1) ถึง (2-3)



ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2-4) และ (2-5)



ค่า x , y ในสมการที่ (2-4) และ (2-5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H ที่ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม

อย่างไรก็ตาม ASTM C618 ได้จำแนกประเภทของวัสดุปอซโซลานเป็น 3 ประเภท คือ ประเภท N ประเภท F และประเภท C โดยมีปริมาณส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายวัสดุปอซโซลาน (ASTM C618)

ส่วนประกอบทางเคมี	วัสดุปอซโซลานประเภท		
	N	F	C
ซิลิกอนไดออกไซด์+อลูมิเนียมออกไซด์+ไอออนออกไซด์ ต่ำสุดร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ (SO_3) สูงสุดร้อยละ	4.0	5.0	5.0
อัลคาไลด์ สูงสุดร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ปริมาณความชื้น สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0
คุณสมบัติทางกายภาพ			
ความละเอียด:ปริมาณค่าแรงเบอร์ 325 สูงสุดร้อยละ	34.0	34.0	34.0
ความอยู่ตัว:การขยายตัวหรือหดตัว โดยการทดสอบบอโตเคลฟ	0.8	0.8	0.8
ความต้องการปริมาณน้ำ สูงสุดร้อยละ	115	105	105
ดัชนีกำลัง (Strength activity index)			
ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 7 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75
ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 28 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75

- หมายเหตุ 1. ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซีโซลานจากธรรมชาติหรือปอซีโซลานจากธรรมชาติ
 2. ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์
 3. ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์

2.1.7 ชานอ้อย (bagasse)

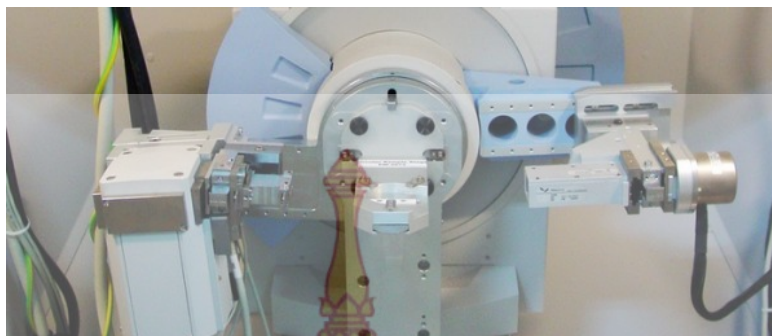
พลังงานจากชีวมวลเป็นพลังงานที่ได้จากพืช สัตว์ หรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต สารอินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งผลผลิตจากการเกษตรและป่าไม้ เช่น ชานอ้อย แกลบ ไม้พิน หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ รวมไปถึงการนำมูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางเกษตร นำไปผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี โดยอาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวช่วยย่อยสลาย

อ้อย เป็นพืชชนิดหนึ่งที่มี ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานชีวภาพได้ในอัตราสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น พลังงานที่ผลิตได้ จากชีวมวลของอ้อยจำนวน 1 ตัน มีปริมาณเทียบเท่ากับพลังงานที่ได้จากน้ำมันดิบ 1 บาร์เรล ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ด้วยอ้อยจำนวน 1 ตัน เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 25-30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ไอน้ำ 0.4 ตัน เพื่อให้ได้น้ำตาล ที่เหลือจะเป็นกากหรือชานอ้อย เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต ประมาณ 290 กิโลกรัม ที่มีค่าเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้าถึง 100 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ทำให้มีการนำชานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังงาน ความร้อน สำหรับต้มน้ำให้เดือดจนกลายเป็นไอ และสามารถนำพลังงานจากไอน้ำดังกล่าว หมุนเวียนกลับมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ใหม่อีกครั้งกระบวนการโซลเจล

2.1.8 การทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธี X-ray Diffactometer: XRD

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffactometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลักษณะขององค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์, ความเครียดของตัวอย่าง และค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบางและคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย



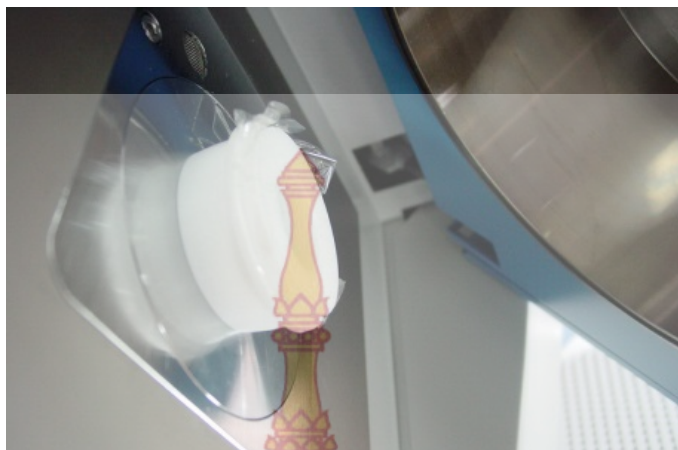
รูปที่ 1 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธี X-ray Diffraction: XRD (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2012)

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d\sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้เครื่องตรวจจับรับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ ซึ่งเครื่อง XRD เป็นเครื่องที่ติดตั้งเครื่องตรวจจับที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็ว และให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง

XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็งหรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 เมช หรือ ประมาณ 40 ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม

2.1.9 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence: XRF

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์, ธรณีวิทยา, สิ่งแวดล้อม, ทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือเรืองแสงออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่า ในตัวอย่างที่ทดสอบนั้น มีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ห้วงวัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง



รูปที่ 2 เครื่องการทดสอบการวิเคราะห์ธาตุ X-ray Fluorescence: XRF (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2012)

เครื่อง XRF โดยทั่วไปจะมีด้วยกัน 2 แบบ คือ Wavelength Dispersive XRF (WDXRF) และ Energy Dispersive XRF (EDXRF) โดยเครื่อง XRF เครื่อง EDXRF ซึ่งจะสามารถทำการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่าง ได้ตั้งแต่ Na-U เรียงตามเลขอะตอม ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งแบบไม่มีมาตรฐานและมีมาตรฐาน (ต้องมีสารมาตรฐาน) สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในหลายลักษณะ ทั้งของแข็ง, ผง, ตัวอย่างที่ขึ้นรูปแล้วหรือตัวอย่างที่เป็นของเหลว

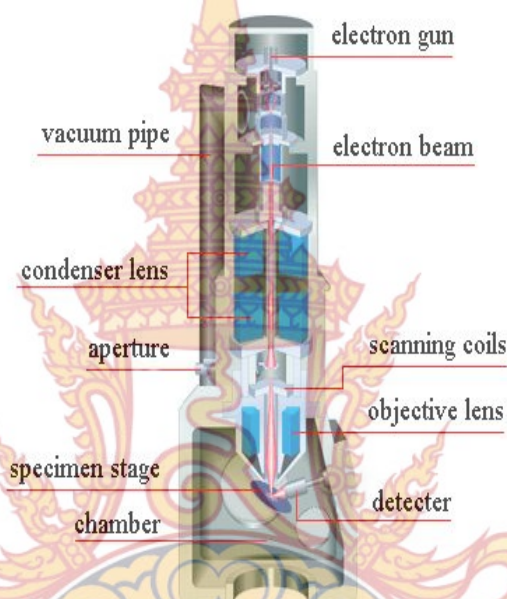
ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ก็คือเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีที่ต้องบดตัวอย่างเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด) และให้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว และไม่จำเป็นต้องใช้ในการมาตรฐานทดสอบ

ข้อเสียของ XRF แบบ EDXRF ก็คือความสามารถในการวิเคราะห์ ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ จะทำได้ยาก โดยเฉพาะธาตุในกลุ่มธาตุเบาหากมีปริมาณน้อยๆ ผลที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งหากตัวอย่างนั้นไม่สามารถขึ้นรูปให้เป็นของแข็ง เพื่อทดสอบในสภาพความดันต่ำก็จะเกิดการดูดกลืนรังสีของอากาศ ภายในห้องใส่ตัวอย่าง ซึ่งมีผลให้ความเข้มข้นของ X-ray ที่ได้ลดลง

2.1.10 ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค Scanning Electron Microscope: SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมี

ความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 10000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น การวิเคราะห์ธาตุโดยการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive Spectrometry: EDS) และการวิเคราะห์ธาตุโดยการกระจายความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (Wavelength Dispersive Spectrometry: WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



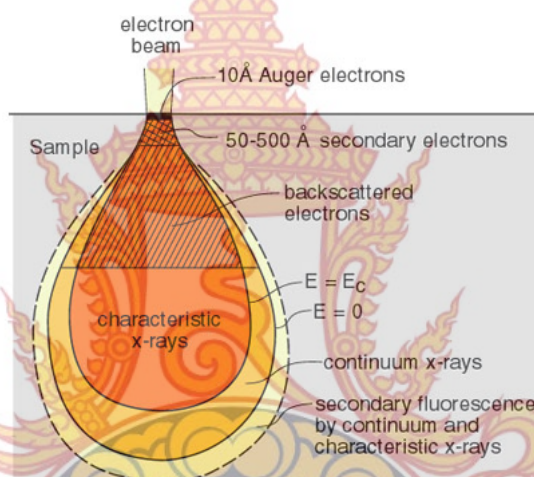
รูปที่ 3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2012)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตต ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง

50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

- อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน



รูปที่ 4 แสดงอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ที่มีต่อสสาร (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี 2012)

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับความเสียหายจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

2.1.11 การวิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสาร Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR

FT-IR spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบโครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800-10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงรังสีที่มองเห็นได้กับรังสีไมโครเวฟ โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ Near Infrared ($12800-4000\text{ cm}^{-1}$), Middle Infrared ($4000-200\text{ cm}^{-1}$) และ Far Infrared ($200-10\text{ cm}^{-1}$)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับการส่งผ่านซึ่งเรียกว่าคลื่นอินฟราเรด



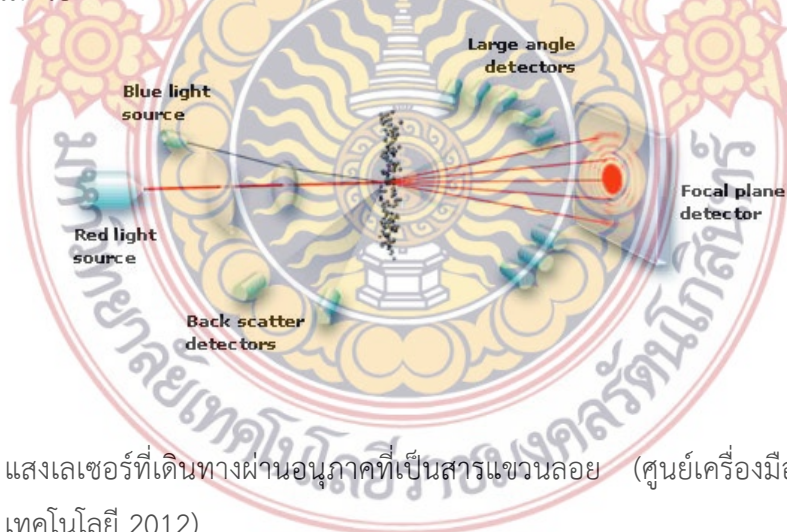
รูปที่ 5 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer

2.1.12 การทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size analyzer: LPS)

เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ (LASER Diffraction) จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิด แก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ซึ่งเป็นแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ลำแสงจะถูกขยายขนาดโดย Beam expander แล้วส่องผ่านไป

ยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (Emulsion) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวมีความโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของอนุภาคได้และไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคจะต้องสูงพอที่จะได้ข้อมูลเชิงสถิติที่ดี (โดยจากเครื่อง Master size 3000 กำหนดไว้ที่ความเข้มข้น 10-20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบแบบเปียก และความเข้มข้น 2 - 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบแบบแห้ง) แต่ต้องไม่เข้มข้นเกินไปจนเกิดการกระเจิงซ้ำกันหลายครั้ง (Multiple scattering)

เมื่อแสงเลเซอร์เดินทางผ่านอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย จะเกิดปรากฏการณ์กระเจิงของแสง โดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบของความเข้มที่มุมต่างกันขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค แต่ละมุมของการกระเจิงจะมีสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งสมบัติการกระเจิงของแสงจากอนุภาคนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ โดยลำแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำให้เกิดภาพปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) ที่เครื่องตรวจจับโฟโตเซลล์ซึ่งวางอยู่บนระนาบที่ตั้งฉากกับเส้นทางเดินของแสงเลเซอร์ ที่จุดโฟกัสของการเลี้ยวเบนจะมีลักษณะเป็นวงมืด-สว่างสัมพันธ์กับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เลนส์รวมแสงได้ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติพิเศษคือ ไม่ว่าอนุภาคจะก่อให้เกิดการกระเจิงที่บริเวณใดในลำแสงเลเซอร์ก็ตาม รูปแบบการเลี้ยวเบนจะไม่เคลื่อนไหว และมีจุดศูนย์กลางอยู่บนแกนออปติกของเลนส์เสมอ (Allen, 1997) จากการกระเจิงของแสงที่ได้สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคได้ตามทฤษฎีของมี (Mie theory) โดยใช้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) และค่าการดูดซับแสง (Absorption index) ของอนุภาคและตัวกลางร่วมด้วย



รูปที่ 6 แสงเลเซอร์ที่เดินทางผ่านอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2012)

จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สีแดงและสีน้ำเงินเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มตัวอย่าง แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดใหญ่ และแสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่น 473.00

นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดเล็ก และมีหัววัดรังสีรับแสงการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและบันทึกค่าเฉลี่ยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยการประมวลผลของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผ่านคอมพิวเตอร์

โดยมุมของการเลี้ยวเบนจะขึ้นกับขนาดอนุภาค ซึ่งความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2-6 (Rahaman, 2003)

$$\sin\theta = \frac{1.22\lambda}{t} \quad (2-6)$$

โดย θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

t คือ ขนาดอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่กระทบอนุภาค

หากพิจารณาที่มุมการเลี้ยวเบนน้อยๆ จะได้ดังสมการ 2.7

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{t} \quad (2-7)$$

โดยเครื่องเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีระบบการวิเคราะห์ 2 ระบบ คือ การทดสอบแบบเปียก และการทดสอบแบบแห้ง

- การทดสอบแบบเปียก จะใช้ของเหลวเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านหน้าต่างเซลล์ (ทางห้องปฏิบัติการใช้น้ำกรองระบบ RO) ซึ่งการทดสอบแบบเปียกจะมีการกระจายตัวของสารตัวอย่างได้ดีโดยหน้าต่างเซลล์แคบและมีระบบอัลตราโซนิคช่วยในการกระจายอนุภาคขณะทำการทดสอบด้วย

- การทดสอบแบบแห้ง จะใช้ลมเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านหน้าต่างเซลล์สำหรับตัวอย่างที่ไม่สามารถกระจายตัวในของเหลวได้ แต่การทดสอบแบบแห้งนี้ จะมีการกระจายตัวของตัวอย่างได้ไม่ค่อยดีเท่าแบบเปียก และหน้าต่างเซลล์กว้าง ทำให้อนุภาคใหญ่มีโอกาสบังอนุภาคเล็กได้ ขณะเคลื่อนที่ผ่านหน้าต่างเซลล์ได้



รูปที่ 7 เครื่อง Particle size distribution analyzer

2.1.13 ความเค้น (Stress)

ตามความเป็นจริงความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติและความยากในการวัดค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปแบบของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านภายใน ความเค้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-8

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-8)$$

โดย σ คือ ความเค้น (นิวตันต่อตารางเมตร : N/m^2 , กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร : ksc)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อนวัสดุ (ตารางเมตร : m^2 , ตารางเซนติเมตร : cm^2)

F คือ แรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุ (นิวตัน : N, กิโลกรัม)

เนื่องจากในที่นี้เราจะใช้หน่วยระบบเอสไอ (SI metric units) ดังนั้นแรง (F) จึงมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) พื้นที่ (A) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) และความเค้น (σ) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือเรียกว่า ปาสคาล (Pa)

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ ได้แก่

1. ความเค้นดึง (tensile stress)

สัญลักษณ์ σ_t จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงดึง โดยแรงดึงจะต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดที่กระทำนั้น ความเค้นดึงจะให้เครื่องหมายแสดงเป็นบวก

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2-9)$$

2. ความเค้นอัด (compressive stress)

สัญลักษณ์ σ_c จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงอัด โดยแรงอัดจะต้องกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของท่อวัตถุที่กระทำนั้น ความเค้นอัดจะให้เครื่องหมายแสดงเป็นลบ

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2-10)$$

3. ความเค้นเฉือน (shear stress)

สัญลักษณ์ τ เป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัตถุนั้น โดยพยายามทำให้วัตถุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรงนั้น

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2-11)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุรฉัตร ฉัตรวีระ (2544) คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าฟางข้าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าฟางข้าวที่ได้จากการเผาฟางข้าวในเตาเผาโรชีเมนต์ โดยทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าฟางข้าว คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ได้แก่ ความชันเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย กำลังรับแรงอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก การขยายตัวในน้ำและการหดตัวแบบแห้ง โดยทำการควบคุมปริมาณน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และเถ้าฟางข้าว) โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.40 ($W/(C+RSA) = 0.4$) ตัวแปรหลักที่ใช้คือ อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าฟางข้าวในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 20, 40, 60 และ 80 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าการพัฒนา กำลังรับแรงของซีเมนต์เพสต์ในช่วง 28 วันจะเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าฟางข้าวในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 40 ส่วนการดูดซึมน้ำ ความชันเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย การขยายตัวในน้ำและการหดตัวแบบแห้ง จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อเพิ่มร้อยละของการแทนที่ของเถ้าฟางข้าว ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและค่าร้อยละของกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ธรรมดาจะมีค่าลดลง

จิรัฐิติ บรรจงศิริ (2550) การศึกษารับแรงอัดของของจีโอโพลิเมอร์จากถ่าน้ำมันโดยเปรียบกับ มอร์ตาร์มาตรฐาน อัตราส่วนผสมร้อยละของเถ้าต่อร้อยละของเหลว 2 แบบ คือ 1:1 ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และ 1:1 ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ทำการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65, 75 และ 85 องศาเซลเซียส ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ อัตราส่วน 1:1 ผลการศึกษาพบว่า การทดสอบทางเคมีพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐานของ ASTM C618 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ดีที่สุด คือ เถ้า : ของเหลว เท่ากับ 1:1 ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสที่ 28 วัน กำลังรับแรงอัดระหว่างมอร์ตาร์มาตรฐานกับจีโอโพลิเมอร์ ปรากฏว่ามอร์ตาร์มาตรฐานสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์ โดยภาพรวมการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์ช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน ไปแล้วกำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาไม่มากนัก

บุรฉัตร ฉัตรวีระ (2554) พฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานในการประยุกต์ใช้กับพลังงานไมโครเวฟงานวิจัยเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานจำพวก เถ้าลอยและเถ้าแกลบในรูปแบบการทดสอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยทำการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ค่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะ โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 0, 10 และ 20 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.38 และ 0.45 จากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.38 จะมีอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.45 ในส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาลดลงและอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยจะมีค่าสูงกว่าของเถ้าแกลบ ในส่วนของค่าไดอิเล็กตริก ควรเลือกค่าในช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและเมื่อบ่มได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วควรปรับพลังงานให้มีค่าลดลงเพราะค่าไดอิเล็กตริกจะลดลงตามเวลา ไม่เช่นนั้นจะทำให้ความชื้นในวัสดุทดสอบลดลงจนแห้ง ส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดตอนปลายลดลงได้สำหรับค่าความจุความร้อนจำเพาะพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงใดๆ ของร้อยละการแทนที่เท่ากันทั้งเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. จะมีค่าการคายความร้อนที่น้อยกว่าของเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. ทั้งนี้เนื่องจากที่ความละเอียด 5,000 ตร.ซม./ก. วัสดุจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำมากกว่าที่ความละเอียด 4,000 ตร.ซม./ก. ทำให้น้ำที่ไม่ได้ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Free water) ลดน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิและพลังงานในการคายความร้อนลดลงตามไปด้วย

วันโชค เครือหงษ์ (2555) การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาดคือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์และขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20

และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทดสอบความไม่เป็นผลึกของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยวิธีเรียวเวลด์ กำลังอัดของเพสต์การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อนการทดสอบกระจายขนาดโพรงของเพสต์ ผลการทดสอบพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดหยาบมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC ขณะที่เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมีกำลังอัดสูงกว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดหยาบเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดร้อยละ 20 มีปริมาตรโพรงทั้งหมดต่ำที่สุด ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมัน และมีปริมาณที่ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC นอกจากนี้ขนาดโพรงวิกฤตของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ OPC เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดช่วยลดขนาดโพรงวิกฤตมากกว่าเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดหยาบ

จิรวัดน์ ชาลีวรรณ (2555) ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้บด การวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอัตราการแทนที่และความละเอียดของเถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้บดต่อระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยนำ เถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลของโรงงานน้ำ ตาลมาบดให้มีความละเอียด 3 ขนาด คือ บดหยาบ บดปานกลาง และบดละเอียดโดยมีขนาดอนุภาคต่างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 30, 10, และ 0 ตามลำดับ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 0, 20, และ 40 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ผลิตมอร์ตาร์โดยควบคุมค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5 โดยการปรับปริมาณน้ำ และเติมสารลดน้ำพิเศษ ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลายจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่และความละเอียดของเถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้บดที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดจะแปรผกผันกับปริมาณเถ้าขานอ้อยที่ผสมมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้บดละเอียดร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด โดยที่อายุ 28 และ 90 วัน กรณีปรับปริมาณน้ำมีกำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 98 และ 97 ของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ กรณีเติมสารลดน้ำพิเศษ มอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้บดละเอียดร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 131 และ 126 ของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการต่างๆ ที่วางแผนในการศึกษาสัดส่วนของซีเมนต์ในปอร์ตแลนด์ผสมที่มีผลต่อแรงดัดและแรงอัดในชิ้นงาน ซึ่งจะมีเนื้อหาเรียงตามลำดับต่อไปนี้

3.1 การศึกษาหาข้อมูลในการทำโครงการ

ศึกษาข้อมูลต่างๆ เช่น วารสาร สิ่งพิมพ์ ฯลฯ เพื่อหาแนวทางการทำโครงการงาน ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อวางแผนงานต่างๆ เพื่อทำโครงการ

3.2 การเตรียมวัสดุ

3.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราทีพีไอ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจะนำไปใช้กับงานก่อสร้าง งานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูง และงานคอนกรีตทั่วไป เช่น งานอาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กทุกชนิด สะพาน ถนน สนามบินและผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงประเภทต่างๆ

3.2.2 ภูเขาอ้อย

ภูเขาอ้อยที่ใช้ในการดำเนินการศึกษา เป็นภูเขาอ้อยจากบริษัท ประจวบอุตสาหกรรม จำกัด อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งภูเขาอ้อยเหล่านี้จะมีขนาดที่หยาบและมีความชื้นอยู่ ซึ่งก่อนที่จะนำภูเขาอ้อยเหล่านี้มาทำการทดสอบแทนที่ปูนซีเมนต์จะต้องนำไปอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาคัดแยกโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อแยกเศษภูเขาอ้อยส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 40 ออกไป หลังจากนั้นนำไปบดด้วยวิธี Ball mill แล้วจึงนำไปทดสอบได้ โดยภูเขาอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์นี้จะทำการทดสอบที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

การบดภูเขาอ้อยด้วยวิธี Ball mill

3.2.2.1 เครื่องมือการบดด้วยวิธี Ball mill

1. เครื่อง Ball mill (ดังแสดงในรูปที่ 3.1)
2. ถังขนาด 17 ลิตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.2)
3. ขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.3)
4. ลูกกลมโลหะขนาด 9, 12 และ 15 มิลลิเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.4)

3.2.2.2 วิธีการทดสอบ

1. ขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร ใส่ลูกกลมโลหะขนาด 9 มิลลิเมตร จำนวน 25 ลูก, ลูกกลมโลหะขนาด 12 มิลลิเมตร จำนวน 30 ลูก, ลูกกลมโลหะขนาด 15 มิลลิเมตร จำนวน 25 ลูก (ดังแสดงในรูปที่ 3.5)
2. ใส่เก้าชามอ้อยที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ลงไปในขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร ประมาณ 3/4 ของขวด (ดังแสดงในรูป 3.6)
3. นำขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในการป้องกันขนาด 17 ลิตร ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์ยึดขวดภายในการป้องกันพร้อมใช้เทปใสปิดปากการป้องกันให้สนิท (ดังแสดงในรูปที่ 3.7)
4. เมื่อทำตามข้อที่ 3 เรียบร้อยแล้วนำไปติดตั้งบนเครื่อง Ball mill จากนั้นเปิดเครื่องให้หมุนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ดังแสดงในรูปที่ 3.8)
5. เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว ให้นำเก้าชามอ้อยที่บดเสร็จแล้วมาใช้ในการผสมซีเมนต์เพสต์ต่อไป

3.2.3 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการทดสอบ เป็นน้ำที่กรองสะอาดและปราศจากสิ่งเจือปน



รูปที่ 8 เครื่องบดละเอียด (Ball milled)



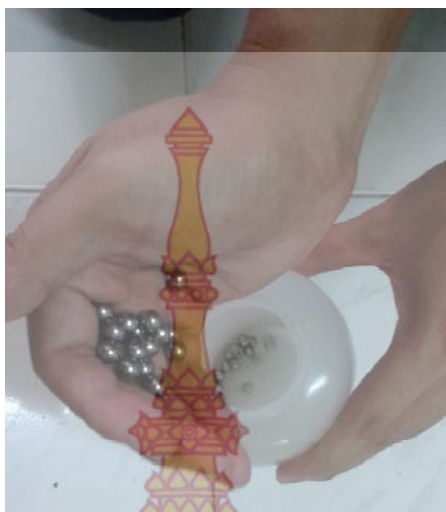
รูปที่ 9 ถังสีขนาดปริมาตร 17 ลิตร



รูปที่ 10 ขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร



รูปที่ 11 ลูกกลมโลหะขนาด 9, 12 และ 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 12 แสดงการใส่ลูกกลมโลหะรัศมี 1.5 เซนติเมตร



รูปที่ 13 แสดงการใส่เถ้าขาน้อย



รูปที่ 14 นำขวด Plastic PP Reagent ขนาด 1000 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในถังขนาด 17 ลิตร



รูปที่ 15 นำถังที่ปิดผนึกแล้วติดตั้งบนเครื่อง Ball mill

3.3 การทดสอบ

3.3.1 การทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธี (XRD)

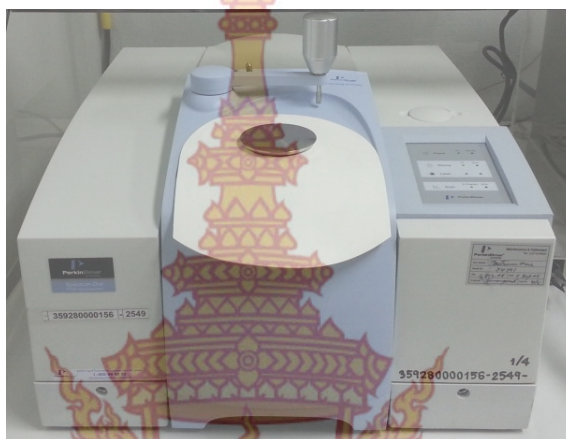
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างแต่ละชนิดได้อีกด้วย



รูปที่ 16 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น D8 DISCOVER

3.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของซีเถ้าซานอ้อย (FT-IR)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $4000-400\text{ cm}^{-1}$ การทดสอบทำโดยนำซีเถ้าซานอ้อยจำนวน 1 กรัม ที่ผ่านการบดละเอียดนาน 24 ชั่วโมงและนำชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดมาบดละเอียด เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของชิ้นงาน



รูปที่ 17 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างยี่ห้อ Thermo รุ่น 470

3.3.3 การศึกษาลักษณะพื้นผิวซีเถ้าซานอ้อย (SEM)

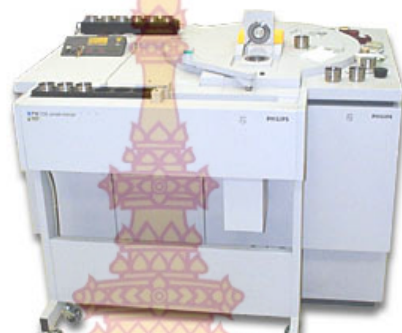
เทคนิคนี้เป็นการศึกษาลักษณะพื้นฐานของซีเถ้าซานอ้อยก่อนบดและหลังบดละเอียดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในข้อ 3.3.2 มาวิเคราะห์พื้นผิวของซีเถ้าซานอ้อย ความพรุนตัว และเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปว่ามีพื้นผิวแตกต่างกันอย่างไร



รูปที่ 18 เครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL

3.3.4 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค (XRF)

เป็นเครื่องวิเคราะห์หาธาตุตั้งแต่ Be ถึง U สามารถบอกปริมาณโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งสามารถวัดได้ตั้งแต่ระดับ ppm ถึงเปอร์เซ็นต์ นำสารตัวอย่างข้อ 3.3.2 มาวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย ว่าในตอนเริ่มต้นมีปริมาณซิลิกาที่เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบหลังจากหาปฏิกิริยากับซีเมนต์แล้ว (ปฏิกิริยาไฮเดชัน) จะเกิดสารประกอบซิลิกาตกลงที่เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 19 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer ยี่ห้อ PHILIP รุ่น PW2400

3.3.5 การทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (LPS)

ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ (LASER Diffraction) จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิด แก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ซึ่งเป็นแสงสีแดง มีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร นำสารตัวอย่างข้อ 3.3.2 มาวิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายตัวของเถ้าขานอ้อยก่อนบดและหลังละเอียด



รูปที่ 20 Laser Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Malvern

3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง

3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 25x25x25 มิลลิเมตร โดยใช้เก้าขานอ้อยแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยแปรค่าเก้าขานอ้อยในช่วง 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณน้ำในส่วนผสม ($w/c = 0.38$) หลังจากหล่อซีเมนต์เพสต์แล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบแล้วนำไปป้อนในน้ำเป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงอัด เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบตามกำหนด

3.4.2 การผสมซีเมนต์เพสต์และการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

3.4.2.1 เครื่องมือการทดสอบ

1. เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (ดังแสดงในรูปที่ 3-14)
2. เครื่องชั่งน้ำหนักอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม (ดังแสดงในรูปที่ 3-15)
3. แบบหล่อซีเมนต์เพสต์ ขนาด 25x25x25 มิลลิเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3-16)
4. เครื่องทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ (ดังแสดงในรูปที่ 3-17)

3.4.2.2 วิธีการทดสอบ

1. ทำความสะอาดใบพาย หม้อผสม และเซตให้แห้ง แล้วใส่ปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ลงในหม้อผสม
2. ใส่น้ำที่เตรียมไว้จากการตวงด้วยกระบอกตวง ตามอัตราส่วนผสม แล้วเปิดเครื่องผสมความเร็วต่ำ (140 ± 5 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
3. ปิดเครื่องผสมเป็นเวลา 30 วินาที ระหว่างที่หยุดเครื่องผสมชูดปูนซีเมนต์ ที่ติดอยู่ข้างๆ หม้อผสม และที่ใบพาย ให้มาอยู่รวมกันที่ตรงกลางหม้อผสม (เวลารวมเป็น 1 นาที)
4. เปิดเครื่องผสม ปรับความเร็วของเครื่องผสมในระดับปานกลาง (ความเร็ว 285 ± 10 รอบ/นาที) เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที (เวลารวมเป็น 2 นาที 30 วินาที) ดังแสดงในรูปที่ 3.18

3.4.3 ขั้นตอนในการทำก้อนตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์

1. หล่อซีเมนต์เพสต์ลงบนแบบทดสอบขนาด 25x25x25 มิลลิเมตร โดยจะต้องทำเสร็จสิ้นในเวลา 2 นาที 30 วินาที หลังจากผสมซีเมนต์เพสต์เสร็จแล้ว ใส่น้ำลงในแบบหล่อเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 12.5 มิลลิเมตร โดยใส่ลงในช่องแบบหล่อทดสอบ
2. กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 25 ครั้งให้ตั้งฉากกับแบบหล่อ น้ำหนักในการกระทุ้งให้แรงพอที่จะทำให้ซีเมนต์เพสต์แผ่ไปทั่วแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.19
3. เมื่อกระทุ้งครบทุกช่องของแบบหล่อแล้ว ให้ใส่ซีเมนต์เพสต์ลงในแบบหล่อ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก โดยเมื่อกระทุ้งเสร็จ ให้เหลือซีเมนต์เพสต์สูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย

4. ใช้เกรียงปาดซีเมนต์เพสต์ที่ล้นขอบแบบหล่อ แล้วปาดผิวหน้าให้เรียบร้อย เพื่อให้ผิวหน้าของแบบหล่อเรียบยิ่งขึ้น ให้ใช้เกรียงปาดเบาๆ อีกหนึ่งครั้งตามยาวของแบบหล่อ
5. หลังจากหล่อซีเมนต์เพสต์แล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงแกะแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.20
6. แล้วนำไปบ่มในน้ำ เป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.21
7. เมื่อก่อนตัวอย่างทดสอบ ครบอายุการทดสอบที่ต้องการศึกษาแล้ว ให้นำก้อนตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ แล้วทำการจดบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 21 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 22 เครื่องชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 23 แบบหล่อซีเมนต์ขนาด 25x25x25 มิลลิเมตร³



รูปที่ 24 เครื่องทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 25 แสดงการผสมซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 26 แสดงการกระทุ้งซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 27 ก้อนตัวอย่างหลังถอดแบบหล่อ



รูปที่ 28 แสดงการปั๊มก้อนตัวอย่างทดสอบ

3.4.4 จำนวนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ทดสอบ

จำนวนซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 5 แสดงจำนวนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ทดสอบกำลังอัด

Symbol	No. of cement paste specimen (pieces)			
	7 days	14 days	21 days	28 days
PC	5	5	5	5
CBA-1	5	5	5	5
CBA-2	5	5	5	5
CBA-3	5	5	5	5
CBA-4	5	5	5	5

ทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่าง

3.5.1 ทดสอบกำลังรับแรงดัด

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร โดยใช้เก้าขานอ้อยแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยแปรค่าเก้าขานอ้อยในช่วง 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีปริมาณน้ำในส่วนผสม ($w/c = 0.38$) หลังจากหล่อซีเมนต์เพสต์แล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังดัด เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบตามกำหนด

3.5.2 การผสมซีเมนต์เพสต์และการทดสอบกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์

3.5.2.1 เครื่องมือการทดสอบ

1. เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.14)
2. เครื่องชั่งน้ำหนักอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม (ดังแสดงในรูปที่ 3.15)
3. เครื่องทดสอบกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.22)
4. แบบหล่อซีเมนต์เพสต์ ขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.23)

3.5.2.2 วิธีการทดสอบ

1. ทำความสะอาดใบพาย หม้อผสม และเซตให้แห้ง แล้วใส่ปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ลง

ในหม้อผสม

2. ใส่ น้ำที่เตรียมไว้จากการตวงด้วยกระบอกตวง ตามอัตราส่วนผสม แล้วเปิดเครื่องผสมความเร็วต่ำ (140 ± 5 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที

3. ปิดเครื่องผสมเป็นเวลา 30 วินาที ระหว่างที่หยุดเครื่องผสมชูดปูนซีเมนต์ ที่ติดอยู่ข้างๆ หม้อผสม และที่ใบพาย ให้มาอยู่รวมกันที่ตรงกลางหม้อผสม (เวลารวมเป็น 1 นาที)

4. เปิดเครื่องผสม ปรับความเร็วของเครื่องผสมในระดับปานกลาง (ความเร็ว 285 ± 10 รอบ/นาที) เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที (เวลารวมเป็น 2 นาที 30 วินาที) ดังแสดงในรูปที่ 3.24

3.5.3 ขั้นตอนในการทำก้อนตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์

1. หล่อซีเมนต์เพสต์ลงในแบบทดสอบขนาด $25 \times 25 \times 285$ มิลลิเมตร โดยจะต้องทำเสร็จสิ้นในเวลา 2 นาที 30 วินาที หลังจากผสมซีเมนต์เพสต์เสร็จแล้ว ใส่ซีเมนต์ลงในแบบหล่อเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 12.5 มิลลิเมตร โดยใส่ลงในช่องแบบหล่อทดสอบ

2. กระทบด้วยแท่งกระทบ 25 ครั้งให้ตั้งฉากกับแบบหล่อ น้ำหนักในการกระทบให้แรงพอที่จะทำให้ซีเมนต์เพสต์แผ่ไปทั่วแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.25

3. เมื่อกระทบครบทุกช่องของแบบหล่อแล้ว ให้ใส่ปูนซีเมนต์เพสต์ลงในแบบหล่อ แล้วกระทบเช่นเดียวกับชั้นแรก โดยเมื่อกระทบเสร็จ ให้เหลือซีเมนต์เพสต์สูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย

4. ใช้เกรียงปาดซีเมนต์เพสต์ที่ล้นขอบแบบหล่อ แล้วปาดผิวหน้าให้เรียบร้อย เพื่อให้ผิวหน้าของแบบหล่อเรียบยิ่งขึ้น ให้ใช้เกรียงปาดเบาๆ อีกหนึ่งครั้งตามยาวของแบบหล่อ

5. หลังจากหล่อซีเมนต์เพสต์แล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงแกะแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.26 แล้วนำไปบ่มในน้ำ เป็นเวลา 28 วัน

6. เมื่อก่อนตัวอย่างทดสอบ ครบอายุการทดสอบที่ต้องการศึกษาแล้ว ให้นำก้อนตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังตัดของซีเมนต์เพสต์ แล้วทำการจดบันทึกผลการทดสอบ



รูปที่ 29 เครื่องทดสอบกำลังตัดของซีเมนต์เพสต์ Universal testing machine (Instron 55R4502)



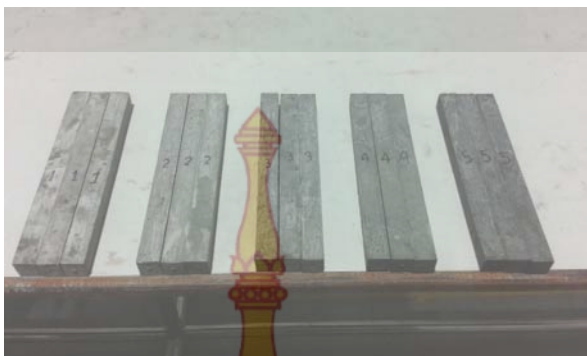
รูปที่ 30 แบบหล่อซีเมนต์เพสต์ ขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร



รูปที่ 31 แสดงการผสมซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 32 แสดงการกระทุ้งซีเมนต์เพสต์



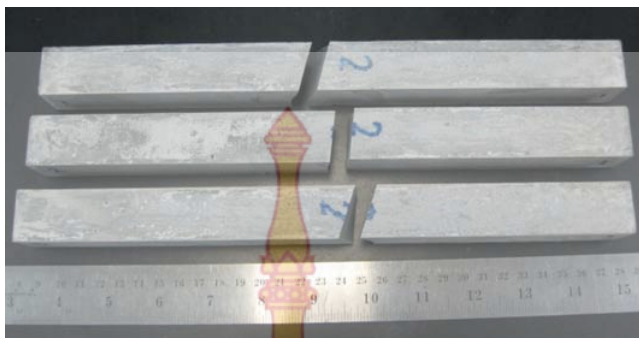
รูปที่ 33 ก้อนตัวอย่างหลังถอดแบบหล่อ



รูปที่ 34 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร³



รูปที่ 35 แสดงการวางชิ้นงานเพื่อทดสอบค่ากำลังดัด



รูปที่ 36 ตัวอย่างชิ้นงานหลังการทดสอบกำลังอัด

3.5.4 การเติมวัสดุทดแทนผงยางบดละเอียดและน้ำยางข้นเพื่อเพิ่มกำลังอัดของชิ้นงาน

3.5.4.1 นำเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ในข้อ 3.5.3 มาเติมวัสดุทดแทนได้แก่ยางบดละเอียดในอัตราส่วน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำ แล้วเทหล่อเป็นชิ้นงาน แล้วบ่มในน้ำกรองให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น วิเคราะห์กำลังอัดของชิ้นที่ขึ้นรูปได้

3.5.4.2 นำเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ในข้อ 3.5.3 มาเติมวัสดุทดแทนได้แก่น้ำยางข้นเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์ (อีก 10 เปอร์เซ็นต์ คือ แอมโมเนียเพื่อป้องกันการแข็งตัวของน้ำยาง) ในอัตราส่วน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำ แล้วเทหล่อเป็นชิ้นงาน แล้วบ่มในน้ำกรองให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น วิเคราะห์กำลังอัดของชิ้นที่ขึ้นรูปได้



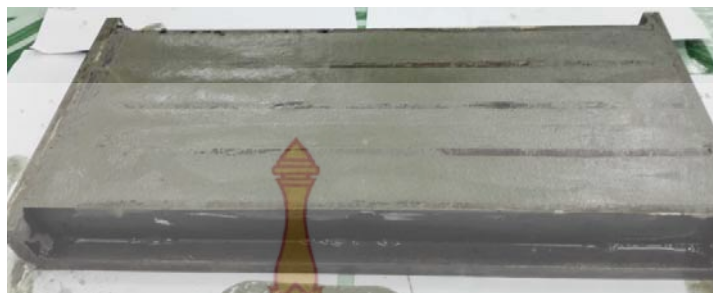
รูปที่ 37 แสดงสัดส่วนผสมระหว่างผงยางบดละเอียดกับผงมอร์ตาร์



รูปที่ 38 แสดงน้ำยางข้นที่ใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ 39 แสดงซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมระหว่างน้ำยางข้นยางบดละเอียด



รูปที่ 40 แสดงการลอ่ขึ้นรูปซีเมนต์มอร์ตาร์ทผสมระหว่างน้ำยางข้นและยางบดละเอียด

3.5.5 จำนวนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ทดสอบ

จำนวนซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 6 แสดงจำนวนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ทดสอบกำลังอัด

Symbol	No. of cement paste specimen
	28 days
CBA-1	3 pieces
CBA-2	3 pieces
CBA-3	3 pieces
CBA-4	3 pieces

สถานที่ทำการทดลอง

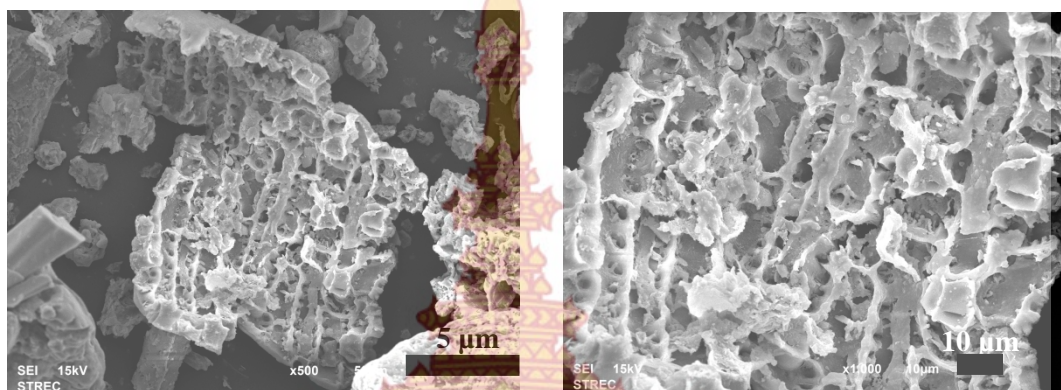
- ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะของเถ้าชานอ้อย

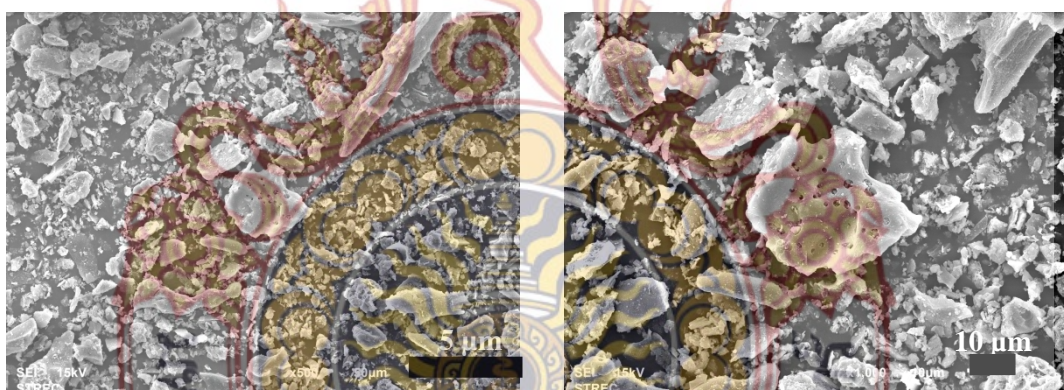
4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของเถ้าชานอ้อยโดยการถ่ายภาพ SEM



(ก) กำลังขยาย 500 เท่า

(ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

รูปที่ 41 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยก่อนบด

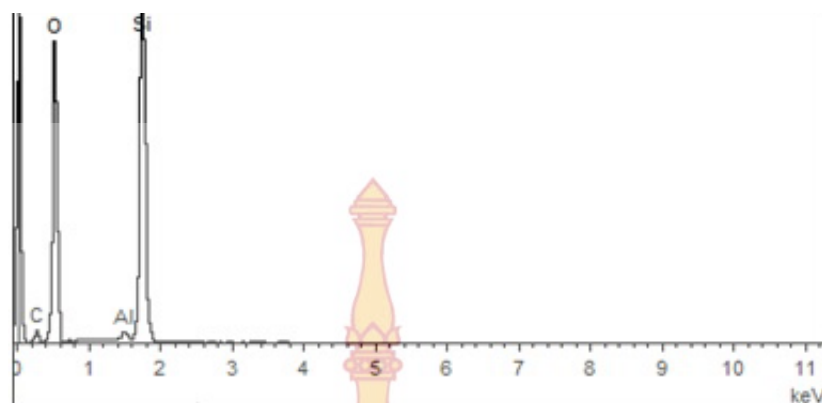


(ก) กำลังขยาย 500 เท่า

(ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

รูปที่ 42 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยหลังบดละเอียดด้วยวิธีบดละเอียด (ball milled) นาน 24 ชั่วโมง

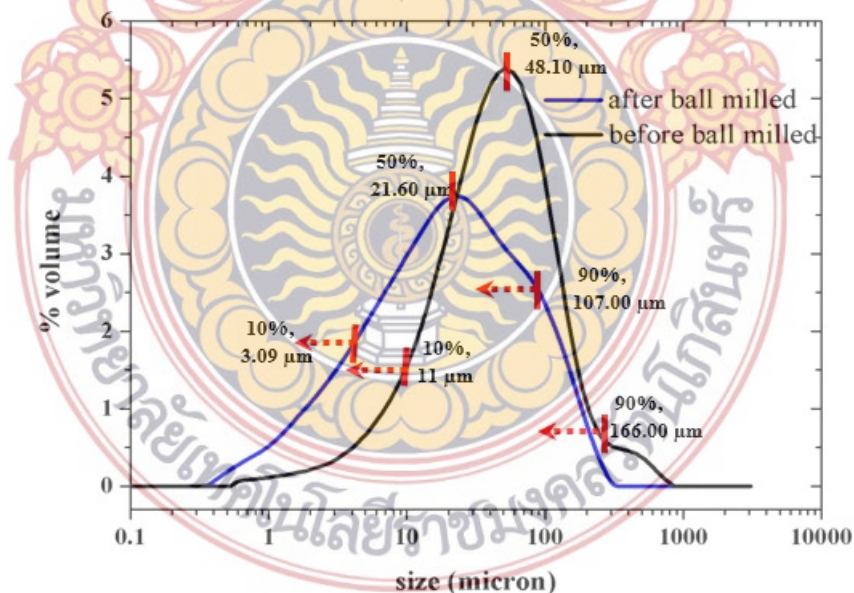
จากรูปที่ 41(ก-ข) พบว่าซีเถ้าชานอ้อยตอนเริ่มต้น มีความพรุนตัวของเถ้าชานอ้อยสูง ลักษณะทางกายภาพของเถ้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยทางธรรมชาติ เมื่อถูกความร้อนทำให้เส้นใยเหล่านี้เกิดรูพรุนขึ้นภายใน รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดประมาณ 6 ไมครอน พบว่าเถ้าชานอ้อยก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ ความพรุนสูง เป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อนำส่วนเถ้าชานอ้อยไปบดพบว่ามีลักษณะอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง รูปร่างไม่แน่นอน และความพรุนสูงขึ้น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย เมื่อเทียบกับเถ้าชานอ้อยก่อนบดประมาณ 14.25 ± 5.97 ไมครอน แสดงในรูปที่ 4-2ก-ข



รูปที่ 43 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยหลังบดละเอียดด้วยวิธี ball milled นาน 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 43 แสดงสเปกตรัมของของเรืองรังสีเอกซ์ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) ที่ติดอยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าในซีเก้าชานอ้อยที่ผ่านการเผาไหม้ประกอบของธาตุหลักคือ ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) และยังมีธาตุปริมาณน้อยอยู่ซีเก้าชานอ้อย ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) และคาร์บอน (C) แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ ถ้าหากธาตุที่มีปริมาณน้อยมากในระดับ ppm อาจต้องใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (WDX) ในการวิเคราะห์ธาตุเหล่านั้น ดังแสดงในหัวข้อ 4.1.4

4.1.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาค LPS

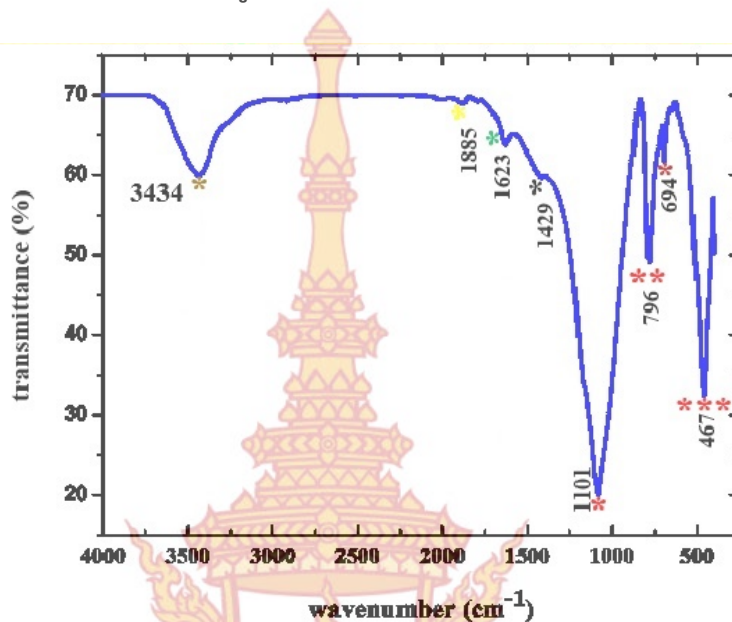


รูปที่ 44 กราฟเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคก่อนและหลังบดละเอียด

จากรูปที่ 44 พบการวิเคราะห์ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเก้าชานอ้อยก่อนบดและหลังบดโดยวัดค่าที่ 10%, 50% และ 90%

มีขนาดของอนุภาค 11 μm , 48.10 μm และ 166 μm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเก้าชานอ้อย หลังบดด้วยวิธี ball milled เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลงโดยอนุภาคของเก้าชานอ้อยเท่ากับ 3.09 μm , 21.60 μm และ 107 μm ตามลำดับ

4.1.3 การวิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันในซีเก้าชานอ้อยด้วยเทคนิค FT-IR



รูปที่ 45 กราฟของการทดสอบ Transform Infrared Spectrometer: FT-IR

จากรูปที่ 45 พบว่าในซีเก้าชานอ้อยมีพันธะการจับกันของธาตุดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งยืนยันได้ว่าผลของ FT-IR สอดคล้องกับผลของ WDX (XRF), XRD

ตารางที่ 7 แสดงหมู่ฟังก์ชันของธาตุต่างๆ ในเก้าชานอ้อย

ลำดับ	Functional groups	Wave number
1	O—H	3434
2	H-O-H bending	1885
3	C=O	1623
4	V_3 of CO_3^{2-} (asymmetric)	1429
5	Si—O—Si (asymmetric)	1101
6	Si—O—Si (symmetric)	796
7	O—Si—O	467
8	Si-O (quartz)	694

ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของซีเมนต์ซีเมนต์อ้อย พบว่า สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดของซีเมนต์อ้อยแสดงองค์ประกอบ O-H ที่เลขคลื่น 3434 cm^{-1} , สารประกอบ H-O-H bending ที่เลขคลื่น 1885 cm^{-1} , สารประกอบ C=O ที่เลขคลื่น 1623 cm^{-1} , สารประกอบ V_3 of CO_3^{2-} (asymmetric) ที่เลขคลื่น 1429 cm^{-1} , สารประกอบ Si-O-Si (asymmetric) ที่เลขคลื่น 1101 cm^{-1} สารประกอบ Si-O-Si (symmetric) ที่เลขคลื่น 796 cm^{-1} , สารประกอบ ที่เลขคลื่น 467 cm^{-1} สารประกอบ Si-O quartz มีเลขคลื่นอยู่ที่ 694 cm^{-1} ตามลำดับ

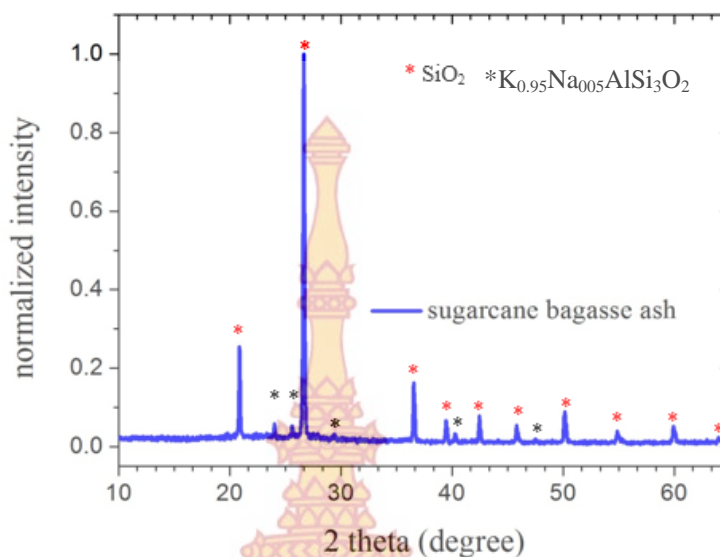
4.1.4 การทดสอบการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค WDX (XRF)

จากตารางที่ 42 พบว่าการวิเคราะห์ผลองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์อ้อยพบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณมากกว่าร้อยละ 70 มีปริมาณ SO_3 ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณ LOI ที่สูงนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่สั้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์อ้อยตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าซีเมนต์อ้อยมีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N เป็นวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ

ตารางที่ 8 แสดงปริมาณธาตุที่อยู่ในซีเมนต์อ้อย

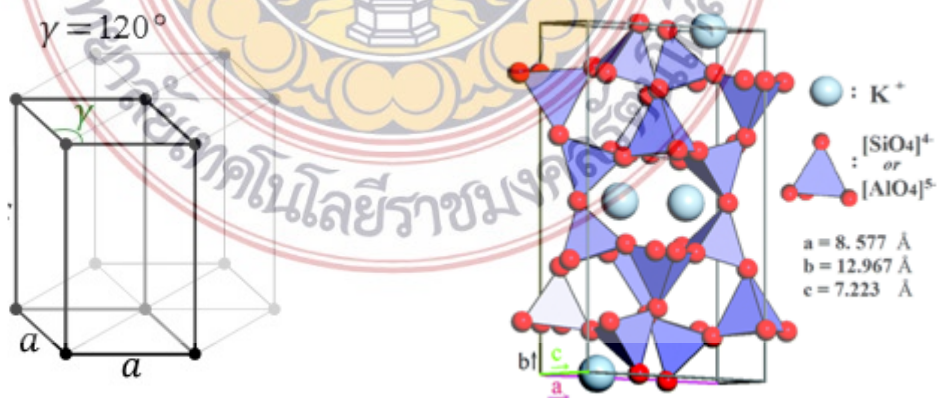
ลำดับ	สารประกอบเคมี	ปริมาณ (%)
1	Silicon dioxide (SiO_2)	71.3
2	Aluminum oxide (Al_2O_3)	9.07
3	Potassium oxide (K_2O)	2.87
4	Calcium oxide (CaO)	2.09
5	Iron oxide (Fe_2O_3)	1.83
6	Magnesium oxide (MgO)	1.27
7	Phosphorus pentoxide (P_2O_5)	0.597
8	Titanium dioxide (TiO_2)	0.348
9	Sodium oxide (Na_2O)	0.301
10	Sulfur trioxide (SO_3)	0.153
11	Loss On Ignition (LOI)	10.171

4.1.5 ผลการทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRD



รูปที่ 46 การทดสอบการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยวิธี XRD

จากรูปที่ 46 การวิเคราะห์ด้วย XRD ของเถ้าขานอ้อยนั้น พบมีสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ในของควอตซ์ มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะกอลนอล (Hexagonal crystal) แต่ละหน่วยเซลล์มีความยาวพันธะดังนี้ $a = b \neq c$ โดยที่ $a = b = 4.91344$ อังสตรอม และ $c = 5.406524$ อังสตรอม มุมของหน่วยเซลล์ $\alpha = \beta = 90^\circ$ แต่ $\gamma = 120^\circ$ ตามลำดับ ความเข้มของรังสีสูงสุดอยู่ที่มุม $21.08^\circ, 26.5^\circ, 36.55^\circ, 39.47^\circ, 42.47^\circ, 45.80^\circ, 50.13^\circ, 55.25^\circ, 59.90^\circ$ และ 63.96° แต่ที่มุม 26.5° มีความเข้มรังสีเอกซ์สูงสุด และสารประกอบโพแทสเซียมโซเดียมอลูมินาซิลิเกต ($\text{K}_{0.95}\text{Na}_{0.05}\text{AlSi}_3\text{O}_8$) มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic crystal) แต่ละหน่วยเซลล์มีความยาวพันธะดังนี้ $a \neq b \neq c$ โดยที่ $a = 8.57140$ อังสตรอม $b = 12.96460$ อังสตรอม และ $c = 7.22170$ อังสตรอม มุม $\alpha = 90^\circ, \beta = 115^\circ$ และ $\gamma = 87^\circ$ ตามลำดับ มีมุมเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์อยู่ที่มุม $24.02^\circ, 25.60^\circ, 29.41^\circ, 40.27^\circ$ และ 47.50° ตามลำดับ แต่ที่มุม 24.02° มีความเข้มรังสีเอกซ์สูงสุด

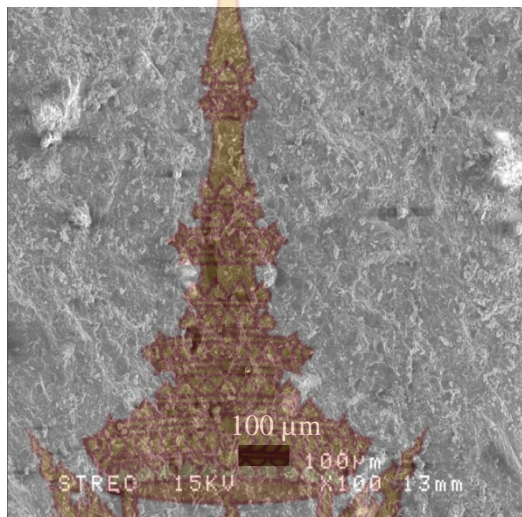


รูปที่ 47 โครงสร้างผลึกของควอตซ์และโพแทสเซียมโซเดียมอลูมินาซิลิเกต (Skorina, 2015)

4.2 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย 10% ที่อายุ 28 วัน

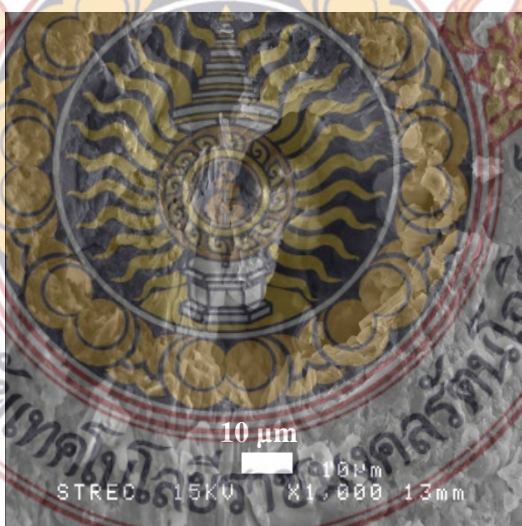
4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยการถ่ายภาพ SEM

คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยโดยการถ่ายภาพ SEM และ มีลักษณะพื้นฐานของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย



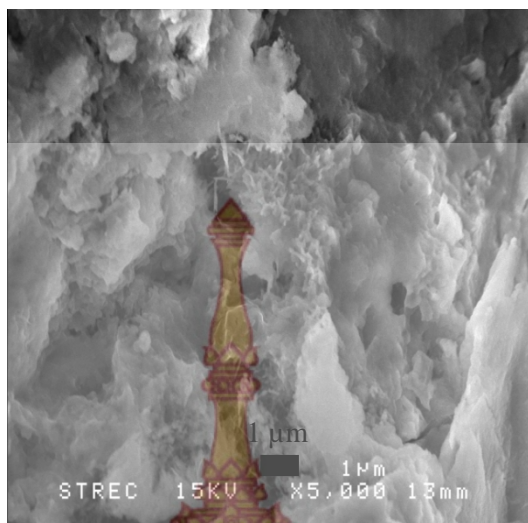
รูปที่ 48 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยกำลังขยาย 100 เท่า

จากรูปที่ 48 พบว่าพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ที่กำลังขยาย 100 เท่า มีลักษณะพรุนตัวต่ำ มีความหนาแน่นสูง



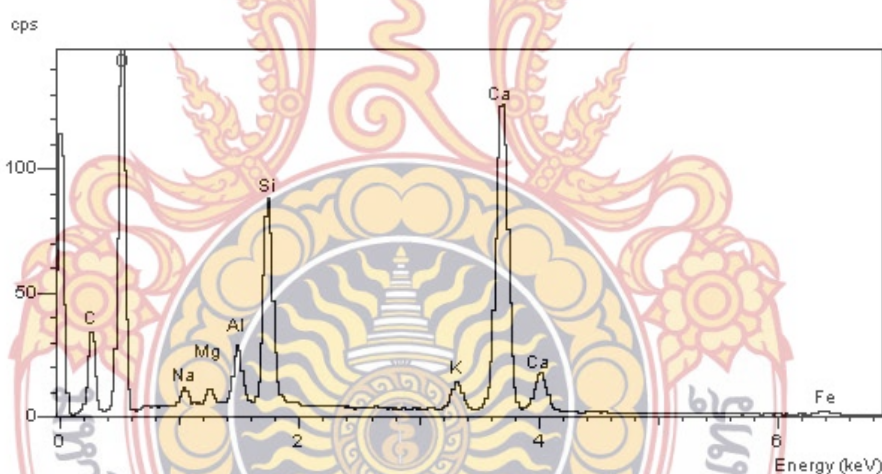
รูปที่ 49 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อย กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 49 เมื่อใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นเป็น 1000 เท่า พบว่ารูพรุนมีขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 ไมครอน และมีความหนาแน่นสูง



รูปที่ 50 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของซีเมนต์เฟสผสมเถ้าชานอ้อยกำลังขยาย 5000 เท่า

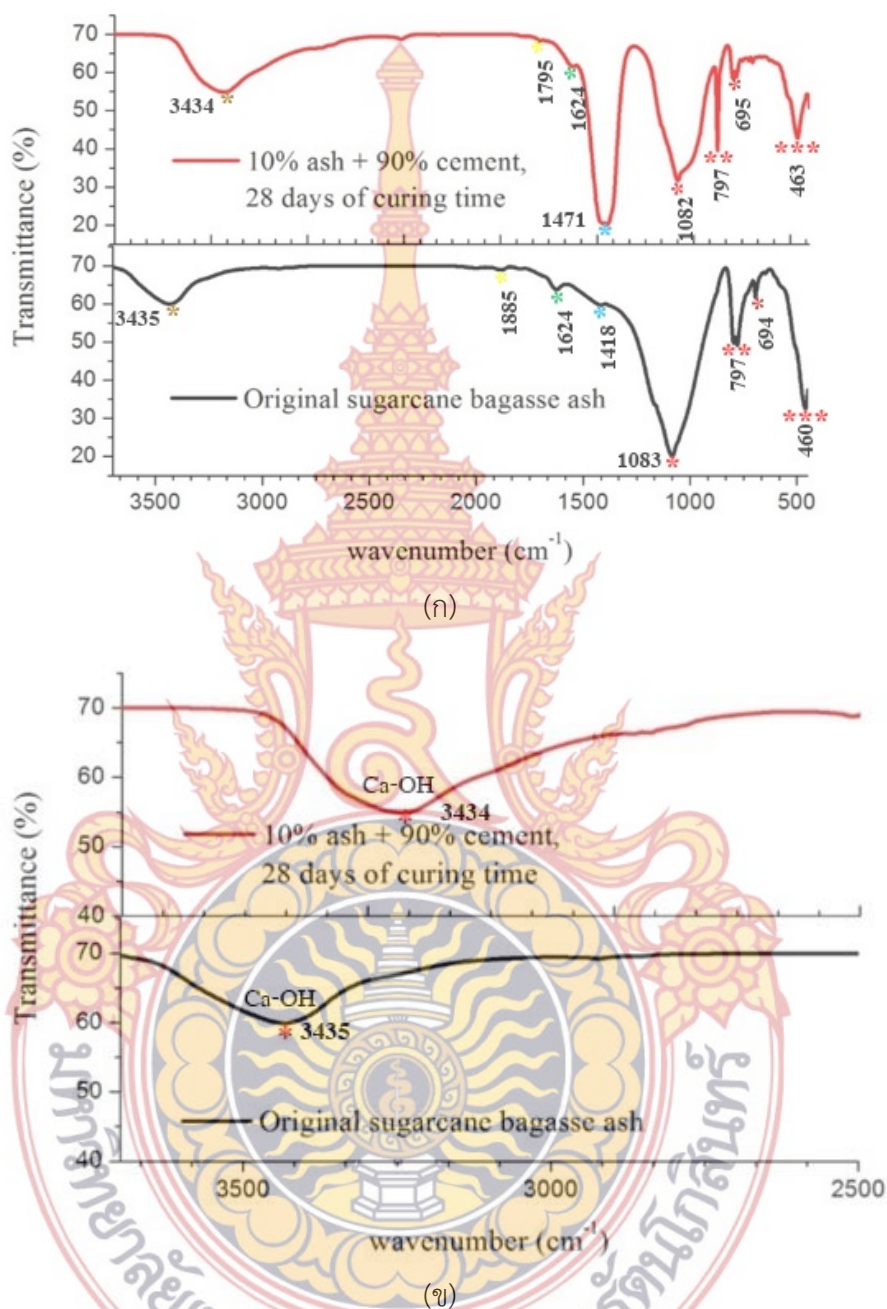
จากรูปที่ 50 เมื่อใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นเป็น 5000 เท่า พบว่าผลึกซิลิกาที่มีลักษณะสีขาวกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของซีเมนต์เฟสผสมเถ้าชานอ้อยดังรูป



รูปที่ 51 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เฟสผสมเถ้าชานอ้อย

จากรูปที่ 51 แสดงสเปกตรัมของเครื่องรังสีเอกซ์ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) ที่ติดอยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าในซีเมนต์เฟสผสมเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของธาตุหลักคือ แคลเซียม (Ca), ซิลิกอน (Si), ออกซิเจน (O), โพแทสเซียม (K), คาร์บอน (C) และอะลูมิเนียม (Al) และยังมีธาตุปริมาณน้อยอยู่ซีเมนต์เฟสผสมเถ้าชานอ้อย ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg), โซเดียม (Na) และเหล็ก (Fe) แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ ถ้าหากธาตุที่มีปริมาณน้อยมากในระดับ ppm อาจต้องใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (WDX) ในการวิเคราะห์ธาตุนั้น ดังแสดงในหัวข้อ 4.1.4

4.2.2 การวิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ของซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อย



รูปที่ 52 กราฟของการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ระหว่างซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อยกับวัสดุพอซโซลาน

จากรูปที่ 52(ก-ข) แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อยที่แสดงในสมการข้างต้น จะมีลักษณะคล้ายกับโหมดของการสั่นของออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตาม อาจมีความแตกต่างของความเข้มของการสั่นและพลังงานที่เกิดจากเลื่อนไปของพันธะในสารประกอบออกไซด์ ผลของ FT-IR พบว่าจะมีพีคสูงสุดที่พลังงาน 1083 cm⁻¹ ซึ่งเกิดจากความถี่การสั่นของโหมด (V₃) ของสารประกอบซิลิเกต

ซึ่งอยู่ในรูปซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amutha, 2013) นอกจากนี้ พีคที่ 1083 cm^{-1} จะเกิดปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 (สังเกตได้จากพีคที่ตำแหน่ง 3434 cm^{-1}) จะมีค่าความสูงของพีคที่ลดลงเปลี่ยนจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 ไปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต CSH (ที่ตำแหน่ง 1082 cm^{-1}) ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซิลิกา กับ Ca(OH)_2 ดังสมการที่ (4.1)



4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

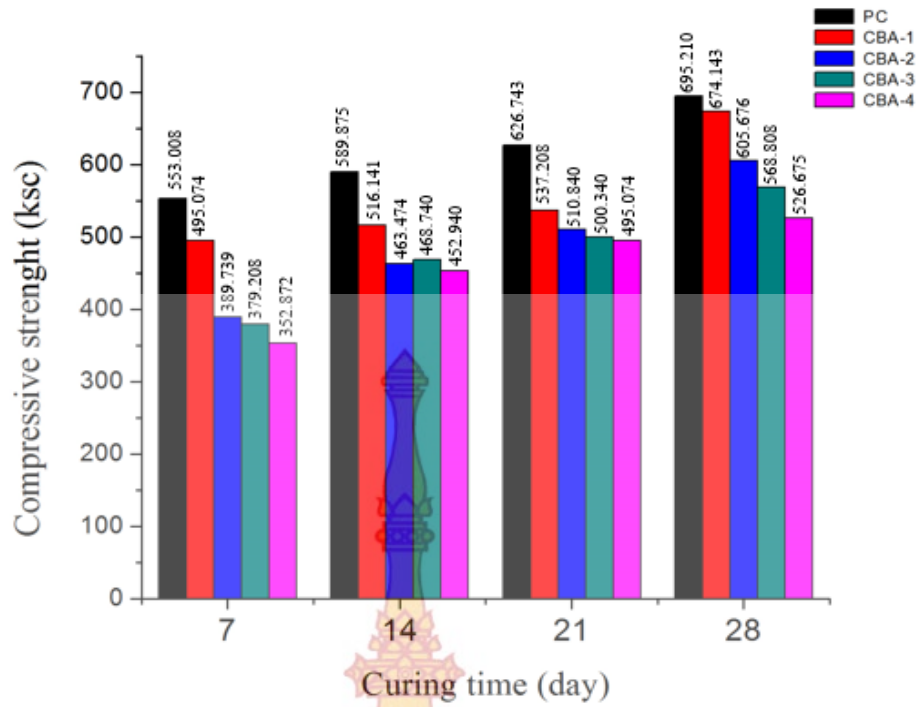
ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์แสดงในตารางที่ 9 และกราฟเปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์แสดงในรูปที่ 53

ตารางที่ 9 แสดงสัญลักษณ์และค่าของปริมาณเถ้าชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษา

Symbol	Sugarcane Bagasse Ash
PC	0%
CBA-1	10%
CBA-2	20%
CBA-3	30%
CBA-4	40%

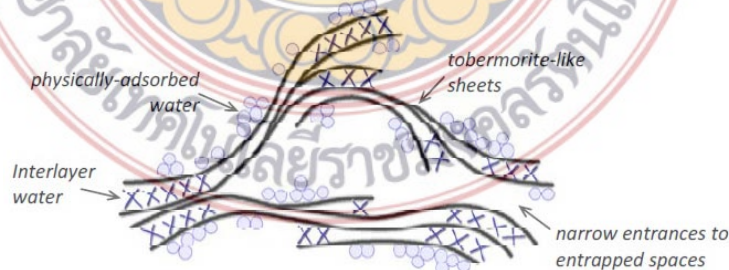
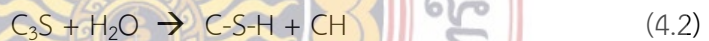
ตารางที่ 10 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย

Symbol	W/(C+SCBA)	compressive strength (ksc)			
		7 days	14 days	21 days	28 days
PC	0.38	553.008	589.875	626.743	695.210
CBA-1	0.38	495.074	516.141	537.208	674.143
CBA-2	0.38	389.739	463.474	510.874	605.676
CBA-3	0.38	379.206	468.740	500.340	568.808
CBA-4	0.38	352.872	452.940	495.074	526.675



รูปที่ 53 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 53 ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ พบว่าการเพิ่มของกำลังอัดระหว่าง 7 ถึง 28 วัน มีความสำคัญมากสำหรับเถ้าชานอ้อย 10% มีค่าความแข็งแรง 674.14 ksc ซึ่งใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมแบบอื่นๆ ที่มีเถ้าชานอ้อยผสมอยู่การที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นบางส่วนเกิดจากผลกระทบของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่าง SiO_2 ปฏิกิริยาจากเถ้าชานอ้อยและ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์อย่างไรก็ตามการแทนที่ของเถ้าชานอ้อย 20%, 30% และ 40% ทำให้ผลรับกำลังอัดลดลงเทียบกับการแทนที่ของเถ้าชานอ้อย 10% ที่อายุ 28 วันดังแสดงตามสมการที่ (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ (Govindarajan, 2011)



รูปที่ 54 แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ (Govindarajan, 2011)

4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์กำลังตัดของซีเมนต์เพสต์

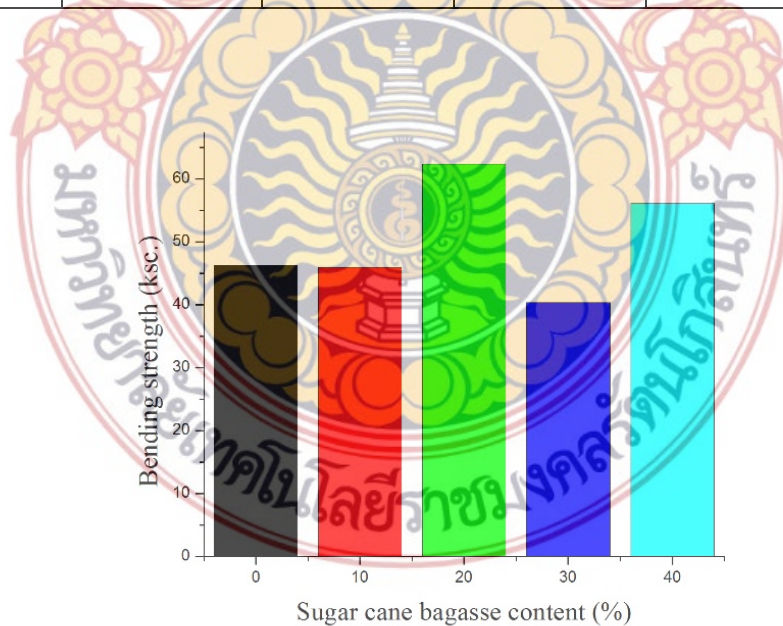
ผลการทดสอบกำลังตัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 4-5 และตารางที่ 4-6

ตารางที่ 10 แสดงกำลังตัดสูงสุดของซีเมนต์เพสต์ที่แปรค่าเถ้าขานอ้อย

%Ash	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_{av} (MPa)	SD
0%	4.77	5.91	2.96	4.55	1.49
10%	5.09	4.71	3.73	4.51	0.70
20%	4.66	5.60	8.09	6.12	1.77
30%	4.3	4.56	3.01	3.96	0.83
40%	7.26	6.94	2.32	5.51	2.76

ตารางที่ 11 แสดงกำลังตัดของซีเมนต์เพสต์ที่แปรค่าเถ้าขานอ้อย

%Ash	σ_1 (ksc)	σ_2 (ksc)	σ_3 (ksc)	σ_{av} (ksc)	SD
0%	48.64	60.26	30.18	46.36	15.17
10%	51.90	48.03	38.03	45.99	7.16
20%	47.52	57.10	82.49	62.37	18.07
30%	43.85	46.50	30.69	40.35	8.46
40%	74.30	70.77	23.66	56.15	28.19



รูปที่ 55 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังตัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

จากรูป 54 ผลการทดสอบกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยนำน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่อายุครบ 28 วัน พบว่ากำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าชานอ้อยที่ 20% รับกำลังดัดได้ดีที่สุด มีค่าความแข็งแรง 62.37 ksc ซึ่งใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เมื่อเทียบกับการแทนที่ของเถ้าชานอ้อย 0%, 10, 30% และ 40%

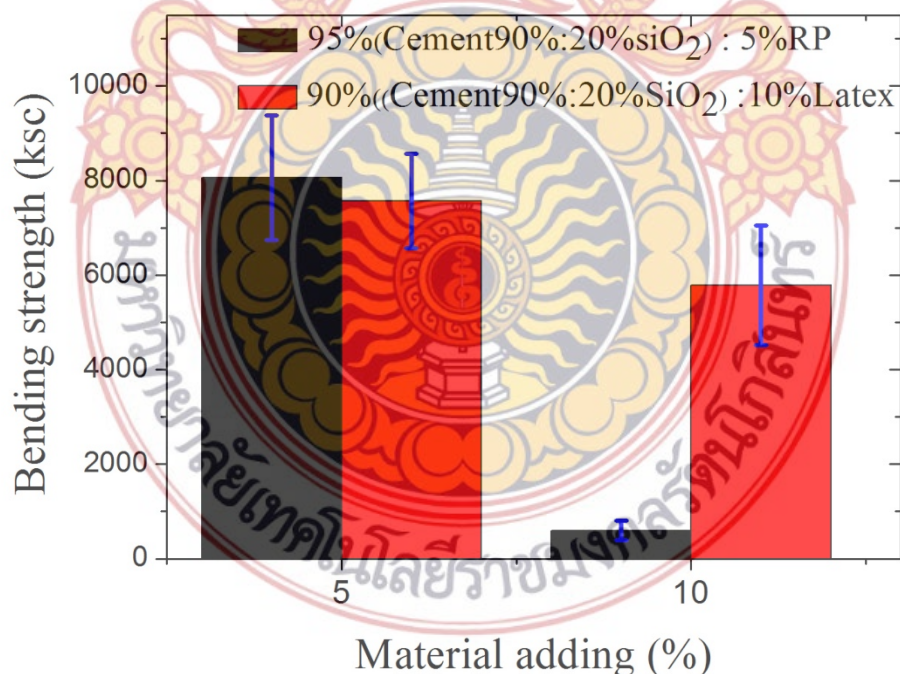
ตารางที่ 12 แสดงกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ที่เติมวัสดุผสมจากวัสดุผสมทดแทน

4.5 (90%Cement : 10SiO₂) : RP

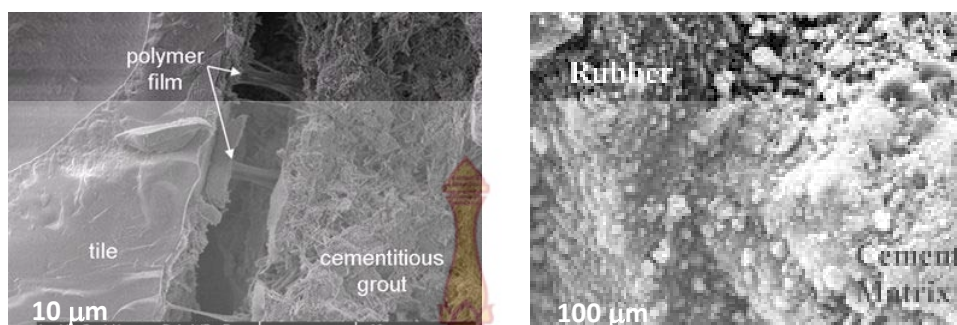
%Ash	σ_{1RP} (ksc)	σ_{2RP} (ksc)	σ_{3RP} (ksc)	σ_{av} (ksc)	SD _{RP}
5	8511.80	6521.47	7649.90	7563.10	998.13
10	640.36	367.91	780.81	596.70	209.93

4.6 (90%Cement : 10SiO₂) : Latex rubber

%Ash	σ_{1LR} (ksc)	σ_{2LR} (ksc)	σ_{3LR} (ksc)	σ_{av} (ksc)	SD _{LR}
5	9439.79	7917.75	6819.31	8058.95	1315.94
10	6631.33	6389.69	4336.12	5785.71	1261.18



รูปที่ 56 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมยางบดละเอียดและผสมน้ำยางข้นด้วยสัดส่วน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 57 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเพื่ออธิบายการจับตัวน้ำยางชั้นและผงยาบละเอียดกับซีเมนต์มอร์ต้า (Jamshidi, 2013)

นำกำลังตัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อยที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รับกำลังตัดได้ดีที่สุด มีค่าความแข็งแรง 62.37 ksc ซึ่งใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ซึ่งเป็นกำลังที่ดีที่สุดมาเติมวัสดุสองชนิด คือ ผงยางลดละเอียดขนาด 40 ไมครอน และน้ำยางชั้น (น้ำยางชั้น 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก : แอมโมเนีย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดนี้สามารถทำให้กำลังอัดของซีเมนต์ผสมดีขึ้น จากกราฟที่ 55 พบว่าที่การผสมวัสดุทดแทน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงยางบดละเอียดให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการเติมน้ำยางชั้นในปริมาณเท่ากัน เกิดจากปริมาณของน้ำยางที่น้อยเกินไป อาจไม่สามารถยึดเกาะวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์กับผงซิลิกาให้หนาแน่นได้ แต่ผงยางบดสามารถยึดเกาะกับซีเมนต์กับผงซิลิกาได้ดีกว่าน้ำยางชั้น แต่เมื่อปริมาณของน้ำยางเพิ่มขึ้น (วัสดุทดแทน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) น้ำยางชั้นสามารถยึดเกาะหรือประสานระหว่างชิ้นงานซีเมนต์กับผงซิลิกาได้ดีขึ้นทำให้ค่ากำลังจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ในรูปที่ 56 (Yang, 1992- Jamshidi, 2013)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 การศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นฐานของเส้นฐานอ้อยโดยการถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นฐานอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด มีลักษณะสัณฐาน (morphology) ของเส้นฐานอ้อยก่อนบดมีลักษณะอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ ความพรุนสูง ขนาดของรูพรุนประมาณ 6 ไมครอนเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่สม่ำเสมอเมื่อนำส่วนเส้นฐานอ้อยไปบดพบว่า มีลักษณะอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง รูปร่างไม่แน่นอน และความพรุนสูงขึ้น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กลงประมาณ 14.25 ± 5.97 ไมครอน

5.1.2 การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคของเส้นฐานอ้อย (LPS)

จากการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคของเส้นฐานอ้อยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยแสงเลเซอร์ (LPS) พบว่าเส้นฐานอ้อยก่อนบดมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่มีขนาด 48.10 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นฐานอ้อยหลังบด และเส้นฐานอ้อยหลังบดมีขนาด 21.60 ไมครอน

5.1.3 การศึกษาการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของเส้นฐานอ้อย (FT-IR)

จากการศึกษาการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของเส้นฐานอ้อยด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR) พบว่าสารประกอบส่วนใหญ่ของเส้นฐานอ้อยคือ Si-O-Si โดยพบที่เลขคลื่น 1101 cm^{-1}

5.1.4 การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (XRF)

จากการศึกษาด้วยเทคนิคดังกล่าว พบว่าสารประกอบส่วนใหญ่ของเส้นฐานอ้อย คือ Silicon dioxide เป็นองค์ประกอบหลัก มีปริมาณร้อยละ 71.30 ส่วนที่เหลือเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์และไฮโดรคาร์บอน

5.1.5 การศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

จากการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าผลึกของเส้นฐานอ้อยส่วนใหญ่คือ SiO_2 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะกอนอล (Hexagonal crystal)

5.1.6 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นฐานอ้อย (FT-IR)

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นฐานอ้อย (FT-IR) พบว่ามีพีคสูงสุดที่พลังงาน 1083 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากความถี่การสั่นของโหมด (V_3) ของสารประกอบซิลิเกตซึ่งอยู่ในรูปซิลิกาแบบออสติฐานนอกจากนี้พีคที่ 1083 cm^{-1} จะเกิดปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 (สังเกตได้จากพีคที่ตำแหน่ง 3434 cm^{-1}) จะมีค่าความสูงของพีคที่ลดลงเปลี่ยนจาก Ca(OH)_2 ไปอยู่ในรูปแบบของสารประกอบ CSH (ที่ตำแหน่ง 1082 cm^{-1}) ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซิลิกา กับ Ca(OH)_2

5.1.7 การศึกษาทางกายภาพของพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์

จากการพิจารณาภาพถ่ายทางกายภาพพบว่าส่วนผสม พบว่าพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นสูงรูปพรุนต่ำ พบผลึกซิลิกาที่มีลักษณะเป็นสีขาวกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ และพบธาตุหลักของซีเมนต์เพสต์คือ แคลเซียม, ซิลิกอน และออกซิเจน ตามลำดับ

5.1.8 การศึกษากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อย

จากการศึกษาและทำการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อยพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าขานอ้อยมีกำลังน้อยลงเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่การแทนที่เถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัด 674.14 ksc และมีค่าใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์ธรรมดา เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20, 30 และ 40 นั้น ผลของกำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ลดลงประกอบกับผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยลงทำให้กำลังที่ได้มีค่าลดลง และปริมาณของซิลิกาที่มากเกินไป ไม่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้กับ Ca(OH)_2 ได้ในปริมาณที่มากพอและเกิดปฏิกิริยาที่ไฮเดรชันในรูปแบบของสารประกอบ CSH ได้อย่างเพียงพอ จึงทำกำลังอัดของชิ้นงานมีค่าลดลง [4]

5.1.9 การศึกษากำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อย

จากการศึกษาและทำการทดสอบกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อย พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20 มีกำลังดัดสูงสุดอยู่ที่ 62.37 ksc ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งมีค่ากำลังดัดน้อยกว่า เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าขานอ้อยที่เวลาดังกล่าว ซึ่งเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีปริมาณของ CSH ที่มากเพียงพอ ทำให้เกิดกำลังที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

5.1.10 จากการศึกษาและทำการทดสอบกำลังดัดของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางข้นและยางบดละเอียด พบว่าที่การผสมวัสดุทดแทน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผงยางบดละเอียดให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการเติมน้ำยางข้นในปริมาณเท่ากัน เกิดจากปริมาณของน้ำยางที่น้อยเกินไป อาจไม่สามารถยึดเกาะวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์กับผงซิลิกาให้หนาแน่นได้ แต่ผงยางบดสามารถยึดเกาะกับซีเมนต์กับผงซิลิกาได้ดีกว่าน้ำยางข้น แต่เมื่อปริมาณของน้ำยางเพิ่มขึ้น (วัสดุทดแทน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) น้ำยางข้นสามารถยึดเกาะหรือประสานระหว่างชิ้นงานซีเมนต์กับผงซิลิกาได้ดีขึ้นทำให้ค่ากำลังจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อย ดังนั้นควรมีการศึกษาครั้งต่อไปในการพัฒนาเป็นมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

2. ในการศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในทำงานวิจัยเพื่อเปรียบเทียบสารประกอบต่างๆ กับเถ้าชานอ้อย

3. ควรมีการพัฒนาเครื่องบดละเอียดเถ้าชานอ้อยให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ เพราะในการศึกษาค้างนี้ใช้เครื่อง Ball milled ในการบดเถ้าชานอ้อยซึ่งทำให้ไม่สามารถบดเถ้าชานอ้อยในปริมาณมากได้ และใช้เวลาในการบดเถ้าชานอ้อยนาน



บรรณานุกรม

1. คาวี มนทการติวงค์, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล. 2548, กำลังอัดและความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อย, เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 1 พ.ศ. 2548, สมาคมคอนกรีตไทย, หน้า CON-53 ถึง CON-61.
2. จิรวัดน์ ชาลีวรรณ, 2555. ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อย-แกลบ-ไม้บด, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
3. จิรัฐดี บรรจงศิริ, 2550. การศึกษารับแรงอัดของของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าน้ำมัน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์.
4. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2544. คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าฟางข้าว, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
5. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2554. พฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลาน ในการประยุกต์ใช้กับพลังงานไมโครเวฟ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
6. วันโชค เครือหงษ์, 2555. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน : วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
7. ศักรินทร์ เหลืองกำจร, วารสารคอนกรีต, เมษายน 2008, วัสดุจีโอโพลีเมอร์, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
8. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร, ประจำปี 2555, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 401 หน้าที่ 23.
9. American Society for Testing and Materials. “ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 1991.
10. Amutha K, G. Sivakumar, 2013 Analytical analysis of Synthesized bio silica from bioresidues, Spectra chimica Acta Part A: Molecular and iomolecular Spectroscopy, 112, pp 219-222.
11. Chindaprasirt, P., jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T.,2007, “Effect of fly ash fineness on microstrucure of blended cement paste.” Construction and Building Materials, 2 Vol. 21, No. 7, pp. 1534-1541.

12. D. Govindarajan* and G. Jayalakshmi, 2011. XRD, FTIR and SEM studies on calcined sugarcane bagasse ash blended cement.
13. Taisiya Skorina and Antoine Allanore, 2015, Aqueous alteration of potassium-bearing aluminosilicate minerals: from mechanism to processing, Green Chem, pp. 2123-2136
14. X. Yang and D.D.L. Chung, 1992, Latex-modified cement mortar reinforced by short carbon fibers. Composites, pp. 453-460.
15. M. Jamshidi, H. R. Pakravan and K. Zojaji, 2013, Correlation between water permeability of Latex modified concrete (LMC) and water diffusion coefficient of latex film, Iran Polym J. pp. 799-809.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

แสดงตารางผลการทดสอบกำลังอัดซีเมนต์เพสต์



ตารางที่ ผ-1 ตารางสรุปแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

DAYS	EXEMPLE (AVERGE) (Ksc)					หมายเหตุ
	PC	CBA-1	CBA-2	CBA-3	CBA-4	
7	553.008	495.074	389.739	379.206	352.872	
14	589.875	516.141	463.474	468.740	452.940	
21	626.743	537.208	510.874	500.340	495.074	
28	695.210	674.143	605.676	568.808	526.675	

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ในตารางที่ ผ-1 ถึง ผ-6 มีดังนี้

PC	หมายถึง	ซีเมนต์เพสต์
CBA-1	หมายถึง	ซีเมนต์เพสต์วัสดุปอซโซลาน (เถ้าขานอ้อย 10%)
CBA-2	หมายถึง	ซีเมนต์เพสต์วัสดุปอซโซลาน (เถ้าขานอ้อย 20%)
CBA-3	หมายถึง	ซีเมนต์เพสต์วัสดุปอซโซลาน (เถ้าขานอ้อย 30%)
CBA-4	หมายถึง	ซีเมนต์เพสต์วัสดุปอซโซลาน (เถ้าขานอ้อย 40%)
W/(C+SCBA)	หมายถึง	อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน
Bagasse Ash	หมายถึง	เถ้าขานอ้อย
Date Test	หมายถึง	วันที่ทำการทดสอบ





RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY RATTANAKORN SALAYA CAMPUS

: การศึกษาสัดส่วนของซีเมนต์ในปอร์ตแลนด์ผสมที่มีผลต่อแรงดัดและแรงอัดในชิ้นงาน

: Cement	100%
: Bagasse Ash	0%
: W/(C+SCBA)	0.38

ตารางที่ ผ-2 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มาตรฐาน (PC) ksc

Specimen No.	1	2	3	4	5	Average (ksc)	Date Test
Strange the specimen in 7 days (ksc)	537.208	568.808	489.807	553.008	<u>458.207</u>	521.408	25/03/57
Strange the specimen in 14 days (ksc)	584.609	<u>521.408</u>	600.409	<u>505.608</u>	584.609	559.328	1/04/57
Strange the specimen in 21 days (ksc)	<u>568.808</u>	632.009	600.409	647.810	<u>537.208</u>	597.249	09/04/57
Strange the specimen in 28 days (ksc)	<u>616.209</u>	679.410	711.011	<u>600.409</u>	695.210	660.450	16/04/57

หมายเหตุ : ค่าตัวเลขที่ขีดเส้นใต้ หมายถึง ค่าที่ตัดออก



RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY RATTANAKORN SALAYA CAMPUS

: การศึกษาสัดส่วนของซีเมนต์ในปอร์ตแลนด์ผสมที่มีผลต่อแรงดัดและแรงอัดในชิ้นงาน

: Cement	90%
: Bagasse Ash	10%
: W/(C+SCBA)	0.38

ตารางที่ ผ-3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าขี้เถ้า (CBA-1) ksc

Specimen No.	1	2	3	4	5	Average (ksc)	Date Test
Strange the specimen in 7 days (ksc)	474.007	442.407	521.408	410.806	489.807	467.687	25/03/57
Strange the specimen in 14 days (ksc)	537.208	505.608	505.608	426.606	442.407	483.487	1/04/57
Strange the specimen in 21 days (ksc)	537.208	521.408	442.407	600.409	553.008	530.888	09/04/57
Strange the specimen in 28 days (ksc)	584.609	663.610	695.210	663.610	505.608	622.529	16/04/57

หมายเหตุ : ค่าตัวเลขที่ขีดเส้นใต้ หมายถึง ค่าที่ตัดออก



RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY RATTANAKORN SALAYA CAMPUS

: การศึกษาสัดส่วนของซีเมนต์ในปอร์ตแลนด์ผสมที่มีผลต่อแรงคดและแรงอัดในชิ้นงาน

: Cement 80%

: Bagasse Ash 20%

: W/(C+SCBA) 0.38

ตารางที่ ผ-4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อย (CBA-2) ksc

Specimen No.	1	2	3	4	5	Average (ksc)	Date Test
Strange the specimen in 7 days (ksc)	410.806	<u>316.005</u>	363.405	<u>300.204</u>	395.006	357.085	25/03/57
Strange the specimen in 14 days (ksc)	458.207	<u>410.806</u>	442.407	489.807	<u>395.006</u>	439.247	1/04/57
Strange the specimen in 21 days (ksc)	<u>379.206</u>	489.807	616.209	426.606	<u>632.009</u>	508.768	09/04/57
Strange the specimen in 28 days (ksc)	<u>553.008</u>	600.409	616.209	600.409	<u>663.610</u>	606.729	16/04/57

หมายเหตุ : ค่าตัวเลขที่ขีดเส้นใต้ หมายถึง ค่าที่ตัดออก



RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY RATTANAKORN SALAYA CAMPUS

: การศึกษาสัดส่วนของซีเมนต์ในปอร์ตแลนด์ผสมที่มีผลต่อแรงดัดและแรงอัดในชิ้นงาน

: Cement	70%
: Bagasse Ash	30%
: W/(C+SCBA)	0.38

ตารางที่ ผ-5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อย (CBA-3) ksc

Specimen No.	1	2	3	4	5	Average (ksc)	Date Test
Strange the specimen in 7 days (ksc)	<u>331.805</u>	379.206	395.006	363.405	<u>426.606</u>	379.206	25/03/57
Strange the specimen in 14 days (ksc)	<u>316.005</u>	474.007	474.007	458.207	<u>458.207</u>	436.086	1/04/57
Strange the specimen in 21 days (ksc)	529.308	474.007	497.707	<u>529.308</u>	<u>537.208</u>	513.508	09/04/57
Strange the specimen in 28 days (ksc)	<u>537.208</u>	568.808	553.008	<u>521.408</u>	584.609	553.008	16/04/57

หมายเหตุ : ค่าตัวเลขที่ขีดเส้นใต้ หมายถึง ค่าที่ตัดออก



RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY RATTANAKORN SALAYA CAMPUS

: การศึกษาสัดส่วนของซีเมนต์ในปอร์ตแลนด์ผสมที่มีผลต่อแรงดัดและแรงอัดในชิ้นงาน	
: Cement	60%
: Bagasse Ash	40%
: W/(C+SCBA)	0.38

ตารางที่ ผ-6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าขี้เถ้า (CBA-4) ksc

Specimen No.	1	2	3	4	5	Average (ksc)	Date Test
Strange the specimen in 7 days (ksc)	363.405	<u>426.606</u>	331.805	<u>331.805</u>	363.405	363.405	25/03/57
Strange the specimen in 14 days (ksc)	474.007	458.207	426.606	<u>395.006</u>	<u>426.606</u>	436.086	1/04/57
Strange the specimen in 21 days (ksc)	458.207	521.408	<u>426.606</u>	<u>553.008</u>	505.608	492.967	09/04/57
Strange the specimen in 28 days (ksc)	505.608	<u>489.807</u>	<u>489.807</u>	553.008	521.408	511.928	16/04/57

หมายเหตุ : ค่าตัวเลขที่ขีดเส้นใต้ หมายถึง ค่าที่ตัดออก



ภาคผนวก ข.

ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดสอบกำลังตัดซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ ผ.7 ตารางสรุปแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์ผสม

ตัวอย่าง	หมายเลข ชั้น ทดสอบ	ความต้านทานแรงอัด สูงสุด (เมกะพาสคัล)	มอดูลัส (เมกะพาสคัล)	หมายเหตุ
Cement 100 %	1	4.77	3,041.28	แตกหัก
	2	5.91	4,088.46	แตกหัก
	3	2.96	2,560.73	แตกหัก
ค่าเฉลี่ย		4.55	3,230.16	
Cement 90 %+10 Sugarcane Ash	1	5.09	3,019.52	แตกหัก
	2	4.71	3,779.49	แตกหัก
	3	3.73	2,582.74	แตกหัก
ค่าเฉลี่ย		4.51	3,127.25	
Cement 80 %+20 Sugarcane Ash	1	4.66	2,134.37	แตกหัก
	2	5.60	2,555.86	แตกหัก
	3	8.09	2,762.41	แตกหัก
ค่าเฉลี่ย		6.12	2,483.88	
Cement 70 %+30 Sugarcane Ash	1	4.30	3,272.47	แตกหัก
	2	4.56	2,453.63	แตกหัก
	3	3.01	1,118.74	แตกหัก
ค่าเฉลี่ย		3.96	2,281.61	
Cement 60 %+40 Sugarcane Ash	1	7.26	2,833.98	แตกหัก
	2	6.94	3,028.38	แตกหัก
	3	2.32	2,139.47	แตกหัก
ค่าเฉลี่ย		5.51	2,667.28	

หมายเหตุ ความเร็วหัวทดสอบ = 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที

ระยะระหว่างจุดรองรับ = 100 มิลลิเมตร

เส้นผ่าศูนย์กลางของเพลากัด = 10 มิลลิเมตร

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นายสันติ รัตนวีรนนท์
วัน เดือน ปีเกิด 3 ตุลาคม พ.ศ. 2521



วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2547

สถานที่ทำงาน

สาขาวิทยาศาสตร์ (ฟิสิกส์)
คณะศิลปศาสตร์ หน้าที่ศาลายา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ตำบล ศาลายา อำเภอ พุทธมณฑล จังหวัด นครปฐม 73170

สาขาวิจัยที่สนใจ

ฟิสิกส์วัสดุ, วัสดุศาสตร์

บทความที่เสนอในที่ประชุมวิชาการและผลงานวิจัย

1. สันติ รัตนวีรนนท์ สุรพล ศรีแก้ว และ ปราดรณ ภักดีวานิช. 2545. “เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 2 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 12 มีนาคม 2547, บทความย่อ หน้า 163
2. Santi Rattanaveeranon, Surapol Srikaew and Paradorn Pakdeevanich. Improved method for the preparation of pure silicon from rice husk. The third Thailand materials science and technology conference, 10-11 August 2004 pp. 270-272.
3. S. Rattanaveeranon, R. Ruamnikhom and S. Pangmanayon. Growth of zinc oxide nanoparticles on graphene assembly using to detect of acetone concentrations. Key Engineering Materials 2016 Vol. 675-676, pp. 125-129.