

การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุก etailoy จีโโพลิเมอร์
สำหรับใช้เป็นวัสดุมาตรฐานพื้นชั้นทาง กรณีศึกษา
รถไฟทางคู่ ช่วงมาบกะเบา – ชุมทางจิระ



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุก etailoy จีโโพลิเมอร์
สำหรับใช้เป็นวัสดุมาตรฐานพื้นฐานทาง ตรีศึกษา
รถไฟทางคู่ ช่วงมาบกะเบา – หุมทางจิริระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
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

พร ชนะพาล : การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุก เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ สำหรับใช้เป็น
วัสดุมาตรฐานพื้นชั้นทาง ธรณีศึกษา รถไฟทางคู่ ช่วงมาบกะเบา – ชุมทางจิระ

(STABILIZATION OF MODIFIED CRUSH-FLY ASH GEOPOLYMER AS BASE
PAVEMENT MATERIAL STUDY OF TRACK DOUDLING PROJETECT FOR
NORTEASTERN LINE : MAP KABAO-THANON CHIRA JUNCTION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐาน ผสมกับเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ การศึกษานี้ใช้อัตราส่วนหินคลุกต่อเถ้าลอย จำนวน 3 สัดส่วน คือ 95% : 5% , 90% : 10% และ 85% : 15% สารเร่งปฏิกิริยา(Alkaline Activators)ที่ใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่สัดส่วน 50 : 50 หลังจากนั้นได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของหินคลุก เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนด สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของการรถไฟ เมื่อตรวจสอบภาพด้วยกล้องส่องกราดพบว่าตัวอย่างมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นเกิดจากกระบวนการชะล้างซิลิกาและอลูมินาจากเม็ดเถ้าลอยจนเกิดเป็นรูพรุนอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ดี

การวิจัยนี้มีประโยชน์เพื่อให้เห็นลักษณะความแตกต่างตามระยะเวลาการบ่มของตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งทำให้เห็นขั้นตอนและกระบวนการทำงานของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ให้สอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของวัสดุตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ได้อย่างชัดเจน สัดส่วนของเถ้าลอยที่เหมาะสม ควรใช้สัดส่วนของเถ้าลอยที่ร้อยละ 10 ถึง 15 จึงจะทำให้ปริมาณของสารละลายอัลคาไลน์มี การสร้างปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่มากพอจนสามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างต่อเนื่องตามช่วงอายุของการใช้งาน การศึกษาด้านคุณสมบัติความคงทนของวัสดุและการประยุกต์ใช้กับวัสดุอื่นๆ เป็นต้น

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PORN CHANAPAN : STABILIZATION OF MODIFIED CRUSH-FLY ASH
GEPOLYMER AS BASE PAVEMENT MATERIAL STUDY OF TRACK
DOUDLING PROJTECT FOR NORTEASTERN LINE : MAP KABAO-
THANON CHIRA JUNCTION. ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT
CHINULKIJNIWAT, Ph.D.

The purpose of this thesis aims to study the possibility of stabilizing marginal crushed rock (CR) by mixing with fly ash based geopolymer (FA). The main study of this thesis examines an appropriate proportion between CR and FA in three different ratios; 95:5, 90:10 and 5:5. A liquid alkali activator was a mixture of sodium silicate (Na_2SiO_3 : NS) solution and sodium hydroxide (NaOH: NH) solution at 50:50 ratio. Besides this thesis also evaluates the compressive strength (CS) development in three different curing times; 7 days, 14 days and 28 days in order to compare with the conditions of being a base pavement material for double track railway. To investigate microstructural characteristic, scanning electron microscope analysis was subsequently performed to study the effect of influential factors on CS development. This illustrated that an increase in CS development was from silica washing process and FA alumina, causing porosities, which meant geopolymerization has occurred in the process.

The results revealed the differentiation of the given curing times which could signify that the geopolymerization working process was in accordance with CS development. Accordingly, the suitable FA ratio was between 10 and 15 per cent since this range could enable the alkaline activator to maximize polymerization reaction in order to continuously improve the CS throughout its lifetime. This thesis suggests that durability and its application to other materials should be studied in a further research.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature _____

Academic Year 2017

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและการเอาใจใส่อย่างดียิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานหลัก และ ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ให้แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจด้วยความยินดี เอาใจใส่ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ให้แก่ผู้ศึกษา อีกทั้งให้แนวคิด คำปรึกษา และคำแนะนำทางด้านทฤษฎีและเครื่องมือในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณคุณอนันต์ ธานี ผู้อำนวยการส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ คุณชาติรี พิชาลี นายช่างโยธา กรมทางหลวงชนบทที่ 2 จังหวัดสระบุรี การรถไฟแห่งประเทศไทย บริษัท อิตาเลียนไทย จำกัด(มหาชน) และบริษัท เสรีภักดิ์ เซ็นเตอร์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนข้อมูลและวัสดุ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์และถูกต้องเหมาะสม

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และสนับสนุนและเป็นกำลังใจสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี ในการทำวิทยานิพนธ์จนประสบความสำเร็จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พร ชนะพาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	3
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หินคลุก.....	5
2.1.1 ตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน.....	5
2.1.2 ตะแกรงมาตรฐานของเทเลอร์.....	6
2.2 การบดอัด(Compaction).....	7
2.3 กำลังอัดแกนเดียว(Unconfined Compressive Strength, UCS).....	8
2.4 มาตรฐานการทดลองที่เกี่ยวข้อง(Standards).....	9
2.5 เถ้าลอย(Fly Ash).....	9
2.6 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย.....	9
2.7 รูปร่างของเถ้าลอย.....	11
2.8 คุณสมบัติทั่วไปของจีโอโพลิเมอร์.....	12
2.9 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์.....	14
2.10 ตัวเร่งปฏิกิริยา(Aikaline Activtor).....	15
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16

3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1	บทนำ.....	23
3.2	การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง.....	23
3.3	ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ.....	23
3.4	การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ.....	24
3.5	กำลังอัดแกนเดียว.....	26
3.6	การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค.....	26
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล.....	28
4.1	บทนำ.....	28
4.2	ผลทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....	29
4.3	ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	31
4.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค.....	33
4.5	การวิเคราะห์ด้านต้นทุนของวัสดุ.....	34
5	บทสรุป.....	38
5.1	สรุปผลโครงการวิจัย.....	38
5.2	ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป.....	39
	เอกสารอ้างอิง.....	40
	ภาคผนวก ก รูปภาพแสดงการทดสอบงานวิจัย.....	43
	ประวัติผู้เขียน.....	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก.....	6
2.2 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์.....	6
2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	10
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี 2533-2541.....	11
2.5 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว.....	16
2.6 การเลือกสารเคมีใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539.....	16
3.1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ.....	25
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก.....	28
4.2 การผ่านตะแกรงขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
4.3 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของแท่งตัวอย่างทดสอบ UCS.....	32

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track).....	2
1.2 รูปตัดทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track).....	2
2.1 ลักษณะทางกายภาพของหินคลุก.....	5
2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) ถัดลอยขยาย (1,000 เท่า).....	12
2.3 Polycondensation of Na-Poly (Sialate-disloxo)albite framework.....	14
2.4 ผิวของถัดลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น ต่างๆ 10 นาที.....	15
2.5 ข้อมูลการทดสอบการบดอัด (A) กราฟทดสอบการบดอัด RAP 100% และ RAP ผสม Fly Ash ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (B) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+10%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่างๆ (C) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+20%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่างๆ (D) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+30%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่างๆ.....	21
2.6 กำลังรับแรงอัดของ RAP+FA ที่อัตราส่วนต่างๆระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง.....	22
3.1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการทดสอบ.....	27
4.1 การกระจายขนาดผลึกของหินคลุกที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ.....	29
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นสูงสุดและปริมาณของหินคลุกผสมถัดลอย ในสัดส่วน CR:FA=95:5 จะได้ค่า OMC = 7.48 % และค่า $\rho_{dmax} = 2.264 \text{ kn/m}^3$	30
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นสูงสุดและปริมาณของหินคลุกผสมถัดลอย ในสัดส่วน CR:FA=90:10 จะได้ค่า OMC = 7.00 % และค่า $\rho_{dmax} = 2.253 \text{ kn/m}^3$	30
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นสูงสุดและปริมาณของหินคลุกผสมถัดลอย ในสัดส่วน CR:FA=85:15 จะได้ค่า OMC = 6.50 % และค่า $\rho_{dmax} = 2.251 \text{ kn/m}^3$	31
4.5 ค่ากำลังอัดของหินคลุกถัดลอยจีโอโพลิเมอร์.....	32
4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกถัดลอยจีโอโพลิเมอร์ (CR+FA = 95:5) บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	33

4.7	โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (CR+FA = 90:10) บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	34
4.8	โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่สัดส่วนผสม (CR:FA = 90 : 15) ที่อายุบ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	34
4.9	กราฟแสดงต้นทุนวัสดุรวมรวมหายาหินคลุกผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่ส่วนผสมต่างๆ มีสัดส่วนสารละลายระหว่าง NaOH:Na ₂ SiO ₃	35
4.10	กราฟแสดงต้นทุนวัสดุรวมรวมหายาหินคลุกผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่ส่วนผสม 50 : 50 ต่ออายุการบ่มที่ 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน.....	36
ก.1	ตัวอย่างหินคลุก.....	44
ก.2	ตัวอย่างเถ้าลอย.....	44
ก.3	สารโซเดียมซิลิเกต.....	45
ก.4	สารโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	45
ก.5	การผสมหินคลุกในสัดส่วนต่างๆระหว่างหินคลุก:เถ้าลอย.....	46
ก.6	การบดอัดตัวอย่างหินคลุกในสัดส่วนต่างๆ.....	46
ก.7	การบดอัดตัวอย่างหินคลุกในสัดส่วนต่างๆ.....	47
ก.8	การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วนต่างๆ(95:5,90:10,85:15)ชุดตัวอย่างละ 9 ก้อน.....	47
ก.9	การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วน 95 : 5.....	48
ก.10	การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วน 90 : 10.....	48
ก.11	การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วน 85 : 15.....	49
ก.12	การเตรียมชิ้นตัวก่อนการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	49
ก.13	การทดสอบกำลังแรงอัดแกนเดียว.....	50
ก.14	การวิบัติของวัสดุที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศไทยมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศช่วยลดต้นทุนในการขนส่งสินค้าอุตสาหกรรมและเป็นขนส่งคนจากตัวเมืองใหญ่ออกสู่ต่างจังหวัดและเป็นการพัฒนาระบบรางเพื่อเชื่อมเป็นโครงข่ายในภูมิภาคในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประเทศไทยอยู่ในจุดยุทธศาสตร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมโครงข่ายให้ครอบคลุมประเทศเพื่อนบ้านของไทย จะเห็นได้ว่าปัจจุบันรัฐบาลได้ให้ความสำคัญในการสร้างระบบรางหลายโครงการ เช่น ระบบรถไฟทางคู่ หลายเส้นทางพร้อมๆกันจนทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุก่อสร้างประเภทดินลูกรังที่มีอยู่ในแหล่งธรรมชาติที่เป็นวัสดุพื้นฐานในการก่อสร้าง เช่นดินเค็มใช้ในการก่อสร้างชั้นคันทางดินถม (Embankment) ส่วนมากจะใช้ดินลูกรังในการก่อสร้างชั้นพื้นรองทาง (Sub-Base Course) โครงสร้างพื้นชั้นทางของรถไฟทางคู่ แบบทางระดับดิน โดยทั่วไปจะประกอบด้วยชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง วัสดุที่ใช้ถมคันทางหรือชั้นดินเค็ม ส่วนมากผู้ออกแบบจะให้มีการรับน้ำหนักเป็นชั้นๆ ตามแนวตั้งเพื่อกระจายน้ำหนักลงชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางตามลำดับ ดังนั้นวิศวกรที่ออกแบบส่วนมากจะเลือกวัสดุที่มีความคงทนต่อการใช้งานและประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างรถไฟทางคู่ ตามแบบรูปและรายการ มีการเลือกวัสดุหินคลุกมาใช้เป็นวัสดุหลัก เมื่อทำการบดอัดแล้วจะมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมสูง สามารถรับแรงอัดได้ดี หินคลุกที่นำมาใช้ในโครงการจะต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

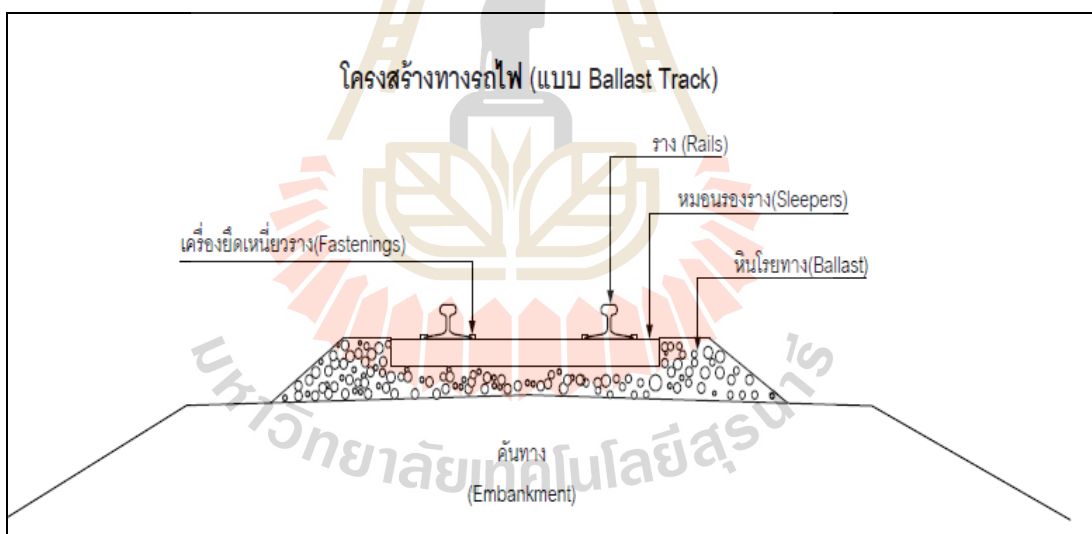
ชนิดของทางรถไฟโดยทั่วไปจะมีทางรถไฟอยู่สองชนิดที่จะถูกใช้งานในโครงการรถไฟทางคู่คือทางรถไฟแบบใช้ หิน โรยทาง (Ballasted Track) และทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีต (Slab Track)

1. ทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีต (Slab Track) จะมีการใช้ทางรถไฟแบบพื้นคอนกรีตในโครงสร้างทางยกระดับ สะพานอุโมงค์ และทางต่ำกว่าดินเนื่องจากทางรถไฟประเภทนี้จะมีความนุ่มนวลสะดวกสบาย(Ride Comfortable) การติดตั้งทางรถไฟมีความแม่นยำสูง และมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเรื่องแรงงานในการบำรุงรักษาต่ำ
2. ทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track) จะมีการใช้ทางรถไฟแบบใช้หินโรยทางในบริเวณที่เป็นพื้นคันทางถมและทางดินตัด เนื่องจากทางรถไฟแบบดังกล่าวจะมี

ความยืดหยุ่นที่เพียงพอให้ทางยังคงอยู่ติดกับพื้นดินได้เมื่อเกิดการทรุดตัวของพื้นดินขึ้นและสามารถทำการปรับแนวเส้นทางรถไฟได้ง่ายกว่า



รูปที่ 1.1 ทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track)



รูปที่ 1.2 รูปตัดทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track)

วัสดุหลักที่ใช้ในโครงการชั้นพื้นคันทาง ส่วนมากมักจะเป็นวัสดุที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น ดินเค็ม ดินลูกรัง จึงมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการก่อสร้างโครงการดังกล่าวมา การเลือกและหาวัสดุใหม่มาทดแทนในโครงการนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อใช้ในการก่อสร้างและช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณรอบๆ โครงการก่อสร้าง หนึ่งในวัสดุสีเขียวที่กำลังเป็นที่นิยมคือ จีโอโพลีเมอร์ เป็นวัสดุชนิดพอลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก มีกระบวนการ

ที่ไม่ซับซ้อน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเชื่อมโยงที่ทนต่ออุณหภูมิสูง วัสดุจีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น จีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากองค์ประกอบของวัสดุและการเกิด ปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มี

โครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นสารประกอบหลัก โดยจะทำให้แตกตัวด้วย อัลคาไลน์ หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ดี มีองค์ประกอบทางโครงสร้างที่แตกต่างจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุมาปรับปรุงคุณภาพของหินคลุก etailoy จีโอโพลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นชั้นทางให้ได้อัตราร่วนที่เหมาะสมและรับกำลังอัดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด จะมีการทดสอบกำลังที่อายุการบ่ม 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงวัสดุหินคลุกที่ไม่ผ่านมาตรฐาน ผสมกับetailoy จีโอโพลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นชั้นทางในงานก่อสร้างรถไฟฟ้าทางคู่ โดยเน้นการศึกษาด้านกำลังอัด โครงสร้างทางจุลภาคตัวอย่างวัสดุ และวิเคราะห์ด้านราคาต้นทุน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 วัสดุจากโรงโม่หิน ส.ศิลาทอง ตำบล หน้าพระลาน อำเภอ เกลิมพระเกียรติ จังหวัด สระบุรี
- 1.3.2 วัสดุจากetailoy โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 1.3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์ รวมทั้งสถานที่ใช้ที่ ห้องทดสอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท
- 1.3.4 สารเร่งปฏิกิริยา Alkaline Activators เป็นส่วนผสมระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตและ สารโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 นำผลการศึกษาที่ได้ไปกำหนดเป็นมาตรฐานในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุประเภท หินคลุก เพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นชั้นทางในงานก่อสร้างรถไฟฟ้าทางคู่

1.4.2 เพื่อนำผลการศึกษารที่ได้เป็นแนวทางในการนำถั่วลยจิโพลิเมอร์ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุที่ไม่ผ่านมาตรฐานในการก่อสร้าง

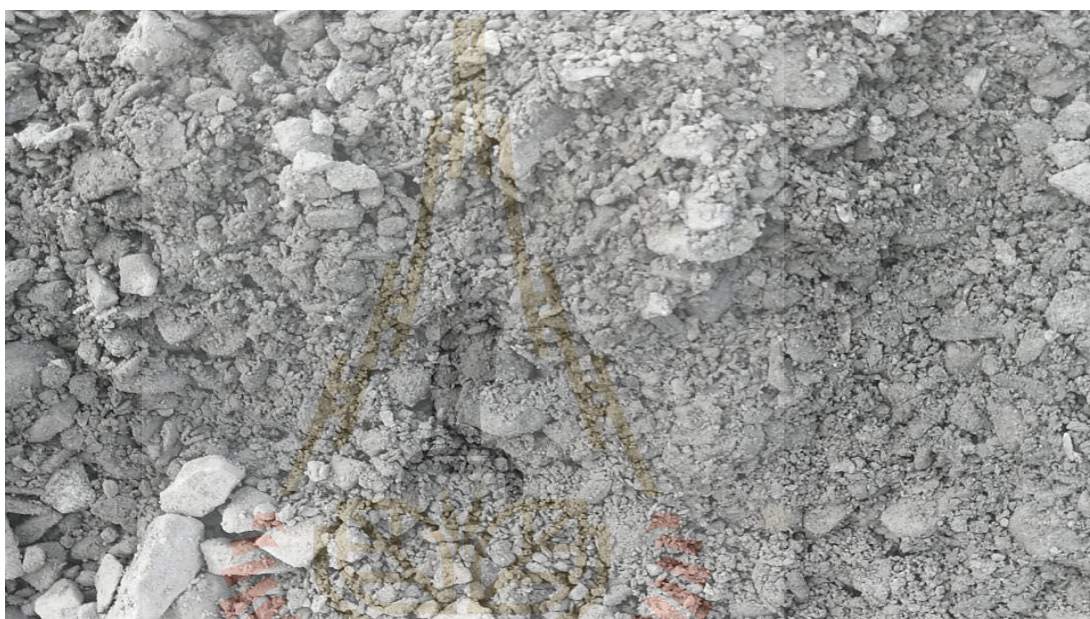


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หินคลุก

เป็นวัสดุพื้นทาง หมายถึง วัสดุรวมหินโม้ (Crushed rock soil aggregate type) สำหรับใช้ใน การก่อสร้างถนน โดยก่อสร้างบนชั้นพื้นทางหรือชั้นอื่นใดซึ่งผ่านการตรวจสอบแล้ว



รูปที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของหินคลุก

2.1.1 ตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน (U.S. Sieve) เป็นตะแกรงซึ่งมีตาเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตะแกรงที่ใช้วัดขนาดของหินเริ่มจากเบอร์ 3/8", 1/2", 3/4", 1", 1 1/2" และ 2" สำหรับตะแกรงคัดขนาดทรายมีขนาดเรียงกันคือเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 และ 100 ตัวเลขเบอร์บอกถึงจำนวนตาของตะแกรงต่อความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงเบอร์ 30 หมายความว่า 1 นิ้ว แบ่งออกเป็น 30 ช่อง ดังนั้นใน 1 ตารางนิ้วจะมีจำนวนช่องทั้งสิ้น 900 ช่อง

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	A	B
50 (2 นิ้ว)	100	100
25.0 (1 นิ้ว)	-	75 - 95
9.5 (3/8 นิ้ว)	30 - 65	40 - 75
4.75 (เบอร์ 4)	25 - 55	30 - 60
2.00 (เบอร์ 10)	15 - 40	20 - 45
0.425 (เบอร์ 40)	8 - 20	15 - 30
0.75 (เบอร์ 200)	2 - 8	5 - 20

ที่มา : มาตรฐาน ASTM C 136

2.1.2 ตะแกรงมาตรฐานของเทเลอร์ (Tyler Sieve) เป็นตะแกรงซึ่งมีตาเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เช่นเดียวกับตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน แต่มีขนาดแตกต่างกันไปเล็กน้อย อย่างไรก็ตามตะแกรงมาตรฐานของเทเลอร์ไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันนี้

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล		
	A	B	C
50 (2 นิ้ว)	100	-	-
25.0 (1 นิ้ว)	75 - 95	100	100
9.5 (3/8 นิ้ว)	40 - 75	50 - 85	60-100
4.75 (เบอร์ 4)	30 - 60	35 - 65	50-85
2.00 (เบอร์ 10)	20 - 45	25 - 50	40-70
0.425 (เบอร์ 40)	15 - 30	15 - 30	25-45
0.75 (เบอร์ 200)	5 - 20	5 - 15	5-20

ที่มา : มาตรฐาน ASTM C 133

2.2 การบดอัด (Compaction)

การบดอัดดินคลุก คือการเพิ่มความหนาแน่นของดินคลุกโดยการไล่อากาศออก ระดับการบดอัดสามารถวัดได้จากหน่วยน้ำหนักแห้งของดินคลุก เมื่อเติมน้ำลงไปดินคลุก น้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางทำให้ดินคลุกอ่อนนุ่มขึ้น เมื่อดินคลุกสามารถเลื่อนไถลข้ามกันและเคลื่อนตัวไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินคลุกได้ง่ายขึ้น ในช่วงแรกหน่วยน้ำหนักแห้งของดินคลุกจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเกินกว่าค่า ๆ หนึ่งแล้ว การเพิ่มขึ้นของน้ำจะทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลง การลดลงของหน่วยน้ำหนักแห้งเกิดเนื่องจากปริมาณน้ำที่เข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดินคลุกมีมากเกินไป จนทำให้เม็ดดินคลุกไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ได้ ปริมาณน้ำที่ทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าสูงสุด (Maximum Dry Unit Weight, γ_{max}) เรียกว่า ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ส่วนปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม เรียกว่า ปริมาณน้ำทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม (Dry and Wet Sides of Optimum Moisture Content) ตามลำดับ

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำเหมาะสมนิยมกระทำในห้องปฏิบัติการ และนำผลทดสอบไปใช้สำหรับควบคุมคุณภาพการบดอัดเมื่อคอนกรีตไปบดอัดในสนาม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เป็นการทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic Compaction) เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณน้ำ ซึ่งกระทำ โดยการนำดินคลุกที่ต้องการบดอัดในสนามมาบดอัดในแบบหล่อมาตรฐาน และพลังงานที่ใช้สำหรับบดอัดจะถูกกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ และการควบคุมการก่อสร้าง การสร้างกราฟการบดอัดจะทำการบดอัดที่ปริมาณน้ำ 5 ถึง 7 จุด และในแต่ละจุดของการบดอัดจำเป็นต้องเปลี่ยนตัวอย่างดินคลุกใหม่ ทั้งนี้ เพื่อจัดผลที่ดินคลุกจะเกิดการแตกหักและเล็กลงเมื่อถูกบดอัดซ้ำ โดยเฉพาะดินคลุกที่มีเม็ดขนาดใหญ่หรือดินคลุกเม็ดหยาบ ตัวอย่างเช่น ดินคลุกลูกรังหรือดินคลุกที่เกิดจากการผุกร่อนของหิน (Residual Soil) และดินคลุกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เหลือใช้จากการย่อยหิน ดินเหล่านี้จะแตกหักง่ายเมื่อทำการบดอัดซึ่งจะส่งผลให้หน่วยน้ำหนักที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง ส่วนดินคลุกเม็ดละเอียด เช่น ดินคลุกเหนียว และดินตะกอน จะมีค่าปริมาณน้ำเหมาะสมสูงกว่าดินคลุกเม็ดหยาบ เมื่อถูกบดอัดจะจับตัวกันเป็นแท่งแน่นยากต่อการแยกดินคลุกออกกลับมาใช้งานใหม่ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการบดอัดจึงควรเปลี่ยนดินคลุกตัวอย่างใหม่ทุกครั้ง ในการกำหนดรูปแบบและพลังงานบดอัด ในปัจจุบันมีสองรูปแบบได้แก่ การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D 698 และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor)

ทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D 1557 ใช้ในการทดสอบสำหรับงานที่ต้องการค่าหน่วยน้ำหนัก
แห่งสูงสุด

โดยทั้งสองรูปแบบ จะใช้แบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว หรือ
เลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 5 นิ้ว ก็ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุที่นำมาทดสอบรูปแบบ
และพลังงานบดอัดดังแสดงในตาราง โดยที่พลังงานการบดอัดต่อหน่วยปริมาตร (E) สามารถ
คำนวณได้จากสมการที่ (2.1) ต่อไปนี้

$$E = \frac{N_B \times N_L \times W_H \times L_H}{V_M} \dots\dots (2.1)$$

เมื่อ N_B คือ จำนวนครั้งในการตบกระทบหินคลุกของค้อนใน 1 ชั้น N_L คือ จำนวนชั้นของ การบด
อัด W_H คือ น้ำหนักของค้อน L_H คือ ระยะที่ค้อนตบกระทบหินคลุก และ V_M คือ ปริมาตร ของแบบ
หล่อ และในการเลือกขนาดของแบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM จะพิจารณาจากขนาดของเม็ดหิน
คลุกที่นำมาบดอัด โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1. ถ้าหินคลุกตัวอย่างค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้แบบหล่อ ขนาด
4 นิ้ว
2. ถ้าหินคลุกตัวอย่างค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แต่ค้ำบน ตะแกรง
ขนาด 3/8 นิ้ว ไม่เกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้แบบหล่อขนาด 4 นิ้ว
3. ถ้าหินคลุกตัวอย่างค้ำบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แต่ค้ำ บน
ตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว ไม่เกินกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้แบบหล่อขนาด 6 นิ้ว

2.3 กำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strengths, UCS)

เป็นการทดลองสำหรับดินตัวอย่างคงสภาพและตัวอย่างดินไม่คงสภาพ การทดลองแบบ
คล้ายลักษณะกับการทดสอบคอนกรีต โดยตัวอย่างดินเหนียวถูกวางในเครื่องอัด ทำการวัดความ
เค้น และความเครียดจนกระทั่ง ตัวอย่างดินวิบัติการทดลอง UCS. ทำให้ได้สองวิธีคือ แบบ Stress
Control และแบบ Strain Control วิธีที่นิยมใช้กัน มากคือ Strain Control เพราะทำได้ง่ายกว่าในการ
ทดลองการรับแรงอัดของแท่งดินตัวอย่างเราจะควบคุม Strain ในอัตรา 0.5 -2 เปอร์เซ็นต์/นาที(ถ้า
แท่งดินมี ความยาว 50 ม.ม. และต้องการควบคุม Strain ที่ 1 % ก็หมายความว่าให้ดินรับแรงอัด
แล้วเกิดการยุบตัว ลงในอัตรา 0.5 ม.ม. /นาที) และทดลองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดที่ต้องการ

ทราบหรือจุดที่ดินวิบัติ ชั่วโงม นำขึ้นจากน้ำปล่อยให้แห้งด้วยอากาศจนมีสภาพอึดตัวผิวแห้ง นำไปทดสอบหาค่า กำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS)

2.4 มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (Standards) มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (Standards) สำหรับการศึกษานี้ ประกอบด้วย

- 2.4.1 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมคอนกรีต (Cement Modified Crushed Rock Base) ตามมาตรฐาน American Society of Testing Materials ASTM C 33
- 2.4.2 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (เทียบเท่า AASHTO T 180)
- 2.4.3 วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน (เทียบเท่า AASHTO T 280)
- 2.4.4 การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง Direct Shear Test ตามมาตรฐาน ASTM D3080-98

2.5 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหินเถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโลมีสี่เทาเทาห้า หรือ น้ำตาลเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) สังกะหรณ์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลัก เป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นนุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะ ระหว่างอนุภาคแต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious Substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับ ประเภทของถ่านหินอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาของการเผาดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

2.6 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตมีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้า

ลดย ตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในงาน American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบ ทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียม ออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการ เผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมี ปริมาณ ส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3), min %	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5	5
ปริมาณความชื้น, max %	3	3
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition (LOI), max %	6	6
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ที่มา : <https://www.astm.org/Standards/C618.htm>

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงานซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition(LOI)ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มากการควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-Aggregate ขึ้นได้ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาจะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้ ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่มาะ

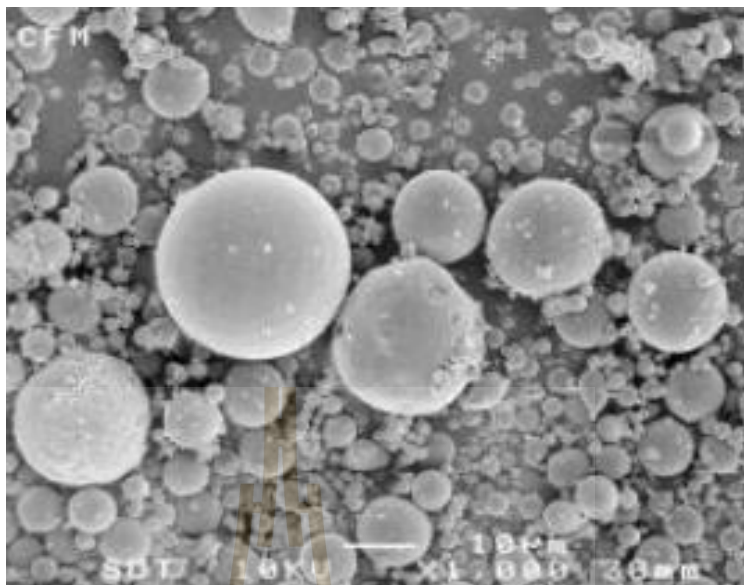
พ.ศ.2433 - 2541 คุณสมบัติ โดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่า ร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่างมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าถ้ำลอยแหล่งอื่นที่มีอยู่ในประเทศไทย ส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยแม่เมาะระหว่าง ปี 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_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	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	11.20	2.80	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	8.50	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.80	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

2.7 รูปร่างของถ้ำลอย

อนุภาคถ้ำลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยมเมื่อถ่ายภาพอนุภาคของถ้ำลอยจากถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.2 เมื่อถ้ำลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตแข็งแรงต่อการแตกหักบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ (P.Chindaprasirt, Jaturapitakkul, Chalee, & Rattanasak, 2009)

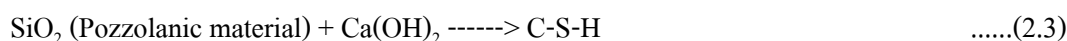


รูปที่ 2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) ถั่วลอยขยาย (1,000 เท่า)

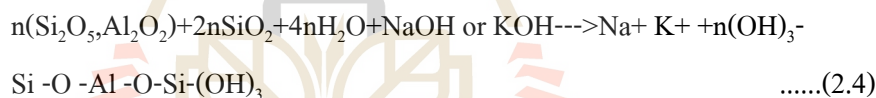
2.8 คุณสมบัติทั่วไปของจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovskiy ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ และถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดลักษณะโครงสร้างของไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) ดังสมการที่ (2.2) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาที่สองขึ้น ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดัง

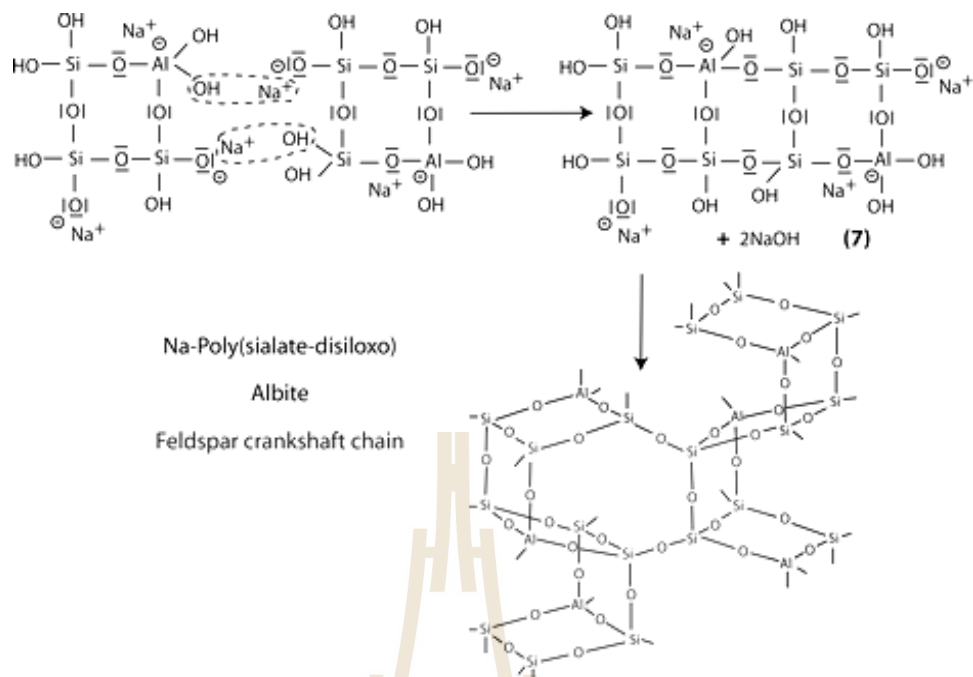
สมการที่ (2.3) ปฏิกิริยานี้เองจะเพิ่มผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จีโอโพลิเมอร์เกิดจากวัตถุดิบที่มีซิลิกา (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้องค์ประกอบหลักเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีและเกิดเป็น Polymer chain ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สมการที่ (2.4) แสดงสมการทางเคมีของปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)



ถ้าถ่านหินซึ่งมีส่วนประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลจะเกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เช่นเดียวกับคอนกรีต สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกัน และเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกันก็จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในกระบวนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ สารจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 1 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาก (ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) จึงทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย



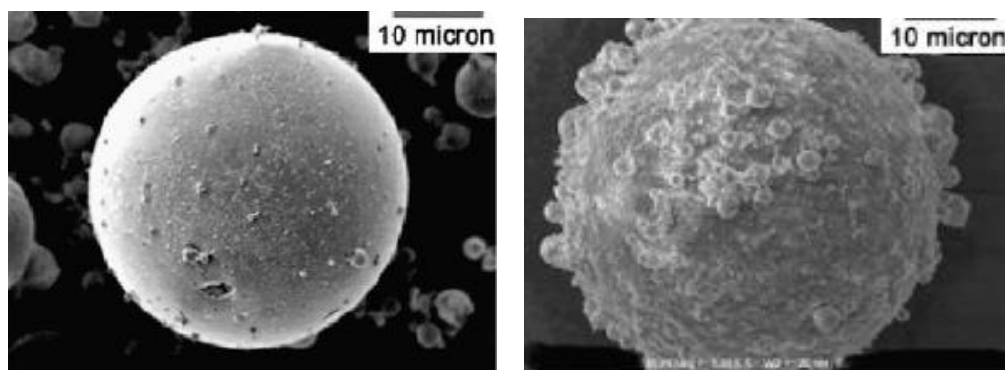
รูปที่ 2.3 Polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework

2.9 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารพวกอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (Morphology) แนนอนเป็นส่วนประกอบของอสัณฐาน (Amorphous Phase) และสารกึ่งผลึก (Semicrystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมโรไลเซชัน (Geopolymerization) จึงเป็นสารซิลิกาและอลูมินาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงได้และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดีปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรไลเซชันแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

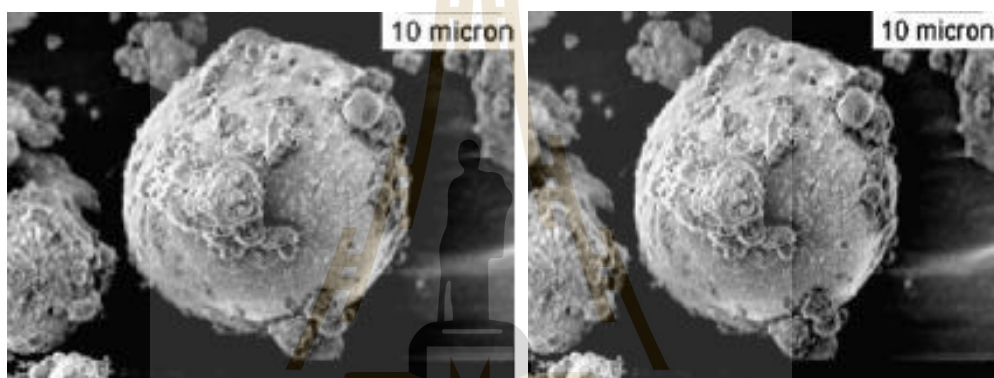
2.9.1 การชะละลาย (Dissolution)

ถ้าหรือสารตั้งต้นเมื่อผสมสารละลายที่มีความเป็นเบสสูงเช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิด การละลายของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากผิวซิลิกอนและอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส เกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของแก้วตัวอย่างแก้วลอมที่ถูกชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงในรูปที่ 2.8 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มี ผลต่อการชะของแก้วความเข้มข้นที่มากขึ้นทำให้เกิดการชะของอ็อกซิเจนและอลูมิเนียมออกมาจากผิวของแก้วลอมมาก



a) Original fly ash

b) 5M NaOH



c) 10M NaOH

d) 15M NaOH

รูปที่ 2.4 ผิวของเถ้าลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ 10 นาที

2.10 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator)

2.10.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มี การล้างไขมันออก เช่นอุตสาหกรรมทำสบู่อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้านมิใช่ในรูปแบบของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

2.10.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_2) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำจัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อนโซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับ

อุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วน โดยโมเลกุลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

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

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539

ตารางที่ 2.6 การเลือกสารเคมีใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539

Property	Percent by weight
Na_2O	15.36 %
SiO_2	33.28 %
H_2O	51.36 %

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ประมาณ 0.20 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50 น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ ดังจะเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ

จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะปาสกาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ จีโอโพลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนทานการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ ในปริมาณต่ำ

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

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัสดุดิบที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถาถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

สมิตร ส่งพิริยะกิจ (2548) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถาถ่านหินและทรายเป็นวัสดุดิบ สารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำ อัตราส่วนระหว่างเถาถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียส หลังจากทำการหล่อตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบกำลังอัดทำที่อายุ 1 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและกำลังอัดยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปตามอายุบ่ม ส่วนตัวอย่างที่

ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้น แต่กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และในที่สุดจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

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

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถ้านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกะปาสคาล อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความชื้นเหลือได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่า

กำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Ohsawa et al. (1984) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิลิก (Picric acid) และกรดไซลิคเซลิก (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิลิก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดไซลิคเซลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ซึ่งเกิดปฏิกิริยากับค้างของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้านหิน และพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับค้างผิวของเถ้านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของค้าง ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำเข้าไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นผนังคล้ายกระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ Gordon (1984) กล่าวถึงการใส่สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified materials และ Bound modified materials โดยที่ Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่มลงไปอย่างมากเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูง Kuhlman (1989) กล่าวว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของ

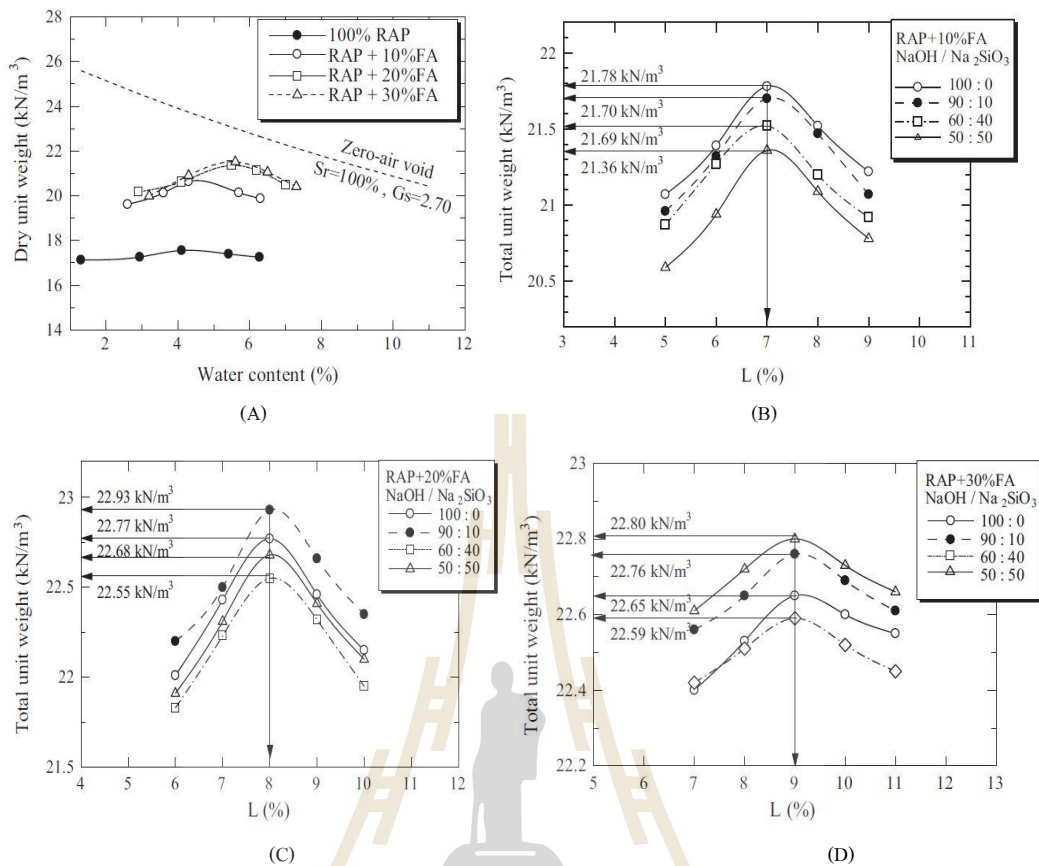
ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีผิวจราจรทำจากยางมะตอยโดยการนำผิวจราจรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ในช่วงปี ค.ศ. 1942 ถึง 1958 ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งานทั้งผิวจราจรยึดหยุ่นที่ชำรุดเสียหายและผิวจราจรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี Tabensky (1990) รายงานว่า Florida department of transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่าด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนนและ Orange country california ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งกับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ใน

อัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า กับวัสดุชั้นล่างเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow municipal airport และ Mohave country airport

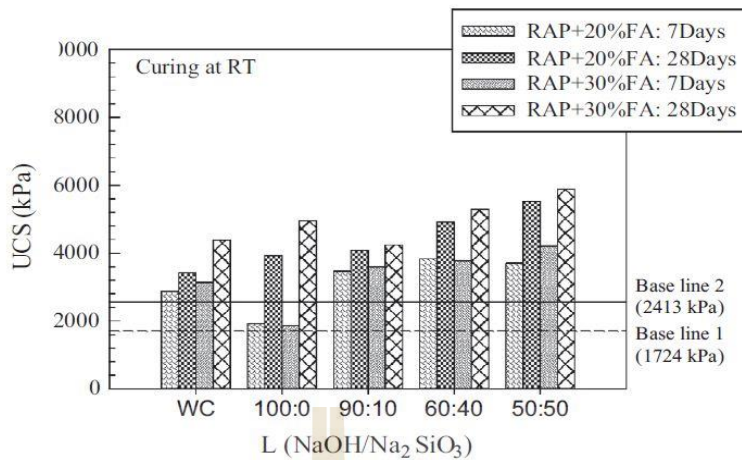
Walton (1995) บันทึกไว้ว่าการนำวัสดุเก่ามาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold in-place recycling) เป็นที่ยอมรับกันว่าประหยัดมาก และได้เริ่มมีการใช้เป็นมาตรฐานในปี ค.ศ. 1970 ในรัฐ Oregon New Mexico Kansas และ Florida ต่อมาวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อิตาลี รัสเซีย แคนาดา เยอรมัน ฝรั่งเศส และอังกฤษ โดยใช้กับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำถึงปานกลางในปี ค.ศ. 1980 ปรากฏว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในช่วงดังกล่าวใช้ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และยังใช้ Emulsion เป็น สารผสมเพิ่ม A.A. Loundon & Partner consultingengineers (1995) กล่าวว่า การก่อสร้างด้วยวิธี Cold in-place recycling ต้องมีการสำรวจ ออกแบบตามเงื่อนไขและตามสภาพถนนที่จะทำการก่อสร้างรวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่จะใช้งานเพื่อที่จะสามารถวางแผนงานให้ได้ผลที่ดีที่สุด การก่อสร้างจะไม่ทำในขณะที่เปียกและหลีกเลี่ยงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ใช้ควรหาจากการทดลอง ซึ่งถ้าใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพระหว่างการบดอัดความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุที่ไม่ผสมเพิ่ม แต่ถ้าไม่ผสมซีเมนต์หรือไม่ผสมอะไรเลย ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต้องไม่เกินปริมาณความชื้นเหมาะสมและต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากการบดอัดและแต่งรูปเรียบร้อยแล้ว การบ่มเพื่อรักษาความชื้นทันทีซึ่งอาจใช้ยางแอสฟัลต์หรือวัสดุอย่างอื่นที่เหมาะสมก็ได้

Taha et al. (2002) ได้ทำการทดสอบการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP และพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลงและกำลังอัดลดลงเมื่อเติมปริมาณ RAP มากขึ้น

Hoy Menglim และ S. Horpibulsuk (2016) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ RAP ที่ผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเกลือและสารปรับคุณสมบัติ NaOH และ Na_2SiO_3 ที่อัตราส่วนต่างๆดังนี้



รูปที่ 2.5 ข้อมูลการทดสอบการบดอัด (A) กราฟทดสอบการบดอัด RAP 100% และ RAP ผสม Fly Ash ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (B) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+10%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่างๆ (C) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+20%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่างๆ (D) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+30%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่างๆ



รูปที่ 2.6 กำลังรับแรงอัดของ RAP+FA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ
ระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษากำลักรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบการปรับปรุงหินคลุก etailoyด้วยจีโอพอลิเมอร์ ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และปริมาณetailoy (Fly Ash) โดยจะทำการทดสอบกำลักรัดบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ทำการเปรียบเทียบกับกำลักรัดตามมาตรฐาน(ต่อน้ำหนักกดเพลลา)ที่ 1.57 MPa และ รับกำลักรัด(ต่อน้ำหนักกดเพลลา) ที่ 1.96 MPa

3.2 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

- 3.2.1 มวลรวมหยาบจาก โรงไม้หิน ส.ศิลาทอง ตำบล หน้าพระลาน อำเภอ เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี
- 3.2.2 etailoy (Fly Ash) ที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 375
- 3.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.2.4 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

3.3 ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ในการหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุกที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้มาตรฐานและข้อกำหนดซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวก็จะอ้างอิง การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และ AASHTO ดังต่อไปนี้

- 3.3.1 มีค่าของความสึกหรอ เมื่อทดลองตามมาตรฐาน ASTM C33 “วิธีการทดลองหา ค่าความสึกหรอของ L n lbin” ไม่เกินร้อยละ 40
- 3.3.2 มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามมาตรฐาน ASTM C88 “วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่ เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้งที่น่ามาใช้

- 3.3.3 ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพ
- 3.3.4 มีขนาดกะทัดรัด และเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T27-70 “วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 1
- 3.3.5 ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร
- 3.3.6 มีค่า Liquid Limit เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D423-66 “วิธีการทดสอบหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- 3.3.7 มีค่า Plasticity Index เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T90 “วิธีการทดสอบหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index”
- 3.3.8 มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T113 “วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานทดสอบเพื่อหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0 ฟัลด์คอนกรีต และ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ผิวทางแบบเซอร์เฟซทริตเมนต์ที่ความแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความแน่นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 “วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.4 การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ

- 3.4.1 เตรียมสัดส่วนหินคลุก (Crushed rock) และเถ้าลอย (FA) ผู้ศึกษาได้กำหนดสัดส่วนที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ ดังนี้ สัดส่วนของหินคลุก (Crushed rock) ต่อเถ้าลอย (FA) จำนวน 3 สัดส่วน คือ Crush rock : FA = 95 : 5 , 90 : 10 , 85 : 15
- 3.4.2 เตรียมสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali activator) ผู้ศึกษาได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali-activator) ในการศึกษานี้ คือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต เกรด C-53 จากบริษัทวิโรฒวิทยภัณฑ์ จำกัด ประกอบด้วย $\text{Na}_2\text{O} = 15.50\%$, $\text{SiO}_2 = 32.7\%$ และน้ำ 51.75% โดยน้ำหนักสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์เกล็ด (ความบริสุทธิ์ 99%) จากบริษัทวิโรฒวิทยภัณฑ์ จำกัด ผสมกับน้ำกลั่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา (Liquid Alkali Activator) เตรียมจากการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีสัดส่วน ดังนี้ สารละลายโซเดียมซิลิ

เกิดต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50 : 50$ ผสมกับวัสดุตั้งต้น (หินคลุกและเถ้าลอย) ที่ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ในแต่ละสัดส่วนการเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Crushed Rock – FA - Geopolymer) โดยผสมหินคลุก เถ้าลอย ตามสัดส่วนที่กำหนด (Crush rock : FA = 95 : 5 , 90 : 10 , 85 : 15) เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาของแต่ละสัดส่วน ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50 : 50$) ผสมกับวัสดุตั้งต้น (Binder) โดยใช้เวลาผสมประมาณ 5 -10 นาที กับแต่ละสัดส่วน สัดส่วนมีความเหมาะสมที่จะบดอัด จากนั้นบดอัดตามการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor compaction) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 ในการเก็บตัวอย่างหลังจากบดอัดแล้ว จะห่อด้วยพลาสติกใสเก็บไว้ ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 -30 °C) ที่มีอายุบ่ม 7 , 14 และ 28 วัน ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะทำการ เก็บตัวอย่างจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อความถูกต้องแม่นยำ

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ตัวอย่าง	อัตราส่วนของตัวอย่างทดสอบ		อายุการบ่ม(จำนวนตัวอย่าง)		
	CR : FA	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$	7 วัน	14 วัน	28 วัน
1	95 : 5	50 : 50	3	3	3
2	90 : 10	50 : 50	3	3	3
3	85 : 15	50 : 50	3	3	3

หมายเหตุ CR : หินคลุก (Crushed rock)

FA : เถ้าลอย (Fly Ash)

Na_2SiO_3 : สารละลายโซเดียมซิลิเกต

NaOH : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมน้ำที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์

3.4.3 ทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ระหว่างวัสดุผสมรวมหยาบหินคลุกและเถ้าลอย (Fly ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักวัสดุ ด้วยสารกระตุ้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่อัตราส่วนเท่ากับ 50:50 แล้วบันทึกผลเพื่อนำค่าปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อกำหนดขั้นตอนต่อไป

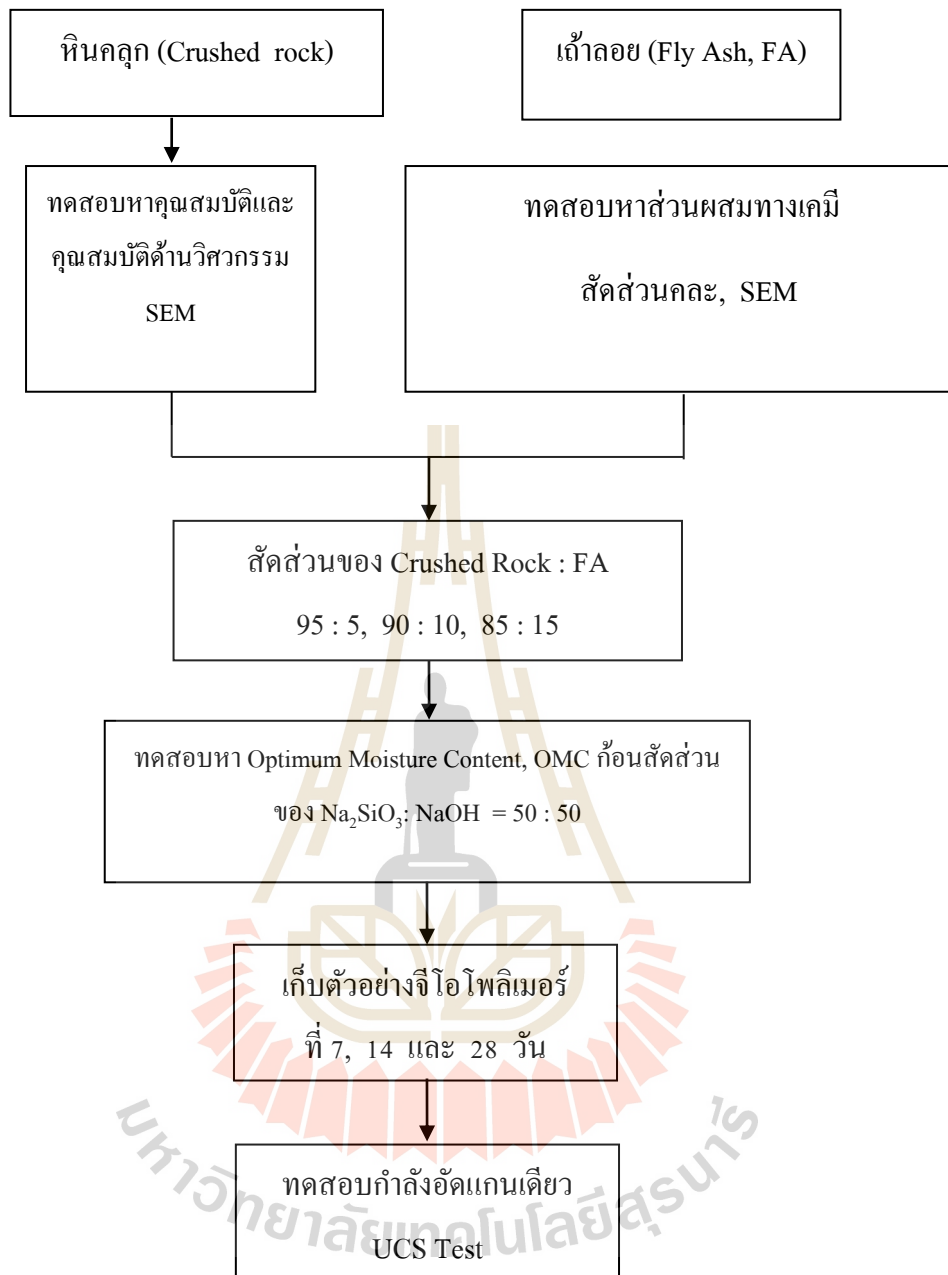
3.4.4 ตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดียว โดยนำผลปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OMC) ระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบหินคลุก และเถ้าลอย (Fly ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักวัสดุ จากข้อ (3.4.2) มาทำก่อน ตัวอย่างบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) โดยบ่มตัวอย่าง ที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

3.5 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strengths, UCS)

เป็นการทดลองสำหรับดินตัวอย่างคงสภาพและตัวอย่างดินไม่คงสภาพ การทดลองแบบ คล้ายลักษณะกับการทดสอบคอนกรีต โดยตัวอย่างดินเหนียวถูกวางในเครื่องอัด ทำการวัดความ เค้น และความเครียดจนกระทั่ง ตัวอย่างดินวิบัติการทดลอง UCS. ทำให้ได้สองวิธีคือ แบบ Stress Control และแบบ Strain Control วิธีที่นิยมใช้กัน มากคือ Strain Control เพราะทำได้ง่ายกว่าในการ ทดลองการรับแรงอัดของแท่งดินตัวอย่างเราจะควบคุม Strain ในอัตรา 0.5 -2 เปอร์เซ็นต์/นาที(ถ้า แท่งดินมีความยาว 50 ม.ม. และต้องการควบคุม Strain ที่ 1 % ก็หมายความว่าให้ดินรับแรงอัด แล้วเกิดการยุบตัว ลงในอัตรา 0.5 ม.ม. /นาที) และทดลองไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดที่ต้องการ ทราบหรือจุดที่ดินวิบัติ ชั่วโงม นำชิ้นจากน้ำปล่อยให้แห้งด้วยอากาศจนมีสภาพอิมตัวผิวแห้ง นำไป ทดสอบหาค่า กำลังรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS)

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่างเพื่อศึกษาการพัฒนา กำลัง อัดและการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างวัสดุที่ปรับปรุงด้วย จีโอ โพลีเมอร์ โดยใช้เครื่องอิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยนำชิ้นส่วนของวัสดุ ขนาดเล็กจาก กึ่งกลางของก้อนวัสดุหลังจากทดสอบกำลังอัดแล้ว โดยใช้เครื่องมือรุ่น JEOL JSM64



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

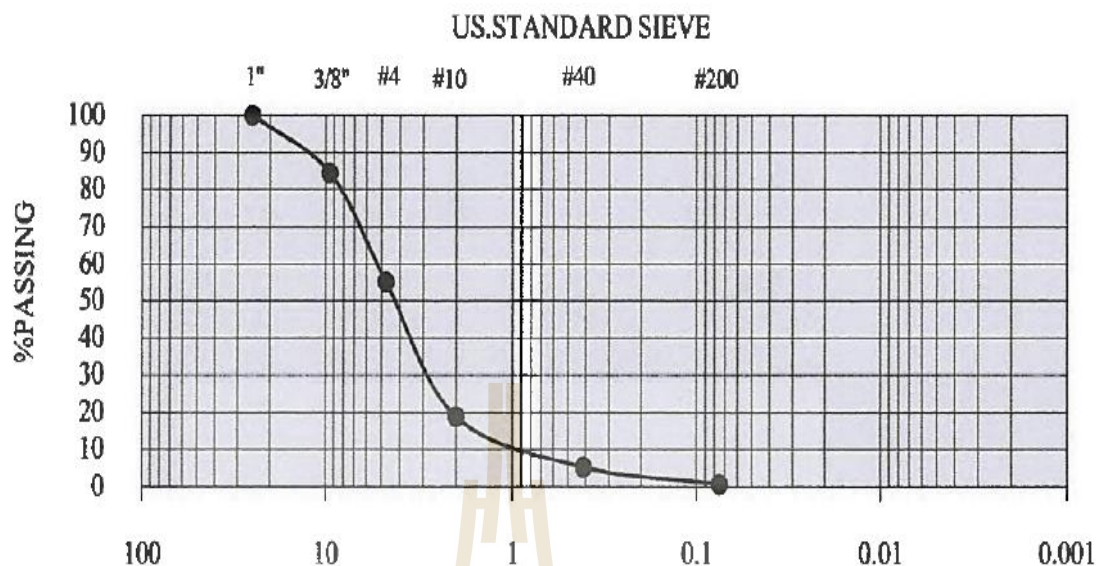
บทนี้นำเสนอผลการศึกษาน้ำหนักกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบของหินคลุกการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค มีรายละเอียดแต่ละหัวข้อดังนี้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก

Content	Crushed Rock	Standard for base course
Specific gravity	2.83	
Liquid limit	Non Liquid	≤ 25
Plastic limit	Non Plastic	≤ 6
Plastic index	Non Plastic	≤ 6
Maximum dry unit weight	2.25	≥ 1.440
Optimum moisture content	6.97	-
CBR at 95% of dry density	85.30	≥ 80
LA abrasion	31.91	≤ 40

ตารางที่ 4.2 การผ่านตะแกรงขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัย

SIEVE	Wt.RETAINED Gm.	% RETAINED	CUMLATIVE % RETAINED	% PASSING
1"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	465.41	15.51	15.51	84.49
#4	877.69	29.26	44.77	55.23
#10	1089.54	36.32	81.09	18.91
#40	405.68	13.52	94.61	5.39
#200	139.58	4.65	99.26	0.74
PAN	22.10	0.74	100.00	0.00

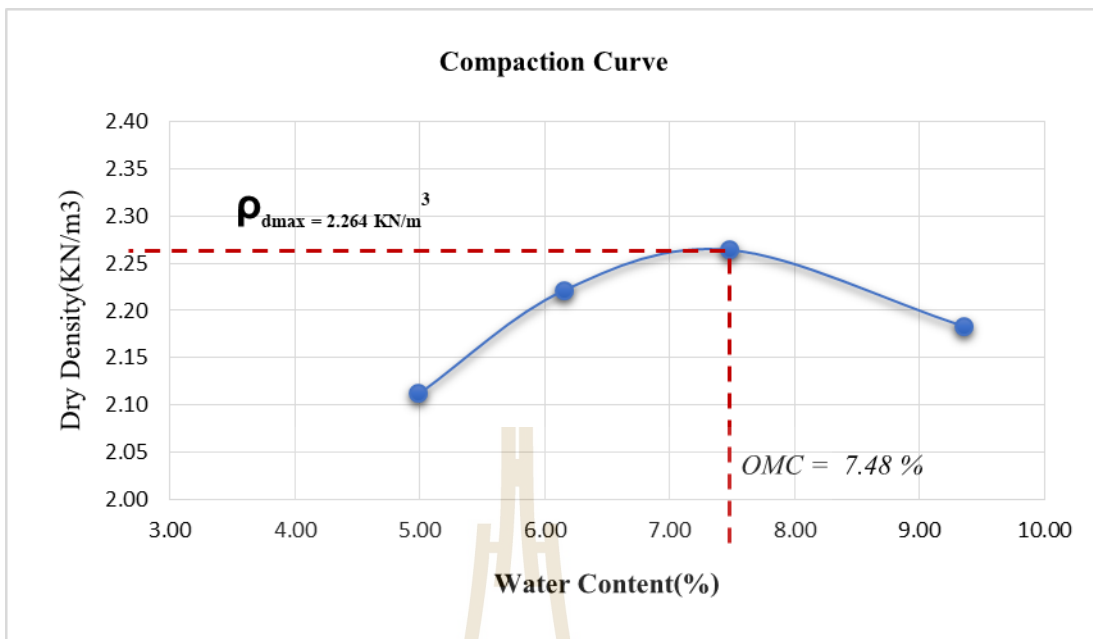


รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดคละของหินคลุกที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

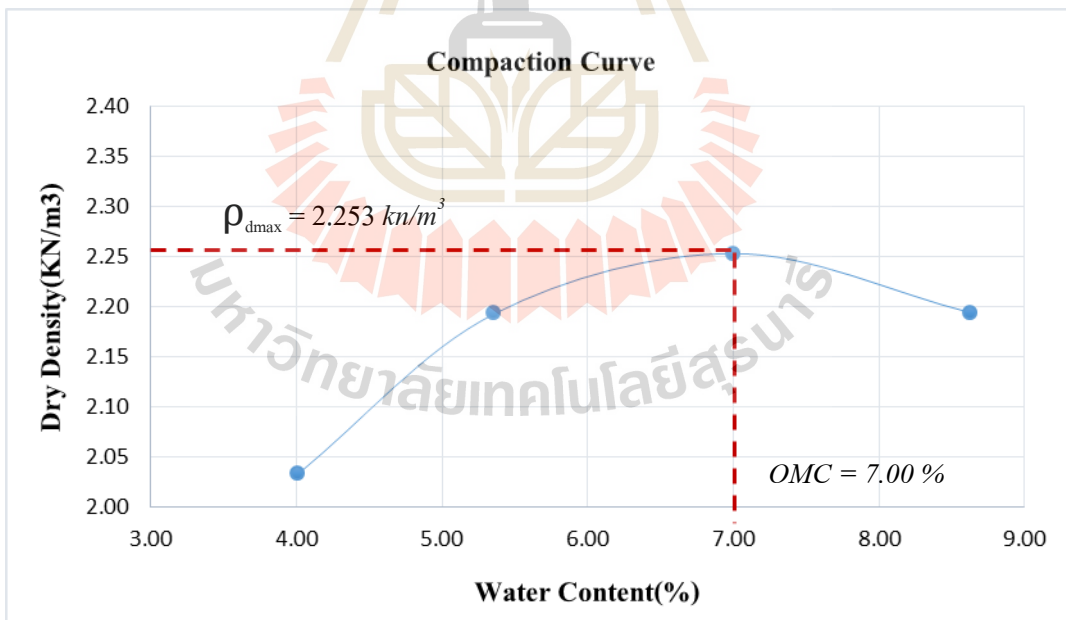
ความถ่วงจำเพาะมีค่า 2.83 ชีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) มีค่าต่ำมากซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการรถไฟ กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ ความสึกหรอ (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 31.1 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40 %) ซี.บี.อาร์. (CBR) ที่ร้อยละ 84.00 (ค่า CBR" ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต) ขนาดคละตามมาตรฐานฐานหินคลุกที่ใช้ในทำพื้นชั้นทางรถไฟ มีอยู่ 3 Class คือ Class A , Class B และ Class C วัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัยจึงถือว่าเป็นวัสดุคุณภาพดี

4.2 ผลทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

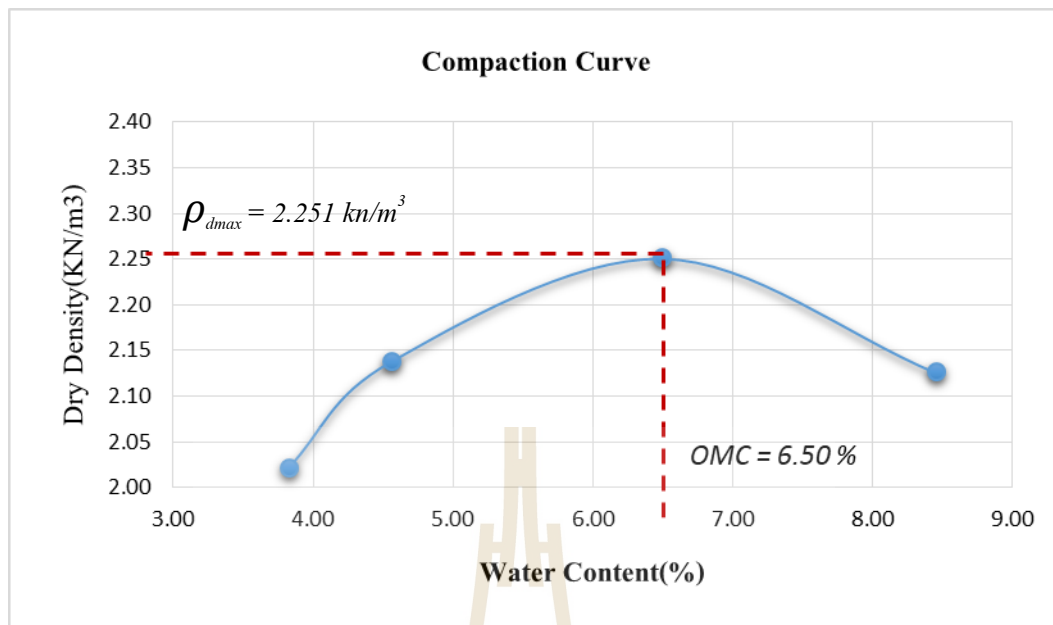
ค่าความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และค่าความแน่นสูงสุด $\rho_{d(max)}$ ของหินคลุกผสมกับถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยนำผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ สำหรับส่วนผสม (CR : FA = 95 : 5 , 90 : 10 , 85 : 15) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Na_2SiO_3 : NaOH = 50 : 50)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นสูงสุดและปริมาณของหินคลุกผสมเถ้าลอยในสัดส่วน CR : FA= 95 : 5 จะได้ค่า OMC = 7.48 % และค่า $\rho_{dmax} = 2.264 \text{ kn/m}^3$



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นสูงสุดและปริมาณของหินคลุกผสมเถ้าลอยในสัดส่วน CR : FA= 90 : 10 จะได้ค่า OMC = 7.0 % และค่า $\rho_{dmax} = 2.253 \text{ kn/m}^3$



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นสูงสุดและปริมาณของหินคลุกผสมเถ้าลอยในสัดส่วน CR : FA= 85 : 15 จะ ได้ค่า $OMC = 6.5 \%$ และค่า $\rho_{dmax} = 2.251 \text{ kn/m}^3$

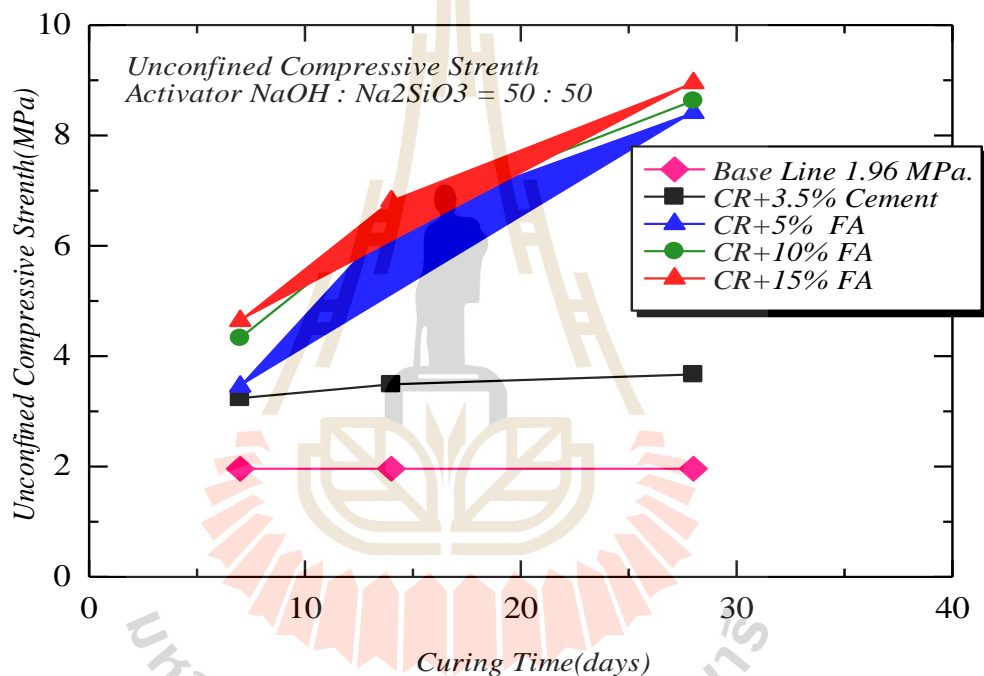
จากรูปที่ 4.2,4.3,4.4 แสดงกราฟการบดอัดของแท่งตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด(Maximum dry density, ρ_{dmax})มีค่าเท่ากับ 2.264,2.253,2.251 gm/cm^3 และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม(Optimum Moisture Content ,OMC)มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.48 7.00,6.50 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อความหนาแน่นแห้งของวัสดุผสมรวม(หินคลุกผสมเถ้าลอย)เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในมวลรวมมากขึ้นความหนาแน่นแห้งของวัสดุผสมรวมมีแนวโน้มลดลง ส่วนผลที่ต่อค่า OMC จะพบว่าปริมาณของเถ้าลอยส่งผลน้อยทำให้ค่า OMC ที่ได้ในแต่ละสัดส่วนของวัสดุผสมรวม(หินคลุก+เถ้าลอย)จะ ได้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก (6.50% - 7.48%)

4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength ,UCS)

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength,UCS) แบบแช่น้ำของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่สัดส่วนผสม(CR : FA= 95 : 5 , 90 : 10 , 85 : 15)และตัวเร่งปฏิกิริยา (Na_2SiO_3 : $\text{NaOH} = 50 : 50$) ที่อายุการบ่ม อุณหภูมิห้องปกติ

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของแท่งตัวอย่างทดสอบ UCS

ตัวอย่าง ทดสอบ	อัตราส่วนผสมของตัวอย่าง ทดสอบ		Average Unconfined Compressive Strength(MPa)		
	CR:FA	Na ₂ SiO ₃ :NaOH	7 days	14 days	28 days
1	95:5	50:50	3.45	4.32	4.64
2	90:10	50:50	6.43	6.60	6.81
3	85:15	50:50	8.41	8.53	8.95



รูปที่ 4.5 ค่ากำลังอัดของหินคลุก เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์

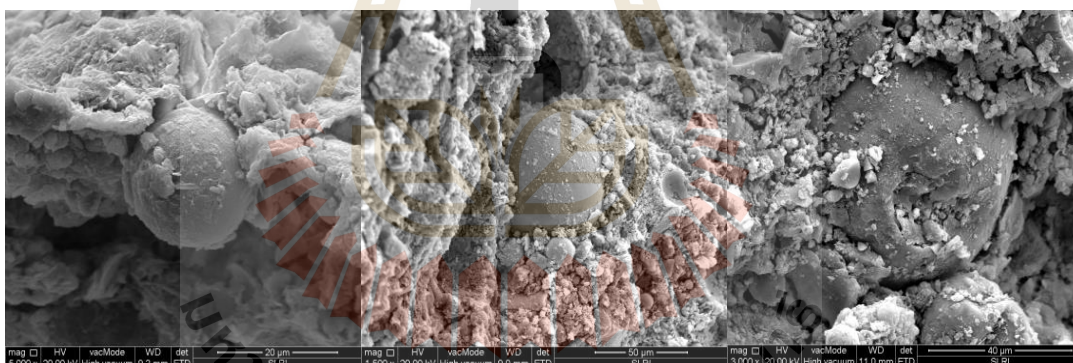
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังอัดของหินคลุกที่ผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนากำลังขึ้นตามอายุการบ่มที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบกับตัวอย่างทดสอบที่ผสมปูนซีเมนต์ 3.5% จะได้ค่ากำลังสูงสุด = 3.67 MPa และตัวอย่างทดสอบที่ผสมกับเถ้าลอยที่สัดส่วน (CR:FA = 95:5, 90:10, 85:15) มีค่ารับกำลังแรงอัดสูงสุดที่ 4.64 MPa ,6.81 MPa และ 8.95 MPa ตามลำดับ

นอกจากนี้ ค่ารับกำลังอัดสูงสุดที่ได้ในแต่ละสัดส่วนของตัวอย่างเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการรับกำลังอัดของพื้นชั้นทางของการรถไฟ แล้วยังสูงกว่า 1.96 MPa ส่วนการปรับคุณภาพของหินคลุกผสมซีเมนต์ให้ค่าสูงสุดที่ 3.67 MPa แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับต้นทุนต่อลูก

บาศก์เมตรส่วนผสมที่นำมาทดสอบทั้ง 3 ส่วนผสมจะมีราคาแพงโดยเฉพาะสารผสมเพิ่มสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต

4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

ลักษณะภาพ โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์จะดูเหมือนว่าจะอยู่ในขั้นตอนของการชะละลายเอาซิลิกาออกมาจากเถ้าลอย (Fernandez-Jimenez, et al., 2005) จะเห็นว่าที่ผิวของเถ้าลอยมีรูพรุนเป็นจำนวนมากเนื่องจากการกักตัวของตัวเร่ง จะมีลักษณะแตกต่างกันชัดเจนตามระยะเวลาบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับขั้นตอนของกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Fernandez-Jimenez, et al., 2005) ที่สอดคล้องกับกำลังอัดของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 ที่พัฒนาขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่สัดส่วนผสม (CR:FA = 95 : 5) และ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Na_2SiO_3 : NaOH = 50 : 50) ที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

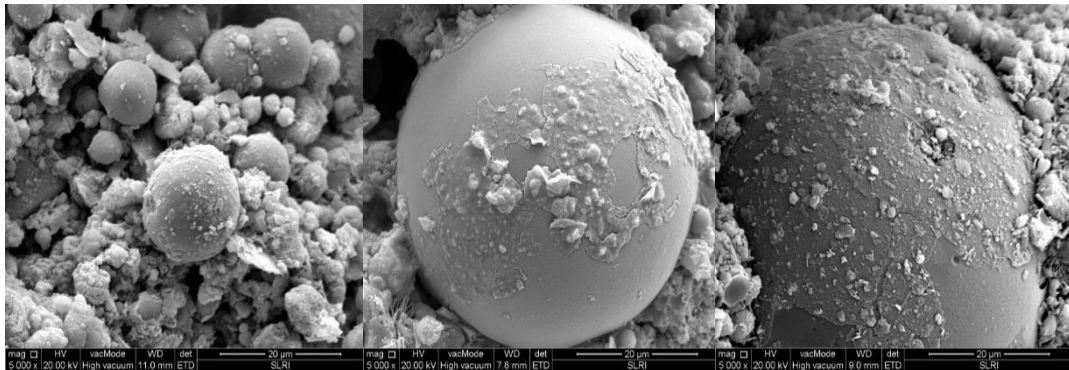


(ก) 7 วัน

(ข) 14 วัน

(ค) 28 วัน

รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วน (CR:FA = 95 : 5) บ่มที่อุณหภูมิห้อง

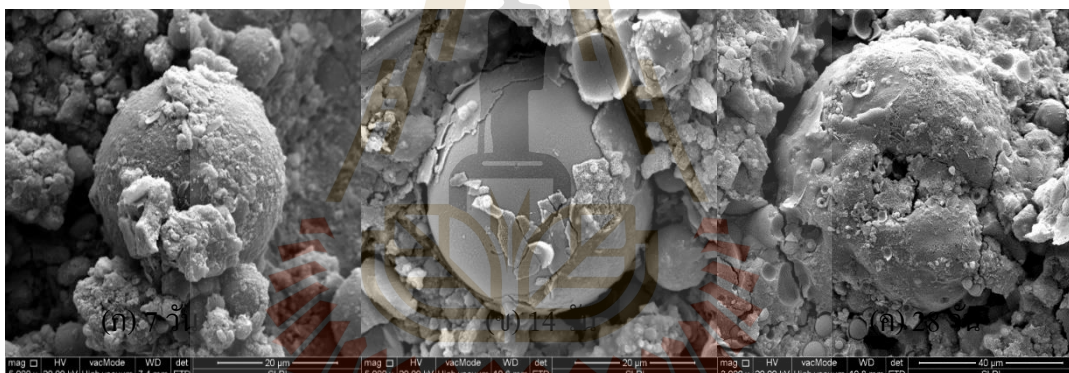


(ก) 7 วัน

(ข) 14 วัน

(ค) 28 วัน

รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์
ที่สัดส่วนผสม (CR:FA = 90 : 10) ที่อายุบ่มที่อุณหภูมิห้อง



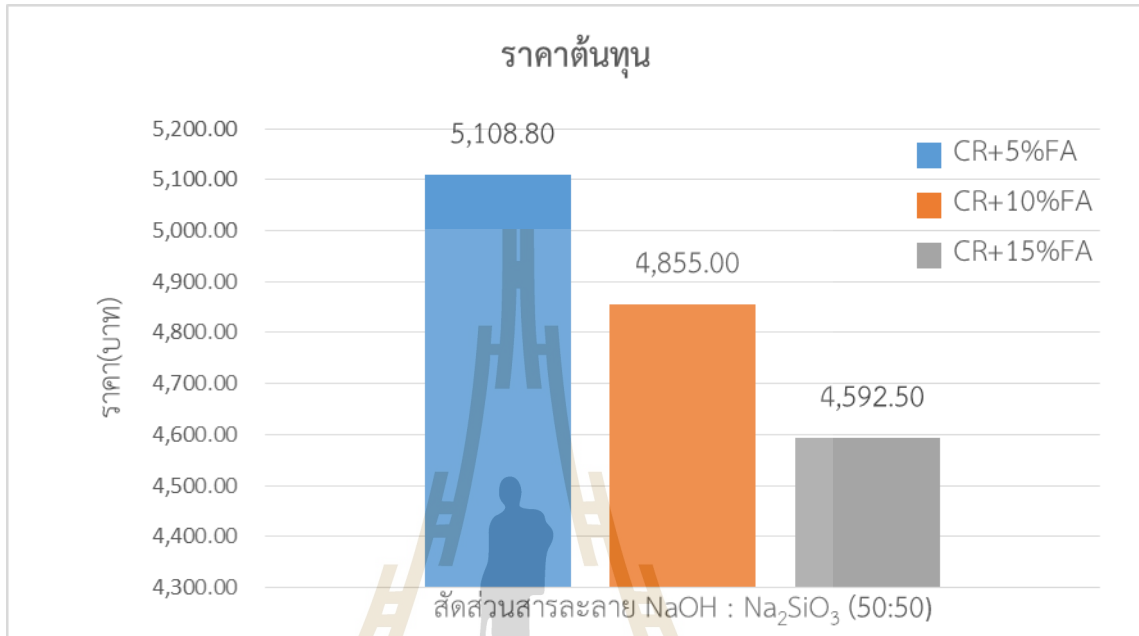
รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์
ที่สัดส่วนผสม (CR:FA = 90 : 15) ที่อายุบ่มที่อุณหภูมิห้อง

4.5 การวิเคราะห์ด้านต้นทุนของวัสดุ

การวิเคราะห์ด้านต้นทุนของวัสดุจากข้อมูลกำลังอัดและต้นทุนที่ใช้ในการพัฒนากำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบของหินคลุกปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ดังนี้

- 1.) เถ้าลอย ราคา 1,000.00 บาท/ตัน จากโรงผลิตไฟฟ้า อำเภอมะเมาะ จังหวัด ลำปาง.
- 2.) หินคลุก ราคา 190.00 บาท/ตัน จากโรงโม่หิน ส.ศิลาทอง จังหวัด สระบุรี
- 3.) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ราคา 50.00 บาท/กิโลกรัม จากบริษัท วิโรฒ
วิทยภัณฑ์ จำกัด. จังหวัด นครราชสีมา ใช้ผสมกับน้ำ ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์
ต้นทุนจะลดลงเป็น 20.00 บาท/กิโลกรัม.

- 4.) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ราคา 67.00 บาท/กิโลกรัม จากบริษัท วิโรฒวิทยา ภัณฑ์ จำกัด. จังหวัด นครราชสีมา



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงต้นทุนวัสดุรวมรวมหยาบหินคลุกผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่ส่วนผสมต่างๆ มีสัดส่วนสารละลายระหว่าง $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$

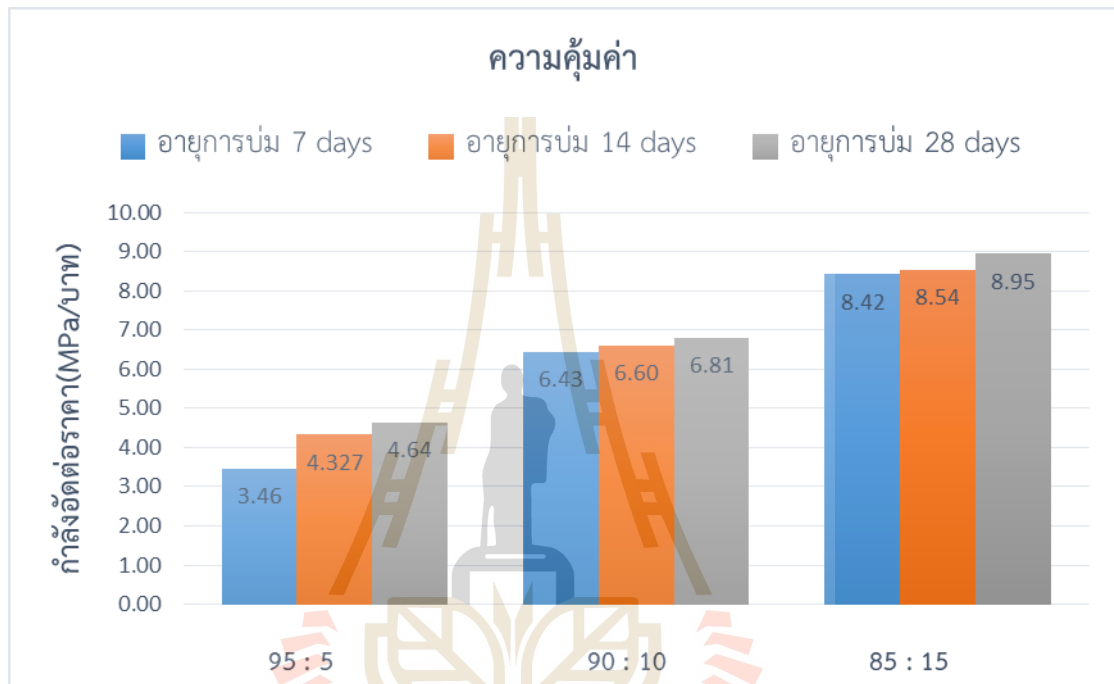
จากรูปที่ 4.9 แสดงต้นทุนวัสดุรวมรวมหยาบจากหินคลุกผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่ส่วนผสมต่างๆ โดยคิดราคาจากปริมาณ ที่ 1,000 กิโลกรัม ในสัดส่วนผสมที่ 95 : 5 มีราคาเท่ากับ 5,108.80 บาท ,สัดส่วน 90 : 10 มีราคาเท่ากับ 4,855.00 บาท และค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ที่อัตราส่วนเท่ากับ 85 : 15 มีราคาเท่ากับ 4,592.50 บาท

การวิเคราะห์ต้นทุนต่อผลตอบแทน (Cost – Benefit Analysis) เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการเลือกใช้งานวัสดุรวมรวมหยาบหินคลุก เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ที่มีความคุ้มค่าใช้งาน รูปที่ 4.9 แสดงที่ส่วนผสม 85 : 15 ใช้สารละลาย $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 50 : 50 ให้ต้นทุนต่อกำลังอัดค้ำมากที่สุด การปรับปรุงหินคลุกผสมเถ้าลอย จีโอ โพลิเมอร์ที่เลือกสัดส่วนที่ดีที่สุดต่ออายุการบ่มที่ 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน พบว่า

อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยา $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ที่อายุการบ่ม 7 วัน. ราคาต้นทุนต่อกำลังที่ค้ำมากที่สุด ที่ใช้เถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15

อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยา NaOH : Na₂SiO₃ ที่อายุการบ่ม 14 วัน. ราคาต้นทุนต่อกำลังที่
 คุ่มค่าที่สุด ที่ใช้เถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15

อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยา NaOH : Na₂SiO₃ ที่อายุการบ่ม 28 วัน. ราคาต้นทุนต่อกำลังที่
 คุ่มค่าที่สุด ที่ใช้เถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงต้นทุนวัสดุรวมหายาหินคลุกผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์
 ที่ส่วนผสม 50 : 50 ต่ออายุการบ่มที่ 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน

ในขณะที่ต้นทุนต่อกำลังอัดจะคุ้มค่ามากขึ้น เมื่อมีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น โดยที่กำลัง
 อัดต่อต้นทุนที่ดีที่สุด จากรูปที่ 4.10 แสดงต้นทุนของการปรับปรุงหินคลุกผสมเถ้าลอย จีโอโพลิ
 เมอร์ ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยคิดจากปริมาณหินคลุกที่ 1,000 กิโลกรัม. จะพบว่าสัดส่วนที่คุ้มค่า
 ที่สุดคือ ส่วนสัดส่วน CR : FA = 95 : 5 ให้ค่ากำลังที่ 4.64 MPa ก็ยังสูงกว่าค่ามาตรฐานของการ
 รถไฟ มีค่ากำลังอัดที่ยอมให้ 1.96 MPa (ต่อน้ำหนักกดเพลลา) มีราคาเท่ากับ 3.46 MPa/baht. ที่อายุ
 การบ่ม 7 วัน โดยใช้ปริมาณเถ้าลอย(Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 5 ส่วนสัดส่วน CR : FA = 90 : 10 ให้
 ค่ากำลังที่ 6.43 MPa ก็ยังสูงกว่าค่ามาตรฐานของการรถไฟ มีค่ากำลังอัดที่ยอมให้ 1.96 MPa (ต่อ
 น้ำหนักกดเพลลา) มีราคาเท่ากับ 4.32 MPa/baht. ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยใช้ปริมาณเถ้าลอย(Fly Ash)
 เท่ากับร้อยละ 10 และส่วนสัดส่วน CR : FA = 85 : 15 ให้ค่ากำลังที่ 8.41 MPa ก็ยังสูงกว่าค่า

มาตรฐานของการรถไฟ มีค่ากำลังอัดที่ยอมให้ 1.96 MPa(ต่อน้ำหนักกดเพลตา) มีราคาเท่ากับ 4.64 MPa/baht. ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยใช้ปริมาณเถ้าลอย(Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 15

ดังนั้น สัดส่วนที่ให้กำลังอัดดีที่สุดและราคาต่ำสุดคือ CR : FA = 85 : 15 ใช้อัตราส่วนของสารละลาย NaOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 50 : 50



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้การศึกษาปรับปรุงหินคลุกผสมเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด ปริมาณของอัตราส่วนระหว่าง สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 28 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานค่าที่ยอมให้ 1.96 MPa (ต่อน้ำหนักกดเพลลา) และมาตรฐานงานพื้นที่ทางของการรถไฟ ที่ค่ายอมให้ 1.57 MPa (ต่อน้ำหนักกดเพลลา) ท้ายสุดจะวิเคราะห์ผลจากผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนและความคุ้มค่าที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างทางรถไฟทางคู่ ช่วงมาบกะเบา-ชุมทางจิระได้ดังนี้

5.1.1 ที่อัตราส่วนระหว่างวัสดุรวมรวมหยาบของหินคลุกผสมกับเถ้าลอย (Fly ash) จีโอโพลิเมอร์มีสัดส่วน CR : FA = 5 , 10 และ 15 ใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2SiO_3 : NaOH = 50 : 50 มีการบ่มที่อายุ 7 วัน , 14 วัน และ 28 วัน ทุกสัดส่วนจะเป็นค่ากำลังอัดสูงกว่า 1.57 MPa. ซึ่งเป็นพื้นที่ทางสำหรับรถไฟที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และจะมีการสร้างพื้นที่ทางรถไฟให้สามารถรับน้ำหนักได้ที่ 1.96 MPa ในเส้นทางที่ก่อสร้างขึ้นใหม่ หรือทดแทนเส้นทางเดิม สำหรับสัดส่วนที่เหมาะสมควรนำมาใช้ในการก่อสร้างพื้นที่ทางของรถไฟ ควรใช้สัดส่วนของเถ้าลอยที่ร้อยละ 10 ถึง 15 จึงจะทำให้ปริมาณการชะล้างของสารละลายอัลคาไลน์มีความเข้มข้นเพียงพอจนสามารถพัฒนา กำลังได้อย่างต่อเนื่องตามช่วงอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น.

5.1.2 วัสดุตัวอย่างหินคลุกผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ในสัดส่วน CR : FA = 95 : 5,90 : 10,85 : 15 ที่ใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2SiO_3 : NaOH = 50 : 50 มีการพัฒนา กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน.ถึง 28 วัน. ที่อายุการบ่ม 7 วัน. ทุกสัดส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 3.5% และ กำลังอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วน CR : FA = 90 : 10 และ ที่ผสมด้วยสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2SiO_3 : NaOH = 50 : 50 มีการพัฒนา กำลังอัดขึ้นเรื่อย ๆ มากกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 3.5 % จนถึงอายุบ่ม 28 วัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า สามารถใช้สารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์แทนปูนซีเมนต์ได้.

- 5.1.3 สัดส่วนที่ให้กำลังอัดดีที่สุดและราคาต่ำสุดคือ CR : FA = 85 : 15 ใช้อัตราส่วนของสารละลาย NaOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 50 : 50 ผลที่ได้จากการทดสอบสูงกว่าค่ามาตรฐานของการรถไฟ มีค่ากำลังอัดที่ยอมให้ 1.96 MPa(ต่อน้ำหนักกดเพลลา) มีราคาเท่ากับ 4.64 MPa/baht. ที่อายุการบ่ม 7 วัน
- 5.1.4 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ มีประโยชน์เพื่อให้เห็นลักษณะความแตกต่างตามระยะเวลาการบ่มของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจำเป็นจะทำให้เห็นขั้นตอนและกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันหรือการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างหินคลุกแฉะล่อยจีโอโพลิเมอร์ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น.

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป

- 1.) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงหินคลุกผสมแฉะล่อย จีโอโพลิเมอร์ หากมีการศึกษาต่อควรลดปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ลง เพราะมีราคาแพงมาก หากต้องการลดต้นทุนโดยอาจใช้วัสดุชนิดอื่นในการทดแทน เช่น แฉะล่อย (Fly Ash) ทำแทนด้วย แฉะลอบ (RHA) หรือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) การลดสัดส่วนของแฉะลอบ นอกจากนี้ ควรศึกษาด้านความคงทน หรือ อิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของหินคลุกแฉะล่อยจีโอโพลิเมอร์
- 2.) งานวิจัยนี้การศึกษาปรับปรุงหินคลุกผสมแฉะล่อย จีโอโพลิเมอร์ โดยจะทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน ดังนั้นควรมีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มและระยะเวลาการบ่ม เช่น ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่อายุบ่ม 14, 28, 60 และ 90 วัน ต่อกำลังอัด.

เอกสารอ้างอิง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. สืบค้นจาก <http://maemoh.egat.com/ash/index.php>.

[20 พฤศจิกายน 2560]

กรมทางหลวง. (2544). มาตรฐานที่ ทล.-ม.201/2544 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก.

กรมทางหลวง. (2556). มาตรฐานที่ ทล.-ม.203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์
(Cement Modified Crushed Rock Base).

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.101/2515 วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.102/2515 วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL.) ของดิน.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.103/2515 วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ
Plasticity Index (PI) ของดิน.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.105/2515 วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive
Strength ของดิน.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.202/2515 วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse
Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.107/2517 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบมาตรฐาน.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่า
มาตรฐาน.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.109/2517 วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR.

กรมทางหลวง. วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205/2517 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรง
แบบล่าง.

คมกริช เวชสัตย์, สุทธิรักษ์ บูชากุล, ปาริฉัตร ปั้นทอง และสุรเดช เหม่มพกุล. (2553). การออกแบบ
และก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุม
วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี.

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข. (2556). การปรับปรุงหินคลุกด้วยคุณภาพเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง,
วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2556.

ธรรม เจริญราวานิช. (2549). การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางรถไฟในแขวงบำรุงนครปฐมวิศวกรรม
สาร มก. ฉบับที่ 57 ปีที่ 19 (ธันวาคม 2548- มีนาคม 2549).

- นคร จันทกร. (2512). **ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ**. อติตรองผู้ว่าการรถไฟแห่งประเทศไทย. (8 กันยายน 2512).
- สมิตร ต่งพิริยะกิจ. (2548). **อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการอัดของมอร์ต้าจีโอโพลีเมอร์**. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34.
- _____. (2556). **คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน**. สืบค้นจาก http://research.rid.go.th/vijais/pdf/Coal_Concrete1.pdf. [24 พฤศจิกายน 2560]
- สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท. (2545) **มาตรฐานที่ มทข. 203-2545 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base)**. อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2539. **โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม มาตรฐานเลขที่ มอก. 433-2539**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ทล-ม. 203/2556, มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ กรมทางหลวง ประเทศไทย, 2558.
- มทข. 244-2556, มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ กรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย, 2557.
- Alonso S, Palomo A. (2001). **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature activator concentration and solids ratio**. Cement and Concrete Research, 29 (1-2):55-62.
- Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. (2009). **Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers**. Waste Management, 29 (2):539-43.
- 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 et al. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere, 99:83-96.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan, BV. (2003). **The effect of mixture composition and curing temperature on the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete**. The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, Indonesia, CMT 14-CMT 18.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. (2004). **Brief Review of Development of Geopolymer Concrete**. American Concrete Institute, USA : Los Vegas, 25 May 2004.

- Hoy M, Horpibulsuk S, Arulrajah A. (2016). **Strength development of Recycled Asphalt Pavement – Fly ash geopolymer as a road construction material.** Construction and Building Materials 117, pp. 209-219
- Ohsawa S, Asaga K, Goto S, Daimon M. (1985). **Quantitative determination of fly Ash in the hydrated fly ash – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ system.** Cement and Concrete Research , 15(2): 357-366.







รูปที่ ก.1 ตัวอย่างหินคลุก



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างเถ้าลอย



รูปที่ ก.3 สารโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)



รูปที่ ก.4 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)



รูปที่ ก.5 การผสมหินคลุกในสัดส่วนต่างๆระหว่างหินคลุก:เถ้าลอย (95:5,90:10,85:15)



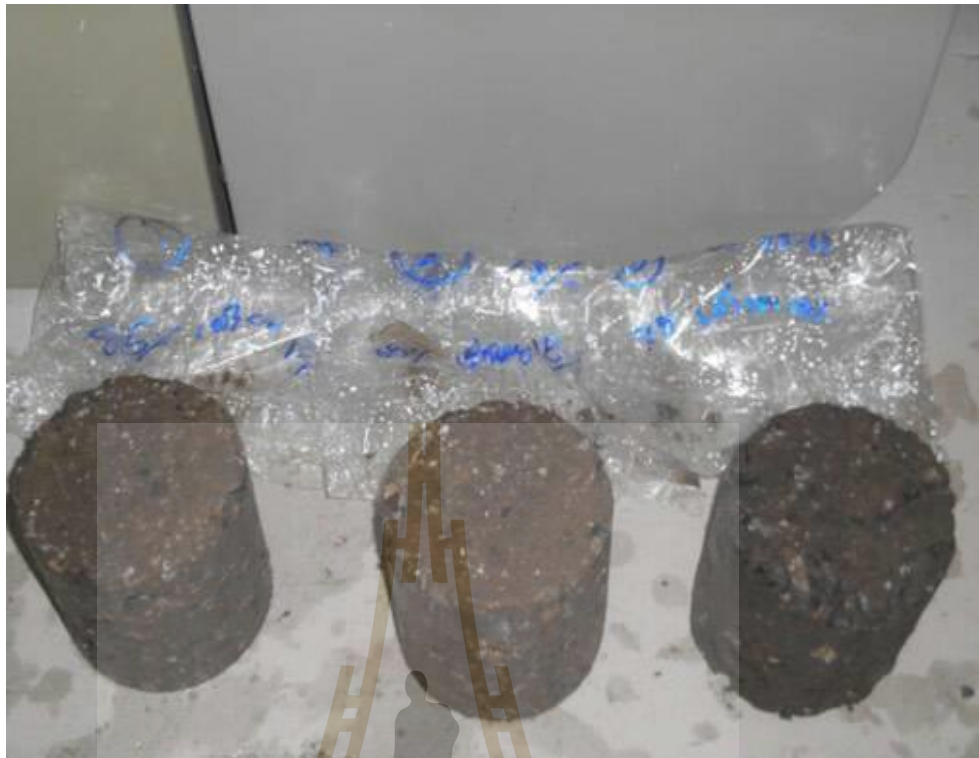
รูปที่ ก.6 การบดอัดตัวอย่างหินคลุกในสัดส่วนต่างๆ (95:5,90:10,85:15)



รูปที่ ก.7 การบดอัดตัวอย่างหินคลุกในสัดส่วนต่างๆ (95:5,90:10,85:15)



รูปที่ ก.8 การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วนต่างๆ(95:5,90:10,85:15)ชุดตัวอย่างละ 9 ก้อน



รูปที่ ก.9 การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วน 95 : 5 (ชุดตัวอย่างละ 9 ก้อน)



รูปที่ ก.10 การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วน 90 : 10 (ชุดตัวอย่างละ 9 ก้อน)



รูปที่ ก.11 การบ่มแห้งตัวอย่างในสัดส่วน 85 : 15 (ชุดตัวอย่างละ 9 ก้อน)



รูปที่ ก.12 การเตรียมชิ้นตัวก่อนการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



รูปที่ ก.13 การทดสอบกำลังแรงอัดแกนเดียว



รูปที่ ก.14 การวิบัติของวัสดุที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ประวัติผู้เขียน

นายพร ชนะपाल เกิดเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2513 ภูมิลำเนาเดิมเกิดที่ ต.โคกมั่งงอย อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ ปัจจุบันอยู่บ้านเลขที่ 666/79 ต.จอหอ อ.เมือง จ.นครราชสีมา ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนคอนสวรรค์ อ.คอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ ปี พ.ศ. 2527. สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิค ชัยภูมิ ปี พ.ศ.2530. สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นสูง สาขาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคศรีสะเกษ ปี พ.ศ.2532. และในปี พ.ศ.2534 - 2539 ได้ไปทำงานที่ประเทศญี่ปุ่น ตำแหน่งช่างประกอบชิ้นส่วนและช่างเชื่อมเหล็กรูปพรรณ ที่โรงงานของบริษัท HORIKE จำกัด ใน จังหวัด นิงาตะ ประเทศญี่ปุ่น. ปี 2540 ได้มาศึกษาต่อและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง ผู้จัดการ โครงการ บริษัท เบญจมาศ จำกัด. เป็นบริษัทที่ทำธุรกิจเกี่ยวกับบอสังหาริมทรัพย์ จึงทำให้เกิดแรงจูงใจในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขา บริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2559 จากงานวิจัยในครั้งนี้ทำให้ผู้วิจัยได้ความรู้และความเข้าใจการปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกผสมเถ้าลอย จีโอโพลีเมอร์ การทดสอบการรับน้ำหนักของวัสดุตัวอย่าง โดยตรงของการปรับปรุงหินคลุกผสม เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ เป็นอย่างดี.