

การศึกษาความเป็นไปได้ของถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อก  
ผสมกากขานอ้อย



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2560

# การศึกษาความเป็นไปได้ของถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อก

## ผลสมกษานอ้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(รศ. ดร.ขวัญกมล ดอนขวา)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กิตติศักดิ์ วงษ์สุข : การศึกษาความเป็นไปได้ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อก

ผสมกากชานอ้อย (FEASIBILITY STUDY OF FLY ASH GEOPOLYMER BLOCK

MIXED BAGASSE). อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมกากชานอ้อย มาใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก โดยทำการทดลองศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลของตัวอย่าง ที่กำหนดเป็นมาตรฐานของคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก เช่น การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด นำเสนออัตราส่วนการทดลองโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน 20 : 15 : 100 กิโลกรัม โดยแปรค่าอัตราส่วนของกากชานอ้อยต่อเถ้าลอยที่ 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% ในกรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน 25 : 15 : 100 กิโลกรัม โดยแปรค่าอัตราส่วนของกากชานอ้อยต่อเถ้าลอยที่ 2%, 4%, 6% และ 8% ในกรณีศึกษาที่ 2 ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน และประเมินค่าใช้จ่ายวัสดุเบื้องต้นในการผลิตเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน : กากชานอ้อย = 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม ระยะบ่ม 28 วัน ในกรณีศึกษาที่ 1 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 26.841 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 4.44 ประมาณการค่าใช้จ่ายวัสดุของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 10.84 บาทต่อก้อน ในขณะที่อัตราส่วนผสม เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน : กากชานอ้อย = 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม ระยะบ่ม 3 วัน ในกรณีศึกษาที่ 2 มีความเหมาะสมมากกว่ากรณีศึกษาที่ 1 ในการนำไปผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก (39 x 19 x 7 เซนติเมตร) เนื่องจากมีระยะบ่มตัวน้อยกว่า ซึ่งมีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 30.300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าการดูดซึมน้ำที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับร้อยละ 3.65 ประมาณการค่าใช้จ่ายวัสดุของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 10.94 บาทต่อก้อน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการผลิตคอนกรีตบล็อกด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมกากชานอ้อย เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานก่อสร้างจากการใช้วัสดุชีวะมวล

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

KITISAK VONGSOOK : FEASIBILITY STUDY OF FLY ASH  
GEPOLYMER BLOCK MIXED BAGASSE. ADVISOR : ASSOC. PROF.  
AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D.

This research aims to study the possibility of geopolymer fly ash mixed with bagasse to produce hollow non-load bearing concrete block. The physical and mechanical properties of samples are investigated such as water absorption and compressive strength. In case one, the proportion of fly ash : activator : dust stone was fixed at 20 : 15 : 100 kg and the ratios of bagasse to fly ash were 2.5%, 5%, 7.5% and 10%. In case two, the proportion of fly ash : activator : dust stone was fixed at 25 : 15 : 100 kg and the ratios of bagasse to fly ash were 2%, 4%, 6% and 8%. These samples was cured at 3, 7 and 28 days before testing. The production cost of fly ash geopolymer block was also estimated in this study. The results showed that the mixed ratio of fly ash : activator : dust stone : bagasse = 20 : 15 : 100 : 2 kg at 28 days in the case one has a maximum compressive strength of 26.841 kg/cm<sup>2</sup> with water absorption of 4.44%. The material cost of this product is about 10.84 baht per unit. While a mix ratio of fly ash : activator : dust stone : bagasse = 25 : 15 : 100 : 1 kg at a curing time of 3 days in the case two is more suitability than case one for the production of hollow non-load bearing concrete blocks (39 x 19 x 7 cm) because of shorter curing time and higher compressive strength (about 30.300 kg/cm<sup>2</sup>). Moreover, a water absorption at 28 days is only about 3.65%. A material cost is 10.94 baht per unit. This research shows the possibility of producing concrete blocks with geopolymer fly ash and bagasse as the alternative biomass construction material.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year 2017

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาโครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ที่กรุณาให้โอกาสในการดำเนินโครงการครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษาแนะนำ แนวทางในการดำเนินโครงการ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไข และสนับสนุนในด้านต่าง ๆ จนโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจให้ในทุก ๆ ด้าน ในการศึกษาครั้งนี้ จนกระทั่งโครงการฉบับนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ที่สุด

ขอบคุณ ดร. อัจฉรา รุ่งเชตุ เพื่อนผู้ช่วยชี้แนะแนวทาง และให้กำลังใจอย่างจนสามารถทำให้โครงการครั้งนี้ดำเนินงานได้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอบคุณ บริษัท จริยะคอนกรีตวัสดุก่อสร้าง จำกัด พี่ศราวุธ ประทินยศศักดิ์ ที่อำนวยความสะดวก และสนับสนุนวัตถุดิบในการทำโครงการในครั้งนี้อย่างเต็มที่

ท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในสาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและ สาธารณูปโภค ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษาและดำเนินการทำโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กิตติศักดิ์ วงษ์สุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 เถ้าลอย (Fly Ash).....	6
2.1.1 คุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย.....	6
2.1.2 รูปร่างของเถ้าลอย.....	8
2.1.3 ความละเอียด (Fineness).....	9
2.1.4 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index).....	10
2.1.5 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน.....	10
2.1.6 โครงสร้างผลึก.....	10
2.2 Geopolymer.....	12
2.2.1 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์.....	14
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator).....	16
2.4 กากอ้อย (Bagasse).....	17
2.5 คอนกรีต.....	18
2.5.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น.....	19
2.5.2 น้ำ.....	20
2.5.3 วัสดุผสม (Aggregates).....	21

2.6	คอนกรีตบล็อก.....	22
2.6.1	คอนกรีตบล็อกสำหรับปูผนัง.....	23
2.6.2	คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (Interlock concrete paving block).....	25
2.6.3	เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	26
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3	วิธีดำเนินการศึกษา.....	32
3.1	การจัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก.....	33
3.2	การออกแบบ และปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก.....	37
3.3	ขั้นตอนการผลิตตัวอย่างคอนกรีตบล็อก.....	39
3.4	การทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล.....	41
3.5	ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก.....	42
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล.....	43
4.1	ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล.....	43
4.1.1	ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของแก้วลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย.....	43
4.1.2	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของแก้วลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย.....	44
4.2	การวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น.....	47
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1	สรุปผล.....	50
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	51
	เอกสารอ้างอิง.....	53
	ภาคผนวก ก ผลการทดสอบสมบัติของแก้วลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย.....	57
	ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น.....	71
	ภาคผนวก ค ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิต และทดสอบแก้วลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อก.....	74
	ประวัติผู้เขียน.....	82

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	7
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ.2533-2541.....	8
2.3 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง (มอก. 2135-2545).....	9
2.4 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์.....	15
2.5 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว.....	17
2.6 องค์ประกอบทางเคมีของกากอ้อย.....	17
2.7 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต.....	19
2.8 กำลังของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำ.....	21
2.9 อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ.....	22
2.10 ความต้านแรงอัด และการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (มอก. 57-2530).....	24
2.11 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533).....	25
2.12 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....	26
3.1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย กรณีศึกษาที่ 1.....	38
3.2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย กรณีศึกษาที่ 2.....	38
4.1 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะบ่ม 28 วัน.....	43
4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด กรณีศึกษาที่ 1.....	44
4.3 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด กรณีศึกษาที่ 2.....	45
4.4 สรุปราคาค่าต้นทุนวัสดุเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยกรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วน 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม.....	48
4.5 สรุปราคาค่าต้นทุนวัสดุเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยกรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วน 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม.....	49
ก.1 ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะบ่ม 3 วัน กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฝุ่น : กากขานอ้อย (กิโลกรัม).....	59



ก.2	ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บดล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 7 วัน กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน : กากชานอ้อย (กิโกรัม).....	61
ก.3	ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บดล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะบ่ม 28 วัน กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน : กากชานอ้อย (กิโกรัม).....	63
ก.4	ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บดล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะบ่ม 3 วัน กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน : กากชานอ้อย (กิโกรัม).....	65
ก.5	ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บดล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะบ่ม 7 วัน กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน : กากชานอ้อย (กิโกรัม).....	67
ก.6	ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บดล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะบ่ม 28 วัน กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฟูน : กากชานอ้อย (กิโกรัม).....	69
ข.1	ราคาต่อหน่วยกิโกรัมของวัสดุดิบ.....	72
ข.2	ราคาต้นทุนการผลิตเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บดล็อกผสมกากชานอ้อยชนิดไม่รับน้ำหนัก กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโกรัม.....	72
ข.3	ราคาต้นทุนการผลิตเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บดล็อกผสมกากชานอ้อยชนิดไม่รับน้ำหนัก กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโกรัม.....	73

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 Scanning Electron Microscope (SEM) ถ้ำลอยขยาย (1,000 เท่า).....	9
2.2 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน.....	10
2.3 รูปทรงสี่หน้าของ SiO <sub>4</sub> (SiO <sub>4</sub> tetrahedral).....	11
2.4 โครงสร้างผลึกβ-ควอร์ซฉายลงบนระนาบ (0001).....	12
2.5 โครงสร้างผลึกของα-ควอร์ซโครงสร้างผลึกของ α-ควอร์ซ ฉายลงบน (0001).....	12
2.6 กระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า.....	13
2.7 ผิวของถ้ำลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ 10 นาที.....	14
2.8 คอนกรีตบล็อกปูผนังแบบกลวงมาตรฐาน แบบและขนาดต่างๆ.....	24
3.1 แผนผังกระบวนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.2 ถ้ำลอยจากแหล่งแม่เมาะ Class C.....	33
3.3 กากอ้อยละเอียด.....	33
3.4 ทราฮายาบ (ทรายแม่น้ำ).....	34
3.5 โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	35
3.6 หินฝุ่น.....	37
3.7 ตู้อบไล่ความชื้น และเครื่องชั่งดิจิตอล.....	38
3.8 เครื่องวิเคราะห์หาค่าความหวานของอ้อย และเครื่องวัดความชื้น.....	39
3.9 เครื่องผสมวัสดุดิบ.....	39
3.10 เครื่องอัดบล็อกคอนกรีต ด้วยแรงดันไฮดรอลิก.....	40
3.11 การจัดเก็บ และบ่มบล็อกทดสอบ.....	40
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูซึมน้ำกับอัตราส่วนผสมของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยที่อายุ 28 วัน ภูมิศึกษาที่ 1 และภูมิศึกษาที่ 2.....	44
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยที่อัตราส่วนต่างๆ ภูมิศึกษาที่ 1.....	45
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยที่อัตราส่วนต่างๆ ภูมิศึกษาที่ 2.....	46
ค.1 การเตรียมถ้ำลอย.....	75
ค.2 การเตรียมกากชานอ้อย.....	75
ค.3 การเตรียมหินฝุ่น.....	76

ค.4	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมซิลิเกต : โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	76
ค.5	การเตรียมแบบอัดคอนกรีตบล็อก.....	77
ค.6	ขั้นตอนผสมวัตถุดิบการผลิตถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อก เติมถ้ำลอยตามอัตราส่วนที่กำหนด.....	77
ค.7	เติมกากชานอ้อยตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด.....	78
ค.8	เติมตัวเร่งปฏิกิริยาตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด.....	78
ค.9	ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยที่ผลิตได้.....	79
ค.10	ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ.....	79
ค.11	การทดสอบกำลังรับแรงอัด และลักษณะการแตกของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย.....	80
ค.12	อบก้อนอิฐบล็อกเพื่อนำไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ.....	81
ค.13	แช่น้ำก้อนอิฐบล็อกเพื่อนำไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ.....	81



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปูนซีเมนต์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อก แต่การที่จะได้ปูนซีเมนต์มานั้นต้องทำหลายทรัพยากรธรรมชาติ รวมถึงระบบนิเวศที่อยู่บริเวณนั้น อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดมลพิษสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางอากาศจากฝุ่นละออง มลพิษทางเสียง ซึ่งในที่สุดส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของชุมชนโดยรอบ ดังนั้นหากมีวัสดุเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ลดลง ก็จะช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ (พงศัภูมิ ศรีชมแก้ว., 2555)

ปัญหาการขาดแคลนแหล่งวัสดุส่งผลกระทบต่อต้นทุนการก่อสร้างและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างทาง ดังนั้นสถาบันการศึกษาและหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมกรรมทางได้วิจัยเพื่อหาวัสดุใหม่ทดแทนวัสดุก่อสร้างพื้นฐานจากธรรมชาติรวมทั้งการหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุธรรมชาติที่ไม่ได้มาตรฐานให้สามารถเป็นวัสดุวิศวกรรมได้ อันจะนำมาซึ่งการลดต้นทุนค่าขนส่งวัสดุที่ได้มาตรฐานจากแหล่งวัสดุที่ห่างไกลจากสถานที่ก่อสร้าง

ปัจจุบันเทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติในงานก่อสร้างถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อขจัดปัญหาการขาดแคลนวัสดุวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้ปูนซีเมนต์ ผสมกับวัสดุธรรมชาติและบดอัดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม (กำลังต้านทานแรงเฉือนการอัดตัว การบวมตัว และการหดตัว) อย่างไรก็ตามการได้มาของการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาด้านการทำลายธรรมชาติสิ่งแวดล้อมจากการระเบิดแหล่งหิน และกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน การผลิตปูนซีเมนต์ปริมาณ 1 ตัน จะต้องปล่อย ก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์) ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณ 1 ตัน (J. Davidovits et al., 2002) เช่นเดียวกัน

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารเชื่อมประสานชนิดใหม่ของโลกปัจจุบัน ซึ่งเป็นส่วนผสมของสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) และวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมิน่าเป็นองค์ประกอบหลักของสารกระตุ้น สารกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution, NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) วัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้จัดเป็น Green material ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก่อให้เกิด (Greenhouse effect) จีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงในการเตรียมตัวอย่างปลดปล่อย  $\text{CO}_2$  ต่ำ จีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดและความคงทนที่เหนือกว่าปูนซีเมนต์ (Patimapon Sukmak et al., 2014)

ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตและการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาไหม้ถ่านหินในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตพลังงานไฟฟ้า มักนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก (วัสดุปอซโซลานิก) ไม่เพียงแต่จะประยุกต์ใช้กับปูนซีเมนต์เท่านั้น เถ้าลอยยังใช้เป็นวัสดุตั้งต้น (Precursor) ในการผสมกับสารกระตุ้นเพื่อผลิตสารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ (Prinya Chindapasirt et al., 2007)

สารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ใช้  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เป็นส่วนผสมหลักของสารกระตุ้น ดังนั้น หากมีการเติมสารผสมเพิ่มที่มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร่วมกับเถ้าลอย สารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  สามารถทำปฏิกิริยากับ CaO และเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H)

อ้อยเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอายุหลายปี อยู่ในวงศ์หญ้า (Gramineae หรือ Poaceae) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* L. อ้อยมีถิ่นกำเนิดทางตอนเหนือของประเทศอินเดีย และหมู่เกาะนิวกินีในมหาสมุทรแปซิฟิก มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ คือ รากเป็นระบบรากฝอย (fibrous root system) เป็นรากที่แข็งแรงและสามารถหยั่งลงไปในดินได้ลึก ลำต้นสามารถแตกหน่อได้จากตาของข้อที่อยู่ติดดิน ใบจะเกิดสลับกันสองข้างของข้อที่หุ้มตาไว้ โดยมากจะมีใบและขนขึ้นบริเวณกาบใบและแผ่นใบ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2527)

อ้อยเป็น 1 ใน 5 พืชเศรษฐกิจหลักสำคัญของประเทศไทย ได้แก่ ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง และปาล์มน้ำมัน โดยเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งเป็นสารให้พลังงานที่สำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ น้ำตาลจากอ้อยเป็นน้ำตาลที่มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 75 ของตลาดน้ำตาลทั้งหมดของโลก ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกน้ำตาลจากอ้อยเป็นลำดับที่ 2 ของโลก รองจากประเทศบราซิล และในปี 2558 ประเทศไทยมีการส่งออกน้ำตาลทรายทั้งสิ้น 7,966,505.48 ตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 9 จากปี 2557 ซึ่งส่งออกได้จำนวน 7,321,575.94 ตัน ทั้งนี้ในปี 2558 ประเทศไทยมีกำลังการผลิตน้ำตาลและผลิตภัณฑ์จากน้ำตาลต่อปีมากกว่า 10 ล้านตัน จากโรงงานผลิตน้ำตาลดิบและน้ำตาลทรายขาวจากทั่วประเทศ 49 โรงงาน (กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ, 2558)

จากรายงานผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ, 2558) โดยอาศัยข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม พบว่า ตั้งแต่ปีการผลิต 2549/2550 ถึง 2557/2558 พื้นที่ปลูกอ้อยในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยประจำปีการผลิต 2557/2558 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย โดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมและการสำรวจจัดเก็บข้อมูลภาคสนาม พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูก

อ้อยในเขตพื้นที่สำรวจรวม 47 จังหวัด จำนวน 10,530,927 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยส่งโรงงาน 9,591,448 ไร่ และพื้นที่ปลูกอ้อยสำหรับทำพันธุ์ 939,479 ไร่ โดยมีพื้นที่เพิ่มจากปีการผลิต 2556/2557 จำนวน 455,784 ไร่ หรือร้อยละ 4.52 เนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายปรับเปลี่ยนพื้นที่ปลูกข้าวในเขตไม่เหมาะสมมาเป็นพื้นที่ปลูกอ้อย ทำให้มีพื้นที่ที่มีศักยภาพสำหรับปลูกอ้อยเพิ่มขึ้น จังหวัดที่ปลูกอ้อยมากที่สุด คือ กาญจนบุรี นครสวรรค์ อุตรธานี นครราชสีมา ลพบุรี และขอนแก่น ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละจังหวัดมีพื้นที่ปลูกอ้อยมากกว่า 6 แสนไร่ สำหรับปีการผลิต 2557/2558 ทั้งประเทศผลิตอ้อยได้ 116,712,776 ตัน โดยเป็นอ้อยส่งโรงงาน 105,959,057.985 ตัน (กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ, 2558)

สถานการณ์การผลิตอ้อยเข้าหีบตั้งแต่ปี 2553/2554 จนถึงปีการผลิต 2557/2558 พบว่า มีปริมาณอ้อยเข้าหีบเพิ่มขึ้น โดยในปีการผลิต 2557/2558 มีปริมาณอ้อยเข้าหีบ 105,959,057 ตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.2 จากปีการผลิต 2556/2557 ซึ่งหีบได้ประมาณ 103,665,750 ตัน เนื่องจากมีโรงงานน้ำตาลที่ได้รับอนุญาตให้ตั้งใหม่เปิดรับอ้อยเข้าหีบเพิ่มขึ้นหลายโรงในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ, 2558)

จากรายงานพยากรณ์พื้นที่เพาะปลูกอ้อยและผลผลิตปีการผลิต 2558/2559 ครั้งที่ 1 ณ วันที่ 21 พฤษภาคม 2558 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ, 2558) คาดว่าประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตพื้นที่สำรวจรวม 47 จังหวัด จำนวน 11,033,736 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยส่งโรงงาน 10,003,430 ไร่ และพื้นที่ปลูกอ้อยสำหรับทำพันธุ์ 1,030,306 ไร่ โดยมีพื้นที่เพิ่มจากปีการผลิต 2557/2558 จำนวน 502,809 ไร่ หรือร้อยละ 4.78 และมีอ้อยส่งโรงงานน้ำตาล 111,052,085 ตัน (กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ, 2558)

กากอ้อย (Bagasse) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการหีบอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย แสดงให้เห็นว่ากากอ้อยเป็นวัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูปที่มีศักยภาพในปัจจุบันสำหรับประเทศไทยที่จะนำมาพัฒนาเข้าสู่อุตสาหกรรมก่อสร้างให้กว้างมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่เหลือที่มีปริมาณมากสม่ำเสมอ และเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลทรายภายในประเทศ (ธัญญารัตน์ คงขุนเทียน, 2557)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากอ้อย พบว่า กากอ้อยมีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 49 เส้นใยประมาณร้อยละ 49 และของแข็งที่ละลายได้ (soluble solid) ประมาณร้อยละ 2 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกากอ้อยแห้ง พบว่า ประกอบด้วยอัลฟาเซลลูโลสประมาณร้อยละ 45.5 เฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 27 ลิกนินประมาณร้อยละ 21.1 และอื่นๆ ประมาณร้อยละ 6.9 (Rocha et al., 2011)

ปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับการใช้กากชานอ้อย ทั้งในภาคการเกษตร และภาคอุตสาหกรรม ต่าง ๆ เช่น ทำเป็นปุ๋ย อาหารสัตว์ ใช้เป็นวัตถุดิบ รังดิน เป็นพลังงาน ทำกระดาษ ภาชนะ บรรจุภัณฑ์ แผ่นไม้อัดจากชานอ้อย ทำพลาสติกจากลิกนินของชานอ้อย (ปรีชา เกียรติกระจาย, 2530) เป็นต้น และนอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการผลิตอิฐบล็อกประสานจากกากอุตสาหกรรม (พงศภูมิ ศร ชมแก้ว, 2555) เป็นต้น

ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยเรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ผสมกากอ้อยในการผลิตคอนกรีตบล็อก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุในงานก่อสร้าง รวมถึง การใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวะมวลที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นมิตร กับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังได้เห็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุทดแทนจากวัสดุชีวะมวลที่เหลือจาก อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายที่กำลังเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม ในการผลิตเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ตามมาตรฐาน และศักยภาพในการเป็นวัสดุ ทดแทนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตบล็อก
- 1.2.3 ศึกษาต้นทุนวัสดุในการผลิตเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ทดลองหาอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ต่อกากชานอ้อยที่เหมาะสมต่อ การขึ้นรูปคอนกรีตบล็อก
- 1.3.2 ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ที่ใช้เถ้า ลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมกากชานอ้อย ตามมาตรฐาน มอก.58-2533
- 1.3.3 ขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่ใช้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมกากอ้อย ตาม มาตรฐาน มอก.58-2533

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ได้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ผสมกากชานอ้อย

- 1.4.2 สามารถขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกที่ใช้ถั่วลยจิโอะโพลิเมอร์ผสมกากขานอ้อย สำหรับก่อสร้างผนังได้ ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533
- 1.4.3 พัฒนาผลิตภัณฑ์ด้านวัสดุในงานก่อสร้าง จากการใช้วัสดุชีวมวลที่เหลือใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหินเถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโลมีสีเทาเทาดำหรือน้ำตาลเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของ ซิลิกาและอลูมินาเมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาคแต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหินอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาของการเผาดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

##### 2.1.1 คุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตมีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงาน ได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้งาน

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้นส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการเผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตามมาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบดังในตารางที่ 2.1

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาอลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอนอกจากนี้ ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย

สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) กำหนดไม่ให้เกิดร้อยละ 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดระยะเวลาก่อตัวได้และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน (ASTM C-618, 2005)

Chemical composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์อะลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), max %	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงานซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีการกำหนด ค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มากการควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$  Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-Aggregate ขึ้น ได้ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาจะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

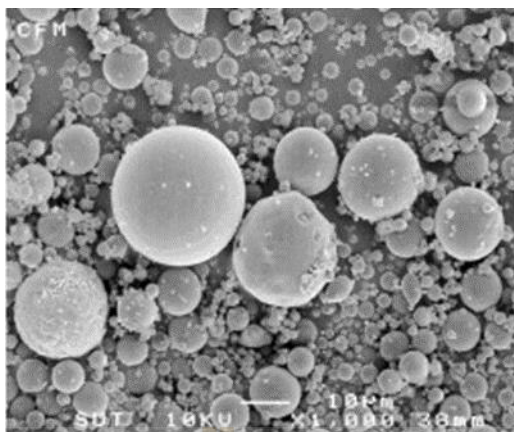
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ พ.ศ.2433 - 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไป มีปริมาณออกไซด์ของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือปริมาณ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะสูงกว่าเถ้าลอยแหล่งอื่นที่มีอยู่ในประเทศไทยส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่าง ปี พ.ศ. 2533–2541 (Prinya Chindapasirt, De Silva, Sagoe-Crentsil, & Hanjitsuwan, 2012 ; Prinya Chindapasirt, Jenjirapanya, & Rattanasak, 2014 ; Hanjitsuwan et al., 2014)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ.2533–2541 (Prinya Chindaprasirt, De Silva, Sagoe-Crentsil, & Hanjitsuwan, 2012 ; Prinya Chindaprasirt, Jenjirapanya, & Rattanasak, 2014 ; Hanjitsuwan et al., 2014)

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	23.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	10.0	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	11.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

### 2.1.2 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยมเมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปางโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลมดังรูปที่ 2.1 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ (P. Chindaprasirt, Jaturapitakkul, Chalee, & Rattanasak, 2009)



รูปที่ 2.1 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอยขยาย (1,000 เท่า)  
(Prinya Chindaprasirt, Chai Jaturapitakkul et al. 2009)

### 2.1.3 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของ เถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจาก เถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือ ส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่านอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี particle size-analysis หรือ วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัมการทดสอบเทอร์บิดิเมเตอร์ (turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบ ทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบโดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมากแต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางการบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง (มอก. 2135-2545)

Simple Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 %	Air Permeability (cm <sup>3</sup> /mg)	Mean Particle Size (micron)
ซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.29	37.4	2370	28.5

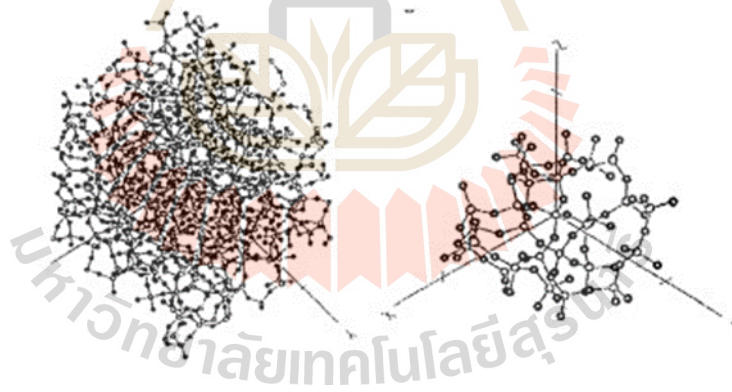
จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้างบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

#### 2.1.4 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน เพื่อแสดงถึงอัตราการเกิดหรือความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย

#### 2.1.5 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน

โครงสร้างผลึกซิลิกาอสัณฐานจะมีการเรียงตัวกันของอะตอมหรืออนุภาคยังไม่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกซิลิกาซึ่งผลึกซิลิกาตั้งกล่าวมีโครงสร้างผลึกต่าง ๆ คือควอร์ซ ไทรคิไมท์ และคริสโทรบอลไลท์ โดยที่แต่ละโครงสร้างจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน (Makino et al., 1999)

(ก) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดใหญ่ของซิลิกาอสัณฐาน (Si<sub>400</sub>O<sub>800</sub> cluster)

(ข) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดเล็กของซิลิกาอสัณฐาน (Si<sub>27</sub>O<sub>72</sub> cluster)

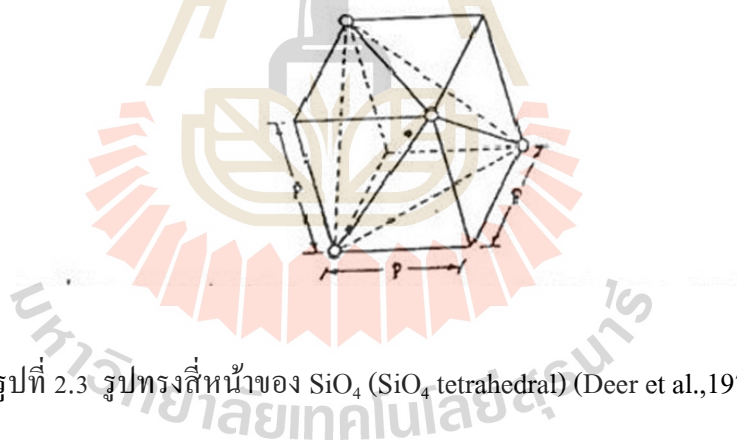
(○ คืออะตอมของออกซิเจน, ● คืออะตอมของซิลิกอน)

#### 2.1.6 โครงสร้างผลึก

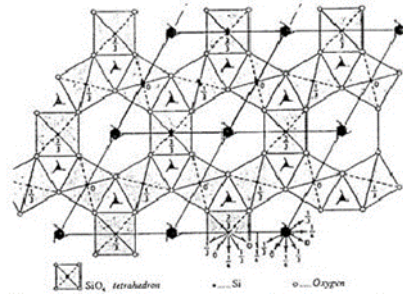
โครงสร้างผลึกซิลิกามีอยู่ 3 โครงสร้างคือควอร์ซ ไทรคิไมท์ และคริสโทรบอลไลท์ โดยแต่ละโครงสร้างผลึกจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะเป็นไป

อย่างช้า ๆ จากโครงสร้างผลึกรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่งดังนั้น โครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงจะยังคงมีอยู่ ณ ที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยน โครงสร้างและแต่ละ โครงสร้างผลึกจะมี โครงสร้างที่แตกต่างกัน 2 โครงสร้าง คือ  $\alpha$ - จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและ  $\beta$ - จะเกิดที่อุณหภูมิสูง (Deer et al., 1971)

โครงสร้างผลึกซิลิกาแต่ละ โครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุล  $\text{SiO}_4$  ซึ่งมีอะตอมของ ออกซิเจนเกาะอยู่ที่มุมและอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลางประกบกันอยู่เป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าของ  $\text{SiO}_4$  ( $\text{SiO}_4$  tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในแต่ละ โครงสร้างผลึกซิลิกาอะตอมออกซิเจนจะ เกาะกับอะตอมซิลิกอน 2 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงในการเปลี่ยนโครงสร้างระหว่าง  $\alpha$ - กับ  $\beta$ - เช่น  $\alpha$ -ควอartz ไปเป็น  $\beta$ -ควอartz การเปลี่ยน โครงสร้างดังกล่าวจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอม เพียงเล็กน้อยในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นการเปลี่ยน โครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่ อุณหภูมิต่ำกับที่อุณหภูมิสูงเช่น โครงสร้างผลึกแบบควอartz เปลี่ยนไปเป็น ไทรคิเมอรัหรือคริสโท บอไลท์การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดเนื่องจากการสลายของพันธะและการเปลี่ยนตำแหน่ง ของอะตอม (Deer et al., 1971)

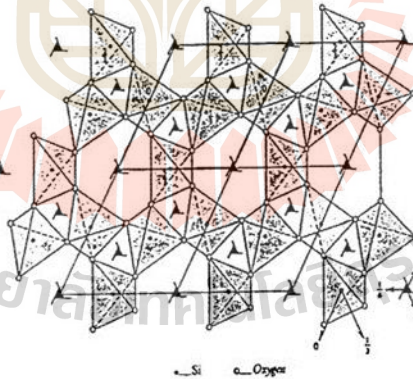


$\beta$ -ควอartz มีความสมมาตรแบบเฮกซะกอนอล (hexagonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ  $P6_222$  หรือ  $P6_366$  และหน่วยเซลล์ (unit cell) หนึ่งหน่วยประกอบด้วยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 3 โมเลกุลซึ่ง ประกอบกันเป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้า ดังแสดงในภาพที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึก  $\beta$ -ควออร์ซ ฉายลงบนระนาบ (0001) (Deer et al., 1971)

จะเห็นได้ว่าหน่วยรูปทรงสี่หน้าเกาะกลุ่มเป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.5 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์คือ  $a$  5.01 Å และ  $c$  5.47 Å  $\alpha$ -ควออร์ซมีสมมาตรแบบไตรกอนอล (trigonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ  $P3_121$  หรือ  $P3_221$  ในหน่วยเซลล์หนึ่งเซลล์ประกอบด้วยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 3 โมเลกุล โครงสร้างผลึกของ  $\alpha$ -ควออร์ซมีลักษณะคล้าย ๆ  $\beta$ - คือมีการเกาะตัวกันของรูปทรงสี่หน้าของ  $\text{SiO}_4$  เป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมแต่จะมีการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์ คือ  $a$  4.913 Å และ  $c$  5.405 Å (Deer et al., 1971)

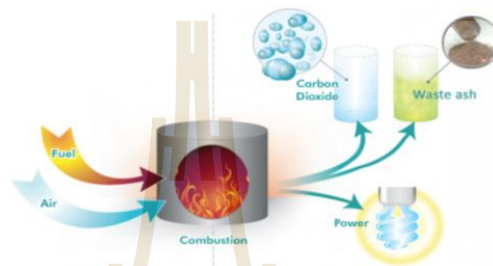


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของ  $\alpha$ -ควออร์ซ โครงสร้างผลึกของ  $\alpha$ -ควออร์ซ ฉายลงบน (0001)  
(Deer et al., 1971)

## 2.2 Geopolymer

จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และปัญหาการกำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมทำให้เกิดแรง

กระตุ้นในการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าวมากขึ้นในปัจจุบัน ได้มีการวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตวัสดุใหม่มากขึ้นมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลงแต่ยังคงคุณสมบัติการเป็นวัสดุประสานที่ดีโดยสารที่ใช้ผสมดังกล่าวเป็นสารปอซโซลานซึ่งไม่มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเองแต่เมื่อผสมกับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้สารปอซโซลานที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่เถ้าลอยโดยเถ้าลอยเป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ที่มา : [http://www.oresomeresources.com/media\\_centre\\_view/resource/image\\_post\\_combustion\\_capture/category/coal\\_low\\_emission/section/media/parent/](http://www.oresomeresources.com/media_centre_view/resource/image_post_combustion_capture/category/coal_low_emission/section/media/parent/)

ในช่วงเวลาไม่นานนี้นักวิจัยชาวต่างประเทศหลายท่าน ได้พยายามศึกษาการผลิตคอนกรีตแบบใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม คอนกรีตดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบกับสารละลายซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดชันได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ซึ่งมีชื่อเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) หรือมีสูตรทางเคมี คือ



เมื่อ M คือ โลหะอัลคาไลน์

N คือจำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่หรือ degree of polycondensation

Z คือตัวเลข 1, 2 หรือ 3 และ

W คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ



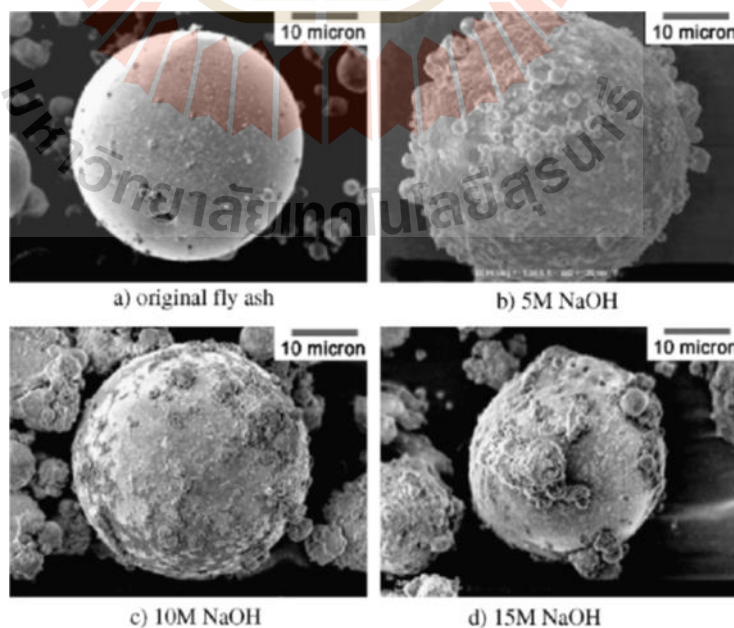
จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าถ่านหินมีส่วนประกอบ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบหลัก หากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์จะสามารถทำให้เกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีต (Ismail et al., 2013)

### 2.2.1 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารพวกอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (Morphology) แน่นอนเป็นส่วนประกอบของอสัณฐาน (Amorphous phase) และสารกึ่งผลึก (Semicrystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) จึงเป็นสารซิลิกาและอลูมิน่าที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อผสมสารละลายอัลคาไลเบสจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงได้และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดีปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 1) การชะละลาย (Dissolution)

เถ้าหรือสารตั้งต้นเมื่อผสมสารละลายที่มีความเป็นเบสสูงเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของซิลิกาและอลูมิน่าออกมาจากผิว ซิลิกอนและอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส เกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของเถ้าตัวอย่างเถ้าลอยที่ถูกชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงในรูปที่ 2.7 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการชะของเถ้าความเข้มข้นที่มากขึ้นทำให้เกิดการชะของอ็อกซิเจนและอลูมิเนียมออกมาจากผิวของเถ้ามาก

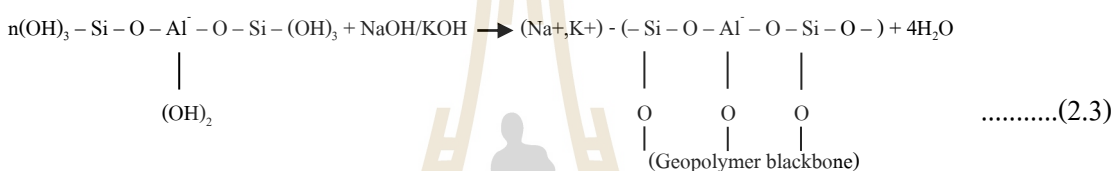
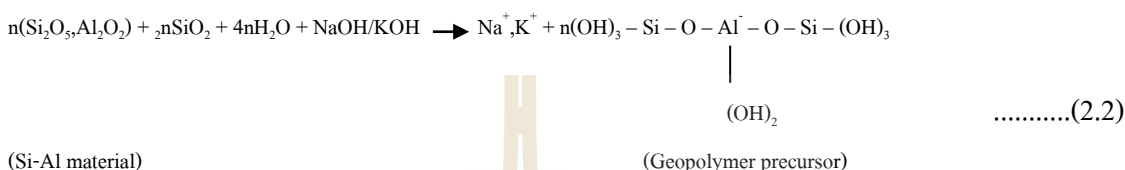


รูปที่ 2.7 ผิวของเถ้าลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 10 นาที

(Rattanasak & Chindaprasirt, 2009, 2014; Rattanasak, Pankhet, & Chindaprasirt, 2011)

2) การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization)

ออลูมิเนียมซิลิเกตและอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เชื่อมต่อกันจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ขึ้นกับ ออลูมิเนียมออกไซด์ที่อยู่ในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้าเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si และ Al ได้ สารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต [Si – O – Al – O] ดังกลไกที่เสนอโดย Hua และ Van Deventer ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกันตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์และซีโอไลต์การสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์ (Ubonrat Rattanasak et al., 2010)

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ ซิลิเกต (ในรูปของแข็งหรือของเหลว)
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ในสารละลาย	การชะของแข็งที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควบแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาในเฟส

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชัน
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	90-300 °C	อุณหภูมิปกติ (ambient)
ช่วง pH	6-11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่แน่นอน	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	ของผสมของเฟสเจลแบบอสัณฐานและกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

### 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator)

#### โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นค่าที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มี การล้างไขออก เช่น อุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้าน มีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นค่าที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทาปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

#### สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำจัดเป็นค่าลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ ) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว (มอก. 433-2539)

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลไดโซเดียมออกไซด์ ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ )	1 : 1.97 ถึง 1 : 2.17	1 : 2.34 ถึง 1 : 2.58	1 : 3.18 ถึง 1 : 3.59
เหล็ก ร้อยละ ไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละ ไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

#### 2.4 กากอ้อย (Bagasse)

ขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล องค์ประกอบทางเคมีของกากอ้อยแสดงดังตารางที่ 2.6 หนึ่งในสามส่วนของกากอ้อยจะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลังงานในอุตสาหกรรมน้ำตาล ที่เหลืออีกสองส่วนใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนไม้ใบกว้างในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุหลายประเภท เช่น การผลิตเชื้อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์ หรือใช้เป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การผลิตไฟฟ้า ขานอ้อยอัดแท่ง ถ่านอัดแท่ง หรือผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว เป็นต้น ซึ่งในแต่ละประเภทการใช้งานมีความยากง่าย และการลงทุนที่แตกต่าง

ลำต้นของอ้อยประกอบด้วย ข้อ และปล้องเป็นระยะ ๆ สลับกันภายในลำต้นของต้นอ้อยประกอบด้วย เนื้อเยื่อ 3 ประเภท คือ เนื้อเยื่อที่รอบนอก เนื้อเยื่อประเภทท่อลำเลียง และเนื้อเยื่อประเภทสะสมอาหาร เมื่อนำอ้อยเข้าสู่กระบวนการหีบอ้อย น้ำอ้อยจะถูกสกัดออกมา ส่วนที่เหลือคือกากอ้อย ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วย น้ำ ไฟเบอร์ และสารที่ละลายน้ำได้ปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้จะมากขึ้นอยู่กับชนิดของอ้อย การตัด และประสิทธิภาพของกระบวนการของโรงงาน ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วจะมีความชื้นระหว่างร้อยละ 46 ถึง 52 ไฟเบอร์ร้อยละ 43 ถึง 52 และสารที่ละลายน้ำได้ (ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล) ร้อยละ 2 ถึง 6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของกากอ้อย (มุสดี แพทช์นุเกราะห์, 2546)

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก		
	ปรีชา เกียรติกระจาย (2532)	Bilba และคณะ (2003)	พีชรรพร ชาวกิจ เจริญ และคณะ (2545)
โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose)	82.52	-	-
แอลฟา-เซลลูโลส ( $\alpha$ -cellulose)	44.05	-	-

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก		
	ปรีชา เกียรติกระจาย (2532)	Bilba และคณะ (2003)	เพชรพร ชาวกิจ เจริญ และคณะ (2545)
เซลลูโลส (Cellulose)	-	41.8	56.6
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	-	28.0	26.11
ลิกนิน (Lignin)	-	21.8	19.15
ลิกนิน (ถ้าอิสระ) (Lignin(Ash Free))	19.78	-	-
เพนโตเซน (Pentosens)	27.12	-	-
ขี้เถ้า (Ash)	1.6	-	1.3
ความสามารถในการละลายของแอลกอฮอล์ เบนซีน (Alcohol benzene solobility)	3.06	-	-

## 2.5 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อการใช้งานในด้านโครงสร้าง เป็นวัสดุที่สามารถสร้างรูปร่างลักษณะตามต้องการและเหมาะสมกับงาน ข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น ไม้ อิฐ หรือเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2.7 คอนกรีตเกิดจากการผสมซีเมนต์ น้ำ ซึ่งทำปฏิกิริยากันเป็นวัสดุประสานรวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ กับ ทราย หิน หรือกรวด ที่เป็นวัสดุผสมหรือมวลรวม ส่วนผสมทั้งหมดจะแข็งตัวภายใน 24 ชั่วโมง และจะสามารถทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุตราบเท่าที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างเพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน คอนกรีตโดยทั่วไปจะมีปริมาตรของซีเมนต์เพสต์อยู่ประมาณ 25 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และฟองอากาศที่แทรกอยู่ช่องว่างประมาณ 0.5 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะเป็นปริมาตรของวัสดุผสม (วินิต, 2539) สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างวัสดุผสม หล่อลื่นคอนกรีตสดในขณะทำงาน ทำให้เพิ่มกำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว และป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ในขณะที่วัสดุผสมมีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานอยู่ในซีเมนต์เพสต์ และช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง (ัชชาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ตารางที่ 2.7 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

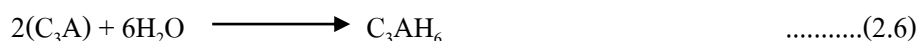
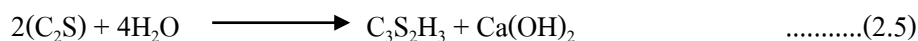
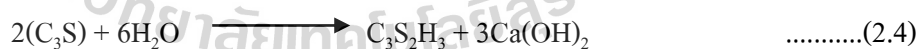
ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. สามารถหล่อขึ้นรูปตามต้องการได้	1. สามารถรับแรงดึงต่ำ
2. ราคาถูก	2. มีความยืดหดตัวต่ำ
3. มีความทนทานสูง	3. มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร
4. ทนไฟได้ดี และไม่ไหม้ไฟ	4. อัตรากำลังต่อน้ำหนักต่ำ
5. สามารถเทหล่อได้ในสภาพที่ก่อสร้าง	

### 2.5.1 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้น

การผสมคอนกรีตมีปฏิกริยาที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือ

#### 1. ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวเป็นคอนกรีตแข็ง ปฏิกริยาจะขึ้นกับสารประกอบในซีเมนต์ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งปฏิกริยากันและเปลี่ยนเป็นวัสดุประสาน ผลผลิตของปฏิกริยาไฮเดรชันมีชื่อเรียกรวมๆ ว่า ซีเมนต์เจล หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Cement gel หรือ C-S-H gel) ประมาณร้อยละ 50 ถึง 90 โดยปริมาตร และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตร มีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมากและมีขนาดเล็ก ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำมาก ปฏิกริยานี้จะเกิดได้มากขึ้นถ้าเพิ่มเวลาในการบ่มให้นานขึ้น ซึ่งมีการเกิดปฏิกริยาดังนี้ (สมการสโตยชิโอเมตริกที่แสดงไม่ใช่สูตรที่แน่นอน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิการก่อตัว เป็นต้น)



จากปฏิกริยาไฮเดรชันข้างต้นจะเห็นได้ว่าความเป็นด่างที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งแสดงความจุบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของซีเมนต์ โดยเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชสูงกว่า 11 ผลึกแคลเซียมที่ไม่ละลายจะรวมตัวเกิดเป็น

โครงสร้างซีเมนต์ ในซีเมนต์เจล (Cement gel) จะมีช่องว่างเล็กเกิดขึ้น โดยคิดเป็นค่าความพรุนได้ประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในช่องว่างเหล่านี้เป็นที่อยู่ของน้ำ ปริมาตรของช่องว่างเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และปฏิกิริยาไฮเดรชัน

## 2. ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

วัสดุปอซโซลาน หมายถึง วัสดุซึ่งไม่มีความสามารถเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะก่อตัวเป็นวัสดุประสาน สารประกอบหลักที่มีในวัสดุปอซโซลาน คือ ซิลิกอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เฟอร็อกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ โดยผลรวมของสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก ต้องมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ วัสดุปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต ที่มีสมบัติเป็นสารเชื่อมเกาะ และจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงขีดจำกัดหนึ่ง ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถแสดงได้ดังนี้ (สมการสตอยชิโอเมตริกที่แสดงไม่ใช่สูตรที่แน่นอน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิการก่อตัว เป็นต้น)



### 2.5.2 น้ำ

น้ำมีหน้าที่หลัก คือ ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้เกิดการจับตัวแน่นกับวัสดุผสมทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นก้อนวัสดุที่แข็ง ช่วยเคลือบผิววัสดุผสมให้เปียกเพื่อการยึดจับกับซีเมนต์เพสต์ได้ดี และยังช่วยทำให้ส่วนผสมมีความชื้น มีความชื้นเหลวพอดีสามารถทำงานได้อย่างสะดวก และหล่อเข้าแบบได้ตามต้องการ น้ำที่นำมาผสมในคอนกรีตต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่มีน้ำมันกรด ต่าง สารอินทรีย์ และต้องมีความชื้นไม่เกิน 2,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตที่ผลิตได้ เช่น ระยะเวลาในการแข็งตัว ค่ากำลังรับแรงอัด หรือทำให้คอนกรีตมีสีผิวไม่สม่ำเสมอ น้ำตาล ในเตรต กรดแทนนิก และสารอินทรีย์ในน้ำ ทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้า เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง และค่ากำลังรับแรงอัดลดลง อาจทำให้เกิดฟองอากาศปริมาณมากจนกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ในขณะที่คาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนต ทำให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วเกินไป คอนกรีตที่ได้จะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ น้ำที่มีซัลเฟตปนอยู่ปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้คอนกรีตกำลังลดลงได้เช่นกัน (ประณต กุลประสูต, 2541) ปริมาณซัลเฟตที่มีผลต่อ

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2.8 โดยทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันลดลง แต่อาจส่งผลให้การก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น สารละลายเกลืออนินทรีย์บางชนิด อาจทำให้การก่อตัวและแข็งตัวช้าลง เช่น เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก เช่นเดียวกับฟอสเฟส อาร์เนต และบอเรต โดยน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของสารเหล่านี้ได้ไม่เกิน 500 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งพบมากในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้ผ่านระบบบำบัด หรือน้ำที่ซึมออกมาจากเหมืองแร่ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ตารางที่ 2.8 กำลังของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

ปริมาณซัลเฟตในน้ำ (เปอร์เซ็นต์)	กำลังของคอนกรีตที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)
0.5	4
1.0	10
มากกว่า 10	ไม่ควรใช้ผสมในคอนกรีตเนื่องจากทำให้กำลังลดลงอย่างมาก

น้ำสำหรับการบ่มต้องเป็นน้ำสะอาด เพื่อป้องกันผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต และรอยเปื้อนที่ผิวอันเกิดจากการใช้น้ำสกปรกบ่มคอนกรีต ส่วนน้ำสำหรับการใช้ล้างวัสดุนั้น ไม่จำเป็นต้องสะอาดมาก แต่ควรเป็นน้ำที่สะอาดพอควร ไม่มีฝุ่น เกลือ สารอินทรีย์ปนอยู่ เพราะอาจเคลือบผิววัสดุผสม และทำให้คอนกรีตที่ได้มีกำลังรับแรงอัดลดลงหรือแข็งตัวช้า

### 2.5.3 วัสดุผสม (Aggregates)

วัสดุผสม หรือบางครั้งเรียกว่า มวลรวม วัสดุผสมโดยทั่วไปได้แก่ หินย่อย กรวด และทรายหยาบเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้ว ทำให้คอนกรีตมีขนาด รูปร่างและความแข็งแรง ยังช่วยให้คอนกรีตมีราคาถูกลงวัสดุผสมที่ใช้ในงานคอนกรีตสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

#### 2.5.3.1 วัสดุผสมละเอียด (Fine aggregates)

เป็นวัสดุที่ส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) ได้แต่ต้องไม่เล็กจนเป็นฝุ่น ที่นิยมใช้คือ ทรายธรรมชาติ และควรเป็นทรายน้ำจืดที่สะอาด มีเหลี่ยมคม และขนาดของเม็ดสม่ำเสมอ

#### 2.5.3.2 วัสดุผสมหยาบ (Coarse aggregates)

เป็นวัสดุส่วนใหญ่ที่ค้างบนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 อาจมีบางส่วนที่ละเอียดปนอยู่บ้างแต่ต้องไม่เกินปริมาณที่มาตรฐานกำหนด วัสดุผสมหยาบได้แก่ หินย่อย หรือกรวดหินที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตต้องมีเหลี่ยมมุม แข็ง ผิวขรุขระ ปิดหุดตัวดำ และทนทานต่อการ



ลึกหรือได้ดี และมีสัดส่วนโลหะที่เหมาะสมขนาดของหิน โดยทั่วไปที่ใช้กันจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 4.76 ถึง 76.20 มิลลิเมตร หรือมีขนาด 3/16 ถึง 3 นิ้ว โดยสามารถแบ่งออกเป็นหินย่อยเบอร์ 1 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.76 ถึง 19.05 มิลลิเมตร หรือมีขนาด 3/16 หรือ 3/4 นิ้ว หินย่อยเบอร์ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 19.05 ถึง 38.10 มิลลิเมตร หรือมีขนาด 3/4 ถึง 1 1/2 นิ้ว และหินย่อยเบอร์ 3 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่างตั้งแต่ 38.1 ถึง 76.20 มิลลิเมตร หรือมีขนาด 1 1/2 ถึง 3 นิ้ว วัสดุผสมต้องมีรูพรุนสามารถดูดซับน้ำและเป็นที่สำหรับการขยายตัวของน้ำเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต

### 2.5.3.3 ส่วนโลหะของวัสดุผสม

ส่วนโลหะของวัสดุผสมมีผลต่อเนื้อและคุณภาพของคอนกรีต ปกติอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบกำหนดโดยปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดมากกว่าปริมาตรช่องว่างในวัสดุผสมหยาบประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ช่องว่างวัสดุหยาบอาจมีมากถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรวัสดุหยาบแห้ง ดังนั้นในทางปฏิบัติมีการกำหนดปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดให้เท่ากับประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรของวัสดุผสมหยาบที่แห้ง แต่เพื่อให้ส่วนผสมของคอนกรีตง่ายต่อการเท มีการกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบไว้ โดยอยู่ระหว่าง 1 : 1 1/2 : ถึง 1 : 2 1/2 ดังแสดงตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

ขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสมหยาบ	อัตราส่วนของวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ	อัตราส่วน	
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
3/8 นิ้ว	หินเกล็ด	0.55	0.70
3/4 นิ้ว	หิน 1	0.40	0.60
1 นิ้ว หรือมากกว่า	หิน 2	0.30	0.50

## 2.6 คอนกรีตบล็อก

คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุก่อสร้างนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยใช้ก่อเป็นผนังกั้นและกำแพงทั้งภายในและภายนอกของอาคาร หรือก่อเป็นพื้นทางเท้า ถนน เป็นต้น ด้วยสมบัติในการทนไฟและระบายความร้อนได้ดี น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ขนาด และคุณภาพได้ตามมาตรฐาน ทำให้คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุที่มีประโยชน์อย่างมากต่องานก่อสร้าง คอนกรีตบล็อกที่ดีต้องมีสมบัติได้มาตรฐานที่กำหนด โดยสมาคมทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (The American

Society for Testing and Materials, ASTM) หรือตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ของประเทศไทย

คอนกรีตบล็อก หมายถึง แท่งคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสม ที่เหมาะสมชนิดต่าง ๆ เช่น กรวด ทราย หินย่อย และอาจมีสารอื่น ๆ ที่เหมาะสมปนอยู่ด้วยอัดเข้าแบบมาตรฐานเป็นบล็อกต่าง ๆ คอนกรีตบล็อกสามารถแบ่งออกตามประโยชน์ในการใช้สอยเป็นคอนกรีตบล็อกสำหรับปูผนัง และคอนกรีตบล็อกสำหรับปูพื้น

### 2.6.1 คอนกรีตบล็อกสำหรับปูผนัง

คอนกรีตบล็อกสำหรับปูผนังสามารถจำแนกออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

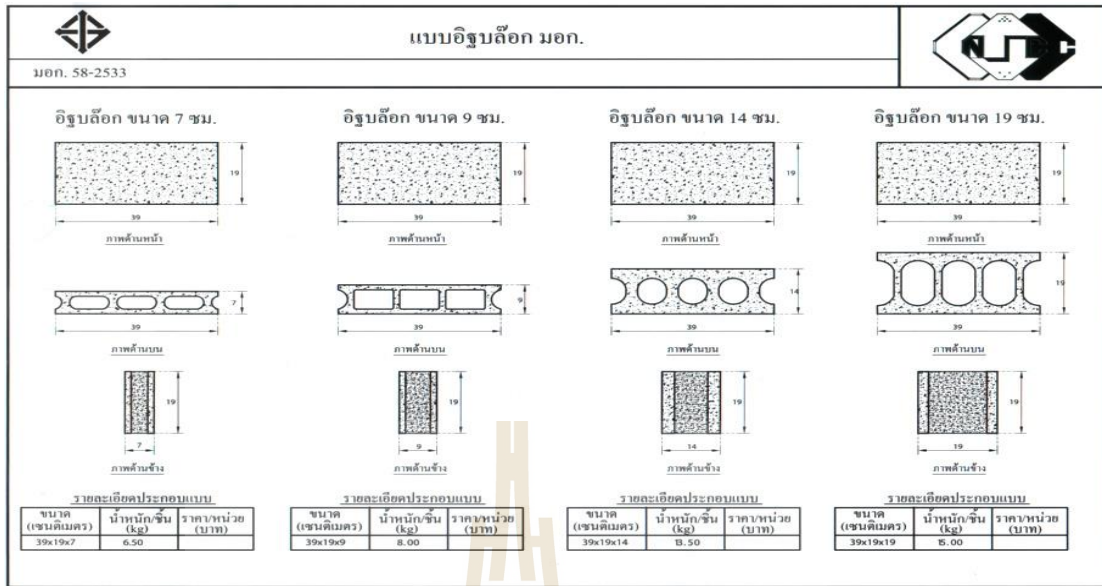
#### 2.6.1.1 คอนกรีตบล็อกปูผนังแบบกลวง(Hollow concrete block)

เป็นคอนกรีตบล็อกที่มีลักษณะกลวง แบ่งเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.8  
ได้แก่

#### ก. คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (Hollow Load-bearing concrete masonry unit)

คอนกรีตบล็อกชนิดที่สามารถรับน้ำหนักได้ ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทควบคุมความชื้น และประเภทไม่ควบคุมความชื้น ซึ่งในแต่ละประเภทแบ่งออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ

- ชั้นคุณภาพ ก ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งต่ำกว่าและเหนือระดับดิน โดยไม่มีการป้องกันผิว ใช้ในกรณีกันการรั่วซึมจากน้ำใต้ดินหรือฝน
- ชั้นคุณภาพ ข ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งต่ำกว่าและเหนือกว่าระดับดิน แต่มีการป้องกันผิว
- ชั้นคุณภาพ ค ใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงภายใน และกำแพงภายนอกเหนือระดับดิน ที่มีการป้องกันความเสียหาย เนื่องจากดินฟ้าอากาศ
- ความต้านแรงอัด และการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักต้องเป็นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (มอก. 57-2530) แสดงดังตารางที่ 2.10



รูปที่ 2.8 คอนกรีตบล็อกปูผนังแบบกลวงมาตรฐาน แบบและขนาดต่าง ๆ

ที่มา : <http://www.nttc.co.th/product.php?id=12#>

ตารางที่ 2.10 ความต้านแรงอัด และการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (มอก. 57-2530)

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงอัดต่ำสุด (เมกะปาสกาล)				การดูดกลืนน้ำสูงสุด เฉลี่ยจาก คอนกรีตบล็อก 5 ก้อน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					
	เฉลี่ยจากพื้นที่รวม		เฉลี่ยจากพื้นที่สุทธิ		น้ำหนักคอนกรีตเมื่ออบแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					
	เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อน	คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน	เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อน	คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน						
ก	7	5.5	14	11	240	244	208	192	176	160
ข	7	5.5	-	-	288	272	256	240	244	208
ค	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-

ข. คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Hollow non-Load-bearing concrete masonry unit)

คอนกรีตบล็อกชนิดที่ไม่สามารถรับน้ำหนักใด นอกจากน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทควบคุมความชื้น และประเภทไม่ควบคุม

ความชื้น ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักต้องเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533) แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533)

ความต้านแรงอัดต่ำสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	
เฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อน	คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน
25 kg/cm <sup>2</sup>	20 kg/cm <sup>2</sup>

#### 2.6.1.2 คอนกรีตบล็อกปูผนังแบบตัน (Solid concrete block)

เป็นคอนกรีตบล็อกปูผนัง สำหรับก่อผนังหรือกำแพงที่ผลิตเฉพาะชนิดที่สามารถรับน้ำหนักได้เท่านั้น

#### 2.6.2 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (Interlock concrete paving block)

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีลักษณะเป็นก้อนคอนกรีตตันที่สามารถนำมาวางเรียงประสานกันได้ต่อเนื่อง มีสีธรรมชาติหรืออาจมีผงสีเจือปนอยู่ทั้งบล็อกหรือเฉพาะที่ชั้นผิวหน้า และมีรูปร่างแบบใดก็ได้ เหมาะสำหรับใช้ปูพื้น เช่น ถนน ทางเท้า ลานจอดรถ และลานกองเก็บวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรอบแบบโครงสร้างชั้นพื้นและชั้นรองพื้นให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งาน

ชนิดและขนาดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ใช้เกณฑ์ในการแบ่งประเภท โดยพิจารณาถึงลักษณะรูปร่างของคอนกรีตบล็อกซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิตรายละเอียดของบล็อกแต่ละชนิด

1. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสี่เหลี่ยม 6 เซนติเมตร สำหรับปูทางเท้าและจอดรถถนนภายในอาคาร
2. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสี่เหลี่ยม 10 เซนติเมตร สำหรับใช้งานที่ต้องการรับน้ำหนักสูง อาทิ ลานจอดรถในโรงงาน พื้นโกดังสินค้า ถนนสาธารณะ
3. ขอบคันหินสี่เหลี่ยม สำหรับก่อทำขอบคันทางเดินหรือขอบของถนนที่ปูด้วยบล็อกชนิดนี้ให้มีความเรียบร้อยสวยงาม
4. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปตัว “ไอ” เพื่อความสะดวกตรวจสอบเร็วในการปูซ้อนเพื่อทำพื้นถนน

### ข้อพิจารณาในการเลือกใช้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

1. ปูง่ายสะดวกรวดเร็ว เสร็จแล้วใช้งานได้ทันที คอนกรีตบล็อกปูถนนออกแบบมาให้สามารถล็อกกันได้ในตัว
2. สะดวกและง่ายในการซ่อมบำรุง ด้วยเหตุที่มีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนกันต่อเนื่อง คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจึงไม่มีการแตกหักเป็นรอยร้าว เช่น พื้นคอนกรีตทั่วไป แต่ในกรณีที่ต้องเปลี่ยนหรือซ่อมก็สามารถถอดเปลี่ยนได้เฉพาะก้อน

### 2.6.3 เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

1. มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมให้เป็นไปตามตารางที่ 2.12 แต่ มาตรฐาน ASTM C936-82 ได้กำหนดมิติอย่างกว้างๆ โดยคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อนต้องมีความกว้าง และความยาวไม่เกิน 140 และ 240 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความหนาต้องไม่มากกว่า 140 มิลลิเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความยาวกำหนดโดย ASTM C936-82 มีค่า  $\pm 1.6$  มิลลิเมตร ขณะที่ความคลาดเคลื่อนของความหนามีค่าเท่ากับหมดคือ  $\pm 3.2$  มิลลิเมตร โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C140-96
2. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีเนื้อแน่น ไม่ร้าวและสีของชั้นผิวหน้าต้องสม่ำเสมอ การทดสอบทำโดยการตรวจพินิจ
3. ความได้ฉาก
  - คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาไม่เกิน 80 มิลลิเมตร จะมีความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร
  - คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาเกิน 80 มิลลิเมตร จะมีความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.12 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2544)

มิติ	เกณฑ์ที่กำหนด (มิลลิเมตร)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
ความกว้าง และความยาว	ไม่เกิน 295	$\pm 2$
ความหนา	60	$\pm 2$
	80	$\pm 2$
	100	$\pm 3$
	120	$\pm 3$

ตารางที่ 2.12 (ต่อ)

มิติ	เกณฑ์ที่กำหนด (มิลลิเมตร)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
ความหนาของชั้นผิวหนา (เฉพาะชั้นผิวที่ทำเป็นสี)	ต่ำสุด 3	

- ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อน ต้องไม่น้อยกว่า 35 เมกะปาสคาล และค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 40 เมกะปาสคาล ขณะที่ ASTM C936-82 กำหนดให้แต่ละก้อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 50 เมกะปาสคาล โดยให้ค่าเฉลี่ยมากกว่า 55 เมกะปาสคาล ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C140-96 โดยคอนกรีตบล็อกที่นำมาทดสอบต้องมีอายุไม่น้อยกว่า 7 วัน

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ใช้ถ้ำ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้นเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือนผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สาร โซเดียมซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นและกำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นและพบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ถ้าใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวเป็นที่น่าเชื่อว่าการใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-Linked AluminoSilicate Polymer) ของจีโอโพลีเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือต่าง ๆ ดังนั้นความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับว่าการเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแข็งตัวรวมถึงความเข้มข้นของด่างด้วยจากการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลีเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นตัวกระตุ้นอย่างเดียวอีกทั้งยังพบว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ได้จากการใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นทำให้มีสารละลาย Alkaline ละลายปนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นเกลือซัลเฟตด้วยและยังพบรอยร้าวในตัวอย่างอีกด้วยและจากการทดลองพบว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียวและบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4-12 เมื่อแช่อยู่ในสารละลายเกลือซัลเฟต

Prinya Chindapasirt และคณะ (2006) ได้ทดลองใช้เถ้านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตได้ทำการควบคุมการไหลแม่ (Flow) ร้อยละ  $110 \pm 5$  ถึง  $135 \pm 5$  ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลแม่จะดีไม่ดีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ  $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$  โดยมีค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการศึกษายู่ระหว่าง 10-65 เมกะพาสกาล โดยสัดส่วนของ  $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$  ที่เหมาะจะมีค่าเท่ากับ 0.67-1 และศึกษาพบว่า เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นจาก 10M ไปเป็น 20M ก็ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์และพบว่าหลังผสมจีโอโพลิเมอร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้องก่อนให้ความร้อนด้วยการอบซึ่งอุณหภูมิที่ใช้บ่มที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียสและควรบ่มไม่เกิน 2 วัน จะให้กำลังอัดที่สูงมากและจากการศึกษาด้วยกล้องขยายอนุภาคของเถ้านหินพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้านหินเป็นทรงกลมถึงแม้ว่าขณะผสมจีโอโพลิเมอร์จะเหนียวข้นจนต้องอาศัยการเติมน้ำเข้าไปร้อยละ 2-8 จะช่วยให้ความข้นเหลวดีขึ้นได้และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) ช่วยให้เทแบบได้ก็จริงแต่จะทำให้ค่ากำลังอัดลดต่ำลงกว่าการใช้น้ำจากการศึกษาครั้งนี้สรุปว่าค่าการไหลแม่ให้ผลดีถ้าใช้อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$  อยู่ที่ 0.67-1 การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 M ถึง 20 M ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 60-75 องศาเซลเซียสถ้ามากกว่า 75 องศาเซลเซียสโครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายในเพราะโครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์มีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายในถ้าโดนความร้อนมากโครงสร้างจะเปลี่ยนไปแม้ว่าจะรักษาอุณหภูมิการบ่มคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส ให้นาน โดยหวังว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นสุดท้ายการใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการผสมและเข้าแบบพบว่าใช้น้ำธรรมดาจะดีกว่าเพราะการใช้สารลดน้ำจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Alonso และ Palomo (2001) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของจีโอโพลิเมอร์เพศดขณะเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ที่ทำจากเถ้านหินพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดต่าง ๆ กันเมื่อถูกกัดโดยด่างจะเริ่มที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวของทรงกลมและขยายออกเป็นรูใหญ่จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปภายใน และทำปฏิกิริยาทั้งภายนอกและภายในทรงกลมจากนั้นเกิดการจับตัวกันจนแข็งจากการดูภาพขยายจะเห็นว่าอนุภาคทรงกลมมีรูทะลุอยู่ทั่วไปในเนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแล้วและมีการจับตัวเชื่อมโยกันนอกจากนั้นสังเกตเห็นว่ายังมีเถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ซึ่งเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง, ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน, ระยะเวลาการบ่มและการผสมและจากการศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำเข้าไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมงเกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นฝนิกคล้าย ๆ

กระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

Davidovits (2013) นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เท่ากับ 0.20-0.2, ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ต่ออลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ต่ออะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเม้นต์พบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ยังสามารถเติมสารต่าง ๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์สามารถพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นในโครงสร้างยานยนต์และอากาศยานอุตสาหกรรมพลาสติกต่าง ๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะปาสกาลมีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลต์นอกจากมีความแข็งหดตัวน้อยทนความชื้น และด้านทานการสึกกร่อนทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบที่จะใช้กับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อนในด้านการคำนวณต้นทุน โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในด้านการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียมส่วนผสมและไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $\text{CO}_2$  มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นอกจากนี้ Hardjito และคณะ (2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่าง ๆ และอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ระหว่าง 0.095 ถึง 0.120 ของอัตราส่วนไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดมากนักส่วนอัตราส่วนน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและกำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นในขณะที่การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การรับกำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้นอย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถาถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์มากกว่าเนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้นแต่เถาถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

ในเวลาต่อมา Hardjito และคณะ (2004) ยังศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่า อลูมิโน-ซิลิเกต โพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงานเช่นเถาถ่านหินองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลต์



โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาวจากผลการศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคตเพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแล้วยังมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยแต่ยังมีเรื่องต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อีกมาก ต่อมาในปี 2005 สมิตร์ ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหิน โดยศึกษาถึงค่ากำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม. มีสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลาย โซเดียมซิลิเกตและน้ำเป็นส่วนผสมมีอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินต่อทรายเท่ากับ  $1 : 2.75$  โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 0.376, 0.386, 0.396 และ 0.416 โดยน้ำหนักอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมมีค่าเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียสหลังจากทำการหล่อตัวอย่างจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสการทดสอบกำลังอัดทำการทดสอบที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนา กำลังอัดต่อไปอีกส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนา ค่ากำลังอัดไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Medjo และ Riskowski (1999) ศึกษา นำขานอ้อยมาผสมในดินและปูนซีเมนต์ เพื่อผลิตเป็นอิฐก่อสร้าง โดยนำมาศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างขานอ้อยที่กำจัดน้ำตาลออก (ต้มในน้ำเดือด 90 นาที ล้างด้วยน้ำอุ่น ทิ้งให้แห้ง) และไม่กำจัดน้ำตาล คัดให้มีขนาดความยาว 80 มิลลิเมตร และหนา 0.2 มิลลิเมตร พบว่าน้ำตาลในขานอ้อยไม่ได้มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อสร้างที่ทำจากขานอ้อย ดิน ปูนซีเมนต์ผสมกัน เนื่องจากอาจได้รับผลมาจากปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ชนิดเนื้อดิน เป็นต้น

ณัฐพล เกตุเหล็ก และคณะ (2544) ทดลองนำเส้นใยมะพร้าวมาใช้ในการผสมบดบล็อกปูพื้นคอนกรีต เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด หน่วยแรงคด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ โดยแปรค่าปริมาณเส้นใยมะพร้าวเป็น 8 16 และ 24 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเทียบกับหินเกล็ด และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน จากการทดลองพบว่าเมื่อผสมเส้นใยมะพร้าว 8 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างมีความสามารถในการรับแรงอัดประลัยดีที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น การรับแรงคด และค่าความหนาแน่น มีความสามารถลดลง แต่ความสามารถในการดูดซึมน้ำจะมากขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น เพราะว่เส้นใยมะพร้าวดูดซึมน้ำได้ดี โดยที่บล็อกปูพื้นคอนกรีตธรรมดาจะมีกำลังอัดประลัย 548.83 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีน้ำหนัก 3.146 กิโลกรัม ค่ากำลังคดประลัย 1,221 กิโลกรัม ค่าความหนาแน่น 2,080 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

เมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำ 3.48 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่บล็อกรูปพื้นคอนกรีตผสมใยมะพร้าวที่ 8 เปอร์เซ็นต์ มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ ส่วนบล็อกรูปพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยมะพร้าวที่ 16 และ 24 เปอร์เซ็นต์ มีกำลังอัดลดลงประมาณ 36.9 และ 47.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Bilba และคณะ (2003) ศึกษา นำเส้นใยอ้อยมาทดแทนซีเมนต์ มาศึกษาถึงอิทธิพลขององค์ประกอบของชานอ้อยที่มีผลต่อการแข็งตัวของชานอ้อยต่อซีเมนต์ โดยนำมาผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเซลลูโลสและน้ำ เสมิเซลลูโลสกับน้ำ และลิกนินกับน้ำ พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสมในขณะแข็งตัวมีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 39 องศาเซลเซียส หลังจากการผสมวัสดุ 15.5 ชั่วโมง และพบว่า การแข็งตัวของเซลลูโลสเร็วกว่าลิกนิน ส่วนเสมิเซลลูโลสไม่แข็งตัวภายใน 30 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่า ชานอ้อยที่เต็มไปด้วยน้ำตาล จะทำให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์ช้าลง เนื่องจากลิกนินจะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งทำให้น้ำตาลละลาย

ปิติ พานิชายุนนท์ และคณะ (2551) ได้ศึกษาและพัฒนาคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากฟางข้าวที่เหลือใช้ในชุมชนจังหวัดพัทลุง ในการศึกษาวิจัยพิจารณาที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกันหลายส่วนผสม และทำการผลิตส่วนผสมละ 5 ก้อน การทดสอบตัวอย่างจะทำการทดสอบน้ำหนัก ความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และค่าแรงอัด จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มฟางข้าวเป็นส่วนผสมสามารถลดน้ำหนักและความหนาแน่นของตัวอย่างได้ ซึ่งอัตราส่วนโดยปริมาตรของ ดิน : ทราย : ซีเมนต์ : ฟาง ที่ให้สมบัติของบล็อกดีที่สุด คือ 10 : 5 : 8 : 8 มีความหนาแน่น 1,591 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าแรงกด 37.56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ 19.84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีฟางข้าว พบว่าน้ำหนักและความหนาแน่นลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือ 29.38 เปอร์เซ็นต์ และ 47.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาคือความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอย จี โอลิเมอร์ ผสมกากอ้อยในการผลิตคอนกรีตบดล็อก ซึ่งเถ้าลอย และกากอ้อยเป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย ตามลำดับ มาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ เพื่อการผลิตคอนกรีตบดล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักสำหรับงานก่อสร้าง โดยการศึกษาแบ่งวิธีการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 กล่าวถึงการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบดล็อก

ส่วนที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบ และปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบดล็อก

ส่วนที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการผลิตตัวอย่างคอนกรีตบดล็อก



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การจัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก

1. etailoy Class C จากโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน แหล่งผลิต โรงไฟฟ้าแม่เมาะ



รูปที่ 3.2 etailoy

2. กากขานอ้อย

กากขานอ้อยได้จากขั้นตอนการสกัดเอาน้ำอ้อยออกหลังจากนั้นจะได้กากอ้อยละเอียด (เลือกใช้กากอ้อยชนิดที่ผ่านขั้นตอนการสกัดย่อยอ้อยสด จากเครื่องจักร Unigrator) ซึ่งจะได้กากอ้อยที่ค่อนข้างละเอียด มีสิ่งแปลกปลอมปนมาส่วนน้อย สะอาด เมื่อผ่านขั้นตอนการสกัดน้ำอ้อยแล้ว กากขานอ้อยที่ได้นำมาลดความชื้นได้ง่าย มีสารที่ละลายน้ำได้ (ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล) เหลืออยู่น้อย มีน้ำหนักเบา



รูปที่ 3.3 กากอ้อยละเอียด

ที่มา : กากอ้อยจากแหล่งโรงงานน้ำตาลทรายระยอง สาขาชัยภูมิ

### 3. ทราชแม่น้ำ

ทราชแม่น้ำ ทราชชนิดนี้มีอยู่ในบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำ ทราชชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ โดยกระแสน้ำได้พัดพาทรายมาจากที่ต่าง ๆ มาตกตะกอนรวมกันในแหล่งที่ราบลุ่มที่เป็นที่รวมของทราช

ขนาดของทราชในการก่อสร้างทั่วไป ทราชแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

- ทราชหยาบ เป็นทราชที่มีเม็ดใหญ่ มีเหลี่ยมคม และแข็งแรงดีมาก เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงมากๆ ซึ่งเป็นทราชที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้
- ทราชกลาง เป็นทราชที่มีขนาดเล็กกว่าทราชหยาบลงมา เป็นทราชที่เหมาะสมสำหรับงานปูนทั่วไป เช่น งานก่ออิฐ พื้นบ้าน ทางเท้า
- ทราชละเอียด เป็นทราชที่มีขนาดเล็ก เหมาะสำหรับงานปูนฉาบทั่วไป



รูปที่ 3.4 ทราชหยาบ

ที่มา : ทราชแม่น้ำจากแหล่งจังหวัดกำแพงเพชร

### 4. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator)

- โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มี การล้างไขมันออก เช่น อุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

- สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{OSiO}_2$ ) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่างลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตาม

อัตราส่วน โดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ ) จากน้อยไปหามาก



รูปที่ 3.5 โซเดียมซิลิเกต และ โซเดียมไฮดรอกไซด์

#### 5. น้ำสะอาด

น้ำมีหน้าที่หลัก คือ ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้เกิดการจับตัวแน่นกับวัสดุผสมทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นก้อนวัสดุที่แข็ง ช่วยเคลือบผิววัสดุผสมให้เปียกเพื่อการยึดจับกับซีเมนต์เพสต์ได้ดี และยังช่วยทำให้ส่วนผสมมีความลื่น มีความชื้นเพียงพอสามารถทำงานได้อย่างสะดวก และหล่อเข้าแบบได้ตามต้องการ น้ำที่นำมาผสมในคอนกรีตต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่มีน้ำมัน กรด ต่าง สารอินทรีย์ และต้องมีความชุ่มไม่เกิน 2,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตที่ผลิตได้

#### 6. หินก่อสร้าง

หินก่อสร้างคือ หินชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน อาคาร ถนน สะพาน โดยอาจนำหินก้อนใหญ่ ๆ มาเรียงสร้าง หรือหินขนาดเล็ก ที่บดย่อย นำมาใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีต คุณสมบัติของหินก่อสร้าง ที่สำคัญคือ ความคงทนต่อการขัดสี ความแกร่งสูง ทนแรงกดอัดได้มาก ทนสารเคมีสูง ปริมาณคละภายหลังการย่อยบดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ความชื้นน้ำต่ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีง่าย ผิวมีการจับเกาะกับซีเมนต์และแอสฟัลต์ดี ปริมาณอินทรีย์สารในเนื้อหินต่ำ เป็นต้น หินก่อสร้างนั้นแบ่งออกได้มากมายหลายชนิด ที่เห็นๆและใช้กันบ่อยก็เช่น หินคลุก หิน1 หิน2 หินลูกรัง หินเกร็ด หินฝุ่น เป็นต้น โดยผมจะขออธิบายแยกตามประเภทหินต่าง ๆ ดังนี้

- ลูกรัง คือ หินที่ดูมาขึ้นจากบ่อหิน บ่อทรายต่าง ๆ หินมีลักษณะ หยาบ ๆ คุเป็นเหลี่ยม ๆ เป็นหินที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก และ ละเอียด ส่วนมากมีสีน้ำตาลแดง ลูกรังที่ดีต้องมีเม็ดปนมาด้วยโดยขนาดเม็ดที่กำหนดตามมาตรฐาน คือไม่เกิน 1 นิ้ว ส่วนมากใช้

สำหรับงานถมที่ ถมถนน โดยลูกค้าสามารถเลือกขนาดของลูกรังได้ว่า ต้องการก้อนขนาดใหญ่หรือขนาดเล็ก เพื่อให้เหมาะสมตรงกับการใช้งานของลูกค้ามากที่สุด

- หินคลุก เป็นหินปูนที่อ่อนจนมี เกรดเคชั่น ที่เรียกว่า well grade โดยเป็นหินที่มีขนาดแตกต่างกันมาปนกัน ไม่สามารถนำไปเป็นหินก่อสร้าง หรือ นำไปบดเป็นปูนซีเมนต์ได้ เพราะไม่ได้ขนาดหรือแร่ธาตุตามที่ต้องการ โดยส่วนมากใช้สำหรับเป็น ชั้นพื้นทางในงานถนน สามารถใช้ถมถนนร่วมกับหินลูกรังได้ หรือ นำไปทำอิฐบล็อก โดยหินคลุกนั้นยังแบ่งย่อยออกเป็นอีกหลากหลายเกรด แล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน
- หินก่อสร้าง (หิน 1, หิน 2, หิน 3/4, หินฝุ่น, หินเกล็ด) เป็นหินตะกอนคาร์บอเนต เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในท้องทะเล ทั้งจากสารอนินทรีย์ และซากสิ่งมีชีวิต ซึ่งอัดถมกันภายใต้ความกดดันและตกผลึกใหม่เป็นแร่แคลไซต์จึงทำปฏิกิริยากับกรด หินปูนใช้ทำเป็นปูนซีเมนต์ และใช้ในการก่อสร้าง
- หินกรวด เป็นหินเนื้อหยาบเกิดจากตะกอนของหิน กรวด ทราย ถูกกระแสน้ำพัดพามา รวมกัน สารละลายในน้ำได้ดินทำตัวเป็นซีเมนต์ประสานให้อนุภาคใหญ่เล็กเหล่านี้เกาะตัวกันเป็นก้อนหิน (หินที่ประกอบด้วย Grain ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่า 2 มิลลิเมตรอยู่มากกว่า 25% ของ Grain ทั้งหมด และจะต้องมีความกลมมน อีกด้วย) ส่วนมากใช้ในการประดับตกแต่งสวน อาคารบ้านเรือน มีหลายสีหลายขนาด

นอกจากมาตรฐานทางคุณสมบัติที่กำหนดแล้ว บางครั้งระยะทางที่ใช้ในการขนส่งยังเป็นตัวกำหนด ทำให้บางครั้งมีความจำเป็นที่ต้องนำหินสร้างที่มีมาตรฐานต่ำกว่าเกณฑ์มาใช้ หินที่นำมาใช้ในการก่อสร้างประกอบด้วยหินปูนเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากผลิตง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ โดยแหล่งหินก่อสร้าง ในประเทศไทยกระจายตัวอยู่แทบทุกจังหวัด ยกเว้น จังหวัดในภาคอีสาน และที่ราบลุ่มภาคกลาง

แหล่งหินเพื่อการก่อสร้างที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งหินปูนในเขต อำเภอหน้าพระลาน พระพุทธบาท เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี เป็นแหล่งหินปูนขนาดใหญ่ ใช้เพื่อการก่อสร้างในกรุงเทพฯ; อำเภออุ้มทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ต่ออำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี; แหล่งหินปูนปางอโศก อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา; ภูผาม่าน อำเภอชุมแพ จังหวัดขอนแก่น; เขาน้อย อำเภอวังสะพุง อำเภอถ้ำเอนราวัน จังหวัดเลย; อำเภอตากลี อำเภอพยุหะคีรี จังหวัดนครสวรรค์; อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร; บ้านม่วง อำเภอเนินมะปรางค์ จังหวัดพิษณุโลก; เขาลำระวัง อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย; แม่ทะ จังหวัดลำปาง; อำเภอตาขุน จังหวัดสุราษฎร์ธานี; เขาลำตาบลงแดง อำเภอเมือง จังหวัดพังงา และแหล่งหินปูนบ้านโอง จังหวัดลำพูน - แหล่งหินแกรนิต ควอตไซต์ เขา

เชิงเทียน อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี - แหล่งหินบะซอลต์ เขาระโคง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์; เขาพนมสวาย อำเภอเมือง อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์; อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี

- หินฝุ่น หินฝุ่นสำหรับผสมคอนกรีต เป็นหินฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร ที่สามารถลอดผ่านตะแกรงทดสอบ 4.75 มิลลิเมตร ได้ สำหรับเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตรับแรง หรือเป็นส่วนผสมการผลิตคอนกรีตบล็อก ซึ่งเป็นหินฝุ่นที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้



รูปที่ 3.6 หินฝุ่น

ที่มา : หินฝุ่นจากแหล่ง อำเภอพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร

### 3.2 การออกแบบ และปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก

งานวิจัยนี้ได้วางแผนการทดสอบคอนกรีตบล็อกโดยใช้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมกากขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ กำหนดให้ก้อนบล็อกทดสอบมีขนาดมาตรฐานเท่ากับ 39 x 19 x 7 เซนติเมตร โดยผสมเถ้าลอยต่อตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหินฝุ่นตามอัตราส่วน โดยน้ำหนัก ที่แต่ละอัตราส่วนผสมจะผสมกากขานอ้อยที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อกากขานอ้อยโดยน้ำหนัก ตามลำดับ นำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด บ่มจนอายุครบ 7 และ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อก และชั่งน้ำหนักตัวอย่างของคอนกรีตที่ผสมกากอ้อย นำผลที่ได้มาศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน ได้กำหนดอัตราส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก ดังตารางที่ 3.1



ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย  
กรณีศึกษาที่ 1

Sample	Fly Ash	Alkaline Activator	Dust stone	Bagasse
Case 1-1	20	15	100	0
Case 1-2	20	15	100	0.5
Case 1-3	20	15	100	1
Case 1-4	20	15	100	1.5
Case 1-5	20	15	100	2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย  
กรณีศึกษาที่ 2

Sample	Fly Ash	Alkaline Activator	Dust stone	Bagasse
Case 2-1	25	15	100	0
Case 2-2	25	15	100	0.5
Case 2-3	25	15	100	1
Case 2-4	25	15	100	1.5
Case 2-5	25	15	100	2

อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการ



รูปที่ 3.7 ตู้อบไล่ความชื้น และเครื่องชั่งดิจิตอล



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์หาค่าความหวานของอ้อย และเครื่องวัดความชื้น

### 3.3 ขั้นตอนการผลิตตัวอย่างคอนกรีตบล็อก

1. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักใส่เครื่องผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน



รูปที่ 3.9 เครื่องผสมวัสดุดิบ

ที่มา : <http://anek.naluen.com/products?action=view&id=7787>

2. เติมของเหลวลงในเครื่องผสมคอนกรีต ควรใส่ลงไปทีละนิดจนครบ ทำการผสมเป็นเวลา 10 นาที
3. นำส่วนผสมที่ผสมจนเข้ากันดีแล้วไปอัดในเครื่องอัดบล็อกไฮดรอลิกโดยเครื่องอัดบล็อกไฮดรอลิกควรมีการทำน้ำมันก่อนเพื่อไม่ให้ส่วนผสมติดกับบล็อกคอนกรีต



รูปที่ 3.10 เครื่องอัดบล็อกคอนกรีต ด้วยแรงดันไฮดรอลิก

4. นำบล็อกคอนกรีตไปวางในที่ที่อากาศถ่ายเทได้ดี หลังจากนั้นเมื่อครบอายุ 7 และ 28 วัน ก็นำคอนกรีตบล็อกไปทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป



รูปที่ 3.11 การจัดเก็บ และป่มบล็อทดสอบ

### 3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

#### 1. การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด

โดยนำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกขนาดมาตรฐาน 39 x 19 x 7 เซนติเมตร จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน มาแปลงหน่วยเป็นกิโลกรัม แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของอิฐ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{.....(3.1)}$$

เมื่อ $\sigma$	=	กำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง (ksc)
P	=	แรงอัดสูงสุดที่จุดประลัย (kg)
A	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ (cm <sup>2</sup> )

#### 2. การคำนวณหาร้อยละการดูดซึม

นำตัวอย่างทดสอบที่แห้งน้ำหนักคงที่ ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นวัดมวลและมิติของตัวอย่างทดสอบ แล้วนำไปแช่ในน้ำสะอาดให้ท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงยกออก ใช้ผ้าเช็ดน้ำที่ผิวและชั่งให้เสร็จภายใน 3 นาที น้ำหนักที่ชั่งได้ถือเป็นน้ำหนักอิฐที่ดูดกลืนน้ำ การคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของตัวอย่างทดสอบ โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักของอิฐตัวอย่างที่แห้ง กับหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง โดยใช้สมการการคำนวณหาร้อยละการดูดซึมโดยอาศัยสมการ

$$\% \text{ Absorption} = \left[ \frac{W_w - W_d}{W_d} \right] \times 100 \quad \text{.....(3.2)}$$

เมื่อ % Absorption	=	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ
$W_w$	=	น้ำหนักอิฐเปียก (กรัม)
$W_d$	=	น้ำหนักอิฐแห้ง (กรัม)

#### 3. การคำนวณหาค่าความหนาแน่น

ทำการทดสอบความหนาแน่น โดยการนำตัวอย่างที่บ่มไว้ตามอายุที่ 7 และ 28 วัน นำมาชั่งน้ำหนักโดยใช้หน่วยวัดเป็นกรัม ทำการวัดขนาดตัวอย่าง กว้าง x ยาว x หนา นำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ เพื่อหาค่าความหนาแน่นของอิฐ

$$\sigma = \frac{W}{V} \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

เมื่อ $P$	=	ความหนาแน่นของอิฐ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$W$	=	น้ำหนักของอิฐ (กรัม)
$V$	=	ปริมาตรตัวอย่างทดสอบ ( $\text{cm}^3$ )

### 3.5 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก

ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำถ้ำลอย จีโอโพลีเมอร์ผสมกากอ้อยมาผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักเพื่อการก่อสร้าง และเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกประเภทเดียวกันที่มีจำหน่ายในท้องตลาด



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

การดำเนินงานวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ของถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย ได้ทำการวิจัยโดยการทดสอบสมบัติของถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย ในอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน มาทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533

#### 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

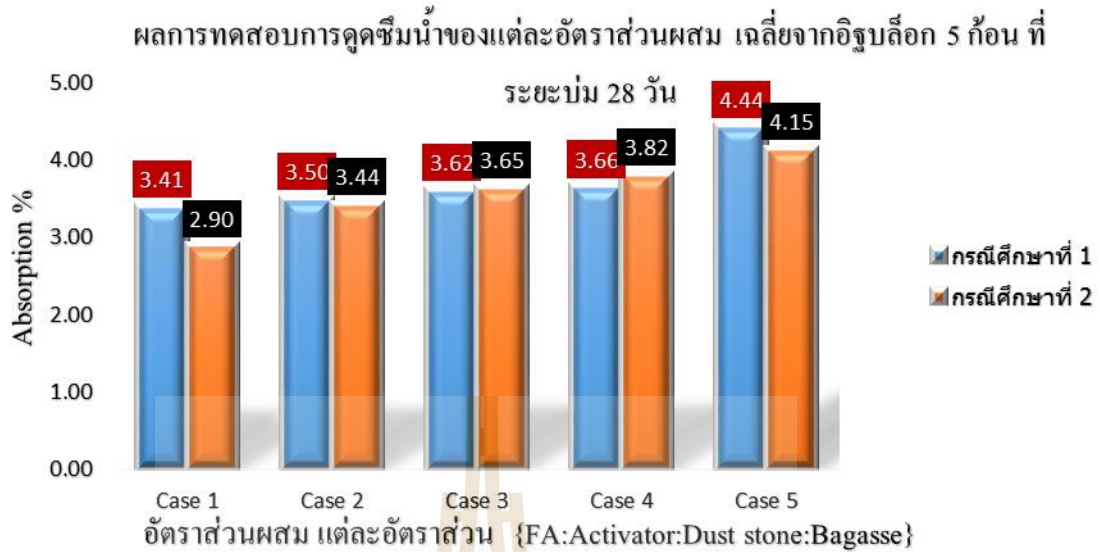
จากการดำเนินงานทดสอบตัวอย่างก้อนอิฐบล็อก โดยทำการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 ของคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ในแต่ละอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย

จากการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 28 วัน

กรณีศึกษาที่ 1	ค่าน้ำหนักเฉลี่ยอิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4	Case 1-5
น้ำหนักสภาพอบแห้ง (Wd), (kg)	5.28	5.14	5.52	5.46	5.86
น้ำหนักสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Ww), (kg)	5.46	5.32	5.72	5.66	6.12
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเฉลี่ย	3.41	3.50	3.62	3.66	4.44
กรณีศึกษาที่ 2	ค่าน้ำหนักเฉลี่ยอิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	Case 2-1	Case 2-2	Case 2-3	Case 2-4	Case 2-5
น้ำหนักสภาพอบแห้ง (Wd), (kg)	5.52	5.24	5.48	5.24	5.3
น้ำหนักสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Ww), (kg)	5.68	5.42	5.68	5.44	5.52
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเฉลี่ย	2.90	3.44	3.65	3.82	4.15



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยอิฐโพลีเมอร์ บล็อกผสมกากขานอ้อยที่อายุ 28 วัน กรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 พบว่าการใช้กากขานอ้อยเป็นส่วนผสมในเถ้าลอยอิฐโพลีเมอร์ปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้แนวโน้มการดูดซึมน้ำสูงขึ้น เนื่องจากกากขานอ้อยมีลักษณะทางกายภาพที่สามารถดูดซึมน้ำไว้ได้ ดังนั้นเมื่อใส่กากขานอ้อยเพิ่มขึ้นในอิฐบล็อก ทำให้เถ้าลอยอิฐโพลีเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยดูดซึมน้ำไว้ได้มากขึ้นด้วย โดยกรณีศึกษาที่ 1 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเฉลี่ยสูงสุดที่ 4.44 เปอร์เซ็นต์

#### 4.1.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยอิฐโพลีเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย

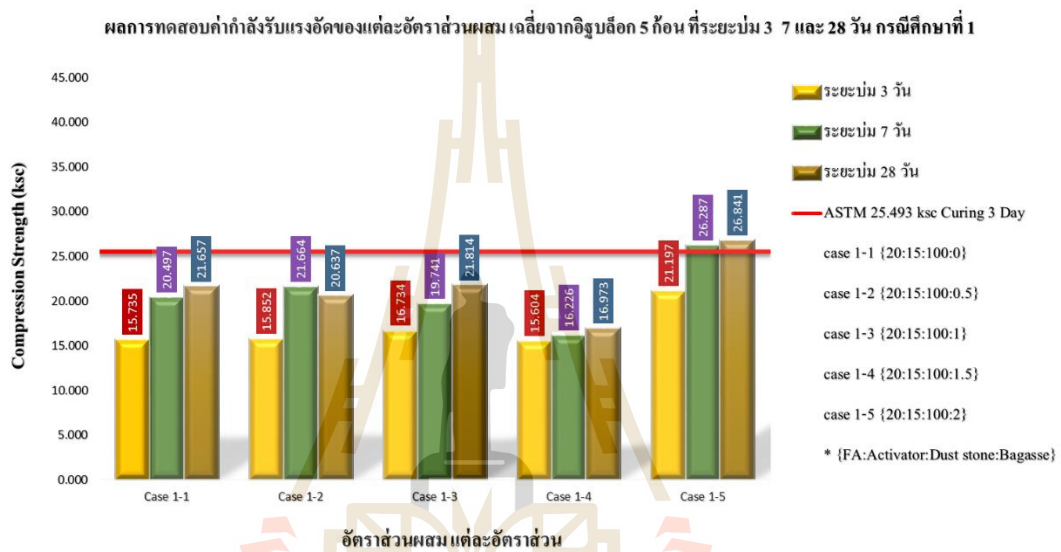
จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยอิฐโพลีเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย สามารถสรุปเป็นผลการทดสอบได้ ดังตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.2 กรณีศึกษาที่ 1 และตารางที่ 4.3 รูปที่ 4.3 กรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด กรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาที่ 1	ค่าเฉลี่ยตัวอย่างทดสอบ 5 ก้อน (ksc)			ASTM (ksc)
	ระยะเวลาบ่ม 3 วัน	ระยะเวลาบ่ม 7 วัน	ระยะเวลาบ่ม 28 วัน	
Case 1-1	15.735	20.497	21.657	25.493
Case 1-2	15.852	21.664	20.637	25.493
Case 1-3	16.734	19.741	21.814	25.493

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กรณีศึกษาที่ 1	ค่าเฉลี่ยตัวอย่างทดสอบ 5 ก้อน (ksc)			ASTM (ksc)
	ระยะบ่ม 3 วัน	ระยะบ่ม 7 วัน	ระยะบ่ม 28 วัน	
Case 1-4	15.604	16.226	16.973	25.493
Case 1-5	21.197	26.287	26.841	25.493

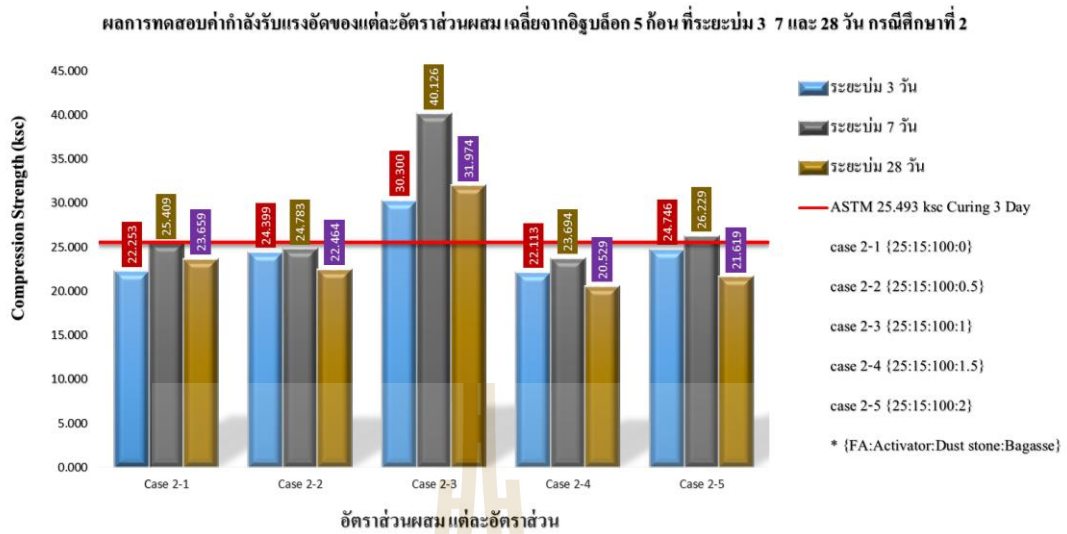


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุของเถ้าลอยซีโอโพลีเมอร์ บล็อกผสมกากขานอ้อยที่อัตราส่วนต่าง ๆ กรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด กรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษาที่ 2	ค่าเฉลี่ยตัวอย่างทดสอบ 5 ก้อน			ASTM (ksc)
	ระยะบ่ม 3 วัน	ระยะบ่ม 7 วัน	ระยะบ่ม 28 วัน	
Case 2-1	22.253	25.409	23.659	25.493
Case 2-2	24.399	24.783	22.464	25.493
Case 2-3	30.300	40.126	31.974	25.493
Case 2-4	22.113	23.694	20.529	25.493
Case 2-5	24.746	26.229	21.619	25.493





รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ บล็อกผสมกากขานอ้อยที่อัตราส่วนต่าง ๆ กรณีศึกษาที่ 2

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 พบว่าการใช้กากขานอ้อยเป็นส่วนผสมในเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ กรณีศึกษาที่ 1 ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม มีแนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยเพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 3 7 และ 28 วัน โดยมีค่ากำลังรับแรงอัด 21.197, 26.287 และ 26.841 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ กรณีศึกษาที่ 2 ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม มีแนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยเพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน โดยมีค่ากำลังรับแรงอัด 30.300 และ 40.126 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเท่ากับ 31.974 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในกรณีนี้มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานตั้งแต่ระยะบ่มที่ 3 วัน ซึ่งมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูง และเร็วกว่ากรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งผ่านมาตรฐานของคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2533 ที่ 25.493 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนเถ้าลอยต่อกากขานอ้อยที่เหมาะสม และอายุบ่มส่งผลต่อกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณความชื้นของหินปูนในส่วนผสมเช่นเดียวกันที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อก กล่าวคือปริมาณความชื้นที่มากเกินไปทำให้ส่วนผสมเยิ้มทำให้การอัดขึ้นรูปไม่ได้รูปทรง ส่งผลต่อกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกเมื่อนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดได้

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

ในการศึกษาการทดลองนี้จะวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์เฉพาะราคาต้นทุนวัสดุในกรณีศึกษาที่มีผลการทดลองค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.58-2533 เท่านั้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

สำหรับการผลิตเต้าลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยชนิดไม่รับน้ำหนัก โดยสัดส่วนผสมที่ออกแบบการทดลองสามารถผลิตคอนกรีตบล็อกได้จำนวน 26 ก้อนต่อโม้ ในการผลิตต่อวันสามารถผลิตได้ 30 โม้ จะได้คอนกรีตบล็อกจำนวน 780 ก้อน

วัสดุที่ใช้ในการผลิตเต้าลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย

- เต้าลอยจากแหล่งแม่เมาะ ราคา 600 บาทต่อตัน (ข้อมูลจากแหล่งปูนเอกชน)
- หินฝุ่น ราคา 280 บาทต่อตัน (ข้อมูลจากร้านวัสดุก่อสร้างที่ผลิตอิฐบล็อก)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ 9.5 บาทต่อกิโลกรัม
- โซเดียมซิลิเกต 20 บาทต่อกิโลกรัม
- กากขานอ้อย 300 บาทต่อตัน

ค่าใช้จ่ายอื่นๆ (โดยประมาณ)

- ค่าไฟฟ้า 50 บาท (ในการผลิตต่อวัน)
- ค่าแรงคนงานคิดราคาเหมาต่อก้อน 0.70 บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิต 30 โม้ กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วน 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม

- ค่าเต้าลอย 20 กิโลกรัม x 0.6 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 360 บาท
- ค่าโซเดียมซิลิเกต 7.5 กิโลกรัม x 20 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 4,500 บาท
- ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 7.5 กิโลกรัม x 9.5 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 2,137.5 บาท
- ค่าหินฝุ่น 100 กิโลกรัม x 0.28 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 840 บาท
- ค่ากากขานอ้อย 2 กิโลกรัม x 0.3 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 18 บาท
- ค่าไฟฟ้า = 50 บาท
- ค่าแรงคนงาน 0.7 บาท/ก้อน x 780 ก้อน = 546 บาท
- รวม = 8,451.5 บาท

ดังนั้นราคาต่อก้อนรวมทั้งหมด  $8,451.50 / 780 = 10.84$  บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิต 30 โม้ กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วน 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม

- ค่าเต้าลอย 25 กิโลกรัม x 0.6 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 450 บาท
- ค่าโซเดียมซิลิเกต 7.5 กิโลกรัม x 20 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 4,500 บาท
- ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 7.5 กิโลกรัม x 9.5 บาท/กิโลกรัม x 30 โม้ = 2,137.5 บาท

- ค่าหินฝุ่น 100 กิโลกรัม x 0.28 บาท/กิโลกรัม x 30 โมง	= 840 บาท
- ค่ากากชานอ้อย 1 กิโลกรัม x 0.3 บาท/กิโลกรัม x 30 โมง	= 9 บาท
- ค่าไฟฟ้า	= 50 บาท
- ค่าแรงคนงาน 0.7 บาท/ก้อน x 780 ก้อน	= 546 บาท
รวม	= 8,532.5 บาท
ดังนั้นราคาต่อก้อนรวมทั้งหมด $8,532.50 / 780 = 10.94$ บาท	

ตารางที่ 4.4 สรุปราคาต้นทุนเฉพาะวัสดุเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม

วัสดุ	คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่ใช้เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ผสมกากชานอ้อย		คอนกรีตบล็อก ขนาดมาตรฐาน 7x19x39 เซนติเมตร	อิฐมวลเบาขนาด 7x20x60 เซนติเมตร
	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	ราคาต้นทุน วัสดุ (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)
เถ้าลอย	20	12		
โซเดียมซิลิเกต	7.5	150		
โซเดียมไฮดรอกไซด์	7.5	71.25		
หินฝุ่น	100	28		
กากชานอ้อย	2	0.6		
รวมราคา (บาท)		261.85		
ราคาต้นทุนต่อก้อน (26 ก้อน/โมง)		10.07	5	17

ตารางที่ 4.5 สรุปราคาต้นทุนเฉพาะวัสดุเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย  
กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม

วัสดุ	คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่ใช้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมกากชานอ้อย		คอนกรีตบล็อก ขนาดมาตรฐาน 7x19x39 เซนติเมตร	อิฐมวลเบาขนาด 7x20x60 เซนติเมตร
	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	ราคาต้นทุน วัสดุ (บาท)	ราคาขายต่อ ก้อน (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)
เถ้าลอย	25	15		
โซเดียมซิลิเกต	7.5	150		
โซเดียมไฮดรอกไซด์	7.5	71.25		
หินปูน	100	28		
กากชานอ้อย	1	0.3		
รวมราคา (บาท)	-	264.55		
ราคาต้นทุนต่อก้อน (26 ก้อน/โม้)		10.18	5	17

จากการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น สามารถสรุปราคาต้นทุนของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย พบว่า ในกรณีศึกษาที่ 1 ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม มีราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อก้อน 10.07 บาท เมื่อรวมค่าใช้จ่ายอื่น ๆ จะมีต้นทุนที่ 10.84 บาท ในกรณีศึกษาที่ 2 ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม มีราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อก้อน 10.18 บาท เมื่อรวมค่าใช้จ่ายอื่น ๆ จะมีต้นทุนที่ 10.94 บาท เมื่อนำราคาไปเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกทั่วไป ราคาต้นทุนของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกจะมีราคาต้นทุนสูงกว่าราคาขายของคอนกรีตบล็อกทั่วไป และเมื่อนำราคาไปเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาจะมีราคาต้นทุนต่ำกว่าราคาขายของอิฐมวลเบา

ดังนั้นเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยอาจเป็นวัสดุก่อสร้างที่สามารถเพิ่มทางเลือกให้กับธุรกิจก่อสร้างได้ หากมีการพัฒนาให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างจริงจังและต่อเนื่องต่อไป

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยเป็นวัสดุเชื่อมประสานในการผลิตคอนกรีตบล็อก ส่วนผสมที่เตรียมในการศึกษานี้คือ เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฝุ่น : กากขานอ้อย โดยกำหนดอัตราส่วนเถ้าลอยต่อกากขานอ้อยได้แก่ 20 : 0.5, 20 : 1, 20 : 1.5 และ 20 : 2 กิโลกรัม ในกรณีศึกษาที่ 1 และมีการปรับอัตราส่วนเถ้าลอยต่อกากขานอ้อยในกรณีศึกษาที่ 2 คือ 25 : 0.5, 25 : 1, 25 : 1.5 และ 25 : 2 กิโลกรัม จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

5.1.1 ส่วนผสมที่เหมาะสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย ที่อายุบ่ม 7 วัน ในกรณีศึกษาที่ 2 ให้คุณสมบัติในการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 สูงสุด คืออัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่าง เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฝุ่น : กากขานอ้อย, 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเท่ากับ 40.126 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกรณีศึกษาที่ 1 ให้คุณสมบัติในการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.58-2533 สูงสุด ที่อายุบ่ม 28 วัน คืออัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่าง เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฝุ่น : กากขานอ้อย, 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเท่ากับ 26.841 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยในกรณีศึกษาที่ 2 จะมีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่ผ่านมาตรฐานที่อัตราส่วน โดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม เร็วกว่าในกรณีศึกษาที่ 1 ที่อัตราส่วน โดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม ซึ่งในกรณีศึกษาที่ 2 ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานที่อายุบ่ม 3 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 30.300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนในกรณีศึกษาที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 26.287 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.2 การดูซึม้ำของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากขานอ้อยเพิ่มขึ้นจะทำให้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักต่าง ๆ มีแนวโน้มดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยกรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่าง เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฝุ่น :

กากขานอ้อย, 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 4.44 และในกรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่าง แกลลวย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินปูน : กากขานอ้อย, 25 : 15 : 100 : 2 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 4.15 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าทุกอัตราส่วนมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินมาตรฐาน มอก.58-2533 กำหนดไว้คือไม่เกินร้อยละ 25

- 5.1.3 การใช้แกลลวยจีโอโพลิเมอร์ผสมกากขานอ้อยในการผลิตคอนกรีตบล็อกมีต้นทุนวัสดุในการผลิตเฉลี่ยต่อก้อน (เฉพาะในกรณีที่ผ่านมาตราฐานคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2533) ในกรณีศึกษาที่ 1 ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม มีราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อก้อน 10.07 บาท ในกรณีศึกษาที่ 2 ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม มีราคาต้นทุนเฉลี่ยต่อก้อน 10.18 บาท เมื่อคิดรวมค่าใช้จ่ายอื่นๆเพิ่มเติมจะได้ราคา 10.84 บาท ในกรณีศึกษาที่ 1 ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม และ 10.94 บาท ในกรณีศึกษาที่ 2 ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม ซึ่งทั้งสองกรณีศึกษามีราคาต้นทุนการผลิตต่ำกว่าราคาขายของอิฐมวลเบาซึ่งมีราคา 17 บาท แต่ทั้งนี้ยังมีราคาต้นทุนสูงกว่าราคาขายของคอนกรีตบล็อกทั่วไปตามท้องตลาดซึ่งมีราคา 5 บาท

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 การผลิตแกลลวยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย ถึงแม้ว่าจะได้ผลทดสอบผ่านมาตรฐาน มอก. 58-2533 ของคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก และมีการใช้วัสดุชีวะมวลให้เกิดประโยชน์สูงสุดในทางสิ่งแวดล้อม แต่ต้นทุนในการผลิตยังสูงอยู่ หากมีการพัฒนาอัตราส่วนที่เหมาะสมควบคู่ไปกับราคาต้นทุนในการผลิต อาจเป็นวัสดุก่อสร้างที่สามารถเพิ่มทางเลือกให้กับธุรกิจก่อสร้างได้ในอนาคต
- 5.2.2 เนื่องจากแกลลวยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยที่ผลิตได้ (น้ำหนักเฉลี่ย 5.6 กิโลกรัมต่อก้อน) มีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตบล็อกทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาด (น้ำหนัก 6.25 กิโลกรัมต่อก้อน) ประมาณ 650 กรัมต่อก้อน ดังนั้นควรมีการศึกษาถึงความแข็งแรงเพิ่มเติมของโครงสร้างเมื่อนำไปใช้งานจริง
- 5.2.3 ออกแบบอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก และศึกษาสมบัติของแกลลวยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อยเพิ่มเติมสำหรับคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก เช่น ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น และค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

- 5.2.4 สามารถนำถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยที่ทำการศึกษาค้างนี้ไปพัฒนาเป็นคอนกรีตบล็อกมวลเบาได้
- 5.2.5 ในอนาคตหากปริมาณกากชานอ้อยที่นำมาเป็นวัสดุผสมไม่เพียงพอสามารถทดแทนด้วยการนำวัสดุอื่นๆ มาผสมเพิ่ม เช่น เม็ดโฟม จีลีส้อย ฟางข้าว หรือนำถ้ำกะลามะพร้าวแบบเม็ดหยาบมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมบางส่วนแทนที่หินฝุ่นในการผลิตคอนกรีตบล็อก เพื่อการอนุรักษ์พลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้



## เอกสารอ้างอิง

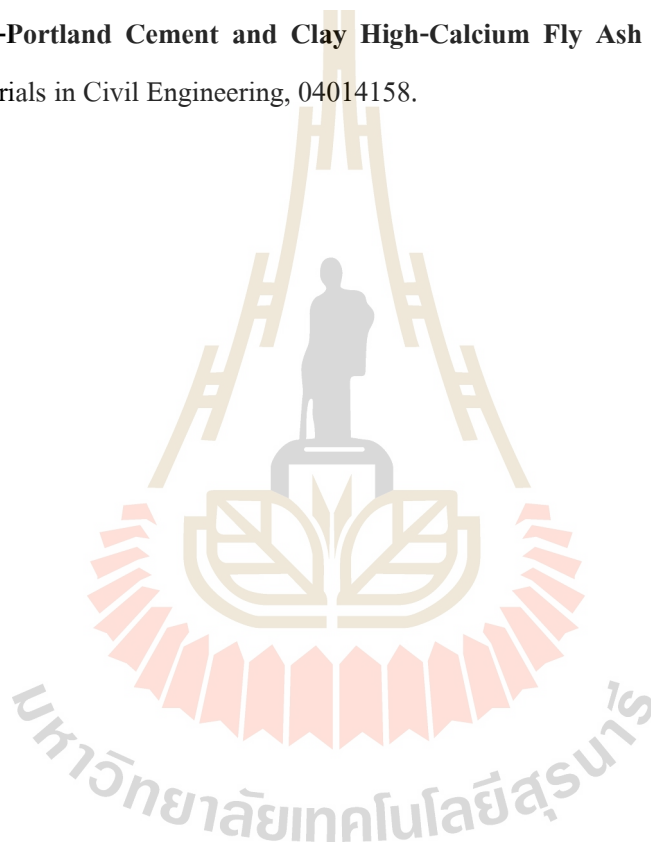
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2527). **การปลูกอ้อย**. กรมส่งเสริมการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ. 24 น.
- กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ สำนักนโยบายอ้อยและน้ำตาลทราย สำนักงานอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย. (2557). **รายงานพื้นที่ปลูกอ้อย ปีการผลิต 2557/2558**. แหล่งที่มา: <http://www.ocsb.go.th/upload/journal/923-9810.pdf>, 2 พฤษภาคม 2559.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2539). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- ณัฐพล เกตุเหล็ก, ธรพาพงษ์ พากเพียร และ วีระศักดิ์ มะขามป้อม. (2544). **การศึกษาบล็อกปูพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยมะพร้าว**. ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ (เทคโนโลยีโยธา) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ธัญญารัตน์ คงขุนเทียน. (2557). **วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมสำหรับผลิตสิ่งทอ**. โครงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัตถุดิบภาคการเกษตรด้วยการพัฒนาเส้นใยธรรมชาติ. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ.
- แบบอิฐบล็อกมาตรฐานอุตสาหกรรม**. (ออนไลน์) แหล่งที่มา: <http://www.nttc.co.th/product.php?id=12#>. [7 พฤศจิกายน 2560].
- ประณต กุลประสูติ. (2541). **เทคนิคงานปูน-คอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- ปรีชา เกียรติกระจาย. (2530). **เยื่อกระดาษจากชานอ้อย**. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปิติ พานิชายุนนท์, ฉัตร ผลนาค, สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, ธวัฒน์ เทพนवल, นพพันธ์ นานคงเนบ, และอนุจิตร จันทศรี. (2551). **การพัฒนาคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากฟางข้าว**. ปรินูญานิพนธ์ระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- ศุสดี แพทย์นุเคราะห์. (2546). **การนำซิลิกา-อลูมินาและชานอ้อยที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อก**. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพชรพร เขาวงกตเจริญ, นิธิรัตน์ สงวนเดือน, เบญจพร บุญชยา, ปรีตรดา โรจน์วิรุฬห์ และ กิตติพงษ์ พงษ์กิตติหัตถ์. (2545). **ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร**. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3. 18-19 กรกฎาคม 2545 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา: 435-436.



- พงศ์ภูมิ ศรชมแก้ว. (2555). **การผลิตอิฐบล็อกจากกากอุตสาหกรรม**. ปรินูญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. (2559). **หลักเกณฑ์เฉพาะในการตรวจสอบเพื่อการอนุญาตสำหรับผลิตภัณฑ์เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต มาตรฐานเลขที่ มอก. 2135-2545**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. (2544). **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม**. ฉบับที่ 1462. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. (2539). **โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม มาตรฐานเลขที่ มอก. 433-2539**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. (2533). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (มอก. 58-2533)**. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- American Society for Testing and Material. (2005). **ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.
- American Society for Testing and Material. (1996). **Standard Test Methods of Sampling and Testing Concrete Masonry Unit**. C140-96. Annual book of ASTM standard vol. 04.05 section 4: 91-98.
- American Society for Testing and Material. (1996). **Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Unit**. C936-82. Annual book of ASTM standard vol. 04.05 section 4: 596-597.
- Alonso, S. and Palomo, A. (2001). **“Alkaline Activator of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature Activator Concentration and Solid Ratio”**, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 1-2, pp. 55-62.
- Bakharev, T. (2004). **Durability of Geopolymer Material in Sodium and Magnesium Sulfate Solution**. Cement and Concrete Research, Vol. 35 No. 6, pp. 1233-1246.
- Bilba, K., Arsene, M. A., and Ouensanga, A. (2003). **Sugar Cane Bagasse Fibre Reinforced Cement Composites**. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. Cement and Concrete Composites vol. 25: 91-96.

- Chindaprasirt, P., Chareerat T. and Sirivivatnanon, V. (2006). **Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer**. Cement and Composites, Vol. 29, No. 3, pp. 224-229.
- Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2006). **A Comparative Study of Preparations and Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer**. International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, 24-25 May 2006, Thailand, pp. 63-712.
- Deer, W. A., Howie, R. A., and Zussman, J. (1971). **An Introduction to the Rock-Forming Minerals**. Longman, London.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. (2003). **The Effect of Mixture Composition and Curing Temperature on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**. The Ninth East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, Indonesia, CMT 14–CMT 18.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. **Brief Review of Development of Geopolymer Concrete**. American Concrete Institute, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.
- Hua, X. and Van Deventer, J.S.J. (1999). **The Geopolymerization of Natural Alumino-Silicates**. Proceeding: 2<sup>nd</sup> International conference on geopolymer, France: Paris, pp. 43-59.
- Ismail KS, et al. 2013. **Gene Expression Cross-Profiling in Genetically Modified Industrial Saccharomyces Cerevisiae Strains During High-Temperature Ethanol Production From Xylose**. J Biotechnol 163(1):50-60
- J. Davidovits. (2013). **Geopolymer Cement**. Geopolymer Cement a review, 2013.
- Makino, T., Ishida, T. (1999). **Microwave Dielectric Relaxation of Bound Water to Silica, Alumina, and Silica–Alumina Gel Suspensions**. Journal of Colloid and Interface Science vol. 212, Issue 1, P. 144-151.
- Medjo, R. E., and Riskowski, G.L. (1999). **A procedure for processing mixtures of soil cement and sugar cane bagasse**. Agricultural Engineering International vol. 3: 1-11.
- Post Combustion Capture Process**. (ออนไลน์) แหล่งที่มา:  
[http://www.oresomeresources.com/media\\_centre\\_view/resource/image\\_post\\_combustion\\_capture/category/coal\\_low\\_emission/section/media/parent/](http://www.oresomeresources.com/media_centre_view/resource/image_post_combustion_capture/category/coal_low_emission/section/media/parent/), [7 พฤศจิกายน 2560].

- Rattanak, U., Chindapasirt, P., & Suwanvitaya, P. (2010). **Development of High Volume Rice Husk Ash Alumino Silicate Composites**. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Material, 17(5), 654-659. doi: 10.1007/s12613-010-0370-0.
- Rocha, G. J. M., C. Martin, I. B. Soares, A. N. S. Maior, H. M. Baudel and C. A. M. Abreu. ( 2011) . **Dilute Mixed-Acid Pretreatment of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production**. Biomass and Bioenergy. 35: 663-670.
- Sukmak, P., De Silva, P., Horpibulsuk, S., & Chindapasirt, P. (2014). **Sulfate Resistance of Clay-Portland Cement and Clay High-Calcium Fly Ash Geopolymer**. Journal of Materials in Civil Engineering, 04014158.



ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบสมบัติของเส้นลวดจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย



### ภาคผนวก ก.1 การดูดซึมน้ำของแก้วลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. นำก้อนคอนกรีตบล็อกไปอบที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง นำก้อนคอนกรีตบล็อกขึ้นจากน้ำเช็ดให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้เป็นน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่จุ่มน้ำ

2. นำก้อนคอนกรีตบล็อกที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้แห้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักคอนกรีตบล็อกแห้ง

#### การคำนวณ

$$\% \text{ Absorption} = \left[ \frac{W_w - W_d}{W_d} \right] \times 100$$

เมื่อ % Absorption = ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ  
 $W_w$  = น้ำหนักอิฐเปียก (กรัม)  
 $W_d$  = น้ำหนักอิฐแห้ง (กรัม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 3 วัน กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก แก้วลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินปูน : กากชานอ้อย (กิโลกรัม)

อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 0	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	44	70.6	49.7	44.3	30.5
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	16.435	26.371	18.564	16.547	11.392
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	15.735				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 0.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	48.8	30.7	32.7	48.7	51.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	18.228	11.467	12.214	18.191	19.162
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	15.852				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 1	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	58.9	42	23.1	45.9	54.1
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	22.000	15.688	8.628	17.145	20.208
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	16.734				

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 1.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	23.6	46.8	33.5	35.2	51.6
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	8.815	17.481	12.513	13.148	19.274
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	15.604				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 2	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	65.5	43.7	58	52.9	50.6
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	24.466	16.323	21.664	19.759	18.900
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	21.197				

+

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 7 วัน กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก แก้วลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินปูน : กากชานอ้อย (กิโลกรัม)

อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 0	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	53.4	49.5	41.5	26.5	75.1
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	19.946	18.489	15.501	9.898	28.052
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	20.497				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 0.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	57	30.8	72.4	50.8	51.8
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	21.291	11.504	27.043	18.975	19.348
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	21.664				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 1	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	55.6	50.8	43.6	51.7	53.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	20.768	18.975	16.286	19.311	19.909
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	19.741				



ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 1.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	43.2	40.6	41.8	45.4	46.2
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	16.136	15.165	15.613	16.958	17.257
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	16.226				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 2	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	70	42.8	71.7	69.5	70.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	26.147	15.987	26.782	25.960	26.259
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	26.287				

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 28 วัน กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก แก้วลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฝุ่น : กากชานอ้อย (กิโลกรัม)

อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 0	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	53.4	58.5	50.3	58	69.7
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	19.946	21.851	18.788	21.664	26.035
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	21.657				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 0.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	57	30.8	61.4	50.8	51.8
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	21.291	11.504	22.934	18.975	19.348
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	20.637				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 1	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	57.6	53.8	72	54.7	53.9
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	21.515	20.096	26.894	20.432	20.133
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	21.814				

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 1.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	43.2	42.6	49.8	45.4	46.2
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	16.136	15.912	18.601	16.958	17.257
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	16.973				
อัตราส่วนผสม 20 : 15 : 100 : 2	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	70	72.8	71.7	69.5	75.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	26.147	27.192	26.782	25.960	28.126
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	26.841				

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 3 วัน กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก แก้วลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินฝุ่น : กากชานอ้อย (กิโลกรัม)

อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 0	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	55.8	57.4	60.6	62.6	59.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	20.843	21.440	22.635	23.382	22.150
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	22.253				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 0.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	57.6	69.7	60.3	68.7	70.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	21.515	26.035	22.523	25.661	26.259
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	24.398				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 1	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	85.4	93.5	76.4	76.2	74.1
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	31.899	34.924	28.537	28.462	27.678
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	30.3				

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 1.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	32.6	58.8	50.5	54.2	64.6
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	12.177	21.963	18.863	20.245	24.130
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	22.113				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 2	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	63	59.7	68.5	68.6	64.9
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	23.532	22.299	25.586	25.624	24.242
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	24.746				

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 7 วัน กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก เถ้าลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินปูน : กากชานอ้อย (กิโลกรัม)

อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 0	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	69.3	65.6	66.5	70.7	-
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	25.885	24.503	24.839	26.408	-
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	25.409				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 0.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	57.8	76.5	65.7	65.4	-
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	21.590	28.574	24.540	24.428	
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	24.783				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 1	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	104.2	104.5	112.2	108.8	98.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	38.921	39.033	41.909	40.639	36.717
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	40.126				

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 1.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	34.2	23.1	63.5	58.2	68.6
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	12.774	8.628	23.719	21.739	25.624
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	23.694				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 2	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	86.1	67.1	40.4	123.1	34.4
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	32.160	25.063	15.090	45.981	12.849
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	26.229				

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองค่ากำลังแรงอัดของแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อย อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะบ่ม 28 วัน กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก แก้วลอย : ตัวเร่งปฏิกิริยา : หินปูน : กากชานอ้อย (กิโลกรัม)

อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 0	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kN)	68.5	67.1	62.3	58	60.8
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	25.586	25.063	23.270	21.664	22.710
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	23.659				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 0.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	66.6	58.1	67.3	54.5	54.2
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	24.877	21.702	25.138	20.357	20.245
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	22.464				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 1	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	81.2	87	98.6	86.7	74.5
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	30.330	32.496	36.829	32.384	27.827
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	31.974				



ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 1.5	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	63.5	53.4	61.5	50.8	45.6
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	23.719	19.946	22.972	18.975	17.033
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	20.529				
อัตราส่วนผสม 25 : 15 : 100 : 2	อิฐบล็อกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ				
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5
ขนาดพื้นที่รับแรงกด (cm <sup>2</sup> )	273	273	273	273	273
แรงกดสูงสุด (kg)	57.3	60.4	62.8	55.6	53.3
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุด (kg/cm <sup>2</sup> )	21.403	22.561	23.457	20.768	19.909
กำลังต้านทานแรงกดสูงสุดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	21.619				



## การคำนวณค่าใช้จ่ายวัสดุในการผลิตเก้าอี้โพลีเมอร์บล็อผสมกากชานอ้อย ชนิดไม่รับน้ำหนัก

### ข้อมูลพื้นฐาน

- เก้าอี้จากแหล่งแม่เมาะ ราคา 600 บาทต่อต้น (ข้อมูลจากแหล่งปูนเอกชน)
- หินฝุ่น ราคา 280 บาทต่อต้น (ข้อมูลจากร้านวัสดุก่อสร้างที่ผลิตอิฐบล็อก)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ 9.5 บาทต่อกิโลกรัม
- โซเดียมซัลเฟต 20 บาทต่อกิโลกรัม
- กากชานอ้อย 300 บาทต่อต้น

ตารางที่ ข.1 ราคาต่อหน่วยกิโลกรัมของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	หน่วยราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
เก้าอี้	0.6
โซเดียมซัลเฟต	9.5
โซเดียมไฮดรอกไซด์	20
หินฝุ่น	0.28
กากชานอ้อย	0.3

ตารางที่ ข.2 ราคาต้นทุนการผลิตเก้าอี้โพลีเมอร์บล็อผสมกากชานอ้อยชนิดไม่รับน้ำหนัก  
กรณีศึกษาที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 20 : 15 : 100 : 2 กิโลกรัม

วัสดุ	คอนกรีตบล็อคน้ำหนักไม่รับน้ำหนัก ที่ใช้เก้าอี้โพลีเมอร์ผสมกากชานอ้อย		คอนกรีตบล็อก ขนาดมาตรฐาน 7x19x39 เซนติเมตร	อิฐมวลเบาขนาด 7x20x60 เซนติเมตร
	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	ราคาต้นทุน วัสดุ (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)
เก้าอี้	20	12		
โซเดียมซัลเฟต	7.5	150		

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

วัสดุ	คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่ใช้ถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์ผสมกากชานอ้อย		คอนกรีตบล็อก ขนาดมาตรฐาน 7x19x39 เซนติเมตร	อิฐมวลเบาขนาด 7x20x60 เซนติเมตร
	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	ราคาต้นทุน วัสดุ (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)
โซเดียมไฮดรอกไซด์	7.5	71.25		
หินปูน	100	28		
กากชานอ้อย	2	0.6		
<b>รวมราคา (บาท)</b>	-	261.85		
<b>ราคาต้นทุนต่อก้อน (26 ก้อน/โม)</b>		10.07	5	17

ตารางที่ ข.3 ราคาต้นทุนการผลิตถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยชนิดไม่รับน้ำหนัก  
กรณีศึกษาที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 25 : 15 : 100 : 1 กิโลกรัม

วัสดุ	คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่ใช้ถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์ผสมกากชานอ้อย		คอนกรีตบล็อก ขนาดมาตรฐาน 7x19x39 เซนติเมตร	อิฐมวลเบาขนาด 7x20x60 เซนติเมตร
	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	ราคาต้นทุน วัสดุ (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)	ราคาขายต่อก้อน (บาท)
ถ้ำลอย	25	15		
โซเดียมซิลิเกต	7.5	150		
โซเดียมไฮดรอกไซด์	7.5	71.25		
หินปูน	100	28		
กากชานอ้อย	1	0.3		
<b>รวมราคา (บาท)</b>	-	264.55		
<b>ราคาต้นทุนต่อก้อน (26 ก้อน/โม)</b>		10.18	5	17

ภาคผนวก ค  
ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิต และทดสอบเก้าอี้โพลีเมอร์บล็อก





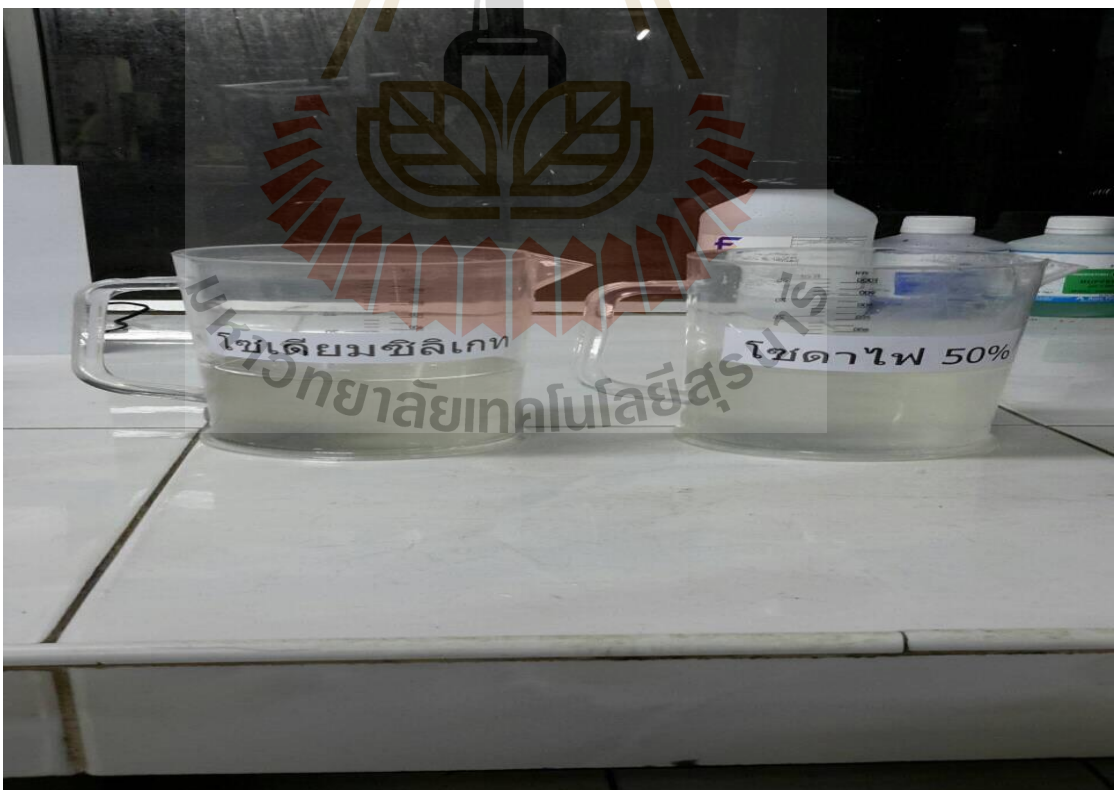
รูปที่ ค.1 การเตรียมถ้ำลอย



รูปที่ ค.2 การเตรียมกากขานอ้อย



รูปที่ ค.3 การเตรียมหินฝุ่น



รูปที่ ค.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมซิลิเกต : โซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ ค.5 การเตรียมแบบอัดคอนกรีตบล็อก



รูปที่ ค.6 ขั้นตอนผสมวัตถุดิบการผลิตเก้าอี้โพลีเมอร์บล็อก เติมเก้าอี้ตามอัตราส่วนที่กำหนด





รูปที่ ค.7 เติมกากชานอ้อยตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด



รูปที่ ค.8 เติมตัวเร่งปฏิกิริยาตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด



รูปที่ ค.9 แก้วลอยจิโอะโพลีเมอร์บล็อกผสมกากชานอ้อยที่ผลิตได้



รูปที่ ค.10 ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ



รูปที่ ค.11 การทดสอบกำลังรับแรงอัด และลักษณะการแตกของเต้าลอยจีโอโพลี  
เมอร์บล็อกผสมกากขานอ้อย



รูปที่ ค.12 อบอุ่นอิฐบล็อกเพื่อนำไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ



รูปที่ ค.13 แขน้ำก้อนอิฐบล็อกเพื่อนำไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ



## ประวัติผู้เขียน

นายกิตติศักดิ์ วงษ์สุข เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2527 ที่อำเภอเมืองกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ทเชียงใหม่ หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัท น้ำตาลทรายกำแพงเพชร จำกัด ตำแหน่งวิศวกรโรงงาน หลังจากนั้นในปี 2554 ได้ย้ายไปเป็นวิศวกรควบคุมโครงการก่อสร้างโรงงานน้ำตาลทรายไทยอุดร จังหวัดอุดรธานี ในปี 2556 ได้มีโอกาสรับเหมาก่อสร้างโรงงานน้ำตาลทรายระยอง สาขาชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรระดับปริญญาโท ด้านการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันประกอบกิจการรับเหมาก่อสร้าง โรงงานอุตสาหกรรม อาคาร โกดัง ฯลฯ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี