

กำลังของหินคลุกผสมกรวดโม้ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์สำหรับใช้ใน  
งานชั้นพื้นทาง : กรณีศึกษา จังหวัดมุกดาหาร



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2560

กำลังของหินคลุกผสมกรวดโม้ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สำหรับใช้ใน  
งานชั้นพื้นทาง : กรณีศึกษา จังหวัดมุกดาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับ โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

\_\_\_\_\_

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

\_\_\_\_\_

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

\_\_\_\_\_

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธงชัย บัวหอม : กำลังของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์  
สำหรับใช้ในงานชั้นพื้นทาง : กรณีศึกษา จังหวัดมุกดาหาร (STRENGTH OF CRUSHED  
ROCK AND CRUSHED GRAVEL STABILIZED WITH FLY ASH GEOPOLYMER  
AS PAVEMENT BASE MATERIAL CASE STUDY MUKDAHAN ) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของหินคลุกผสมกรวดโมกับเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทาง เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนของ หินคลุกผสมกรวดโมจีโอโพลิเมอร์ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ โดยอัตราส่วนที่ทำการทดสอบของหินคลุกผสมกรวดโม อัตราส่วนเท่ากับ 100:0, 0:100, 90:10, 80:20, 70:30, 50:50 และทำการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และสัดส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 50 : 50 และระยะเวลาบ่มกำหนดที่ 7,14 และ 28 วัน และทำการวิเคราะห์ต้นทุนต่อผลตอบแทนกำลังอัดต่อต้นทุนของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนระหว่างหินคลุกผสมกรวดโม 50:50 เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย เท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักและสัดส่วนของโซเดียมซิลิเกต ต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 50 : 50 โดยทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa) พบว่าที่อายุการบ่ม 7 วัน ทุกสัดส่วนให้กำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ เมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนต่อผลตอบแทนกำลังอัดต่อต้นทุนคุ้มค่ามากที่สุด เท่ากับ 1.38 กิโลปาสกาล/บาท ที่อายุการบ่ม 7 วัน ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash ) เท่ากับร้อยละ 5

THONGCHAI BUAHOM : STRENGTH OF CRUSHED ROCK AND  
CRUSHED GRAVEL STABILIZED WITH FLY ASH GEOPOLYMER AS  
PAVEMENT BASE MATERIAL CASE STUDY MUKDAHAN.

ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D.

This research focuses on the compressive Crushed Rock and Crushed Gravel Stabilized with Fly Ash Geo polymer as Pavement Base Material to find the optimum mix of crushed rock, gravel, with fly ash geo polymer. In accordance with the requirements of the standard work, the cost of the mixed stone gravel mixed with the Geo Polymer is designed. The ratio testing of crushed rock, gravel, concrete mix ratio of 100: 0, 0: 100, 90:10, 80:20, 70:30, and 50:50. Select the appropriate ratio to improve by 5 percent fly ash, 10 and 15 by weight and the proportion of sodium silicate of sodium hydroxide is 50: 50. The incubation period set at 7, 14 and 28 days. Cost-to-return analysis of compressive strength on the cost of crushed rock, gravel, concrete mixed with fly ash geo polymer improved.

The results showed that the optimum ratio is the ratio of crushed rock, gravel, concrete mixers 50:50 on the quality of fly ash 5 percent, 10 and 15. The weight and proportion of sodium silicate to sodium hydroxide was 50:50 compared with the standard compressive strength of the cement mix of the Department of Highways NO.DH-S 203/2556 (Permission to 2,413 Kpa) and the cement ground floor of the Department of Rural Roads NO. MTHCH 244-2556 (Permission to 1,724 Kpa) It was found that the curing age of 7 days, the proportion of compressive strength is higher than the standard. The cost-return analysis of compressive strength to the most cost effective was 1.38 kPa / Baht at 7 days curing. Fly Ash content was 5%

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

Academic Year 2017

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

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการการศึกษาฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข หัวหน้าหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินงานโครงการในครั้งนี้ที่ได้กรุณาสละเวลาประเมินและตรวจสอบ ให้ข้อคิดเห็นข้อเสนอแนะต่าง ๆ ให้งานวิจัยเกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 5 (นครราชสีมา) ที่สนับสนุนด้านเครื่องมือในการทดสอบสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ที่สำคัญยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ตลอดจนบูรพาจารย์และผู้ที่มีพระคุณที่ให้การแนะนำอบรม ทั้งการสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

ธงชัย บัวหอม



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หินคลุก.....	4
2.2 กรวดไม่.....	5
2.3 การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ.....	6
2.4 กำลังอัดแกนเดียว.....	7
2.5 มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.6 ใ้ลลอย.....	8
2.6.1 รูปร่างของใ้ลลอย.....	10
2.6.2 ความละเอียด.....	10
2.6.3 การหาดัชนีกำลัง.....	11
2.6.4 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน.....	11
2.6.5 โครงสร้างผลึก.....	12
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	14
2.7.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	14
2.7.2 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์.....	14

2.8	จีโอโพลิเมอร์.....	15
2.9	จีโอโพลิเมอร์ไร้เซชั่น.....	16
	2.9.1 การชะละลาย.....	16
	2.9.2 การทำปฏิกิริยาลูกโซ่.....	16
2.10	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3	วิธีดำเนินการศึกษา.....	20
3.1	การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ.....	20
	3.1.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก.....	20
	3.1.2 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของกรวดไม้.....	21
3.2	การเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง.....	22
	3.2.1 สัดส่วนระหว่าง หินคลุกผสมกรวดไม้ กับ เถ้าลอย.....	22
	3.2.2 เตรียมสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
	3.2.3 การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....	22
3.3	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	23
3.4	ศึกษาต้นทุนของหินคลุกกับกรวดไม้.....	23
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล.....	24
4.1	คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุ.....	24
	4.1.1 หินคลุก(Crushed Rock).....	24
	4.1.2 กรวดไม้(Crushed Gravel).....	25
	4.1.3 หินคลุก(Crushed Rock) ผสมกรวดไม้(Crushed Gravel) ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	27
	4.1.4 เถ้าลอย (Fly Ash).....	31
4.2	ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....	32
4.3	กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS).....	33
4.4	เปรียบเทียบราคาต้นทุน.....	36
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	40
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	40
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	41
	เอกสารอ้างอิง.....	42
	ประวัติผู้เขียน.....	44

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก (มทข.203-2557).....	5
2.2 ขนาดคละของวัสดุกรวดโม้ (ทล.-ม 202/2531).....	5
2.3 ข้อกำหนดสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน.....	6
2.4 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	9
2.5 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยอำเภอแม่มาะจังหวัดลาปาง.....	11
2.6 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว.....	14
2.7 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลวชนิดที่ 2.....	15
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก.....	24
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของกรวดโม้.....	25
4.3 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 90 % ผสมกรวดโม้ 10 %.....	27
4.4 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 80 % ผสมกรวดโม้ 20 %.....	28
4.5 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 70 % ผสมกรวดโม้ 30 %.....	29
4.6 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 50 % ผสมกรวดโม้ 50 %.....	30
4.7 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly Ash).....	31



## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ.....	6
2.2 เส้นโค้งการบดอัดที่ได้จากการทดสอบ.....	7
2.3 Scanning Electron Microscope (SEM) ถ้าวัดขยาย (1,000 เท่า).....	10
2.4 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน (Makino et al., 1999).....	12
2.5 รูปทรงสี่หน้าของ SiO <sub>4</sub> (SiO <sub>4</sub> tetrahedral) (Dcer et al.,1971).....	13
2.6 โครงสร้างผลึก β-ควอร์ซึนขายลงบนระนาบ (0001) (Dcer et al., 1971).....	13
2.7 โครงสร้างผลึกของ α-ควอร์ซึนโครงสร้างผลึกของ α-ควอร์ซึน ขายลงบน (0001) (Dcer et al., 1971).....	14
2.8 โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์(Davidovits,1991).....	17
2.9 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาของ Activator กับ Fly ash (Fernández-Jiménez et al., 2005).....	17
2.10 แบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Shi et al., 2011).....	18
4.1 ขนาดผลของวัสดุหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
4.2 ขนาดผลของวัสดุกรวดโม้ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
4.3 ขนาดผลของวัสดุหินคลุก 90% ผสม กรวดโม้ 10% ที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
4.4 ขนาดผลของวัสดุหินคลุก 80% ผสม กรวดโม้ 20% ที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
4.5 ขนาดผลของวัสดุหินคลุก 70% ผสม กรวดโม้ 30% ที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
4.6 ขนาดผลของวัสดุหินคลุก 50% ผสม กรวดโม้ 50% ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
4.7 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....	32
4.8 (a) วัสดุหินคลุก (b) วัสดุกรวดโม้ (c) ถ้าวัด (d) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ (e) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ) .....	33
4.9 ค่ากำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโม้ที่ปรับปรุงด้วยถ้าวัดจีโอโพลิเมอร์.....	34
4.10 การวัดของวัสดุที่ผ่านการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว.....	35
4.11 ค่ากำลังอัดของกรวดโม้ที่ปรับปรุงด้วยถ้าวัดจีโอโพลิเมอร์.....	35
4.12 กราฟแสดงต้นทุนของวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วน : 5050 ปรับปรุงด้วย ถ้าวัดจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	37

- 4.13 ต้นทุนต่อกำลังอัดของวัสดุหินคลุกผสมกรวดไม่อัตราส่วน 50 : 50 ปรับปรุงด้วย  
    ถั่วลอยจิโอะโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆต่ออายุการบ่มที่ 7,14 และ วัน 28.....38
- 4.14 กราฟแสดงต้นทุนของกรวดไม่ปรับปรุงด้วยถั่วลอยจิโอะโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....38
- 4.15 ต้นทุนต่อกำลังอัดของวัสดุกรวดไม่ปรับปรุงด้วยถั่วลอยจิโอะโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ  
    ต่ออายุการบ่มที่ 7.....39



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างชั้นทางแบบยึดหยุ่น โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง วัสดุถมคันทางหรือชั้นดินเดิม โครงสร้างทางส่วนมากจะออกแบบให้มิลักษณะเป็นชั้นๆ เพื่อให้ความเค้นในแนวตั้งที่เกิดจากน้ำหนักรถกระจายลงไปสู่ชั้นโครงสร้างทางตามความลึกความเข้มข้นของความเค้นที่มีค่าสูง และลดลงตามความลึก ดังนั้น วิศวกรโยธามักจะเลือกวัสดุที่มีคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้เพื่อให้งานก่อสร้างมีความคงทนต่อการใช้งาน และประหยัดงบประมาณค่าก่อสร้าง ชั้นพื้นทางมีหน้าที่หลักในการต้านทานความเค้นในแนวตั้งจากน้ำหนักรถ และทำหน้าที่กระจายหน่วยแรงลงไปยังชั้นโครงสร้างถัดไป ชั้นพื้นทางส่วนมากวัสดุจะเป็นหินคลุก เมื่อทำการบดอัดแล้วจะมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่สูง หินคลุกที่นำมาใช้จะต้องมีคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติด้านวิศวกรรมตามที่หน่วยงานกำหนด (กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทเป็นหน่วยงานหลักที่กำหนดมาตรฐานงานก่อสร้างทางหลวงของประเทศไทย)

วัสดุหลักที่ใช้ในงานก่อสร้างทางนั้นส่วนมากมักจะเป็นวัสดุที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น ดินเดิม ลูกรัง และหินคลุก วัสดุเหล่านี้นับวันยิ่งจะลดน้อยลงและจะหมดไปในที่สุด เนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและความต้องการที่จะพัฒนาโครงสร้างพื้นทางให้มีความแข็งแรงทนทานเพียงพอต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกของยานพาหนะที่สัญจรบนโครงสร้างถนน ความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุก่อสร้างแสดงถึงความสามารถของวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพจากการกระทำโดยสภาพอากาศและแรงต่างๆที่เกิดขึ้น

วัสดุก่อสร้างบางแหล่งที่นำมาใช้โดยปราศจากการปรับปรุงคุณสมบัติอาจไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุทางสามารถทำได้ทั้งทางกล เช่น การบดอัดดิน และทางเคมี เช่นการเติมปูนซีเมนต์ หรือปูนขาว ในประเทศไทยนิยมปรับปรุงคุณภาพวัสดุทางโดยการบดอัดร่วมกับการเติมซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่ายในประเทศไทย อย่างไรก็ตามการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านการทำลายธรรมชาติสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน และส่งผลกระทบต่อประชากรบริเวณโดยรอบ ดังนั้น นักวิจัยและวิศวกรโยธา ทั้งในประเทศและต่างประเทศ ต่างคิดค้นวัสดุก่อสร้างที่ทำให้ส่งผลกระทบต่อโลกน้อยที่สุดหรือเป็นวัสดุสีเขียวเพื่อนำมาใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งหนึ่งในวัสดุสีเขียวที่กำลังเป็นที่นิยม คือ วัสดุอิโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็น

องค์ประกอบทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นโดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปของสถานะซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกา และอลูมินา เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง

การเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพจะส่งผลที่ดีต่ออายุการใช้งาน จังหวัดมุกดาหารเป็นอีกหนึ่งจังหวัดที่กำลังเร่งพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานนั้นให้มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานอยู่ตลอดเวลา แต่เนื่องจากจังหวัดมุกดาหารนั้นไม่มีแหล่งโรงโม่หินทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างและการขนส่งวัสดุจากแหล่งอื่น ได้แก่ จังหวัดสุรินทร์ จังหวัดขอนแก่น จังหวัดบุรีรัมย์ และจังหวัดสระบุรี มีอัตราค่าใช้จ่ายและค่าขนส่งที่สูง การที่จะลดต้นทุนในการก่อสร้างได้นั้น จึงมองเห็นว่าวัสดุกรวดโม่ในเขตพื้นที่จังหวัดมุกดาหารนั้นเพียงพอต่อการใช้งาน มีจำนวนมากสามารถทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด และลดต้นทุนในการก่อสร้างลงได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโม่ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอ โพลิเมอร์ ความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม่ที่ปรับปรุงโดยเถ้าลอยจีโอ โพลิเมอร์ให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมและกำลังอัดให้เป็นไปตามมาตรฐานงาน และเปรียบเทียบต้นทุนของหินคลุกผสมกรวดโม่ หินคลุกผสมกรวดโม่จีโอ โพลิเมอร์ ตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษากำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโม่ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอ โพลิเมอร์
- 1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของหินคลุกผสมกรวดโม่กับเถ้าลอยจีโอ โพลิเมอร์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทาง
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนของหินคลุกผสมกรวดโม่ หินคลุกผสมกรวดโม่จีโอ โพลิเมอร์ ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

### 1.3.1 แหล่งวัสดุ

- หินคลุก จาก โรงโม่ย่งสัง ตำบลนาบัว อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์
- กรวดโม่ จากแหล่งแม่น้ำโขง จ. มุกดาหาร
- เถ้าลอย จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จ.ลำปาง
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากบริษัท วิโรฒวิทยากันท์ จำกัด นครราชสีมา

- สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) จากบริษัท วิโรฒวิทยภัณฑ์ จำกัด นครราชสีมา

### 1.3.2 สัดส่วนผสมของวัสดุ

สัดส่วนระหว่าง หินคลุกผสมกรวดไม่ กับ ฝ้าลอย

- หินคลุก 100 %
- กรวดไม่ 100 %
- หินคลุก 90 % ผสม กรวดไม่ 10 %
- หินคลุก 80 % ผสม กรวดไม่ 20 %
- หินคลุก 70 % ผสม กรวดไม่ 30 %
- หินคลุก 50 % ผสม กรวดไม่ 50 %
- เลือกสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยฝ้าลอยอีโพอลิเมอร์ โดยผสมฝ้าลอยที่สัดส่วน 5%, 10%, 15% โดยน้ำหนัก

### 1.3.3 สารเร่งปฏิกิริยา Alkaline Activators

สารเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activators) เป็น ส่วนผสมระหว่าง โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )

### 1.3.4 การทดลองและการวิเคราะห์ผลทดลอง

- ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของหินคลุกและกรวดไม่
- ทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวของตัวอย่างตามอัตราส่วนที่ระบุไว้
- วิเคราะห์ผลการพัฒนากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ให้ได้กำลังตามที่กำหนดไว้คือ 1,724 KPa และ 2,413 KPa

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ทราบกำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดไม่ที่ปรับปรุงด้วยฝ้าลอยอีโพอลิเมอร์
- 1.4.2 ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมของหินคลุกผสมกรวดไม่กับฝ้าลอยอีโพอลิเมอร์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทาง
- 1.4.3 ทราบต้นทุนของหินคลุกผสมกรวดไม่ หินคลุกผสมกรวดไม่อีโพอลิเมอร์ ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หินคลุก

วัสดุพื้นทางหินคลุก หมายถึง วัสดุรวมรวมหิน โม่ (crushed rock soil aggregate type) สำหรับใช้ในการก่อสร้างถนน โดยก่อสร้างบนชั้นรองพื้นทางหรือชั้นอื่นใดซึ่งผ่านการตรวจสอบแล้ว โดยการเกลี่ยแต่งและบดอัดให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ วัสดุรวมรวมหิน โม่ (Crush rock soil aggregate type base) ต้องเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่มีผุและปราศจากวัสดุอื่นเจือปน จากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบทแล้ว ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ต้องมีขนาดคละกัณอย่างสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก มีเม็ดที่แข็งเหนียวไม่ผุ
- สะอาดปราศจากวัสดุอื่นเจือปน ห้ามนำวัสดุจำพวกเชล (shale) มาใช้งาน
- มีค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 25 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข. (ท) 501.5 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว
- มีค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (plasticity index) ไม่มากกว่าร้อยละ 6 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.6 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก
- มีค่าของความสึกหรอ (percentage of wear) ไม่มากกว่าร้อยละ 40 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.9 : วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ Los Angeles abrasion
- มีค่าของส่วนที่ไม่คงทนไม่มากกว่าร้อยละ 9 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.12 : วิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (soundness) ของมวลรวม โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ
- มีค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R.) ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุด ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.3 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor density) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลติกคอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟซทรีตเมนต์ หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.3 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์
- มีขนาดคละตามตารางที่ 2.1 ตารางขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.8 : วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุ

- ส่วนละเอียด (fine aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเดียวกันกับส่วนหยาบ (coarse aggregate) หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบท ทั้งนี้เมื่อผสมกันแล้วต้องมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก (มทข.203-2557)

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักผ่านตะแกรงคิดเป็นร้อยละ	
	ชนิด ก.	ชนิด ข.
2"	100	100
1"	-	75-95
3/8"	30-65	40-75
เบอร์ 4	25-55	30-60
เบอร์ 10	15-40	20-45
เบอร์ 40	8-20	15-30
เบอร์ 200	2-8	5-20

## 2.2 กรวดโม้

วัสดุกรวดโม้มวลรวม (Crushed Gravel Soil Aggregate Type) ต้องเป็นวัสดุที่เนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่ฝุ่น และปราศจากวัสดุอื่นเจือปนและมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด

2.2.1 มาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล.-ม.202/2531 โดยกำหนดขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดกรวดโม้ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของวัสดุกรวดโม้ (ทล.-ม 202/2531)

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล			
	A	B	C	D
50.0 (2 นิ้ว)	100	100	-	-
25.0 (1 นิ้ว)	-	75-95	100	100
9.50 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75	50-85	60-100
4.75 (เบอร์ 4)	25-55	30-60	35-65	50-85

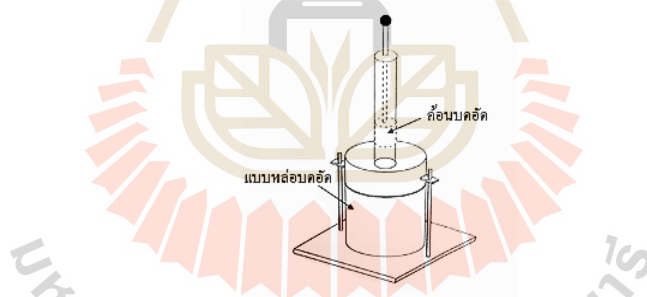
ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล			
	A	B	C	D
2.00 (เบอร์ 10)	15-40	20-45	25-50	40-75
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30	15-30	25-40
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20	5-15	5-20

ที่มา : มาตรฐานงานทาง กรมทางหลวง, 2531

### 2.3 การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

จุดประสงค์ของการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการคือ เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นบดอัดที่เหมาะสมโดยใช้เครื่องมือทดสอบดังรูปที่ 2.1 การทดสอบมี 2 แบบคือ การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ซึ่งมีข้อกำหนดสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ดังแสดงในตารางที่ 2.4 สำหรับรูปที่ 2.2 แสดงเส้นโค้งการบดอัดจากการทดสอบทั้งสองแบบ



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ

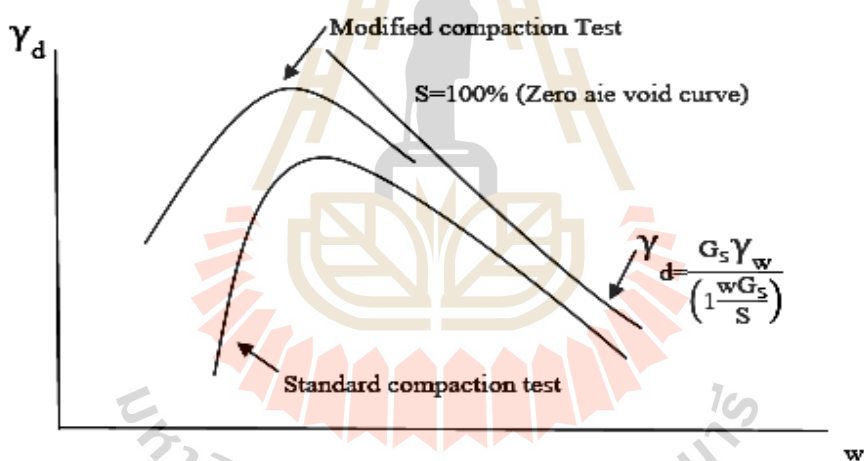
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน

ชนิดการบดอัด	แบบมาตรฐาน ASTM D698 (Standard Compaction test)		แบบสูงกว่ามาตรฐาน ASTM D1557 (Modified compaction test)	
	น้ำหนักค้อน (ปอนด์)	5.5	5.5	10
ระยะตกกระทบ (นิ้ว)	12	12	18	18
ความสูงแบบหล่อดิน (นิ้ว)	4.584	4.584	4.584	4.584



ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ชนิดการบดอัด	แบบมาตรฐาน ASTM D698 (Standard Compaction test)		แบบสูงกว่ามาตรฐาน ASTM D1557 (Modified compaction test)	
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบหล่อดิน (นิ้ว)	4	6	4
จำนวนชั้นการบดอัด	25	56	25	56
บดอัดชั้นละ (ครั้ง)	3	3	5	5
พลังงานบดอัดต่อปริมาตร (ฟุต-ปอนด์/ ฟุต)	12,375		56,250	



รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการบดอัดที่ได้จากการทดสอบ

#### 2.4 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strengths)

Unconfined Compressive Strengths คือ ค่าแรงอัดสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกจะรับได้ ถ้าในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อความเครียด (Strain) ในแนวตั้งเกิน 20% ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ที่ความเครียด 20% นั้นเป็นค่า Unconfined Compressive Strengths ใช้การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเช่นเดียวกับ งานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ดำเนินการตามมาตรฐานการทดสอบดังนี้ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียววิธีการทดลองที่ ทล.-ท 105/2515 นำตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบออกจากแบบ แล้วบ่มโดยใช้พลาสติก

ห่อเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดให้เอาพลาสติกออกแล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง นำขึ้นจากน้ำปล่อยให้แห้งด้วยอากาศจนมีสภาพอิมตัวผิวแห้ง และนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว

## 2.5 มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (Standards)

มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (Standards) สำหรับการศึกษานี้ ประกอบด้วย

- มาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุก ตามมาตรฐาน มทข. 203 - 2557
- มาตรฐานพื้นทางกรวดโม้ ตามมาตรฐาน ทล.-ม.202/2531
- มาตรฐานงานชั้นพื้นทาง ตามมาตรฐาน มทข. 223 - 2545
- มาตรฐานงานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ ตามมาตรฐาน มทข. 242 - 2555
- มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) ตามมาตรฐาน มทข. 244 – 2556
- มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2556
- มาตรฐานวิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.2-2545
- มาตรฐานวิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.3-2545
- มาตรฐานวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.5-2545
- มาตรฐานวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.6-2545
- มาตรฐานวิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.8-2545
- มาตรฐานวิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบโดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ Los Angeles abrasion ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.9-2545

## 2.6 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทาเทาดำ หรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolan) ซึ่งแร่ธาตุประเภทหนึ่ง มีส่วนประกอบหลักเป็นออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และช่วงเวลาของการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน ก่อนที่จะกล่าวถึง

คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าลอย ควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติ และข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกัน คือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในการงาน จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการเผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.4

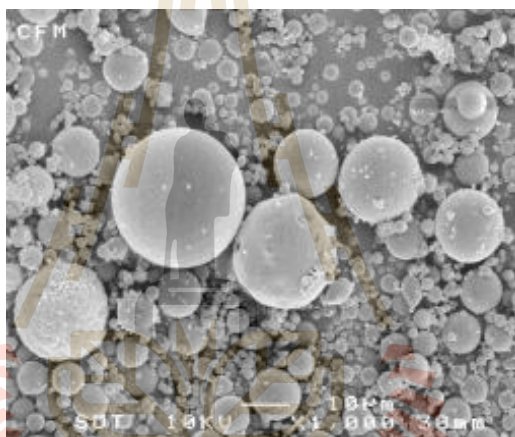
สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ในเถ้าลอย โดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยา อย่างเพียงพอ นอกจากนี้ ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วยสำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัว และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟตได้

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 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

### 2.6.1 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยมเมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลมดังรูปที่ 2.3 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ (P.Chindaprasirt, Jaturapitakkul, Chalee, & Rattanasak, 2009)



รูปที่ 2.3 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอยขยาย (1,000 เท่า)

### 2.6.2 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจาก เถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือ ส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่านอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลน (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 ทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่

แตกต่างกัน ได้มากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมากแต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางการบอกขนาดของอนุภาค โดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง

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	2.02	37.4	2370	28.5

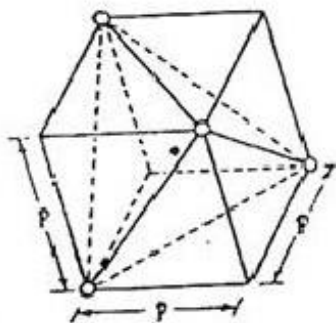
จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

### 2.6.3 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

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

### 2.6.4 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน

โครงสร้างผลึกซิลิกาอสัณฐานจะมีการเรียงตัวกันของอะตอมหรืออนุภาคยังไม่เป็นระเบียบดังแสดงในภาพที่ 2.4 และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกซิลิกาซึ่งผลึกซิลิกา ดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกต่างๆคือควอร์ซ ไทรคิไมท์และคริสโทรบอลท์โดยที่แต่ละโครงสร้างจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน (Makino et al., 1999)

(ก) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดใหญ่ของซิลิกาอสัณฐาน ( $\text{Si}_{400}\text{O}_{800}$  cluster)

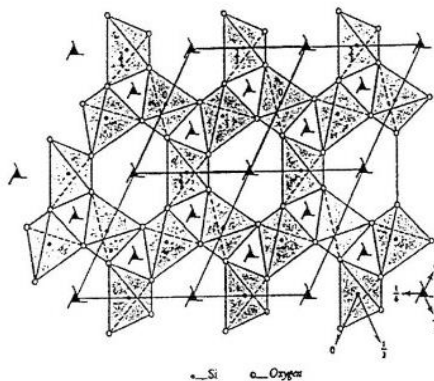
(ข) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดเล็กของซิลิกาอสัณฐาน ( $\text{Si}_{27}\text{O}_{72}$  cluster)

(○ คืออะตอมของออกซิเจน, ● คืออะตอมของซิลิกอน)

### 2.6.5 โครงสร้างผลึก

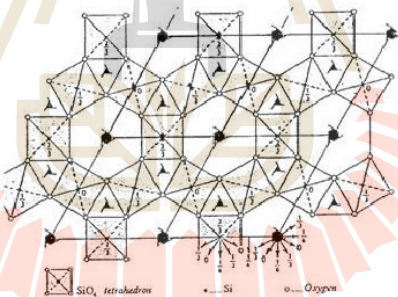
โครงสร้างผลึกซิลิกามีอยู่ 3 โครงสร้างคือควอร์ซ ไทรดิไมท์ และคริสโทรบอลไลท์ โดยแต่ละโครงสร้างผลึกจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะเป็นไปอย่างช้า ๆ จากโครงสร้างผลึกหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่ง ดังนั้น โครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงจะยังคงมีอยู่ ณ ที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้าง และแต่ละโครงสร้างผลึกจะมีโครงสร้างที่ต่างกันได้ 2 โครงสร้าง คือ  $\alpha$ - จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและ  $\beta$ - จะเกิดที่อุณหภูมิสูง (Deer et al., 1971)

โครงสร้างผลึกซิลิกาแต่ละโครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุล  $\text{SiO}_4$  ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเกาะอยู่ที่มุมและอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลางประกบกันอยู่เป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าของ  $\text{SiO}_4$  ( $\text{SiO}_4$  tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในแต่ละโครงสร้างผลึกซิลิกาอะตอมออกซิเจนจะเกาะกับอะตอมซิลิกอน 2 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงในการเปลี่ยนโครงสร้างระหว่าง  $\alpha$ - กับ  $\beta$ - เช่น  $\alpha$ -ควอร์ซไปเป็น  $\beta$ -ควอร์ซ การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมเพียงเล็กน้อยในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกับที่อุณหภูมิสูงเช่น โครงสร้างผลึกแบบควอร์ซเปลี่ยนไปเป็น ไทรดิเมอร์หรือคริสโทบอไลท์ การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดเนื่องจากการสลายของพันธะและการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอม (Deer et al., 1971)



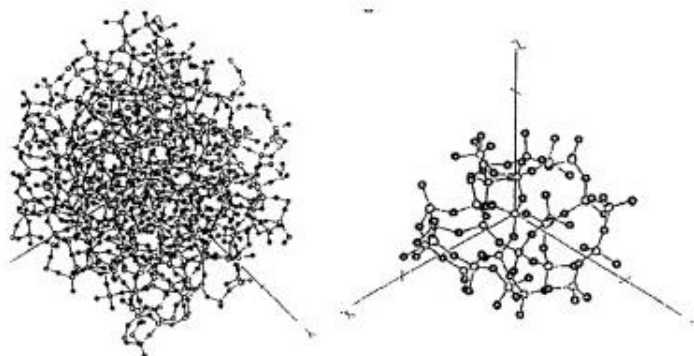
รูปที่ 2.5 รูปทรงสี่หน้าของ  $\text{SiO}_4$  ( $\text{SiO}_4$  tetrahedral) (Deer et al., 1971)

$\beta$ -ควอ์ซมีความสมมาตรแบบเฮกซะกอนอล (hexagonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ  $P6_22$  หรือ  $P6_366$  และหน่วยเซลล์ (unit cell) หนึ่งหน่วยประกอบด้วยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 3 โมเลกุลซึ่งประกอบกันเป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้า ดังแสดงในภาพที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึก  $\beta$ -ควอ์ซฉายลงบนระนาบ (0001) (Deer et al., 1971)

จะเห็นได้ว่าหน่วยรูปทรงสี่หน้าเกาะกลุ่มเป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.7 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์คือ  $a$  5.01 Å และ  $c$  5.47 Å  $\alpha$ -ควอ์ซมีสมมาตรแบบไตรกอนอล (trigonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ  $P3_121$  หรือ  $P3_221$  ในหน่วยเซลล์หนึ่งเซลล์ประกอบด้วยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 3 โมเลกุลโครงสร้างผลึกของ  $\alpha$ -ควอ์ซมีลักษณะคล้าย ๆ  $\beta$ - คือมีการเกาะตัวกันของรูปทรงสี่หน้าของ  $\text{SiO}_4$  เป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมแต่จะมีการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์ คือ  $a$  4.913 Å และ  $c$  5.405 Å (Deer et al., 1971)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของ  $\alpha$ -ควออร์ซ โครงสร้างผลึกของ  $\alpha$ -ควออร์ซ ฉายลงบน (0001) (Decr et al., 1971)

## 2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali activator)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้สำหรับงานจีโอโพลิเมอร์ ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ดังนี้

### 2.7.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขออก เช่น อุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษ ตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำ แล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

### 2.7.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่างลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วน โดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ ) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางเคมีของ โซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วน โดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ )	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



โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาค้างนี้คือชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลวชนิดที่ 2

Property	Percent by weight
Na <sub>2</sub> O	15.36 %
SiO <sub>2</sub>	33.28 %
H <sub>2</sub> O	51.36 %

## 2.8 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ ดังสูตรโมเลกุล



โดย	M	คือ	ธาตุอัลคาไล
	-	คือ	การยึดเกาะพันธะ
	z	คือ	จำนวน โมเลกุล
	n	คือ	หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่
	w	คือ	จำนวน โมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งพบว่าสามารถใช้แก้ปัญหานอกจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า หรือวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดี เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมถ่านหินกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-90°C ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งใช้เป็นสารพวก อัลคาไลซิลิเกต (Alkali silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

วัสดุจีโอโพลิเมอร์จะจัดเรียงโครงสร้างเป็นแบบ 3 มิติ (3D) สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างทางวิศวกรรมได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปสามารถจำแนกโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ออกเป็น 3 ชนิด ตามการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของซิลิกอน อลูมิเนียม และออกซิเจน ดังนี้

- โพลี (ไซอะเลท) (-Si-O-Al-O-)
- โพลี (ไซอะเลท – ไซลอกโซ) (-Si-O-Al-O-Si-O-)
- โพลี (ไซอะเลท – ไดไซลอกโซ) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)

สารปอซโซลานโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมี คือซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่ออบจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการช่วยยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (Artificial pozzolan)

## 2.9 จีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization)

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นสารจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีรูปพรรณสัณฐานแน่นอนเป็นส่วนประกอบของสารลักษณะ อัดฉุน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอลูมินา และซิลิกา ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเมื่อผสมสารละลายของอัลคาไลสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า ก่อตัว และให้กำลังรับแรงได้ดี ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น

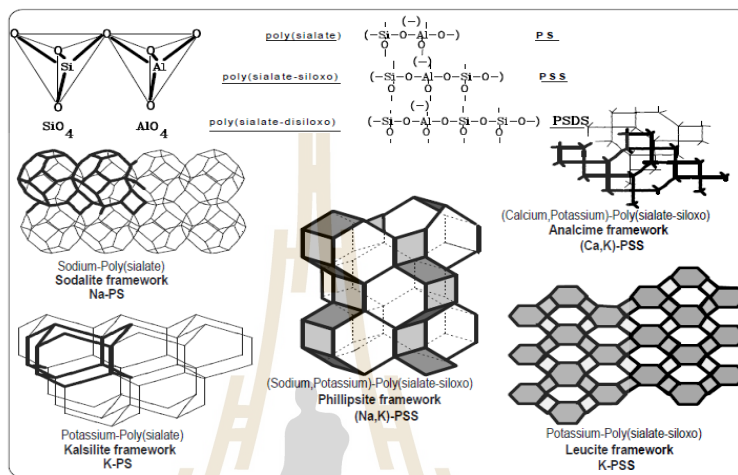
### 2.9.1 การชะละลาย (dissolution)

ถ้าลอยเมื่อผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ โดยอลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมา เนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้นส่วนหนึ่งของถ้าลอยจะถูกทำลายที่ผิว ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิว และสารละลายจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

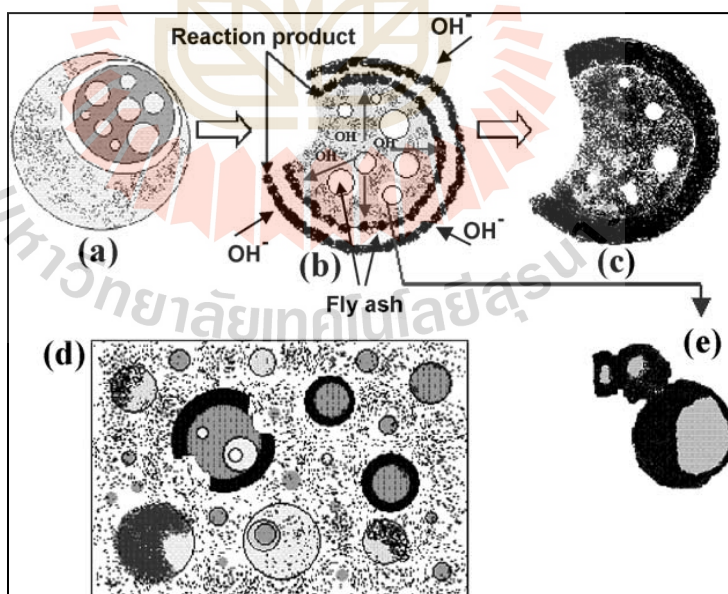
### 2.9.2 การทำปฏิกิริยาถูกลูโซ่ (polymerization)

ผลผลิตของปฏิกิริยาเบื้องต้นเป็นหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ  $\text{Si}^{4+}$  และ  $\text{Al}^{3+}$  ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบ 4 แขนกับออกซิเจน หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ซึ่งจะมีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ โพลีไซอะเลท (polysialate, PS) โพลีไซอะเลทไซลอกโซ (polysialate siloxo, PSS) และ โพลีไซอะเลทไดไซลอกโซ (polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปริมาณของ  $\text{SiO}$  เพิ่มขึ้นจากหนึ่ง

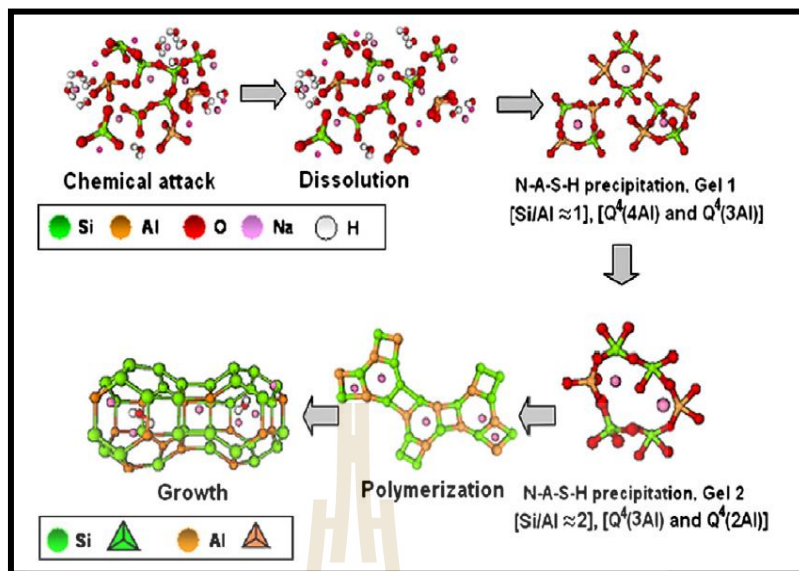
เป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงโพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกันก็จะเกิดมากขึ้น และหนาแน่นขึ้นทำให้เกิด โครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้ รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา (Activator) กับเถ้าลอย (Fly ash) จนเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ ส่วนรูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาจีโอ โพลิเมอร์ในระดับ โมเลกุล



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์ (Davidovits,1991)



รูปที่ 2.9 แบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาของ Activator กับ Fly ash (Fernández-Jiménez et al., 2005)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Shi et al., 2011)

## 2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายปูนซีเมนต์ เมื่อผสมดินขาวเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารกระตุ้นสูงเกินกว่าค่าเหมาะสม การก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างดินขาวเผาต่อ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

Hardjite et al. (2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.095 และ 0.120 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถาถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถาถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลีเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโนซิลิเกตโพลีเมอร์สามารถผลิตจากวัสดุขี้เถ้าที่มีซิลิกาและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าหิน องค์กรประกอบทางเคมีของจีโอโพลีเมอร์คล้ายกับซีโอไลต์ โครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลีเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลีเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้าง มาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลีเมอร์

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข(2556) ได้นำเสนอคุณสมบัติทางกายภาพ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซแบบแช่น้ำของหินคลุกปลายตะแกรง และหินคลุกปลายตะแกรงผสมซีเมนต์ ผลการศึกษาแสดงว่า คุณสมบัติต่างๆ มีค่าสูงกว่าที่ค่าที่ถูกกำหนดไว้ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ในการนำมาก่อสร้างเป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง

ปฏิมาพร สุขมาก และคณะ(2556) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดในถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์ ได้แก่ อัตราส่วนของถ้ำลอยต่อดิน, อัตราส่วนของสารกระตุ้นกับถ้ำลอย และอุณหภูมิที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของสารกระตุ้นที่ 0.7 และอัตราส่วนของสารกระตุ้นกับถ้ำลอยที่ 0.6 จะทำให้วัสดุมีกำลังอัดสูงที่สุด

อิทธิกร ภูมิพันธ์และคณะ(2016) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงดินลูกรังด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์ จากการศึกษาพบว่า วัสดุที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 20 % และสารปรับปรุงจีโอโพลีเมอร์ ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  ratio = 90:10) ให้กำลังอัดสูงสุดและเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นทาง

อิทธิกร ภูมิพันธ์และคณะ(2016) ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการนำ RAP มาผสมกับถ้ำลอยแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกรัน และได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า RAP สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นทาง, วัสดุรองพื้นทางเมื่อใช้ตะกรันหลัก 10 % S มาผสมกับ RAP

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการศึกษา

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วย การหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมการหาค่าความชื้นเหมาะสมของตัวอย่าง การบดอัดตัวอย่าง การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อ ดังต่อไปนี้

#### 3.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

3.1.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้มาตรฐาน และข้อกำหนดการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท ดังต่อไปนี้

- ต้องมีขนาดคละกัอย่างสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก มีเม็ดที่แข็งเหนียวไม่ผุ
- สะอาดปราศจากวัสดุอื่นเจือปน ห้ามนำวัสดุจำพวกเชล (shale) มาใช้งาน
- มีค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 25 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข. (ท) 501.5 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว
- มีค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (plasticity index) ไม่มากกว่าร้อยละ 6 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.6 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก
- มีค่าของความสึกหรอ (percentage of wear) ไม่มากกว่าร้อยละ 40 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.9 : วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ Los Angeles abrasion
- มีค่าของส่วนที่ไม่คงทนไม่มากกว่าร้อยละ 9 ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.12 : วิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (soundness) ของมวลรวม โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ
- มีค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R.) ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุด ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.3 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor density) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลติกคอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟซทริตเมนต์ หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.3 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์
- มีขนาดคละตามตารางที่ 2.1 ตารางขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก ตามวิธีการทดสอบที่ มทข.(ท) 501.8 : วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุ

- ส่วนละเอียด (fine aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเดียวกันกับส่วนหยาบ (coarse aggregate) หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบท ทั้งนี้เมื่อผสมกันแล้วต้องมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท
- การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุกที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้มาตรฐาน และข้อกำหนดการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท ดังต่อไปนี้

### 3.1.2 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของกรวดโม้ ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้มาตรฐาน และข้อกำหนดการทดสอบของกรมทางหลวง ดังต่อไปนี้

- มีความสึกหรือเมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.202/2515 "วิธีการทดสอบหาค่าความสึกหรือของมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) โดยใช้เครื่อง Los - Angeles Abrasion" ไม่เกินร้อยละ 40
- มีส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ของมวลรวมหยาบ เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 213/2531 "วิธีการทดสอบหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม" โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบแล้ว ไม่เกินร้อยละ 9
- ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate)
- มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.205/2517 "วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง" ต้องมีขนาดคละตามที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.3
- ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
- มี Liquid Limit เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.102/2515 "วิธีการทดสอบหา Liquid Limit (L.L.) ของดิน" ไม่เกินร้อยละ 25
- มี Plasticity Index เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.103/2515 "วิธีการทดสอบหา Plastic Limit และ Plasticity Index" ไม่เกินร้อยละ 6
- มี CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.109/2517 "วิธีการทดสอบเพื่อหา CBR" ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ความแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.108/2517 "วิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน"

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง

#### 3.2.1 สัดส่วนระหว่าง หินคลุกผสมกรวดโม้ กับ etailoy

- หินคลุก 100 %
- กรวดโม้ 100 %
- หินคลุก 90 % ผสม กรวดโม้ 10 %
- หินคลุก 80 % ผสม กรวดโม้ 20 %
- หินคลุก 70 % ผสม กรวดโม้ 30 %
- หินคลุก 50 % ผสม กรวดโม้ 50 %
- เลือกสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยetailoyบจีโอโพลิเมอร์ โดยผสมetailoyที่สัดส่วน 5%,10%,15% โดยน้ำหนัก

#### 3.2.2. เตรียมสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali-activator)

ผู้ศึกษาได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali-activator) ในการศึกษาครั้งนี้ คือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกตเกรด C-53 จากบริษัทวิโรฒวิทยภัณฑ์ จำกัด ประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{O}$  15.50 %  $\text{SiO}_2$  32.7 % และน้ำ 51.75 % โดยน้ำหนักสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์เกล็ด (ความบริสุทธิ์ 99%) จากบริษัทวิโรฒวิทยภัณฑ์ จำกัด ผสมกับน้ำกลั่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้สารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยา (Liquid Alkali Activator) เตรียมจากการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีสัดส่วน ดังนี้สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์คือ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50 : 50$  ผสมกับวัสดุตั้งต้น(หินคลุกและetailoy) ที่ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ในแต่ละสัดส่วน

#### 3.2.3 การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Crushed rock-FA-Geopolymer)

โดยผสมหินคลุกกับกรวดโม้ และetailoy ตามสัดส่วนที่กำหนด ในเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาของแต่ละสัดส่วน ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50 : 50$ ) ผสมกับวัสดุตั้งต้น (Binder) โดยใช้เวลาผสมประมาณ 5-10 นาที กับแต่ละสัดส่วน สัดส่วนมีความเหมาะสมที่จะบดอัด จากนั้นบดอัดตามการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction) ทล.-ท 108/2517 ในการเก็บตัวอย่างหลังจากบดอัดแล้วจะห่อด้วยพลาสติกใสเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27-30 °C) ที่มีอายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะทำการเก็บตัวอย่างจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อความถูกต้องแม่นยำ



### 3.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวก่อนตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดวันที่จะทดสอบแกะพลาสติกออกจากก้อนตัวอย่างนำไปแช่น้ำเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อน 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบกำลังอัด โดยตัวกำลังอัดที่ควบคุมจะต้องไม่น้อยกว่า 1,724 และ 2,413 กิโลปาสกาล สำหรับทางหลวงที่มีปริมาณจราจรต่ำ และทางหลวงที่มีปริมาณจราจรสูง ตามลำดับ

### 3.4 ศึกษาต้นทุนของหินคลุกกับกรวดโม

ทำการเปรียบเทียบราคาต้นทุนในการนำวัสดุหินคลุกมาใช้จากแหล่งอื่น กับการนำวัสดุกรวดโมที่มีอยู่ในพื้นที่มาผสมตามสัดส่วนที่ระบุไว้ และทำการวิเคราะห์ต้นทุนต่อผลตอบแทนเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการเลือกใช้งานวัสดุหินคลุกผสมกรวดโมอัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีความคุ้มค่ามาใช้งาน



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, USC) และการเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้าง ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุ

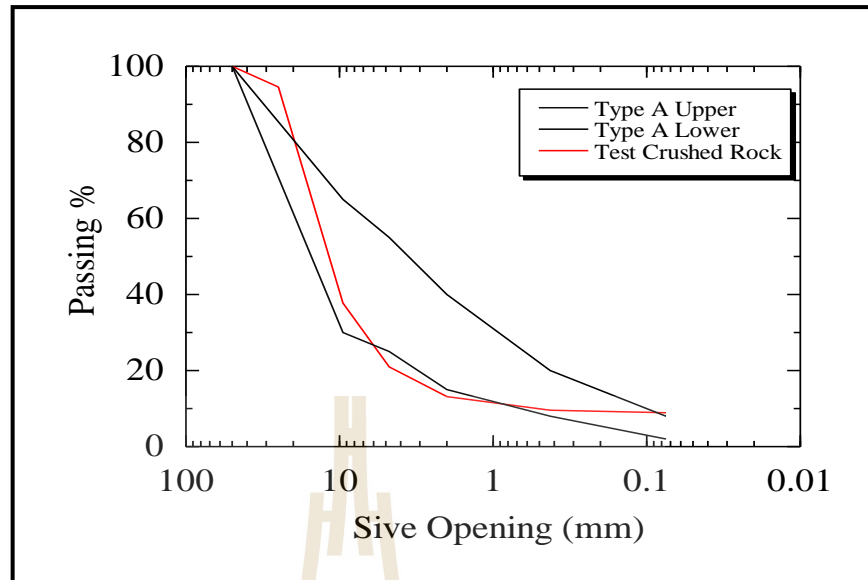
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย หินคลุก และกรวดโม ซึ่งเป็นวัสดุตั้งต้นที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพด้วย เถ้าลอย ซึ่งเป็นวัสดุพอซโซลานและเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการเกิดจีโอโพลิเมอร์ ที่กล่าวมาข้างต้นเหล่านี้ คือ วัสดุตั้งต้นในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 หินคลุก (Crushed Rock)

หินคลุกที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างมาจากโรงโม่หินยังสัง ตำบลนาบัว อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแสดงในตารางที่ 4.1 และขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก

Content	Crushed Rock	Standard for base course
Specific Gravity	2.69	
Liquid limit	Non Liquid	$\leq 25$
Plastic limit	Non Plastic	$\leq 6$
Plastic index	Non Plastic	$\leq 6$
Maximum dry unit weight	2.244	$\geq 1.440$
Optimum moisture content	8.11	
CBR at 95% of dry density	50.90	$\geq 80$
LA abrasion	18.98	$\leq 40$



รูปที่ 4.1 ขนาดผลของวัสดุหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic Index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอ (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 18.98 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40%) ซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 50.90 วัสดุที่นำมาทดสอบไม่ผ่านตามมาตรฐานกำหนดไว้ ซึ่งมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก กำหนดค่า ซี.บี.อาร์ ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดผลของวัสดุหินคลุกจัดอยู่ในเกรด ก ซึ่งมาตรฐานหินคลุกที่ใช้ในกรมทางหลวงชนบทมีอยู่ 3 เกรด คือ ก, ข และ ค วัสดุที่นำมาใช้จึงถือว่าเป็นวัสดุที่ผ่านเกรด

#### 4.1.2 กรวดโม (Crushed Gravel)

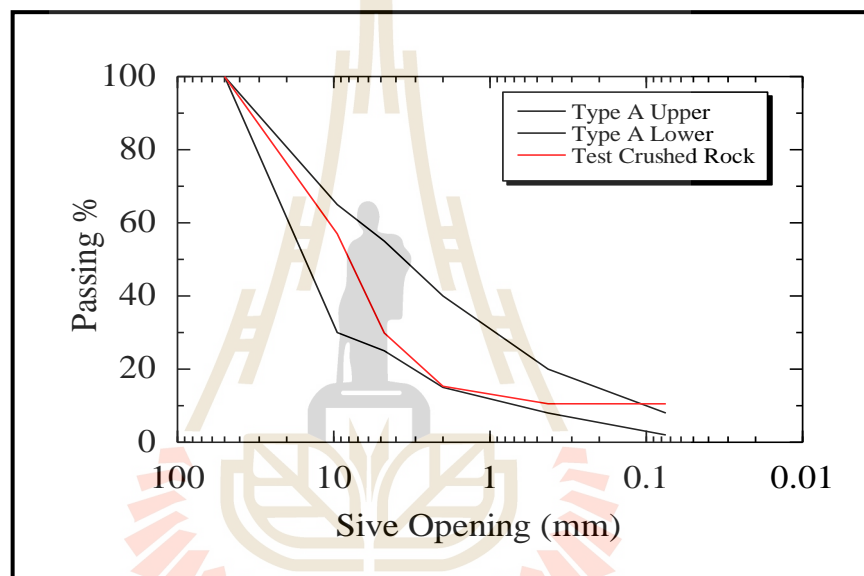
กรวดโมที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างมาจากแหล่งแม่น้ำโขง จังหวัดมุกดาหาร ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแสดงในตารางที่ 4.2 และขนาดผลของวัสดุกรวดโมที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของกรวดโม

Content	Crushed Gravel	Standard for base course
Specific Gravity	2.59	
Liquid limit	Non Liquid	$\leq 25$
Plastic limit	Non Plastic	$\leq 6$

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Content	Crushed Gravel	Standard for base course
Plastic index	Non Plastic	$\leq 6$
Maximum dry unit weight	1.998	$\geq 1.440$
Optimum moisture content	5.66	
CBR at 95% of dry density	20.02	$\geq 90$
LA abrasion	27.00	$\leq 40$



รูปที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุกรวดโมที่ใช้ในงานวิจัย

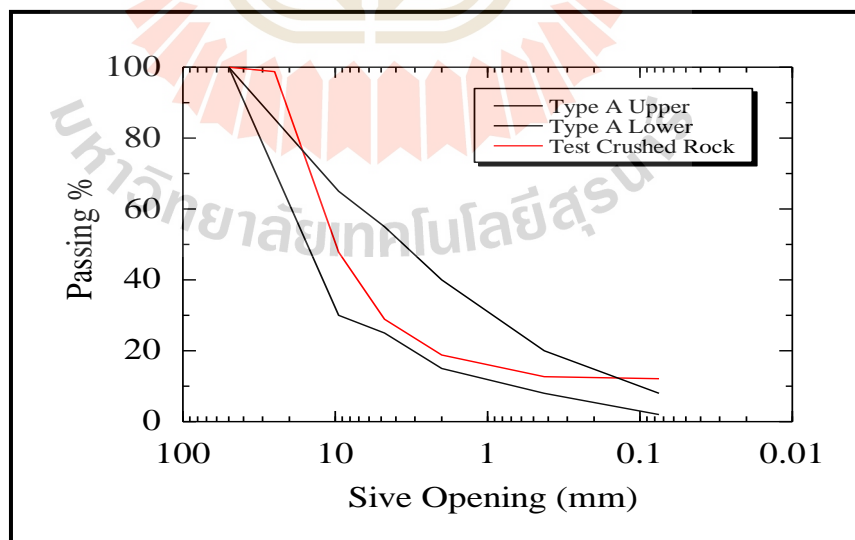
ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic Index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอก (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 27.00 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40%) ค่า ซี.บี.อาร์. (CBR) ที่ร้อยละ 20.02 ซึ่งมาตรฐานกรวดโม กำหนดค่า ซี.บี.อาร์. ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 วัสดุที่นำมาทดสอบนั้นเนื่องจากตัววัสดุมีผิวเรียบมน ลื่น ไม่มีฝุ่นทำให้เกิดช่องว่างทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ขนาดคละของวัสดุกรวดโมจัดอยู่ใน Class A ซึ่งมาตรฐานกรวดโมที่ใช้ในกรมทางหลวงมีอยู่ 2 class คือ A และ B วัสดุที่นำมาใช้งานวิจัยจึงถือว่าเป็นวัสดุทดเกรด

#### 4.1.3 หินคลุก (Crushed Rock) ผสมกรวดไม่ (Crushed Gravel) ที่อัตราส่วนต่างๆ

ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ ได้แก่ หินคลุก 90 % ผสมกรวดไม่ 10%, หินคลุก 80 % ผสมกรวดไม่ 20%, หินคลุก 70 % ผสมกรวดไม่ 30% และหินคลุก 50 % ผสมกรวดไม่ 50 % จะแสดงในตารางที่ 4.3 - 4.6 และขนาดผลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 4.3 - 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 90 % ผสมกรวดไม่ 10 %

Content	CR+CG	Standard for base course
Specific Gravity	2.69	
Liquid limit	Non Liquid	$\leq 25$
Plastic limit	Non Plastic	$\leq 6$
Plastic index	Non Plastic	$\leq 6$
Maximum dry unit weight	2.127	$\geq 1.440$
Optimum moisture content	6.38	
CBR at 95% of dry density	20.01	$\geq 80$
LA abrasion	20.64	$\leq 40$

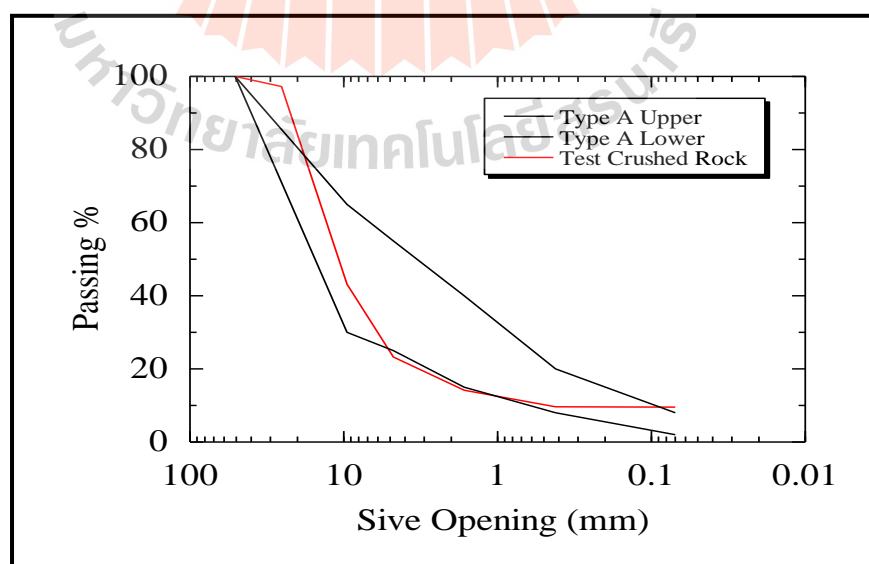


รูปที่ 4.3 ขนาดผลของวัสดุหินคลุก 90% ผสมกรวดไม่ 10% ที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic Index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอก (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 20.64 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40%) ซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 20.01 ซึ่งมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก กำหนดค่า ซี.บี.อาร์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละของวัสดุหินคลุกจัดอยู่ใน เกรด ก ซึ่งมาตรฐานหินคลุกที่ใช้ในกรมทางหลวงชนบทมีอยู่ 3 เกรด คือ ก, ข และ ค วัสดุที่นำมาใช้จึงถือว่าเป็นวัสดุที่ผ่านเกรด

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 80 % ผสมกรวดไม้ 20 %

Content	CR+CG	Standard for base course
Specific Gravity	2.67	
Liquid limit	Non Liquid	$\leq 25$
Plastic limit	Non Plastic	$\leq 6$
Plastic index	Non Plastic	$\leq 6$
Maximum dry unit weight	2.222	$\geq 1.440$
Optimum moisture content	7.29	
CBR at 95% of dry density	25.10	$\geq 80$
LA abrasion	18.90	$\leq 40$

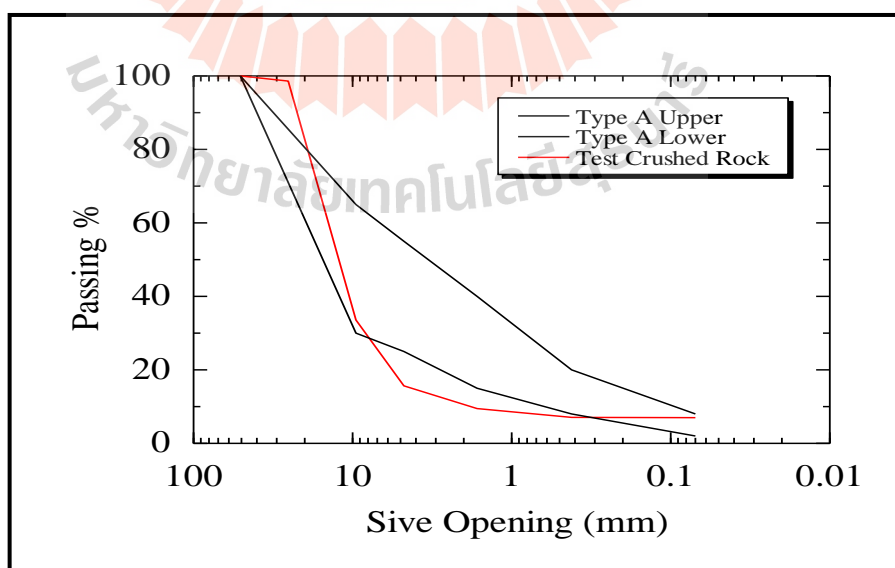


รูปที่ 4.4 ขนาดคละของวัสดุหินคลุก 80% ผสม กรวดไม้ 20% ที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic Index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอก (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 18.90 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40%) ซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 25.10 ซึ่งมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก กำหนดค่า ซี.บี.อาร์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละของวัสดุหินคลุกจัดอยู่ใน เกรด ก ซึ่งมาตรฐานหินคลุกที่ใช้ในกรมทางหลวงชนบทมีอยู่ 3 เกรด คือ ก, ข และ ค วัสดุที่นำมาใช้จึงถือว่าเป็นวัสดุที่ผ่านเกรด

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 70 % ผสมกรวดไม้ 30 %

Content	CR+CG	Standard for base course
Specific Gravity	2.66	
Liquid limit	Non Liquid	$\leq 25$
Plastic limit	Non Plastic	$\leq 6$
Plastic index	Non Plastic	$\leq 6$
Maximum dry unit weight	2.221	$\geq 1.440$
Optimum moisture content	7.71	
CBR at 95% of dry density	53.10	$\geq 80$
LA abrasion	19.42	$\leq 40$

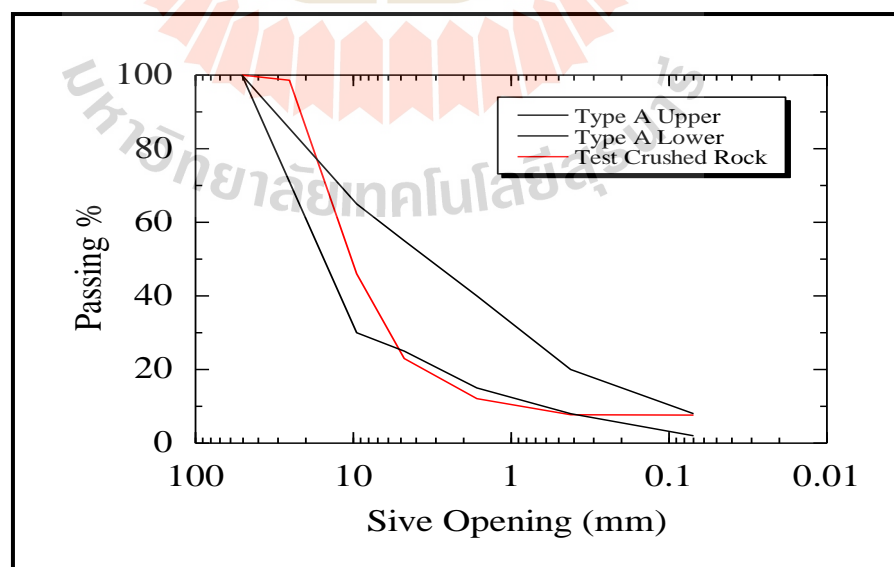


รูปที่ 4.5 ขนาดคละของวัสดุหินคลุก 70% ผสม กรวดไม้ 30% ที่ใช้งานวิจัย

ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic Index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอก (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 19.42 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40%) ซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 53.10 ซึ่งมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก กำหนดค่า ซี.บี.อาร์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละของวัสดุหินคลุกจัดอยู่ใน เกรด ก ซึ่งมาตรฐานหินคลุกที่ใช้ในกรมทางหลวงชนบทมีอยู่ 3 เกรด คือ เกรด ก, เกรด ข และ เกรด ค วัสดุที่นำมาใช้จึงถือว่าเป็นวัสดุที่ผ่านเกรด

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก 50 % ผสมกรวดโม 50 %

Content	CR+CG	Standard for base course
Specific Gravity	2.68	
Liquid limit	Non Liquid	$\leq 25$
Plastic limit	Non Plastic	$\leq 6$
Plastic index	Non Plastic	$\leq 6$
Maximum dry unit weight	2.256	$\geq 1.440$
Optimum moisture content	5.91	
CBR at 95% of dry density	67.00	$\geq 80$
LA abrasion	21.04	$\leq 40$



รูปที่ 4.6 ขนาดคละของวัสดุหินคลุก 50% ผสม กรวดโม 50% ที่ใช้ในงานวิจัย



ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic Index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอก (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 21.04 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40%) ซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 67.00 ซึ่งมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก กำหนดค่า ซี.บี.อาร์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละของวัสดุหินคลุกจัดอยู่ใน เกรด ก ซึ่งมาตรฐานหินคลุกที่ใช้ในกรมทางหลวงชนบทมีอยู่ 3 เกรด คือ เกรด ก, เกรด ข และ เกรด ค วัสดุที่นำมาใช้จึงถือว่าเป็นวัสดุที่ผ่านเกรด

#### 4.1.4 เถ้าลอย (Fly Ash)

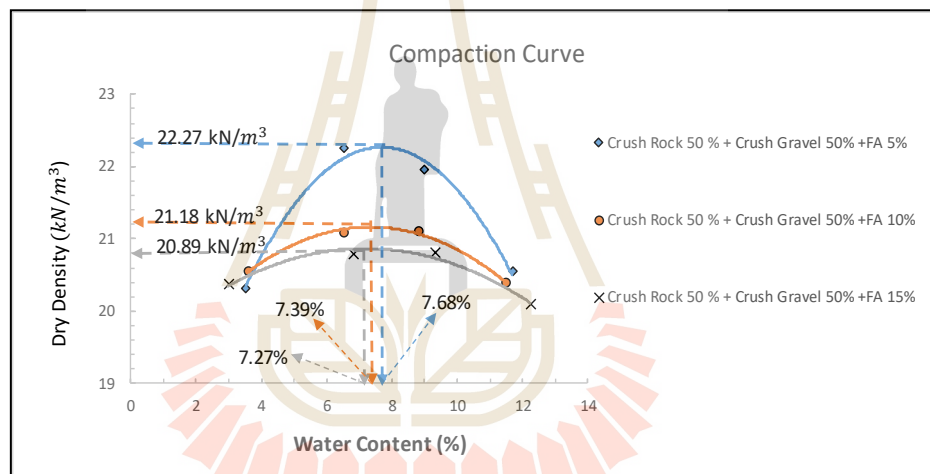
เถ้าลอยที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นแหล่งเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และมีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างคงที่ เถ้าลอยจากแหล่งนี้ได้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อย่างกว้างขวาง องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของเถ้าลอย ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี X – ray fluorescence (XRF) แสดงไว้ ดังตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 25.327,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 8.463,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  19.415 และ  $\text{CaO}$  ร้อยละ 35.702 ผลรวมของ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 53.205 จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C (Type C) หรือเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium FA) และปริมาณ  $\text{SO}_3 = 5.034$  (ข้อกำหนดไม่เกินร้อยละ 5) ค่า  $\text{LOI} = 0.326$  (ข้อกำหนดไม่เกินร้อยละ 6) จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

ตารางที่ 4.7 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly Ash)

Chemical Compositions (%wt)	Fly Ash (FA)
Silicon Dioxide ( $\text{SiO}_2$ )	25.327
Aluminium Oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	8.463
Iron Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	19.415
Calcium Oxide ( $\text{CaO}$ )	35.702
Magnesium Oxide ( $\text{MgO}$ )	0.615
Potassium Oxide ( $\text{K}_2\text{O}$ )	2.354
Chemical Compositions (%wt)	Fly Ash (FA)
Sodium Oxide ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0.157
Sulfur Trioxide ( $\text{SO}_3$ )	5.034
Loss on Ignition (LOI)	0.326

#### 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแต่ละสัดส่วนแล้ว สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ คือสัดส่วนระหว่าง หินคลุก 50 % ผสม กรวดไม้ 50 % การทดสอบการบดอัดของหินคลุกผสมกรวดไม้และเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ดำเนินการเพื่อหาค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) โดยการนำมาผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในสัดส่วนที่เหมาะสม (ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์) รูปที่ 4.7 แสดงกราฟบดอัดของหินคลุกผสมกรวดไม้และเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานสำหรับส่วนผสม (CR50%+CG50%:FA5%, CR50%+CG50%:FA10%, CR50%+CG50%:FA15%) และตัวเร่งปฏิกิริยา ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50:50$ )



รูปที่ 4.7 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) มีค่า 22.27, 21.18 และ 20.89 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.68, 7.39 และ 7.27 ตามลำดับ ผลของ FA ที่มีต่อค่าความหนาแน่นแห้งของวัสดุรวมเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย ในมวลรวมมากขึ้น ความหนาแน่นแห้งของวัสดุรวมมีแนวโน้มลดลง ส่วนผลที่มีต่อค่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม พบว่าปริมาณของเถ้าลอย ส่งผลน้อย ทำให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมแต่ละสัดส่วน มีค่าไม่แตกต่างกันมาก (7.27 % - 7.68 %) รูปที่ 4.8 (a) แสดงภาพวัสดุหินคลุก รูปที่ 4.8 (b) แสดงภาพวัสดุกรวดไม้ รูปที่ 4.8 (c) แสดงภาพเถ้าลอย รูปที่ 4.8 (d) แสดงรูปสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และรูปที่ 4.8 (e) แสดงรูปสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )



(a) หินคลุก



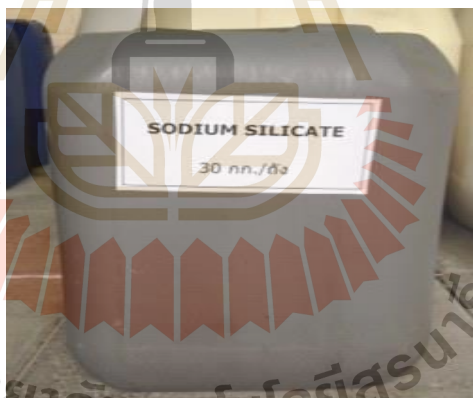
(b) กรวดโม



(c) ฝุ่นละเอียด



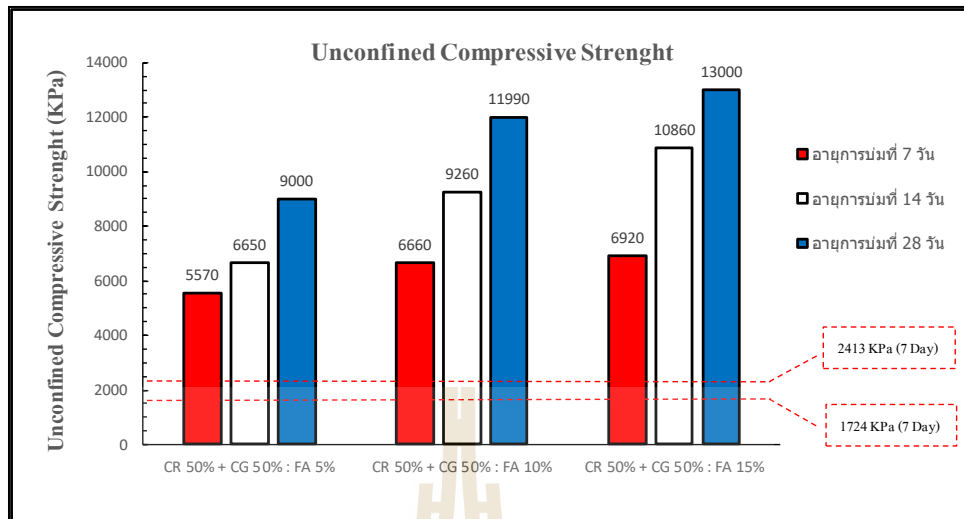
(d) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

(e) โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

รูปที่ (a) วัสดุหินคลุก (b) วัสดุกรวดโม (c) ฝุ่นละเอียด (d) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ (e) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

#### 4.3 กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

รูปที่ 4.9 กราฟการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ที่ สัด ส่วน (CR50% + CG50% : FA5% , CR50% + CG50% : FA10% , CR50% + CG50% : FA15%) และตัวเร่งปฏิกิริยา ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH = 50:50)



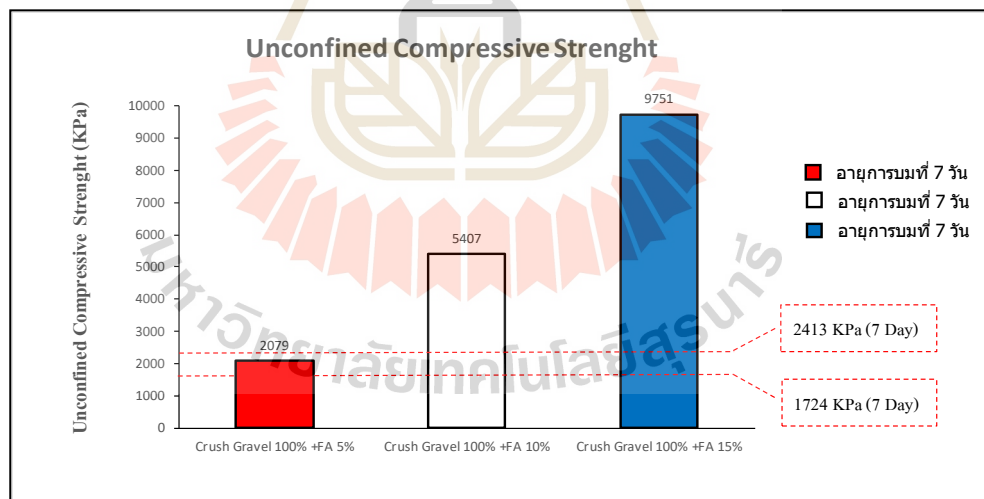
รูปที่ 4.9 ค่ากำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่ากำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่มีการพัฒนากำลังขึ้นตามอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากการทดสอบที่อายุการบ่มที่ 7 วัน ที่สัดส่วน (CR 50% + CG 50% : FA 5%, CR 50% + CG 50% : FA 10%, CR 50% + CG 50% : FA 15%) มีค่า 5570 (FA 5%), 6660 (FA 10%) และ 6920 (FA 15%) KPa อายุการบ่มที่ 14 วัน มีค่า 6650 (FA 5%), 9260 (FA 10%) และ 10860 (FA 15%) KPa อายุการบ่มที่ 28 วัน มีค่า 9000 (FA 5%), 11990 (FA 10%) และ 13000 (FA 15%) KPa ตามลำดับ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าที่ทำการทดสอบมีค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่าขอมให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่าขอมให้ 1,724 KPa) รูปที่ 4.10 แสดงภาพการวิบัติของวัสดุที่ผ่านการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว



รูปที่ 4.10 การวิบัติของวัสดุที่ผ่านการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

รูปที่ 4.10 แสดงกราฟการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ที่สัดส่วน(CG 100% : FA 5% ,CG 100% : FA 10% ,CG 100% : FA 15%) และตัวเร่งปฏิกิริยา ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  :  $\text{NaOH}$  = 50:50)



รูปที่ 4.11 ค่ากำลังอัดของกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่ากำลังอัดของกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน ที่สัดส่วน(CG 100% : FA 5% ,CG 100% : FA 10% ,CG 100% : FA 15%) และตัวเร่งปฏิกิริยา ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  :  $\text{NaOH}$  = 50:50) มีค่า 2079(FA 5%),5407(FA 10%) และ 9751(FA 15%) KPa ตามลำดับ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าทุกอัตราส่วนผ่านมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรม

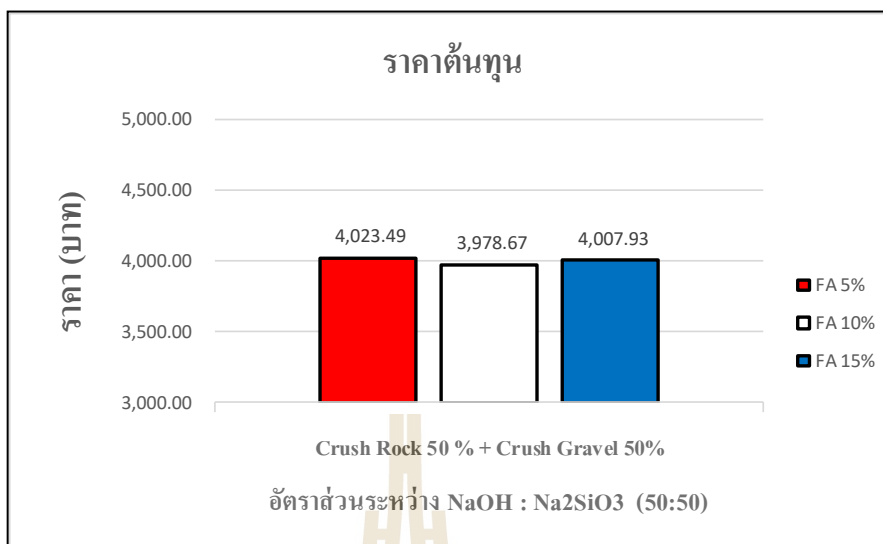
ทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa) ที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่วนอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 KPa) ได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง กรวดโม้(CG) ผสมเถ้าลอย 10 % และอัตราส่วนระหว่าง กรวดโม้(CG) ผสมเถ้าลอย 15 % มีค่า 5407 KPa และ 9751 KPa ตามลำดับ

#### 4.4 เปรียบเทียบราคาต้นทุน

ทำการเปรียบเทียบราคาต้นทุนของหินคลุกผสมกรวดโม้ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ตามอัตราส่วนต่างๆ

- 1.) หินคลุก ราคา 648.08 บาท/ตัน จากโรงโม่ย้งลั้ง ตำบลนาบัว อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์
- 2.) กรวดโม้ ราคา 541.58 บาท/ตัน จากร้านรุ่งโรจน์ อ.เมือง จ.หัวคุดดาหาร
- 3.) เถ้าลอย ราคา 1,631.20 บาท/ตัน จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จ.ลำปาง
- 4.) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ราคา 50 บาท/กิโลกรัม จากบริษัท วิโรฒวิทยากันท์ จำกัด นครราชสีมา ใช้ผสมกับน้ำที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ต้นทุนจะลดลงเป็น 20 บาท/กิโลกรัม
- 5.) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ราคา 67.16 บาท/กิโลกรัม จากบริษัท วิโรฒวิทยากันท์ จำกัด นครราชสีมา

จากรูปที่ 4.12 แสดงต้นทุนของวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วน 50 : 50 ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยคิดจากปริมาณหินคลุกผสมกรวดโม้ที่ 1,000 กิโลกรัม พบว่าอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa) ค่าใช้จ่ายน้อยสุดที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้ 50:50 เท่ากับ 3,978.67 บาท ค่าใช้จ่ายมากที่สุดที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 5 ของน้ำหนักวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้ 50:50 เท่ากับ 4,023.49 บาท



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงต้นทุนของวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วน 50 : 50 ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ

การวิเคราะห์ต้นทุนต่อผลตอบแทน (Cost – Benefit Analysis) เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการเลือกใช้งานวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วน 50 : 50 ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่มีความคุ้มค่าใช้งาน รูปที่ 4.13 แสดงต้นทุนต่อกำลังอัดของวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วน 50 : 50 ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ต่ออายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน พบว่า

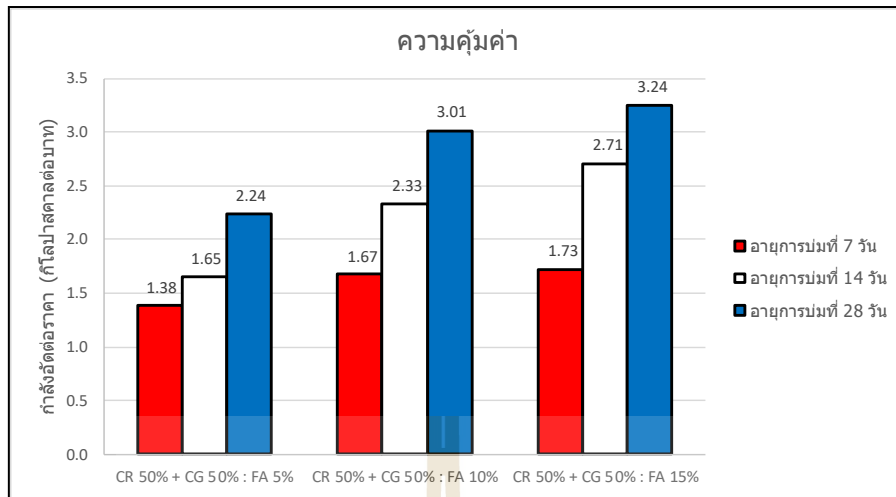
อัตราส่วนสารกระตุ้น NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ที่อายุการบ่ม 7 วัน ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่าที่สุด ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15

อัตราส่วนสารกระตุ้น NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ที่อายุการบ่ม 14 วัน ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่าที่สุด ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15

อัตราส่วนสารกระตุ้น NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ที่อายุการบ่ม 28 วัน ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่าที่สุด ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15

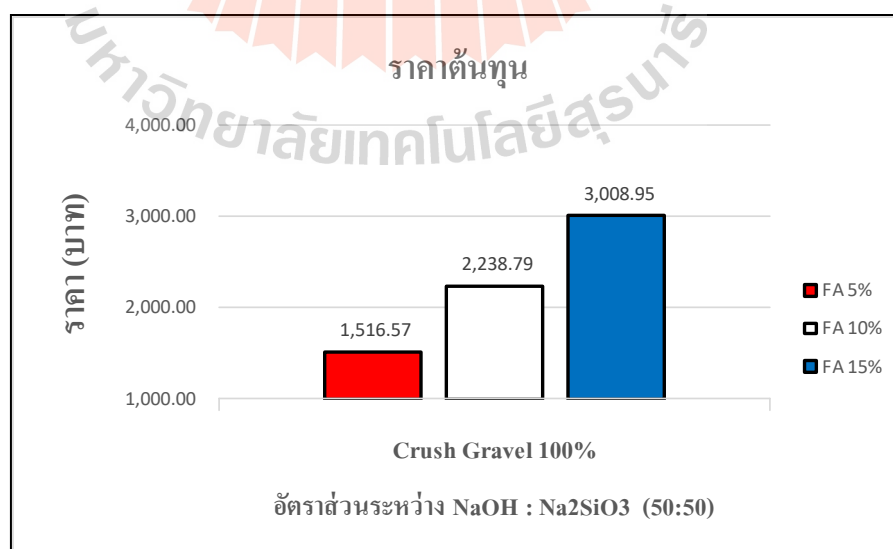
ขณะที่ต้นทุนต่อกำลังอัดจะคุ้มค่าที่สุดเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

โดยกำลังอัดต่อต้นทุนที่คุ้มค่าที่สุดของอัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (จ่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (จ่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล) เท่ากับ 1.38 กิโลปาสกาล/บาท ที่อายุการบ่ม 7 วัน ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 5



รูปที่ 4.13 ต้นทุนต่อกำลังอัดของวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วน 50 : 50 ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยอิโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ต่ออายุการบ่มที่ 7,14 และ 28 วัน

จากรูปที่ 4.14 แสดงต้นทุนของกรวดโม้อปรับปรุงด้วยเถ้าลอยอิโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยคิดจากปริมาณกรวดโม้อที่ 1,000 กิโลกรัม พบว่าอัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa) ค่าใช้จ่ายน้อยสุดที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุกรวดโม้อเท่ากับ 2,238.79 บาท ค่าใช้จ่ายมากที่สุดที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15 ของน้ำหนักวัสดุกรวดโม้อเท่ากับ 3,008.95 บาท



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงต้นทุนของกรวดโม้อปรับปรุงด้วยเถ้าลอยอิโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ

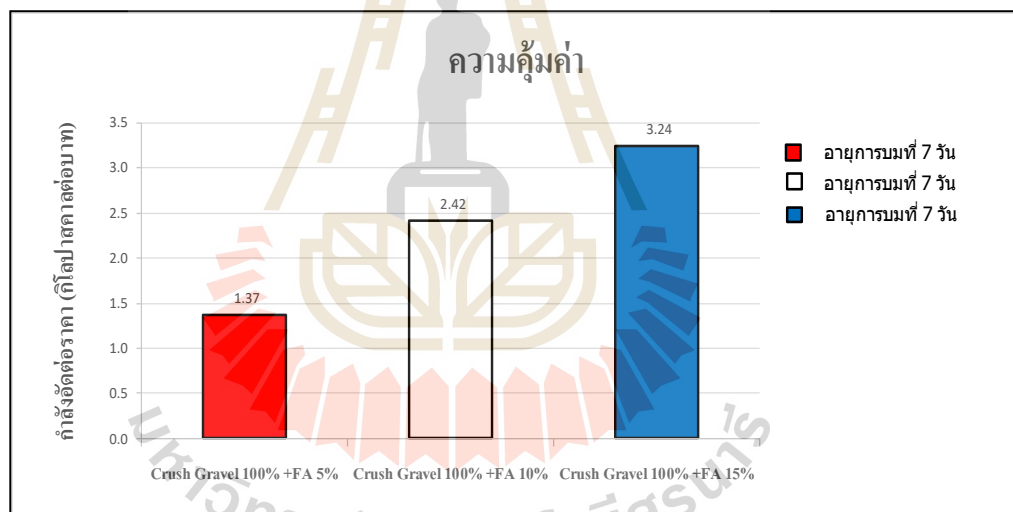


การวิเคราะห์ต้นทุนต่อผลตอบแทน (Cost – Benefit Analysis) เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการเลือกใช้งานวัสดุกรวดโมปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่มีความคุ้มค่าใช้งาน รูปที่ 4.15 แสดงต้นทุนต่อกำลังอัดของวัสดุกรวดโมปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ต่ออายุการบ่มที่ 7 พบว่า

อัตราส่วนสารกระตุ้น  $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่อายุการบ่ม 7 วัน ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่าที่สุด ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15

ขณะที่ต้นทุนต่อกำลังอัดจะคุ้มค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอย เพิ่มขึ้น

โดยกำลังอัดต่อต้นทุนที่คุ้มค่าที่สุดที่สุดของอัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล) เท่ากับ 2.42 กิโลปาสกาล/บาท ที่อายุการบ่ม 7 วัน ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10



รูปที่ 4.15 ต้นทุนต่อกำลังอัดของวัสดุกรวดโมปรับปรุงด้วยเถ้าลอย  
จีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ต่ออายุการบ่มที่ 7

## บทที่ 5

### สรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ของ การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางด้วย วัสดุอีโพลิเมอร์ ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วนที่เหมาะสม ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยอีโพลิเมอร์ และเปรียบเทียบต้นทุนในการก่อสร้างระหว่างหินคลุก กับกรวดโม้โดยประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

- 5.1.1 กำลังอัดของหินคลุกผสมกรวดโม้ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยอีโพลิเมอร์ที่มีการพัฒนา กำลังขึ้นตามอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากการทดสอบที่อายุการบ่มที่ 7 วัน ที่ สัดส่วน(CR 50% + CG 50% : FA 5%, CR 50% + CG 50% : FA 10%, CR 50% + CG 50% : FA 15%) มีค่า 5570(FA 5%) ,6660(FA 10%) และ 6920(FA 15%) KPa อายุการบ่มที่ 14 วัน มีค่า 6650(FA 5%), 9260(FA 10%) และ 1086(FA 15%) KPa อายุการบ่มที่ 28 วัน มีค่า 9000(FA 5%), 11990(FA 10%) และ 13000(FA 15%) KPa ตามลำดับ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าที่ทำการทดสอบมีค่ากำลังอัดสูงกว่า มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอม ให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa)
- 5.1.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของหินคลุกผสมกรวดโม้ที่ได้ทำการทดสอบตามข้อกำหนด ของมาตรฐานงานทาง คือ อัตราส่วนระหว่าง หินคลุก 50% ผสมกรวดโม้ 50% และ เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยอีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ นั้นมีค่ากำลัง อัดสูงกว่ามาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทาง หลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa)
- 5.1.3 กำลังอัดของวัสดุหินคลุกผสมกรวดโม้อัตราส่วน 50:50 ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยอีโพลิเมอร์ ที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทาง หลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa) และกำลังอัดต่อต้นทุนคุ่มค่า

มากที่สุด เท่ากับ 1.38 กิโลปาสกาล/บาท ที่อายุการบ่ม 7 วัน ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 5

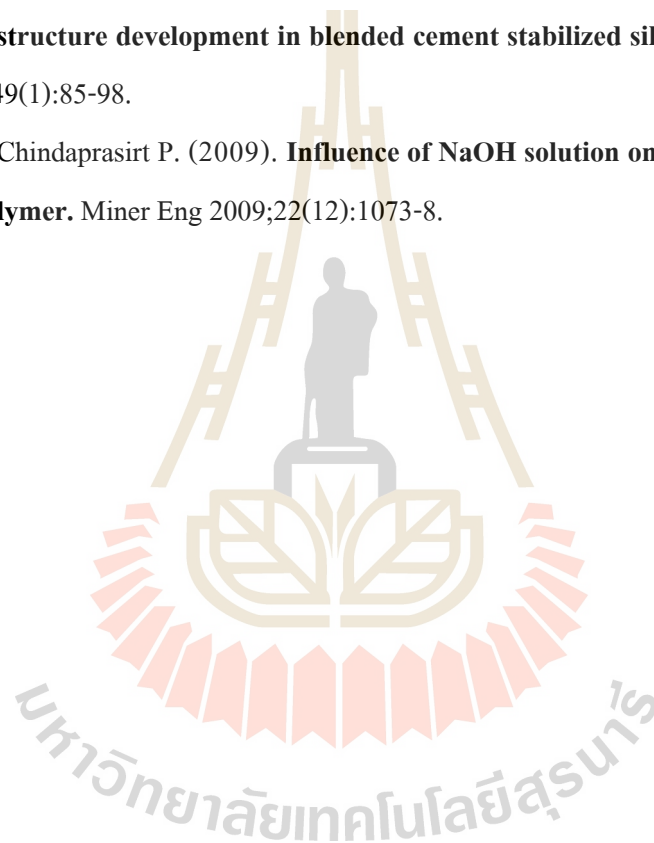
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1. งานวิจัยนี้ศึกษากำลัของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ผลจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างหินคลุกผสมกรวดโมอัตราส่วน 50:50 ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ 5%,10% และ15% ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) 50:50 นั้นมีค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 KPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 KPa) แต่มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่สูง
- 5.2.2. งานวิจัยนี้ศึกษากำลัของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และปริมาณเถ้าลอย ซึ่งมีราคาสูงหากต้องการลดต้นทุน โดยอาจใช้วัสดุอื่นในการทดแทน เช่น เถ้าลอย(Fly Ash) ทำแทนด้วย เถ้าแกลบ(RHA) หรือลดปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารโซเดียมซิลิเกต( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) เพราะมีราคาที่แพงอยู่ในขณะนี้ เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- กรมทางหลวง. (2531). **มาตรฐานงานทาง.**
- ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. (2556). **การปรับปรุงหินคลุกด้วยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง.**  
วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่24 ฉบับที่ 3. 2556.
- สมิตร ต่งพิริยะกิจ. (2548). **อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์.** การประชุม  
วิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34.
- สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท. (2545). **หมวดงานทาง มทข.**
- อนุชิต อุชายภิชชาติ . (2554). **ปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) .** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ โรงพิมพ์  
ดิจิตอลเรบบิท.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2560). **วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) พิมพ์ครั้งที่ .1 : กรุงเทพฯ .**สมาคม  
คอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- Bakharev T. (2004). **Durability of geopolymer material in sodium and magnesium sulfate solution.** Cement and Concrete Research 2004;35(6):1233-1246.
- Buchwald A, Kaps Ch. ( 2 0 0 2 ). **Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay.** Geopolymer. 2002. Melbournd, Australia.
- Chindapasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. (2009). **Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers.** Waste Management 2009 ;  
29(2): 539-43.
- Chindapasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. (2006). **Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer.** Cement and Concrete Composites 2006;29(3): 224-229.
- Davidovits J. ( 1 9 9 1 ). **Geopolymers.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.  
1991;37(8):1633-56.
- Davidovits J, Buzzi L, Rocher R, Gimeno D, Marini C, Tocco S. (1999). **Geopolymeric cement based on low cost geologic material.** Results from the European Research project GEOCIS-TEM. In: Davidovits etal. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere 99. 1999:83-96.

- Guo X, Shi H, Dick WA. (2010). **Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer**. Cement and Concrete Composites 2010; 32(2):142-7.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan, BV. ( 2 0 0 3 ). **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, 2003; CMT 14-CMT 18.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y. ( 2 0 0 9 ). **Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay**. Soils and Found 2009;49(1):85-98.
- Rattanasak U, Chindaprasirt P. (2009). **Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer**. Miner Eng 2009;22(12):1073-8.



## ประวัติผู้เขียน

นายชงชัย บัวหอม เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2534 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 43 ซ. เจ้าสำอาง ถ. เจ้าสำอางค์ 2 ต. กบินทร์ อ. กบินทร์บุรี จ. ปราจีนบุรี ประวัติการศึกษา สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนมารีวิทยากบินทร์บุรี อ. กบินทร์บุรี จ. ปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ อ. เมือง จ. นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล อ. ในเมือง จ. นครราชสีมา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง นายช่างโยธา ที่สำนักงานทาง หลวงชนบทที่ 5 (นครราชสีมา) งานที่ทำอยู่นั้นเป็นงานเกี่ยวกับงานก่อสร้างทาง จึงทำให้เกิด แรงจูงใจในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากงานวิจัยในครั้งนี้ทำให้ผู้วิจัยได้ความรู้และความเข้าใจถึงกำลัง ของหินคลุกผสมกรวดโมที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สำหรับใช้ในงานชั้นพื้นทาง การ ทดสอบกำลังรับน้ำหนักของวัสดุ เป็นอย่างดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี