

การพัฒนากำลังของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยตะกั่วเหล็กเถ้าลอย
จีโอโพลิเมอร์



นายชาญยุทธ กองเกิด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**STRENGTH DEVELOPMENT OF MARGINAL
LATERITIC SOIL STABILIZED WITH
SLAG-FLY ASH GEOPOLYMER**



Chanyuth Khongkred

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2015

การพัฒนากำลังของคณาจารย์ที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยตระกรันเหล็กเฝ้าลอย
จีโอโพลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจางค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชาญุทธ กองเกิด : การพัฒนากำลังของดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้วยตะกรันเหล็ก
ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ (STRENGTH DEVELOPMENT OF MARGINAL LATERITIC
SOIL STABILIZED WITH SLAG-FLY ASH GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 67 หน้า

วัสดุลูกรังที่มีคุณสมบัติไม่ได้มาตรฐานงานทางมักจะทำการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์
(Ordinary Portland cement, OPC) กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานสูงและมีการปล่อย
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดภาวะโลกร้อน จีโอโพลิเมอร์เป็น
วัสดุเชื่อมประสานที่ถ้ำลอยเป็นสารตั้งต้นและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์
ไรเซชันสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเติมสารที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุเหลือ
ทิ้งที่มีมากในประเทศไทยและมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์สูง การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษา
อิทธิพลของสารเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาการบ่ม และสัดส่วนของปริมาณตะกรันเหล็กต่อถ้ำลอย
ต่อกำลังอัดแกนเดียวสัดส่วนของดินลูกรัง : ถ้ำลอย : ตะกรันเหล็ก กำหนดไว้ 3 สัดส่วน คือ
60:30:10, 50:30:20 และ 40:30:30 สัดส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 สัดส่วน
คือ 100:0, 90:10, 80:20, 50:50 และ 40:60 และระยะเวลาการบ่มกำหนด 7 วัน, 14 วัน
และ 28 วัน

ผลทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction Test) พบว่า
หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าสูงขึ้นตามสัดส่วนตะกรันเหล็กโมที่เพิ่มขึ้น และปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา
เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนโซเดียมซิลิเกตในสารเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น กำลังอัดของดินลูกรัง
จีโอโพลิเมอร์แปรผันตรงตามระยะเวลาการบ่ม ปริมาณของตะกรันเหล็กโม และปริมาณของ
โซเดียมซิลิเกตในสารเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของโซเดียมซิลิเกตในสารเร่งปฏิกิริยาเพิ่มความหนืด
ของสารเร่งปฏิกิริยาและเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา
เหมาะสมมีค่าลดลง ดังนั้น หากคำนึงด้านความสามารถในการปฏิบัติงาน (Workability) และ
ต้นทุนการใช้สัดส่วนของโซเดียมซิลิเกตที่น้อยลง (เพิ่มปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า
ร้อยละ 50) ทำให้สารเร่งปฏิกิริยามีความหนืดน้อยลง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานขึ้น
ถึงแม้กำลังอัดแกนเดียวจะมีต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปริมาณโซเดียมซิลิเกตในสัดส่วนสูง
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงซึ่งกำหนดค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม
7 วัน ต้องไม่น้อยกว่า 1.72 เมกกะปาสกาล สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ที่
มีปริมาณการจราจรต่ำ และ 2.41 เมกกะปาสกาล สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางดิน
ซีเมนต์ที่มีปริมาณการจราจรสูง ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 50 ถึง 60 ให้กำลังอัดที่มี

ค่ายอมรับได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงภาพถ่ายด้วยกล้องส่องกราดพบว่าตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังอัดต่ำเกิดจากระบวนการชะละลายซิลิกาและอลูมินาจากเม็ดเถ้าลอยที่ช้า ขณะที่อนุภาคเถ้าลอยของตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังอัดสูงเกิดรูพรุนอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไลเซชันได้ดี

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็กไหม้ จีโอโพลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นโครงสร้างทางชั้นพื้นทางเขียว โดยสัดส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมควรใช้สัดส่วนปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 60 ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อตะกรันเหล็กเท่ากับ 3 : 1 ถึง 1 : 1 ซึ่งให้กำลังอัดที่สูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวง นอกจากการศึกษาวิจัยด้านการพัฒนากำลังอัดแล้ว ผู้วิจัยเห็นว่าควรมีการศึกษาเพิ่มเติมด้านคุณสมบัติอื่นๆ เช่น คุณสมบัติด้านความคงทน ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ และความคุ้มค่าทางด้านต้นทุน เป็นต้น



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

CHANYUTH KHONGKRED : STRENGTH DEVELOPMENT OF
MARGINAL LATERITIC SOIL STABILIZED WITH SLAG-FLY ASH
GEPOLYMER. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK,
Ph.D., 67 PP.

GEPOLYMER/LATERITIC SOIL/FLY ASH/SLAG

Marginal lateritic soil is generally stabilized with Ordinary Portland cement. The cement production consumes energy significantly and emits carbon dioxide (CO_2) to atmosphere, leading to greenhouse effect. Geopolymer is a green binder, which use fly ash (FA) as a precursor. Geopolymerization reaction can be improved by an addition of calcium-rich material. Steel slag, which is abundant in Thailand, is composed of very high calcium oxide. This thesis attempts to investigate effects of liquid alkaline activator, curing time and slag to FA ratio on unconfined compressive strength (UCS). The lateritic soil : FA : slag ratios studied are 60:30:10, 50:30:20 and 40:30:30, the sodium silicate:sodium hydroxide ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) ratios are 100:0, 90:10, 80:20, 50:50 and 40:60 and the curing times are 7, 14 and 28 days.

The modified compaction test results show that the maximum dry density increases with increasing slag content and the optimum alkaline content increases with increasing Na_2SiO_3 . The UCS mainly depends on curing time, slag content and Na_2SiO_3 content. The input of Na_2SiO_3 increases the viscosity of the liquid alkaline activator and fastens the geopolymerization reaction resulting lower optimum liquid alkaline activator. Considering the workability and cost effectiveness, the reduction in Na_2SiO_3 (increase in NaOH over 50%) reduces the viscosity of the liquid alkaline

activator and increases initial setting time. Though the UCS of high NaOH geopolymer is lower than that of low NaOH geopolymer, the 7-day UCS values of high NaOH geopolymer meets the requirement for stabilized base of the Department of Highways, which are 1.7 MPa for low traffic loads and 2.41 MPa for high traffic loads, respectively. The optimum NaOH is found to be 50-60% where the UCS is greater than the requirement of Department of Highways. Scanning electron microscopy analysis shows that the low UCS of FA-slag geopolymer is caused by the poor leaching process of silica and alumina oxides from FA whereas FA particles of high UCS specimen have many etching holes, which indicate the better geopolymerization reaction.

This research shows the viability of marginal lateritic soil improvement with FA-slag geopolymer to be green stabilized base layers. The suggested NaOH content is about 50 to 60% and the slag : FA is about 3 : 1 to 1 : 1 in which the UCS is greater than the requirement of the Department of Highways. Besides, future works on the investigation of durability, permeability and cost effectiveness are recommended.

School of Civil Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความร่วมมือของหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคณาจารย์ผู้ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้านวิศวกรรมโยธา ทั้งในระดับปริญญาศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในระดับบัณฑิตศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อนผู้เป็นกัลยาณมิตรคุณอติธิกร ภูมิพันธ์ ผู้บังคับบัญชา ผู้ร่วมงาน และผู้ใต้บังคับบัญชาในกรมทางหลวงชนบทและสำนักงานทางหลวงชนบทที่ ๓ (ชลบุรี) ทุกท่านที่ได้ส่งเสริม สนับสนุนและให้คำปรึกษาจนกระทั่งการดำเนินงานศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ให้แก่ผู้ศึกษาซึ่งเป็นความรู้และประสบการณ์ที่มีค่าและมีประโยชน์ในการทำงานของผู้ศึกษาและหน่วยงานต้นสังกัดต่อไป

ชาญยุทธ กองเกิด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ตะกรันเหล็กโม้.....	5
2.2 ใ้ลลย.....	8
2.3 Geopolymer.....	16
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator).....	20
2.5 ข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีดำเนินการศึกษา	29
3.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ.....	29
3.2 การหาความชื้นเหมาะสมของตัวอย่าง.....	30
3.3 การเก็บตัวอย่าง.....	30
3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS).....	31
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	33
4.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ.....	33
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....	37
4.3 กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS).....	40
4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค.....	47
5 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	54
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก ก ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กไม่.....	6
2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	10
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ.2533-2541.....	11
2.4 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....	13
2.5 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์.....	19
2.6 คุณสมบัติทางเคมีของ โซเดียมซิลิเกตเหลว.....	20
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินลูกรัง.....	33
4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของดินลูกรัง เถ้าลอย และตะกรันเหล็กไม่.....	35
4.3 เปรียบเทียบกำลังอัดของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วนต่าง ๆ.....	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Basic oxyen furnace และ electric are furnace (Shi,2004)	5
2.2 กระบวนการเกิดตะกั่วเหล็กไม่	6
2.3 Scanning Electron Microscope (SEM) ถ้ำลอย ขยาย (1,000 เท่า)	12
2.4 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน	14
2.5 รูปทรงสี่หน้าของ SiO ₄	15
2.6 โครงสร้างผลึก - ควอร์ชภายใต้บนระนาบ (0001) (Dcer et al., 1971)	15
2.7 โครงสร้างผลึกของ α -ควอร์ช โครงสร้างผลึกของ α -ควอร์ชภายใต้บน (0001) (Decr et al.,1971)	16
2.8 กระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	16
2.9 ผิวของถ้ำลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ 10 นาที่ (Rattanasak & Chindaprasirt, 2009, 2014; Rattanasak, Pankhet, & Chindaprasirt, 2011)	18
3.1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการทดสอบ	32
4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) ถ้ำลอย (ข) ตะกรันเหล็กไม่ และ (ค) ดินลูกรัง	36
4.2 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	36
4.3 ภาพถ่าย SEM ของ (ก) ดินลูกรัง (ข) ถ้ำลอย และ (ค) ตะกรันเหล็กไม่	37
4.4 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์สัดส่วน Soil:FA:slag = 60:30:10	38
4.5 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์สัดส่วน Soil:FA:slag = 50:30:20	38
4.6 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์สัดส่วน Soil:FA:slag = 40:30:30	39
4.7 ค่ากำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์สัดส่วน Soil:FA:slag = 60:30:10	41
4.8 ค่ากำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วน Soil:FA:slag = 50:30:20	42
4.9 ค่ากำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วน Soil:FA:slag = 40:30:30	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ค่ากำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ตามสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา (Activator) (ก) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0$, (ข) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$, (ค) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 80:20$, (ง) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 50:50$ และ (จ) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$	44
4.11 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ Soil:FA:slag = 60:30:10 ของอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ และ 40:60 บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	49
4.12 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ Soil:FA:slag = 40:30:30 ของอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ และ 40:60 บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	50
4.13 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ Soil:FA:slag = 50:30:20 ของทุกอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ อายุบ่ม 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง.....	51
4.14 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ Soil:FA:slag = 50:30:20 ของอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$ บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	51
4.15 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ Soil:FA:slag = 50:30:20 ของอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ บ่มที่อุณหภูมิห้อง.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการขาดแคลนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง นับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นอันเนื่องมาจากแหล่งวัสดุที่ได้ตามมาตรฐานถูกนำมาใช้แล้วเป็นจำนวนมาก ประกอบกับปัจจุบันสังคมเริ่มตระหนักมากขึ้นถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมทำให้การหาแหล่งวัสดุใหม่ๆเป็นไปด้วยความยากลำบาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุก่อสร้างประเภทดินลูกรังหรือหิน โม่ชนิดต่างๆ ที่เป็นวัสดุพื้นฐานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

วัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างทางมักจะเป็นวัสดุที่ได้มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น ดินเดิมใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางชั้นคันทางดินถม (Embankment) ลูกรังใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางชั้นรองพื้นทาง (Sub-base Course) และหินคลุกใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางชั้นพื้นทาง (Base Course) วัสดุเหล่านี้ได้จากแหล่งผลิตที่ถูกต้องตามกฎหมายซึ่งนับวันยิ่งจะลดน้อยลงและจะหมดไปในที่สุดเนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตด้านเศรษฐกิจและความต้องการในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วการเปิดแหล่งวัสดุใหม่หรือการเปิดสำปะทานแหล่งวัสดุใหม่เป็นไปได้อย่างยากขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดด้านกฎหมายและการตระหนักด้านปัญหาสิ่งแวดล้อมของสังคม

ปัญหาการขาดแคลนแหล่งวัสดุส่งผลกระทบต่อต้นทุนการก่อสร้างและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างทาง ดังนั้นสถาบันการศึกษาและหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมทางได้วิจัยเพื่อหาวัสดุใหม่ทดแทนวัสดุก่อสร้างพื้นฐานจากธรรมชาติรวมทั้งการหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุธรรมชาติที่ไม่ได้มาตรฐานให้สามารถเป็นวัสดุวิศวกรรมได้ อันจะนำมาซึ่งการลดต้นทุนค่าขนส่งวัสดุที่ได้มาตรฐานจากแหล่งวัสดุที่ห่างไกลจากสถานที่ก่อสร้าง

ปัจจุบัน เทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติในงานก่อสร้างทางถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อขจัดปัญหาการขาดแคลนวัสดุวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุธรรมชาติและบดอัดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม (กำลังต้านทานแรงเค้นการอัดตัว การบวมตัว และการหดตัว) การปรับปรุงดังกล่าวมักทำกับดินลูกรังทั้งที่ได้และไม่ได้มาตรฐานเพื่อทดแทนหินคลุกในพื้นที่ก่อสร้างที่ไกลจากแหล่งวัสดุหินคลุก นอกจากนี้เทคนิคการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์นี้ยังประยุกต์ใช้ในการซ่อมบำรุงทาง พื้นทางหิน

คลุกเดิมที่เสียหาย โดยการกัดโครงสร้างทางเดิมที่เสียหายแล้วผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่เหมาะสมคลุกเคล้าผสมให้เข้ากันแล้วบดอัดใหม่วิธีการนี้เรียกว่าวิธีการหมุนเวียนการใช้วัสดุเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) อย่างไรก็ตาม การได้มาซึ่งหินปูนซึ่งเป็นวัสดุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาด้านการทำลายธรรมชาติสิ่งแวดล้อมจากการระเบิดแหล่งหิน และกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อนการผลิตปูนซีเมนต์ปริมาณ 1 ตัน จะต้องปล่อยก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์) ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณ 1 ตัน (Davidovits et al.2002) เช่นเดียวกัน

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารเชื่อมประสานชนิดใหม่ของโลกปัจจุบัน ซึ่งเป็นส่วนผสมของสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) และวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักสารกระตุ้น สารกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution, NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) วัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้จัดเป็น Green material ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก่อให้เกิด Greenhouse effect) จีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงในการเตรียมตัวอย่างจึงปลดปล่อย CO_2 ต่ำ จีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดและความคงทนที่เหนือกว่าปูนซีเมนต์ (Sukmak et al.,2014)

ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตและการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาไหม้ถ่านหินในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตพลังงานไฟฟ้า มักนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก (วัสดุพอซโซลานิก) ไม่เพียงแต่จะประยุกต์ใช้กับปูนซีเมนต์เท่านั้น เถ้าลอยยังใช้เป็นวัสดุตั้งต้น (Precursor) ในการผสมกับสารกระตุ้นเพื่อผลิตสารเชื่อมประสาน จีโอโพลิเมอร์ (Chindaprasirt et al., 2007)

สารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ใช้ Na_2SiO_3 เป็นส่วนผสมหลักของสารกระตุ้น ดังนั้นหากมีการเติมสารผสมเพิ่มที่มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร่วมกับเถ้าลอย สารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก Na_2SiO_3 สามารถทำปฏิกิริยากับ CaO และเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, C-S-H) ตะกรันเหล็กโม (Slag) ซึ่งเป็นของเสียอุตสาหกรรมมี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น การประยุกต์ใช้ตะกรันเหล็กโมร่วมกับเถ้าลอยในการผลิตสารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ นอกจากจะมีประโยชน์ ด้านวิศวกรรมและเศรษฐกิจแล้ว ยังมีประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งสองชนิด (เถ้าลอยและตะกรันเหล็กโม) ร่วมกับสารกระตุ้น (NaOH และ Na_2SiO_3) เพื่อผลิตสารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์เขียว (Green geopolymer binder)

ในการปรับปรุงดินลูกรังที่ไม่ผ่านมาตรฐานวัสดุปรับปรุงนี้ สามารถใช้เป็นชั้นทางปรับปรุงแทนหินคลุก การทดสอบดินลูกรังปรับปรุงประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดและเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเพื่ออธิบายอิทธิพลของตะกรันเหล็กไม่ต่อการพัฒนากำลังอัด งานวิจัยนี้จะเป็นต้นแบบเทคนิคการปรับปรุงดินลูกรังเพื่อใช้งานวิศวกรรมทางของประเทศไทยที่ใช้สารเชื่อมประสานเขียวแทนการใช้ปูนซีเมนต์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงวัสดุดินลูกรัง (Laterlitic Soil) ที่ไม่ได้มาตรฐานตามมาตรฐานการก่อสร้างทางของกรมทางหลวงชนบทด้วยสารเชื่อมประสานจีโอ โพลีเมอร์เขียว ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งสองชนิด คือ ตะกรันเหล็กไม่ (Steel slag) และเถ้าลอย (Fly Ash) เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง

1.2.2 ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลีเมอร์ และเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง สำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง

1.2.3 เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารกระตุ้น เถ้าลอย ตะกรันเหล็กไม่ และดินลูกรัง

1.2.4 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังจีโอโพลีเมอร์ด้วย Scanning Electron Microscope ที่สัดส่วนผสมระหว่างสารกระตุ้น เถ้าลอย ตะกรันเหล็กไม่ และดินลูกรังต่างๆ อันจะนำมาซึ่งความเข้าใจในปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 แหล่งวัสดุ

- ลูกรัง (Laterlitic Soil) เป็นลูกรังที่ไม่ได้มาตรฐานจากแหล่งลูกรัง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง
- ตะกรันเหล็ก ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก บริษัทสยามสตีลมิล จำกัด (Siam Steel Mill Service Co.Ltd) ตำบลบ่อวิน อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี
- เถ้าลอย จากแหล่งผลิตโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

1.3.2 สัดส่วนผสมของวัสดุมวลรวม

สัดส่วนระหว่างดินลูกรัง เถ้าลอย(FA) และตะกรันเหล็ก คิดเป็นร้อยละ โดยมวล และมี 3 สัดส่วน ดังนี้

- Soil : FA : Slag 60% : 30% : 10%

- Soil : FA : Slag 50% : 30% : 20%

- Soil : FA : Slag 40% : 30% : 30%

1.3.3 สารเร่งปฏิกิริยา

สารเร่งปฏิกิริยา(Alkaline Activators)เป็นส่วนผสมระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH)ความเข้มข้น 5 โมลาร์ โดยการผันแปรสัดส่วนดังนี้

- Na_2SiO_3 : NaOH 100 % : 0 %

- Na_2SiO_3 : NaOH 90 % : 10 %

- Na_2SiO_3 : NaOH 80 % : 20 %

- Na_2SiO_3 : NaOH 50 % : 50 %

- Na_2SiO_3 : NaOH 40 % : 60 %

1.3.4 การทดลองและการวิเคราะห์ผลทดลอง

- ทดสอบการรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ของตัวอย่างวัสดุในแต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละอัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางได้

- วิเคราะห์อิทธิพลของตะกอนเหล็กต่อการพัฒนากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน

- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) โดยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 นำผลการศึกษาที่ได้ไปกำหนดเป็นมาตรฐานในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุประเภทดินเพื่อใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างทาง

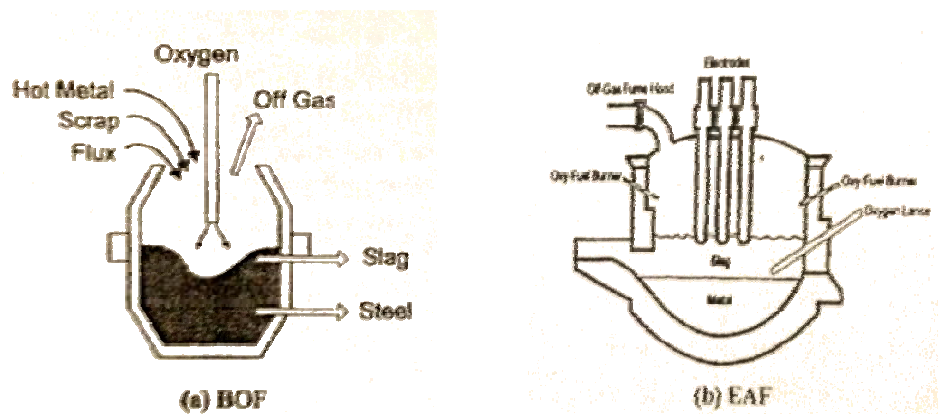
1.4.2 เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้เป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยและตะกอนเหล็กไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการผลิตสารเชื่อมประสานเขียวเพื่อใช้ในการปรับปรุง คุณสมบัติ วัสดุ ที่ไม่ได้มาตรฐานในการก่อสร้าง

บทที่ 2

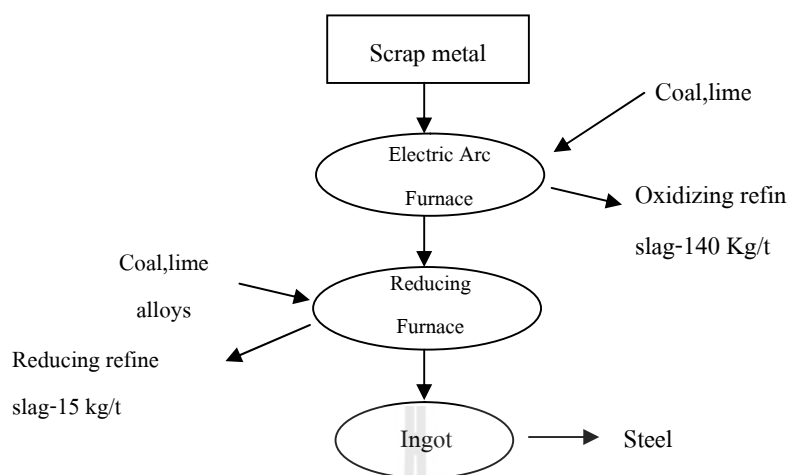
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกรันเหล็กโม

ตะกรันเหล็กโม (Steel slag) เป็นของเสียที่มากที่สุดที่ได้มาจากระบวนการถลุงเหล็กแบบ basic oxygen furnace (BOF) หรือการหลอมเศษเหล็กในกระบวนการ electric arc furnace (EAF) ในกระบวนการ BOF โลหะเหลวจาก blast furnace, เศษเหล็ก, และ fluxes ซึ่งมีส่วนประกอบของ lime (CaO) และ dolomitic lime จะถูกส่งเข้าไปในเตาหลอมและมีการพ่นออกซิเจนความดันสูง ออกซิเจนนี้จะรวมกับสารปนเปื้อน ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอน (แบบคาร์บอนมอนอกไซด์), ซิลิกอน, แมงกานีส, ฟอสฟอรัส และเหล็กบางส่วนในรูปของ liquid oxides ซึ่งทั้งหมดนี้จะรวมกับ lime และ dolomitic lime เกิดเป็นตะกรันเหล็กโม (รูปที่ 2.1a) ส่วนกระบวนการ EAF ใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบ เตาหลอมแบบ EAF มีลักษณะเหมือนหม้อต้มน้ำในรูปที่ 2.1b มี graphite electrode ผ่านตรงฝา electrode นี้ใช้ในการให้ความร้อนแก่เศษเหล็กโดยให้กระแสไฟฟ้าผ่าน electrode เพื่อให้เกิด arc นี้ละลายเศษเหล็ก ระหว่างการละลายจะมีการพ่น oxidization ทำให้เกิดตะกรันเหล็กโม กระบวนการ EAF เป็นกระบวนการใช้ในประเทศไทยเพราะการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดตะกรันเหล็กโมในกระบวนการ EAF



รูปที่ 2.1 basic oxygen furnace และ electric arc furnace (Shi,2004)



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดตะกรันเหล็กไม่ (Rohde et al.,2003)

ตะกรันเหล็กไม่ ส่วนมากจะประกอบด้วย CaO , MgO , SiO_2 และ FeO ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กไม่ชนิดต่างๆ ตะกรันเหล็กไม่จากกระบวนการ BOF และ EAF จะมีลักษณะคล้ายกันมาก อย่างไรก็ตามตะกรันจากโลหะผสมหรือเหล็ก ไร้ สนิมจะค่อนข้างแตกต่างโดยมี FeO น้อย และ Cr มากซึ่งส่วนผสมแบบนี้จะพิจารณาเป็นของ เสียอันตราย

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กไม่จากกระบวนการถลุงเหล็กแบบต่างๆ (Shi, 2004)

Components	Basic oxygen furnace	Electric arc furnace (carbon steel)
SiO_2	8-20	9-20
Al_2O_3	1-6	2-9
FeO_3	10-35	15-30
CaO	30-55	35-60
MgO	5-15	5-15
MnO	2-8	3-8
TiO_2	0.4-2	N/A ^a
S	0.05-0.15	0.08-0.2
P	0.2-2	0.01-0.25
Cr	0.1-05	0.1-1

^aNot available

การใช้ตะกรันเหล็กไม่มี CaO มาก (30-55%) และอัตราส่วน CaO/SiO₂ ที่มาก (ประมาณ 2.0) ซึ่งว่าวัสดุอาจจะไม่เสถียรเมื่อมีน้ำเพราะปฏิกิริยา hydration ของ free CaO และ MgO และปฏิกิริยา oxidation และ corrosion ของ metallic oxide ที่ยังเหลืออยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดการบวมตัวมากถึง 14% ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกของวัสดุมวลรวม (Mathur et al.,1999) การทดสอบ x-ray diffraction โดย Mancio (2001) ยังแสดงว่ามีส่วนที่ไม่เสถียรของ -Ca₂SiO₄ (larnite) ซึ่งทำให้เกิดการบวมตัวด้วย

ตะกรันเหล็กไม่ถูกพิจารณาว่าเป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมและต้องมีการทิ้งอย่างถูกต้องเพื่อจะไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตามวัสดุนี้สามารถใช้ในกระบวนการ recycle ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่หรือใช้เป็นวัสดุสำหรับการก่อสร้างถนนหรือการก่อสร้างอื่น ๆ โครงการวิจัยนี้ศึกษาการใช้ตะกรันเหล็กไม่ ซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กในการก่อสร้างปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างถนน

การใช้ตะกรันเหล็กไม่ในการสร้างถนนได้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ Bayomy & Al-Abdul Wahab (1985) ได้แสดงว่าตะกรันเหล็กไม่ใช้ในการก่อสร้างถนนและทำให้ลดความหนาของชั้นทางได้มีการใช้ตะกรันเหล็กไม่เป็นวัสดุมวลรวมในชั้นผิวทาง, พื้นทาง, และรองพื้นทางในประเทศเบลเยียม, สวีเดน, ฟินแลนด์, อังกฤษ, เนเธอร์แลนด์, ออสเตรเลีย, อเมริกา, แคนาดาและอินเดีย และได้มีข้อกำหนดสำหรับการใช้ตะกรันเหล็กไม่เป็นมวลรวมสำหรับการก่อสร้างถนนในเยอรมันและญี่ปุ่น (Chesner et al, 2000) ในอินเดียได้มีการทดลองเพื่อพัฒนาข้อกำหนดสำหรับการใช้ตะกรันเหล็กไม่เพื่อการก่อสร้างถนน โดย test section ได้แสดงว่าตะกรันเหล็กไม่มีความเหมาะสมในการใช้การก่อสร้างถนนที่มีปริมาณจราจรต่ำ (Mathur et al.,1999) ตะกรันเหล็กไม่ใช้ในการก่อสร้างถนนบราซิลมากกว่า 20 ปีมาแล้ว โดยใช้แทนที่ทรายหรือหินคลุก ในปัจจุบันเพียง 35% ของตะกรันเหล็กไม่ถูกใช้ประโยชน์โดยเฉพาะในการก่อสร้างถนน โดยที่เหลือต้องกำจัดโดยการฝังกลบแบบเปิด

อย่างไรก็ตามมีข้อพิจารณาเกี่ยวกับปริมาณของ free lime (CaO) และ free magnesium (MgO) ในตะกรันเหล็กไม่ซึ่งจะทำให้เกิดการบวมตัวภายใต้ปฏิกิริยา hydration การบวมตัวของตะกรันเหล็กไม่ เนื่องจากปฏิกิริยา hydration ของ MgO, CaO หรือทั้งสองได้รายงาน โดย Ahmed&lovell (1992), Emery (1982), Sherwood (1995) และ Heaton (1995) Aiban (2000) ได้รายงานการบวมตัวของถนนในซาอุดีอาระเบีย การบวมตัวนี้จำกัดการใช้ตะกรันเหล็กไม่ใน

สภาพที่ต้องไม่มีเหตุที่ส่งเสริมให้เกิดการบวมตัว เช่น ในสภาพที่มีค่า void ratio สูงที่เอื้อต่อการบวมตัว การวิบัติบางอย่าง เช่น radial crack และ cone-shaped deformation เนื่องจากการ hydration ของ free calcium oxide (CaO) และ magnesium oxide (MgO) ได้รายงานและแสดงให้เห็นว่ามีความน่าจะเป็นสำหรับ aging และ expansion control เพื่อให้มีพฤติกรรมของถนนที่ดี

แนวโน้มในการบวมตัวขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของตะกรันเหล็กโม้, ขนาดคละ และอายุการใช้งาน ระดับของการบวมตัวที่ยอมรับได้ขึ้นอยู่กับชนิดของงานใช้งาน การวิจัยก่อน ๆ แสดงว่าตะกรันเหล็กโม้สามารถใช้ในการก่อสร้างถนนอย่างปลอดภัยถ้าไม่ถูกความชื้นมากเกินไป ซึ่งการกระทำโดยทั่วไปก็คือการเก็บตะกรันเหล็กโม้ไว้ในอากาศเปิดเป็นระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อให้สารที่มีแนวโน้มที่จะบวมตัวมีความเสถียรขึ้น (free oxide และ metallic iron) ระยะเวลาที่ต้องการขึ้นอยู่กับว่ามีส่วนประกอบที่มีแนวโน้มในการบวมตัวมากเพียงใดและสภาพอากาศ (เช่น อุณหภูมิ ปริมาณฝน ความชื้น) และโดยทั่วไปมีระยะเวลา 3-12 เดือน (Machado, 2000)

Kandhal & Hoffman (1997) ใช้วิธี PTM 130 ในการหาค่าการบวมตัวของตะกรันเหล็กโม้ที่บ่มที่ระยะเวลาต่าง ๆ ตะกรันเหล็กโม้ที่ถูกบดอัดจะแช่ในน้ำ 7 วัน ในน้ำอุ่น ($71\pm 3^{\circ}\text{C}$) และย้ายจากน้ำอุ่นมารักษาคความอิมด้วยน้ำอีก 7 วัน ระหว่างระยะเวลา 2 สัปดาห์นี้มีการวัดการเปลี่ยนแปลงของความสูงของตัวอย่าง และพบว่าตะกรันเหล็กโม้ที่ทิ้งไว้มากกว่า 6 เดือนบวมตัวเพียง 0.3% แต่ที่ไม่ได้ทิ้งไว้จะบวมตัว 2.8% ซึ่งแสดงถึงความสำคัญของระยะเวลาการเก็บเพื่อให้มีการบวมตัวอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับงานถนน (<0.5%)

2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโลมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาลเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของ ซิลิกาและอลูมินาเมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาคแต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหินอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาของการเผาดังนั้น คุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตมีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกัน คือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของ เถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้งาน

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.2

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาอลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับเพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอนอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วยสำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกินร้อยละ 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาที่ก่อตัวได้และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์อะลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition (LOI), max %	6.0	6.0
อัลคาไลในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงานซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition(LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มากการควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้ว เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-Aggregate ขึ้นได้ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลมากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาจะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

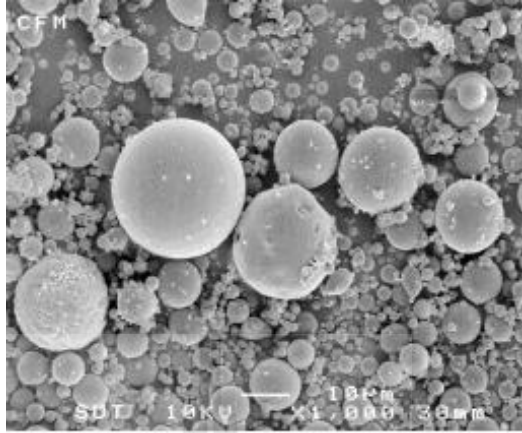
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ พ.ศ.2433 - 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าเถ้าลอยแหล่งอื่นที่มีอยู่ในประเทศไทยส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533–2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	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	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	23.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	10.0	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	11.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

2.2.2 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหิน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปางโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.3 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเท คอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ (Chindaprasirt, Jaturapitakkul, Chalee, & Rattanasak, 2009)



ตารางที่ 2.4 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง

Simple Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 %	Air Permeability (cm ³ /mg)	Mean Particle Size (micron)
ซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

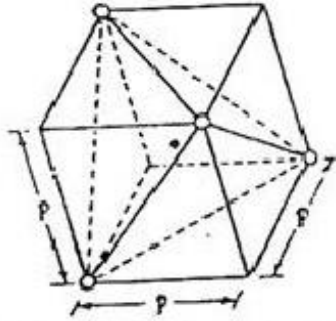
จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำงบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

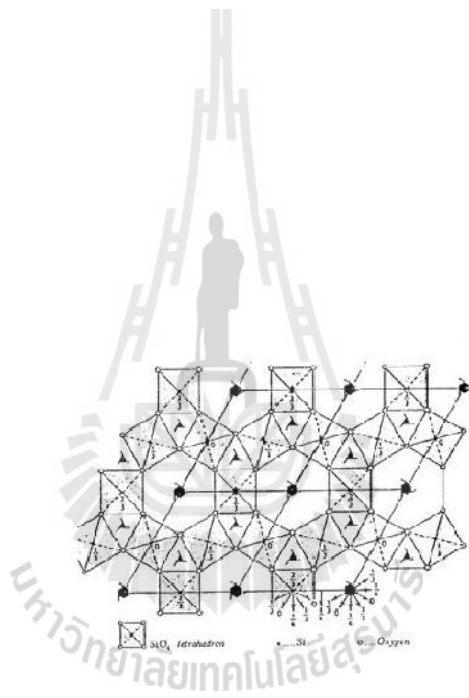
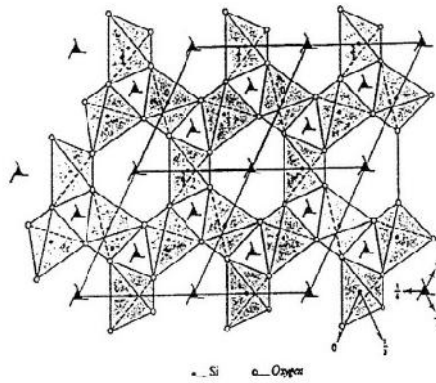
2.2.4 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

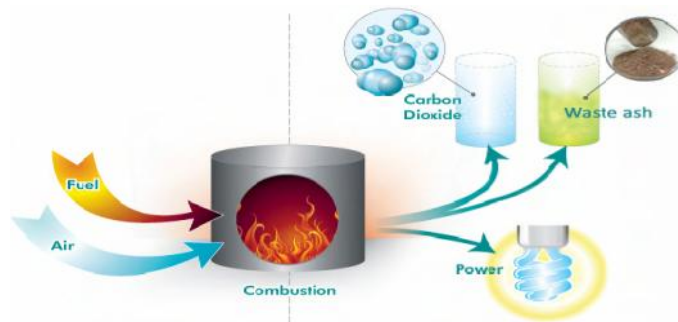
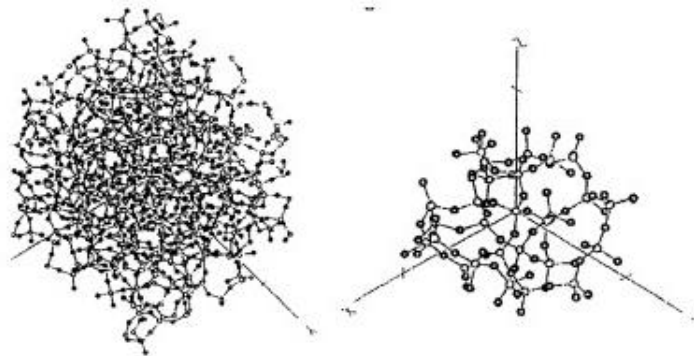
ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลานโดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 7 วันและ 28 วันเพื่อแสดงถึงอัตราการเกิดหรือความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย

2.2.5 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน

โครงสร้างผลึกซิลิกาอสัณฐานจะมีการเรียงตัวกันของอะตอมหรืออนุภาคยังไม่เป็นระเบียบ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกซิลิกาซึ่งผลึกซิลิกาดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกต่าง ๆ คือ ควอซิทไรดิไมท์และคริสโทรบอลท์โดยที่แต่ละโครงสร้างจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน







ในช่วงเวลาไม่นานนี้นักวิจัยชาวต่างประเทศหลายท่านได้พยายามศึกษาการผลิตคอนกรีตแบบใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมคอนกรีตดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบกับสารละลายซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ซึ่งมีชื่อเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) หรือมีสูตรทางเคมีคือ



เมื่อ M คือโลหะอัลคาไลด์

n คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่หรือ degree of polycondensation

z คือ ตัวเลข 1, 2 หรือ 3 และ

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

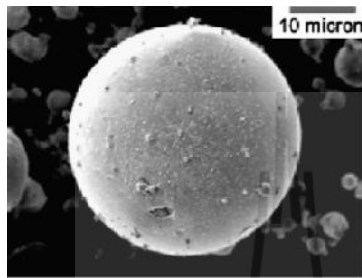
จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ้าถ่านหินมีส่วนประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักหากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลด์จะสามารถทำให้เกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีต (Ismail et al., 2013)

2.3.1 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์

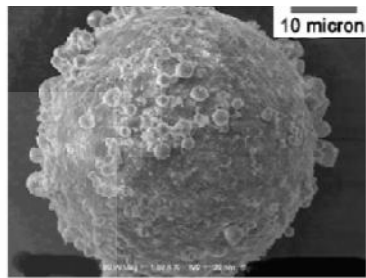
จีโอโพลิเมอร์เป็นสารพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา (Morphology) แน่นอนเป็นส่วนประกอบของอสัณฐาน (Amorphous phase) และสารกึ่งผลึก (Semicrystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมโรไลเซชัน (Geopolymerization) จึงเป็นสารซิลิกาและอะลูมินาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อผสมสารละลายอัลคาไลเบสจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงได้และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดี ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรไลเซชันแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การชะละลาย (Dissolution)

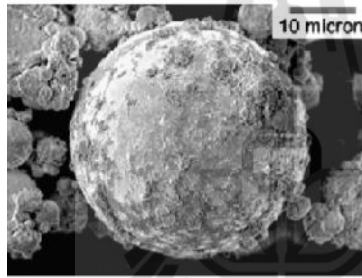
ถ้าหรือสารตั้งต้นเมื่อผสมสารละลายที่มีความเป็นเบสสูงเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากผิวซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับ



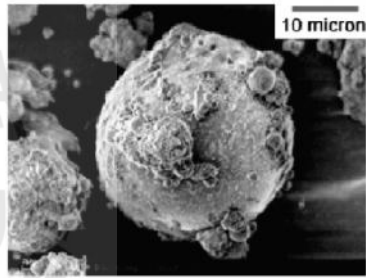
a) original fly ash



b) 5M NaOH

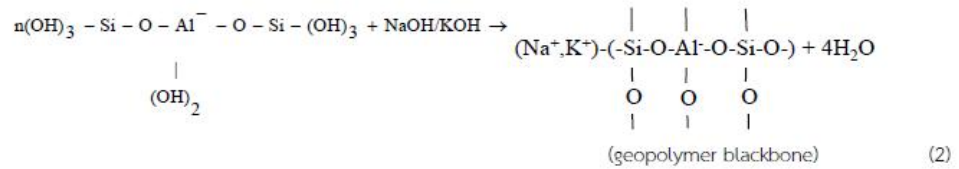
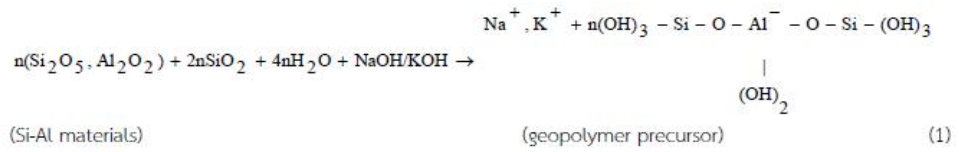


c) 10M NaOH



d) 15M NaOH

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



สารตั้งต้น	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอไรเซชัน วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ+ สารละลายอัลคาไลน์
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ใน สารละลาย	ซีลิกเกต (ในรูปของแข็งหรือของเหลว) การระเหยของแข็งที่มี Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และความแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ระเหยออกมาในเฟส
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	90-300 °C	อุณหภูมิปกติ (ambient)
ช่วง pH	6-11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่มี Al-Si เป็น ส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่แน่นอน ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (unique crystal)	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน ของผสมของเฟสเจลแบบอสัณฐานและกึ่ง อสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็น ส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator)

โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขมันออกเช่นอุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำจัดเป็นด่างลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

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

โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 ตาม ม.อ.ก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

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

2.5 ข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 มาตรฐานและข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุ

- 1) มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมคอนกรีต (Cement Modified Crushed Rock Base) ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 203-2556
- 2) มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 204-2556
- 3) การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 213/2543
- 4) มาตรฐานพื้นทางหินคลุก ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 201-2544
- 5) มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Subbase) ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 206-2532
- 6) มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 205-2532

2.5.2 มาตรฐานและข้อกำหนดด้านการทดสอบ

- 1) วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (เทียบเท่า AASHTO T 180) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 108/2517
- 2) วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน (เทียบเท่า AASHTO T 280) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 105/2515

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักเคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์ (Davidovits, 2013) โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลีเมอร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลีเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 0.20-0.25, ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ซีเมนต์พบว่า จีโอโพลีเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน หรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอไลติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ยังสามารถ

เดิมสารต่าง ๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอ โพลิเมอร์สามารถพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ในโครงสร้างยานยนต์และอากาศยานอุตสาหกรรมพลาสติกต่าง ๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะพาสกาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ นอกจากมีความแข็งหดตัวน้อยทนความชื้น และต้านทานการสึกกร่อนทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบที่จะใช้กับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน ในด้านการคำนวณต้นทุน โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในด้านการผลิต จีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียมส่วนประกอบและไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์

นอกจากนี้ Hardjito และคณะ ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่างๆและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ระหว่าง 0.095 ถึง 0.120 ของอัตราส่วนไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดมากนักส่วนอัตราส่วนน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและกำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การรับกำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้นอย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์มากกว่าเนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้นแต่ถ้าถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

ในเวลาต่อมา Hardjito และคณะยังศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโน-ซิลิเกตโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น ถ่านหินองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาวจากการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคตเพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแล้ว ยังมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยแต่ยังมีเรื่องต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อีกมาก ต่อมาในปี 2005 สมิตร ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทำจากถ่านหิน โดยศึกษาถึงกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีขนาด 5x5x5 ซม. มีสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลาย โซเดียมซิลิเกตและน้ำเป็นส่วนผสมมีอัตราส่วนผสมของถ่านหินต่อ

ทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนักกำหนดอัตราส่วนสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำต่อเถ้านหินเท่ากับ 0.376, 0.386, 0.396 และ 0.416 โดยน้ำหนักอนุภาคน้ำที่ใช้ในการผสมมีค่าเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียสหลังจากทำการหล่อตัวอย่างจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสการทดสอบกำลังอัดทำการทดสอบที่อายุ 1, 7 และ 28 วันผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนากำลังอัดต่อไปอีกส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนาค่ากำลังอัดไปเรื่อยๆจนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคน้ำและสัดส่วนผสมที่มีผลต่อจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดีและได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายซีเมนต์เมื่อใช้ดินขาวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 และเมื่อทำปฏิกิริยากันอย่างเข้มข้นจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารที่ใช้กระตุ้นสูงขึ้นการก่อตัวจะช้าลงการบ่มด้วยอนุภาคน้ำสูงจะช่วยให้ก่อตัวได้เร็วขึ้นสัดส่วนของ Metakaolin/ Ca(OH)_2 ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์แต่พบว่าปริมาณการเกาะตัวกันจะสูงขึ้นเมื่อมี Ca(OH)_2 สูงและการเติม Ca(OH)_2 ลงในผง Metakaolin เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10M จะได้อลูมิโนซิลิเกตเช่นกันและก่อให้เกิด CSH gel และที่น่าสนใจมากก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 10M จะหน่วงการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นเพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นทำให้ไอออนของสารแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคน้ำจะเป็นตัวเร่งให้ทำปฏิกิริยามากขึ้นการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 จะทำให้ปริมาณอะลูมิโนซิลิเกตเพิ่มสูงขึ้น

ในปี 2006 มีการศึกษาทดลองใช้เถ้านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต(Chindaprasirt et.al, 2006) ได้ทำการควบคุมการไหลแผ่น (Flow) ร้อยละ 110 ± 5 ถึง 135 ± 5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลแผ่นจะดีไม่ดีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ โดยมีค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการศึกษายู่ระหว่าง 10-65 เมกะพาสกาลโดยสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 0.67-1 และศึกษาพบว่าแม้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นจาก 10M ไปเป็น 20M ก็ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

และพบว่าหลังผสมจีโอโพลิเมอร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้องก่อนให้ความร้อนด้วยการอบ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้บ่มที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียสและควรบ่มไม่เกิน 2 วันจะให้กำลังอัดที่สูงมากและจากการศึกษาด้วยกล้องขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าถ่านหินเป็นทรงกลมถึงแม้ว่าขณะผสมจีโอโพลิเมอร์จะเหนียวขึ้นจนต้องอาศัยการเติมน้ำเข้าไปร้อยละ 2-8 จะช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นได้และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) ช่วยให้แบบได้ดีก็จริงแต่จะทำให้ค่ากำลังอัดลดต่ำกว่าการใช้น้ำจากการศึกษาครั้งนี้ สรุปว่าค่าการไหลแผ่ให้ผลดีถ้าใช้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_3/\text{NaOH}$ อยู่ที่ 0.67-1 การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10M ถึง 20M ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 60-75 องศาเซลเซียส ถ้ามากกว่า 75 องศาเซลเซียสโครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายในเพราะโครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์มีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายในถ้าโดนความร้อนมากโครงสร้างจะเปลี่ยนไปแม้ว่าจะรักษาอุณหภูมิการบ่มคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียสให้นาน โดยหวังว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นสุดท้ายการใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการผสมและเข้าแบบพบว่าใช้น้ำธรรมดาจะดีกว่าเพราะการใช้สารลดน้ำจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Bakharev ศึกษาความคงทนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้นเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือนผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นและกำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นและพบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ถ้าใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวเป็นที่น่าเชื่อว่าการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-Linked AluminoSilicate Polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ ไม่ค่อยละลายในเกลือต่าง ๆ ดังนั้นความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับว่าการเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแข็งตัวรวมถึงความเข้มข้นของด่างด้วยการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นตัวกระตุ้นอย่างเดียวอีกทั้งยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นทำให้มีสารละลาย Alkaline ละลายปนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นเกลือซัลเฟตด้วยและ

ยังพบรอยร้าวในตัวอย่างอีกด้วยและจากการทดลองพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียวและบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4-12 เมื่อแช่อยู่ในสารละลายเกลือซัลเฟต

ได้มีการนำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินในไฮเดรตซีเมนต์ (Ohsawa et.al, 1984) โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรดเช่นกรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดพิคลิก (Picric Acid) และกรดซาลิซิลิก (Salicylic Acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาผลการทดสอบพบว่าการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้นการใช้ กรดพิคลิก + เมทานอล + น้ำ เป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 ซึ่งการใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดซาลิซิลิกอย่างมา

Alonso และ Palomo ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของจีโอโพลิเมอร์เพศขณะเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ที่ทำจากเถ้านหินพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดต่างๆกันเมื่อถูกกัดโดยด่างจะเริ่มที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวของทรงกลมและขยายออกเป็นรูใหญ่จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปภายใน และทำปฏิกิริยาทั้งภายนอกและภายในทรงกลมจากนั้นเกิดการจับตัวกันจนแข็งจากการดูภาพขยายจะเห็นว่าอนุภาคทรงกลมมีรูทะลุอยู่ทั่วไปในเนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแล้วและมีการจับตัวเชื่อมโยงกันนอกจากนั้นสังเกตเห็นว่ายังมีเถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ซึ่งเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง, ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน, ระยะเวลาการบ่มและการผสมและจากการศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมงเกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นฟร็กคัลลาย ๆ กระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

อภิชาติ คำภาหาล้า ได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านลอยด้วยวิธีแห้งสลับเปียก พบว่าอายุการใช้งานของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้านลอยจะมีค่าต่ำสุดคล้ายกับที่ ACI (1990) และ U.S. Army Corps of Engineers (2004) แนะนำว่ากำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของการแห้งสลับเปียกการเพิ่มเถ้านลอยเพื่อช่วยให้ความหนาแน่นและการ

เกิดปฏิกิริยา pozzolanic ในดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และปริมาณที่เหมาะสมของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 7 และร้อยละ 20 ตามลำดับ ปริมาณเถ้าลอยที่มากเกินไปจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะให้กำลังอัดสูงสุด

งานวิจัยล่าสุดในการทำอิโพลีเมอร์จากดินตะกอน (Sukmak and Horpibulsuk, 2012) แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุคิปร่วมกับเถ้าถ่านหินในการผลิตวัสดุอิโพลีเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง (กำลังอัดมีค่าสูงถึง 12 ถึง 14 MPa) ผลการศึกษาแสดงว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content) ในการผลิตบล็อกอิโพลีเมอร์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าถ่านหินและปริมาณและความเข้มข้นของสารกระตุ้นส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำดินตะกอนอิโพลีเมอร์คืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเท่ากับ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

จากรายงานของการประปานครหลวง ตะกอนดินประปามีสามารถแบ่งออกเป็นช่วง 3 ฤดู โดยแต่ละฤดูมีอัตราส่วนของ ร้อยละของทราย:ร้อยละของทรายแป้ง:ร้อยละของดินเหนียว ต่างกัน ในช่วงฤดูฝน ร้อยละของทราย:ร้อยละของทรายแป้ง:ร้อยละของดินเหนียว เท่ากับ 21.49:44.46:34.05 มีลักษณะของเนื้อดินปานกลางค่อนข้างละเอียด เป็นดินร่วนผสมดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างสูง ในช่วงฤดูคาบเกี่ยว ร้อยละของทราย:ร้อยละของทรายแป้ง:ร้อยละของดินเหนียว เท่ากับ 66.05:29.20:4.75 มีลักษณะของเนื้อดินหยาบ เป็นดินร่วนปนทราย ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง และในช่วงฤดูแล้ง ร้อยละของทราย:ร้อยละของทรายแป้ง:ร้อยละของดินเหนียว เท่ากับ 65.64:24.09:9.47 มีลักษณะของเนื้อดินปานกลางค่อนข้างหยาบ เป็นดินทรายผสมดินร่วน ปริมาณอินทรีย์วัตถุปานกลาง-สูง ในทุกฤดูปริมาณมีซิลิกาในช่วงร้อยละ 49-58 และอลูมินาในช่วงร้อยละ 29-35จากรายงานจะเห็นว่าความแตกต่างของตะกอนดินในแต่ละฤดูอย่างเห็นได้ชัด

เสกสรรค์ ชูทับทิม และ มนต์ เสงี่ยมสุข ได้ทำการศึกษาศึกษาการใช้ตะกอนเตาหลอมเหล็กเป็นมวลรวมหยาบซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำตะกอนเตาหลอมเหล็กมาใช้เป็นมวลรวมหยาบทดแทนหินย้อยในงานคอนกรีตโดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7,28,63, 91 และ 126 วันกำลังดึงแบบผ่าซีกและกำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันรวมถึงทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสดเมื่อกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8 และมีค่า

การยุบตัว 7.5 ± 2.5 เซนติเมตรนอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหินเมื่อนำมาใช้ผสมคอนกรีตด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักผลการศึกษพบว่าการใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กและหินย่อยเป็นมวลรวมหยาบทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตใกล้เคียงกันระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กเป็นมวลรวมหยาบมีแนวโน้มนานกว่าคอนกรีตที่ใช้หินย่อยเป็นมวลรวมหยาบเล็กน้อยการใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตช่วยเพิ่มค่าการยุบตัวให้แก่คอนกรีตสดและทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวที่นานขึ้นการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมเป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแม้มีอายุเกิน 126 วันอย่างไรก็ตามการใช้ตะกรันเตาหลอมเหล็กเป็นมวลรวมหยาบทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้หินย่อยผสมคอนกรีต

การใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมสำหรับปูพื้นถนน (Shi, 2004) กล่าวว่าตะกรันเหล็กเป็นสิ่งที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดมาจากในระหว่างที่ทำการหลอมเหล็กกล้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการหลอมตะกรันเหล็กได้มีการทดสอบเกี่ยวกับผลกระทบที่จะตามมาของตะกรันเหล็กซึ่งสามารถสรุปได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมคือมีการหาค่ากระจายตัวของเกรนขนาดเล็ก, มีการทดสอบความแข็งแรง, มีการทดสอบค่าการสึกกร่อนโดยวิธีลอสแอนเจลิส, กระบวนการการอัดตัว, การหาค่า CBR, ค่าความสามารถในการฟื้นตัวกลับสู่สภาพเดิม, และค่าการขยายตัวซึ่งจะใช้ตะกรันเหล็กที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กเป็นชั้นพื้นทาง, ลักษณะการกระจายตัวของตะกรันเหล็กมีลักษณะที่เป็นไปตามมาตรฐานชั้นตอนที่เพิ่มขึ้นของลักษณะทางกายภาพคือความจุและลักษณะที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติของวัสดุการประเมินค่าของการกระจายตัวแสดงให้เห็นว่าตะกรันเหล็กมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเก็บรักษาไว้ในชั้นบรรยากาศอย่างน้อยที่สุด 4 เดือนก่อนที่จะสามารถนำตะกรันเหล็กไปใช้ในการก่อสร้างงานถนนเพื่อเป็นวัสดุสำหรับปูพื้นถนนหลังจากได้มีการแก้ไขของกระบวนการการเปลี่ยนแปลงของตะกรันเหล็กกล่าวว่ามีความสามารถที่จะกลับคืนสู่สภาพเดิมดีกว่าวัสดุมวลรวมดั้งเดิมซึ่งตะกรันเหล็กมีผลในการทำให้วัสดุสำหรับปูพื้นถนนนั้นอาจเป็นไปได้และคุณภาพของวิทยาการที่ดีสามารถส่งผลให้ได้ตะกรันเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ตรงตามที่ต้องการและมีข้อได้เปรียบทางการเงิน

การใช้ตะกรันเหล็กมาเป็นวัสดุชั้นพื้นทางของถนนโดย Saad Ali Aiban ได้แสดงให้เห็นว่าการนำตะกรันเหล็กมารวมตัวกันให้ผลเป็นที่น่าพอใจโดยการทดลองทำในสภาวะสิ่งแวดล้อมและสภาวะการรับน้ำหนักต่างๆที่พบได้ทั่วไปโดยได้มีการนำวัสดุที่มีความเหมาะสม

มาใช้ในการทดลองผลสำเร็จที่เกิดขึ้นคือถนนมีความแข็งแรงมากขึ้น, การบีบอัดของเม็ดดินต่ำลง, มีความคงทนมากขึ้นและยังมีข้อดีที่มีการใช้วัสดุที่หาได้จากในท้องถิ่น นอกจากนี้ความคงทนของวัสดุยังแสดงให้เห็นว่าวัสดุเหล่านี้ไม่ไวต่อการสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นในปริมาณที่นำมาทดสอบและยังพบอีกว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นยังไม่ไปลดความสามารถในการแบบริบน้ำหนักของถนน ซึ่งข้อได้เปรียบหลักในการใช้ตะกรันเหล็กบริสุทธิ์ คือ ชั้นของถนนจะมีโครงสร้างที่ดีเยี่ยมโดยมีความจำเป็นที่จะต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้ตะกรันเหล็กเพื่อที่จะทำให้สามารถให้ตะกรันเหล็กได้อย่างเดียวโดยไม่ต้องผสมดินร่วน การใช้ตะกรันเหล็ก 100% มีข้อดีตรงที่ไม่ต้องสร้างถนนที่มีส่วนประกอบของชั้นระบายน้ำ และยังช่วยลดความเสี่ยงการทำชั้นของถนนที่มีระบบระบายน้ำซึ่งมีความซับซ้อน นอกจากนี้ชั้นดังกล่าวยังช่วยป้องกันการรั่วไหลจากชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยผลของการวิจัยได้พิสูจน์ว่าการใช้ตะกรันเหล็กในการสร้างถนนจะช่วยลดความหนาของชั้นโครงสร้างทาง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วย การหาคุณสมบัติ ด้านวิศวกรรมของวัสดุ การหาค่าความชื้นเหมาะสมของตัวอย่าง การบดอัดตัวอย่าง การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อ ดังต่อไปนี้

3.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้มาตรฐานและข้อกำหนดการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวก็จะอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และ AASHTO ดังต่อไปนี้

3.1.1 การทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ ตามวิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve analysis) มทช.(ท) 501.8–2545

3.1.2 การทดลองหาค่าขีดจำกัดของ Atterburg ตามวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว (Liquid Limit : LL) มทช.(ท) 501.5–2545 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit :PL) มทช.(ท) 501.6–2545

3.1.3 การทดลองหาค่าความสึกหรอ ตามวิธีการทดสอบหาค่าความสึกหรอของ วัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Coarse aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angelesabrasion) มทช.(ท) 501.9–2545

3.1.4 การทดลองหาค่า ซี.บี.อาร์. ตามวิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.) มทช.(ท) 501.3–2545

3.1.5 การทดลองความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามวิธีการทดสอบความแน่นและสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction Test) มทช.(ท) 501.2 – 2545

3.1.6 การทดลองหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามวิธีมาตรฐานการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ งานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Comart Base) มทช.244–2546

3.2 การหาความชื้นเหมาะสมของตัวอย่าง

3.2.1 สัดส่วนดินลูกรัง (Soil) เถ้าลอย (FA) และตะกรันเหล็ก (Slag) ผู้ศึกษาได้กำหนดสัดส่วนที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ ดังนี้ สัดส่วนของดินลูกรัง (Soil) ต่อ เถ้าลอย (FA) ต่อ ตะกรันเหล็ก (Slag) จำนวน 3 สัดส่วน คือ Soil:FA:Slag = 60:30:10, 50:30:20, 40:30:30 กล่าวคือ กำหนดให้สัดส่วนเถ้าลอย (FA) คงที่ที่ 30% และเพิ่มสัดส่วนของตะกรันเหล็ก (Slag) เป็น 10% 20% และ 30% ของส่วนผสม (Binder) ทั้งหมด

3.2.2 สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali-activator) ผู้ศึกษาได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali-activator) ในการศึกษานี้ คือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต เกรด C-53 จากบริษัท ช.ไทย เคมีคัล จำกัด ประเทศไทย ประกอบด้วย Na_2O 15.50% SiO_2 32.7% และน้ำ 51.75% โดยน้ำหนักสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5 โมลาร์ โดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์เกล็ด (ความบริสุทธิ์ 99%) จากบริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด ผสมกับน้ำกลั่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา (Liquid Alkali Activator) เตรียมจากการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 5 อัตราส่วน ดังนี้ สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0, 90:10, 80:20, 50:50$ และ 40:60 โดยน้ำหนักเมื่อได้สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว นำไปหาค่าความชื้นเหมาะสมของตัวอย่าง (Optimums Liquid alkali-activator Content, OLC) ของแต่ละสัดส่วนของดินลูกรัง (Soil) เถ้าลอย (FA) และตะกรันเหล็ก (Slag)

3.3 การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Lateritic Soil-FA-Slag Geopolymer) โดยผสมดินลูกรัง เถ้าลอย และตะกรันเหล็ก ตามสัดส่วนที่กำหนด (Soil:FA:Slag = 60:30:10, 50:30:20, 40:30:30) เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่หาได้จากหัวข้อ 3.2 ของแต่ละสัดส่วน ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0, 90:10, 80:20, 50:50$ และ 40:60) ผสมกับวัสดุตั้งต้น (Binder) โดยใช้เวลาผสมประมาณ 5-10 นาที กับแต่ละสัดส่วน สัดส่วนมีความเหมาะสมที่จะบดอัด จากนั้นบดอัดตามการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor compaction) มทช. (ท) 501.2-2545 ในการเก็บตัวอย่างหลังจากบดอัดแล้วจะห่อด้วยพลาสติกใสเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27-30 °C) ที่มีอายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะทำการเก็บตัวอย่างจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อความถูกต้องแม่นยำ

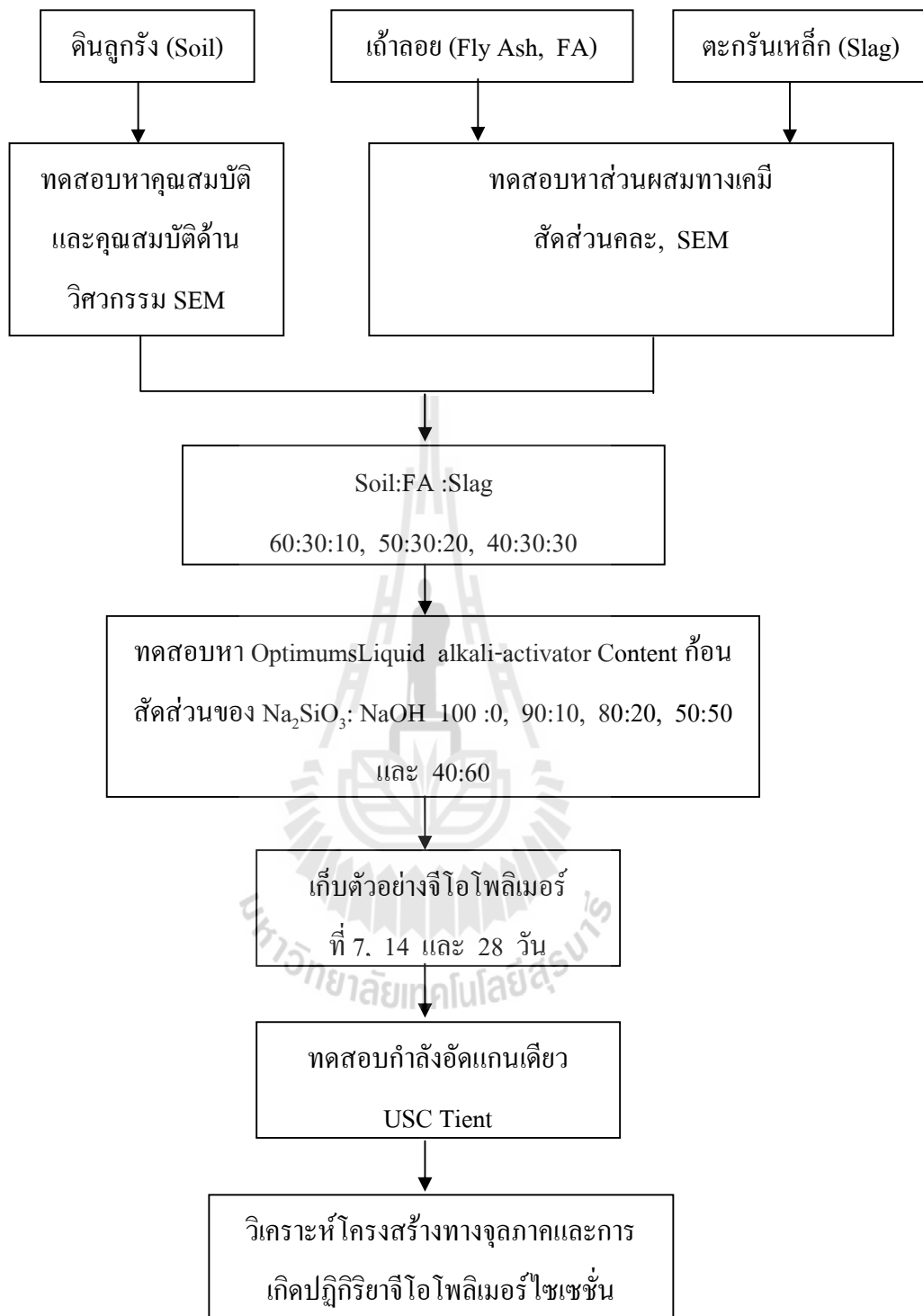
3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวก่อนตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดวันที่จะทดสอบแกะพลาสติกออกจากก้อนตัวอย่างนำไปแช่น้ำเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อน 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบกำลังอัด โดยตัวกำลังอัดที่ควบคุมจะต้องไม่น้อยกว่า 17.5 และ 24.5 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับทางหลวงชนบทที่มีปริมาณจราจรต่ำ และทางหลวงชนบทที่มีปริมาณจราจรสูง ตามลำดับ

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่างเพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างวัสดุที่ปรับปรุงด้วย จีโอโพลิเมอร์แสง โดยใช้เครื่องส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยนำชิ้นส่วนของวัสดุขนาด เล็กจากกึ่งกลางของก้อนวัสดุหลังจากทดสอบกำลังอัดแล้ว โดยใช้เครื่องมือ รุ่น JEOL JSM-6400.





รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุส่วนผสมของสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content: OLC) ค่ากำลังอัดแบบแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength: UCS) และผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อ ดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย ดินลูกรัง ซึ่งเป็นวัสดุตั้งต้นที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ etailoy ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานและเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ ตะกรันเหล็กไม่ (Slag) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำตะกรันเหล็กไม่มาใช้งานพื้นทางและงานผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต ใน การศึกษานี้ จะนำตะกรันเหล็กไม่มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวช่วยเร่งกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่กล่าวมาข้างต้นเหล่านี้ คือวัสดุตั้งต้นในการศึกษาครั้งนี้รายละเอียด มีดังต่อไปนี้

4.1.1 ดินลูกรัง (Lateritic Soil)

ดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ เก็บมาจากบ่อลูกรัง บริเวณอำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง ภาคตะวันออกของประเทศไทย ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแสดงในตารางที่ 4.1 และลักษณะทางกายภาพแสดงในรูปที่ 4.1 (ค)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินลูกรัง

Content	Lateritic soil properties	Standard for subbase
Specific gravity	2.58	
Liquid limit	27.72	<35
Plastic limit	21.65	
Plastic index	6.07	< 11
Maximum dry unit weight	20.85 kN/m ³	
Optimum moisture content	8.0%	
CBR at 95% of dry density	14.7%	> 25%
LA abrasion	52.9%	< 60%

ความถ่วงจำเพาะมีค่า 2.58 จืดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) มีค่า 27.72 และ 6.07 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง ประเทศไทย (กำหนดค่าจืดจำกัดเหลว (Liquid limit) และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic Index) ไม่เกิน 35 และ 11 ตามลำดับ) ความสึกหรอ (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 52.9 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 60%) ซี.บี.อาร์. (CBR) ที่ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดมีค่าร้อยละ 14.7 ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดสำหรับงานชั้นรองพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25) ดังนั้น ดินลูกรังที่นำมาทดสอบนี้เป็นดินลูกรังด้อยคุณภาพหรือไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (Marginal lateritic soil) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าเท่ากับ 20.85 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และร้อยละ 8.0 ตามลำดับ ดินลูกรังจำแนกตามระบบของ Unified Soil Classification System (USCS) ได้เป็นดินทรายปนดินตะกอนและดินเหนียว Silty clayey sand (SC-SM) และจำแนกตามระบบ AASHTO ได้เป็น A-2-4(0)

4.1.2 เถ้าลอย (Fly ash)

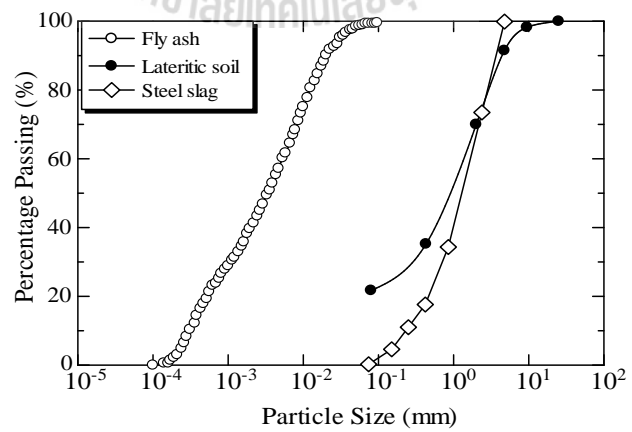
เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นแหล่งเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และมีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างคงที่ เถ้าลอยจากแหล่งนี้ได้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อย่างกว้างขวาง องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของเถ้าลอย ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 36.00 CaO ร้อยละ 26.73 Fe_2O_3 ร้อยละ 17.64 และ Al_2O_3 ร้อยละ 16.80 และจัดเป็นเถ้าลอยประเภท C (Type C) หรือเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium FA) ลักษณะทางกายภาพและสัดส่วนมวลของเถ้าลอยที่นำมาใช้ แสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และ 4.2 ตามลำดับ

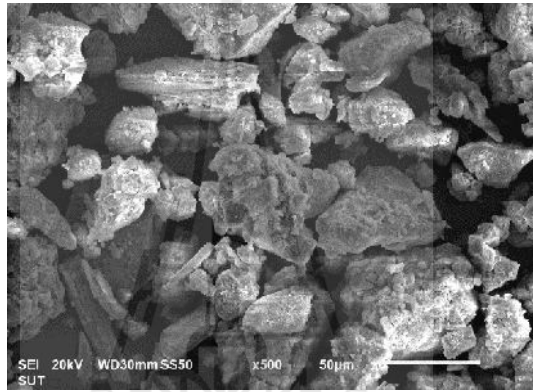
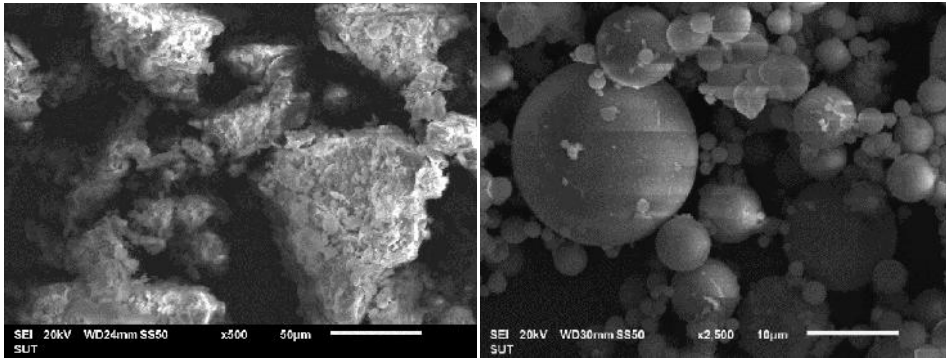
ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของดินลูกรัง ใถ้ล่อย และตะกรันเหล็กโม

Chemical composition (%)	Marginal lateritic soil	Fly ash (FA)	Slag
SiO ₂	77.81	36.00	26.78
Al ₂ O ₃	4.42	16.80	6.96
Fe ₂ O ₃	10.93	17.64	18.65
CaO	1.13	26.73	30.38
MgO	N/A	N/A	9.70
SO ₃	1.36	N/A	1.74
K ₂ O	2.33	1.83	N/A
TiO ₂	1.33	0.48	0.89
MnO ₂	0.55	0.15	3.56
Br ₂ O	0.38	N/A	N/A
Cr ₂ O ₃	N/A	N/A	0.85
ZnO	N/A	N/A	0.48

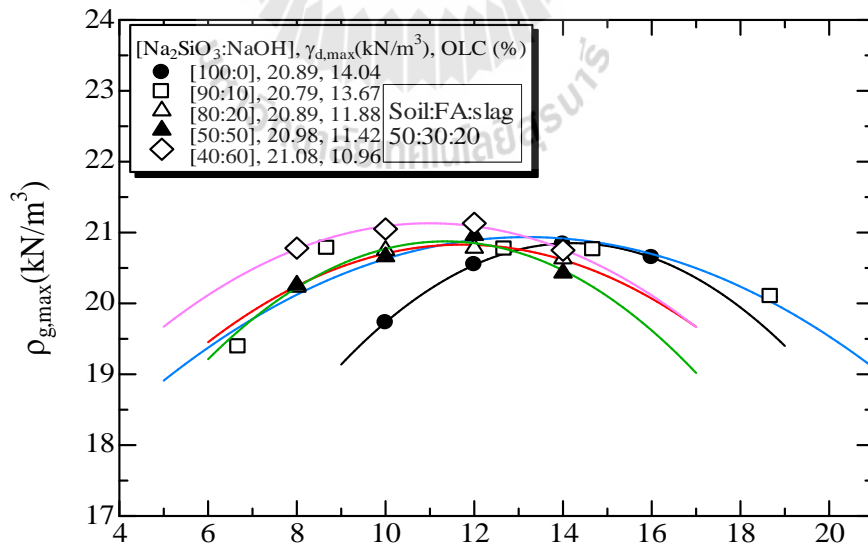
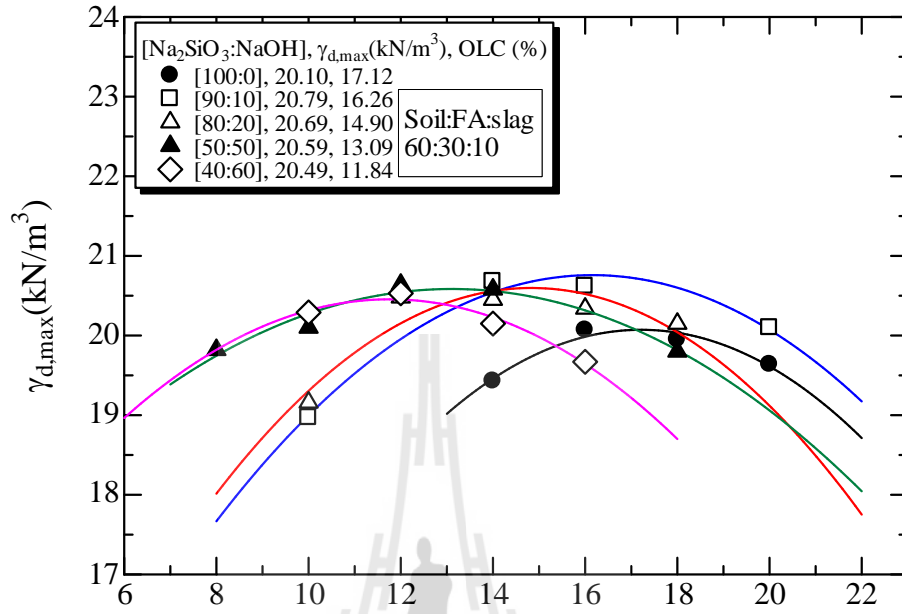
4.1.3 ตะกรันเหล็กโม (Slag)

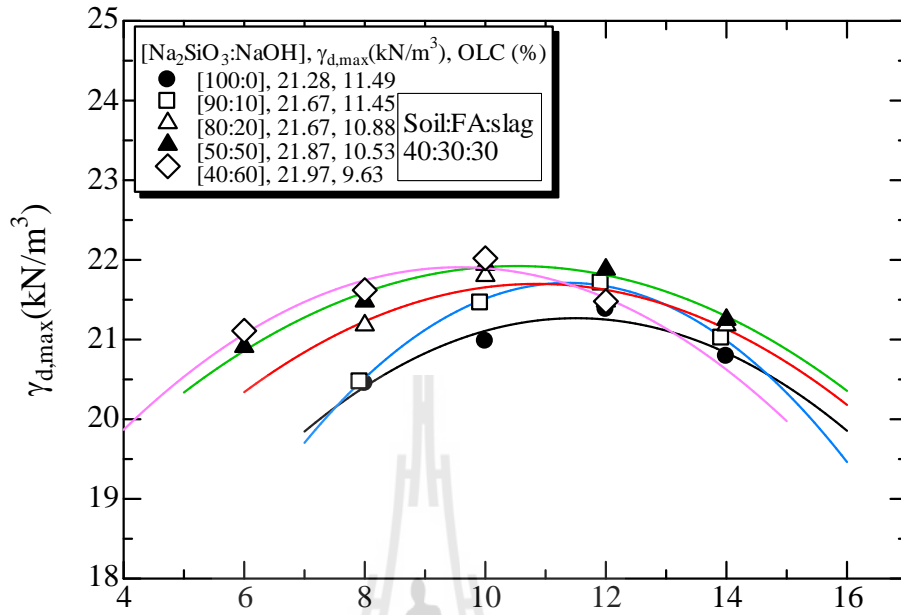
ตะกรันเหล็กโม (Slag) ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กของบริษัท Siam Steel Mill Services จำกัด เขตนิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ด จังหวัดชลบุรี องค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยองค์ประกอบหลักประกอบด้วย CaO ร้อยละ 30.38 SiO₂ ร้อยละ 26.78 Fe₂O₃ ร้อยละ 18.65 และ Al₂O₃ ร้อยละ 6.96 จะเห็นได้ว่า ตะกรันเหล็กโมที่นำมาศึกษามีสัดส่วนของ CaO สูงมาก ซึ่งเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันลักษณะทางกายภาพและสัดส่วนผลของตะกรันเหล็กโม แสดงใน รูปที่ 4.1 (จ) และ 4.2 ตามลำดับ





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

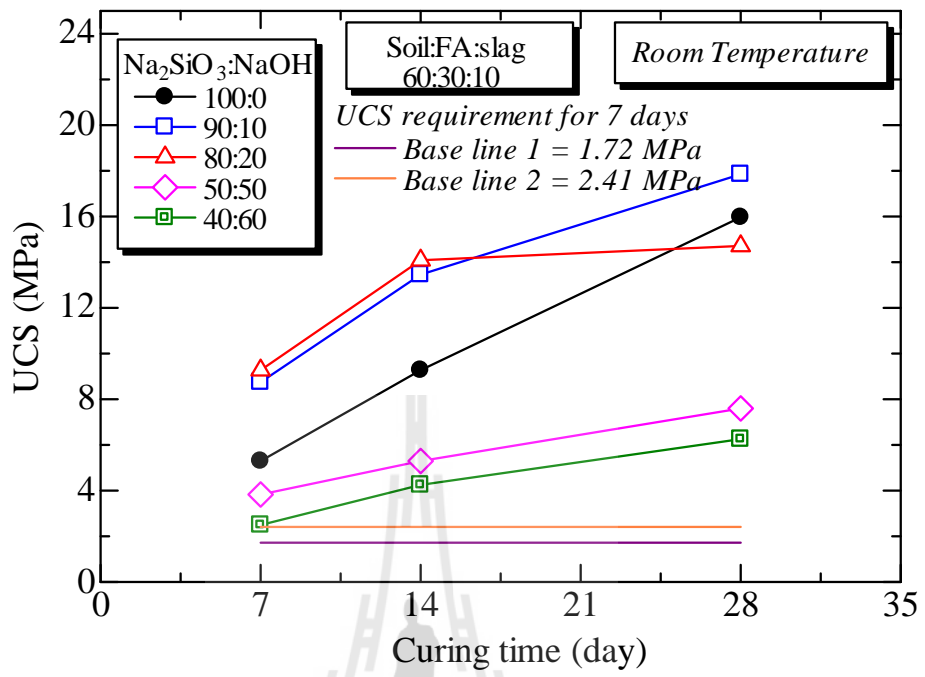
สูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ NaOH เพิ่มขึ้น และค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนของ NaOH เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการบดอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์สัดส่วน Soil:FA:Slag = 40:30:30 $p_{d,max}$ มีค่าเท่ากับ 21.28, 21.67, 21.67, 21.87 และ 21.97 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับสัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH = 100:0, 90:10, 80:20, 50:50$ และ 40:60 ตามลำดับ และค่า OLC มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.49, 11.45, 10.88, 10.53 และ 9.63 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ NaOH เพิ่มขึ้น และค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนของ NaOH เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการบดอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์สัดส่วน Soil:FA:Slag = 50:30:20

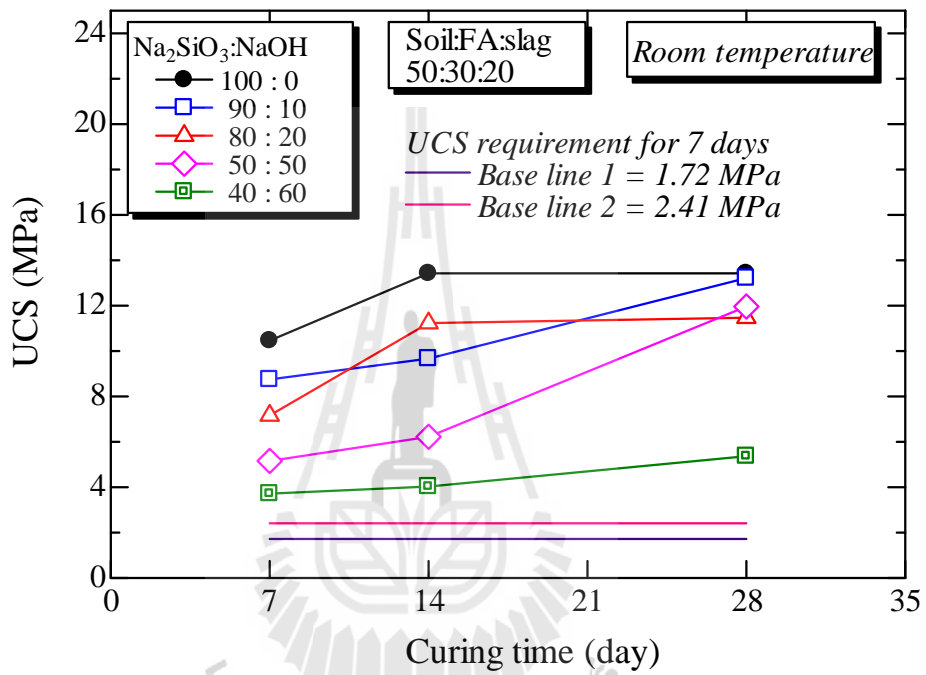
ผลทดสอบการบดอัด (รูปที่ 4.4 – 4.6) ของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วน Soil:FA:slag = 60:30:10, 50:30:20 และ 40:30:30 และสัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH = 100:0, 90:10, 80:20, 50:50$ และ 40:60 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของตะกรันเหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากตะกรันมีความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าดินลูกรังและเถ้าลอยในขณะที่สัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ ที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนของตะกรันเหล็กเพิ่มขึ้นสัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ มีผลต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม กล่าวคือเมื่อสัดส่วนของ NaOH เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าสูงขึ้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมมีค่าลดลง

4.3 กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS)

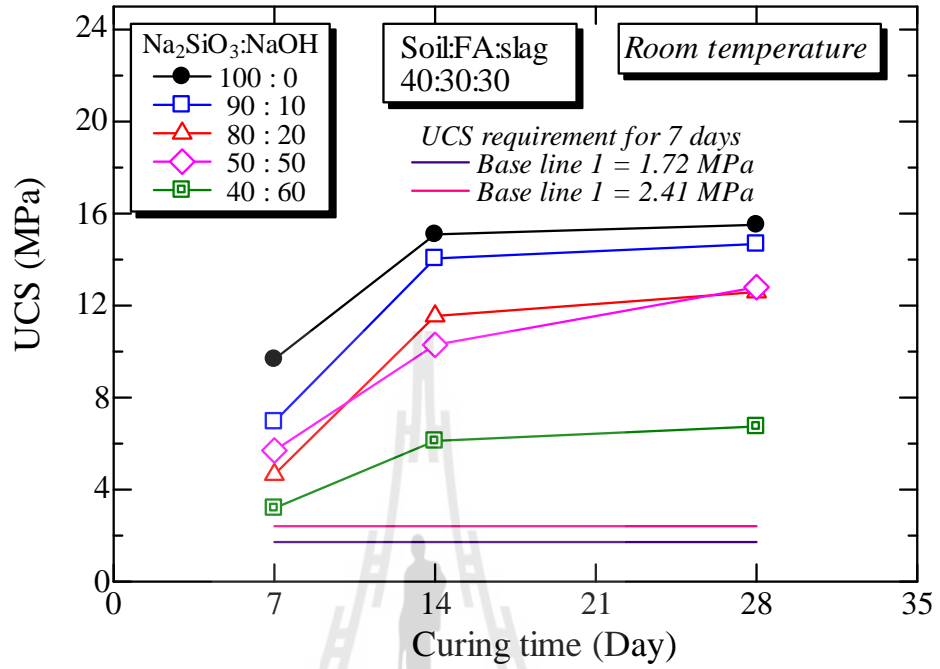
รูปที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength: UCS) แบบแช่น้ำของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ ที่สัดส่วน Soil:FA:Slag = 60:30:10, 50:30:20 และ 40:30:30 สัดส่วน $Na_2SiO_3:NaOH = 100:0, 90:10, 80:20, 50:50$ และ 40:60 ที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ภายใต้สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30°C)



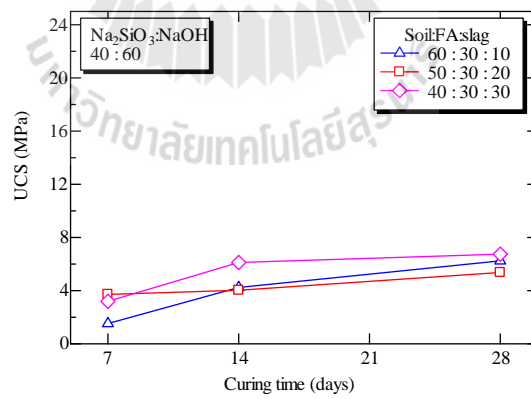
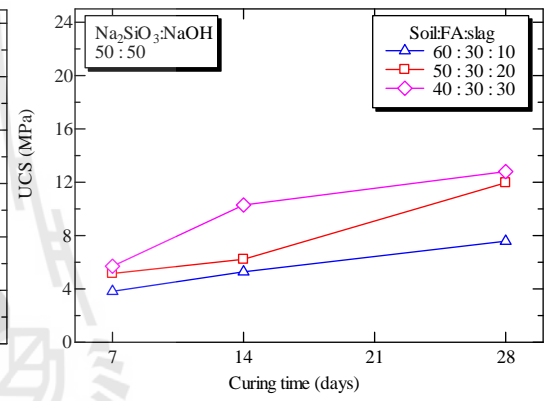
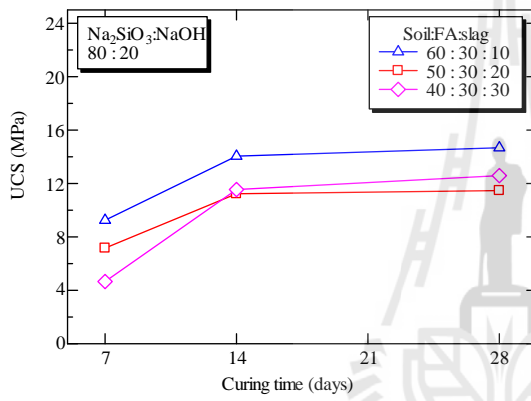
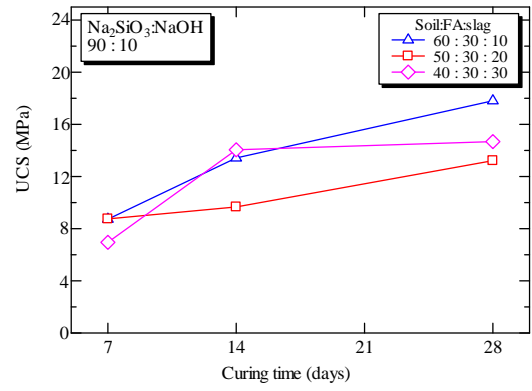
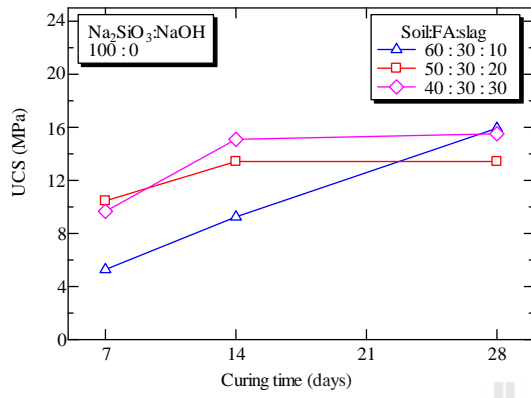
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



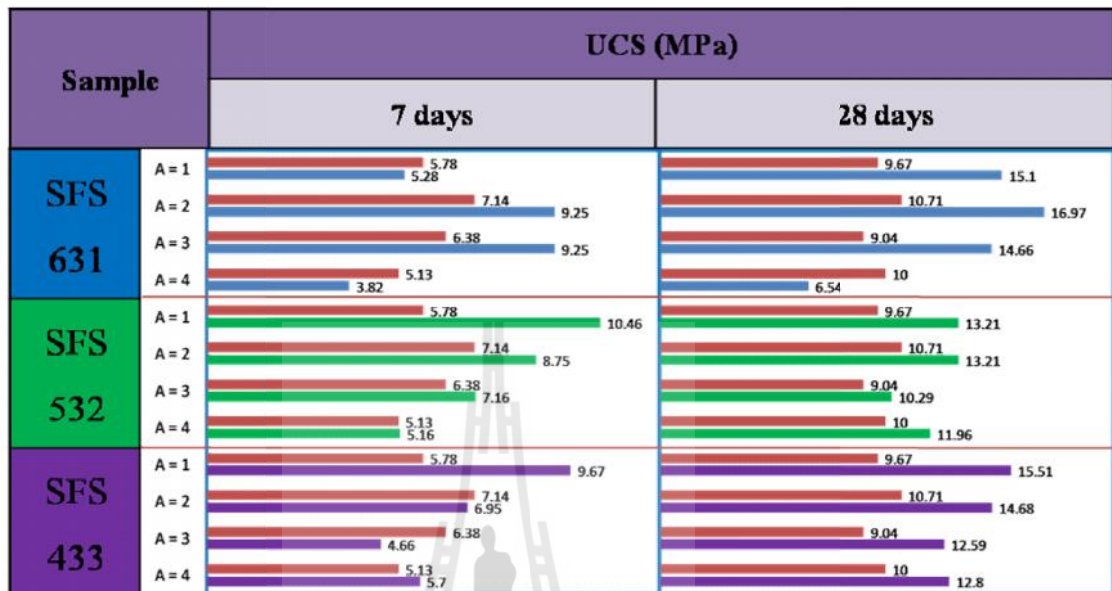
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.10(ก) – (จ) แสดงค่ากำลังอัดกับเวลาของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0, 90:10, 80:20, 50:50$ และ $40:60$ รูปที่ 4.10(ก) แสดงกำลังอัดของทุกสัดส่วนตะกรันเหล็ก (slag) ตั้งแต่ร้อยละ 10 - 30 ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0$ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 20 และ 30 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน สูงกว่าที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 10 แต่หลังจากอายุบ่ม 14 วัน ไปแล้วกำลังอัดค่อนข้างคงที่ ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 10 มีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องและที่อายุบ่มที่ 28 วัน มีกำลังสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 20 และ 30 รูปที่ 4.10(ข) แสดงกำลังอัดของทุกสัดส่วนตะกรันเหล็ก ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 10 และ 20 มีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อายุบ่ม 7 วัน ส่วนตัวอย่างที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 30 มีกำลังค่อนข้างคงที่หลังจาก 14 วัน ไปแล้ว รูปที่ 4.10(ค) แสดงกำลังอัดของทุกสัดส่วนตะกรันเหล็ก ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 80:20$ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 10, 20 และ 30 มีรูปแบบของการพัฒนากำลังเป็นไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือมีการพัฒนากำลังอัดสูงจากช่วงอายุบ่ม 7 วัน ถึง 14 วัน และหลังจาก 14 วัน ไปแล้ว กำลังอัดพัฒนาขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจะสังเกตพบได้ที่อายุบ่ม 28 วัน เมื่อพิจารณาดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมตะกรันเหล็กทั้ง 3 สัดส่วน (ร้อยละ 10, 20 และ 30) ที่ปริมาณ Na_2SiO_3 สูง (ร้อยละ 80, 90 และ 100) ตัวอย่างที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 10 (Soil:FA:slag = 60:30:10)

รูปที่ 4.10(ง) และ (จ) แสดงกำลังอัดของทุกสัดส่วนตะกรันเหล็ก ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 50:50$ และ $40:60$ ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองสัดส่วนนี้มีปริมาณ NaOH สูงถึงร้อยละ 50 และ 60 (ปริมาณ Na_2SiO_3 ร้อยละ 50 และ 40 ตามลำดับ) พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กทั้ง 3 สัดส่วน มีการพัฒนากำลังอัดค่อนข้างช้ากว่าที่ผสมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 3 สัดส่วนแรก ที่ได้กล่าวมาแล้ว ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0, 90:10$ และ $80:20$) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กร้อยละ 10 และ 30 เกือบทุกอายุการบ่ม อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 7 วัน ตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ทุกสัดส่วนผสมตะกรันเหล็กไม่ และทุกสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานงานก่อสร้างของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง ยกเว้นสัดส่วน Soil:FA:slag = 60:30:10 ที่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$ ตัวอย่างเดียวเท่านั้นที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบกำลังอัดของตัวอย่างดินลูกรัง ulla ลอย จีโอโพลิเมอร์และดินลูกรัง ulla ลอย ตะกรันเหล็ก จีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วนต่างๆ



- SFS433-A
- SFS532-A
- SFS631-A
- SFS730-A

หมายเหตุ SFS XYZ-A คือ

SFS = Soil:FA:Slag

XYZ-A

X คือ สัดส่วนของ Soil เช่น 7 หมายถึง 70%

Y คือ สัดส่วนของ Fly ash เช่น 3 หมายถึง 30%

Z คือ สัดส่วนของ Slag เช่น 0 หมายถึง 0%

A คือ สัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$

1 หมายถึง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0$

2 หมายถึง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$

3 หมายถึง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 80:20$

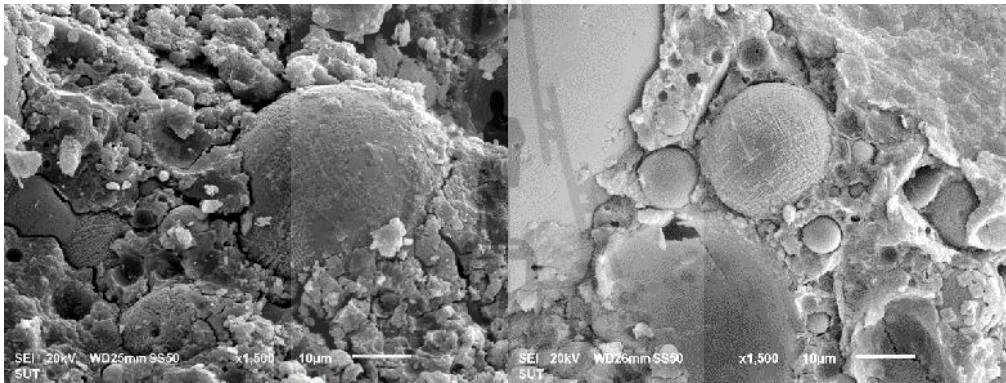
4 หมายถึง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 50:50$

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่ผสม slag ที่สัดส่วนต่างๆ ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 30 และยังเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม slag (SFS 730-A) ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0, 90:10, 80:20$ และ $50:50$ บดอัดที่ความแน่นแห้งสูงสุดและทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน และ 28 วัน จะเห็นว่าที่อายุบ่ม 7 วัน ตัวอย่างที่ผสม slag เพิ่มเข้าไป และผสมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ สูง จะให้กำลังอัดในช่วงต้นสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสม slag และเมื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มที่ 28 วัน สัดส่วนที่ผสมด้วย slag ให้กำลังอัดสูงกว่าสัดส่วนที่ไม่ได้ผสม slag เกือบทุกสัดส่วนซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ตะกรันเหล็กเป็นตัวเสริมกำลังของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งให้ผลคล้ายกับการใช้ granulated blast furnace slag (GBFS) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ที่มีจำหน่ายในเชิงการค้าและนิยมใช้ในต่างประเทศ เช่น ใช้เป็นตัวเร่งหรือเพิ่มกำลังในงานคอนกรีตองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ CaO สูง จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ CSH ในช่วงแรก ทำให้กำลังอัดสูงขึ้นมาก (Phoo-ngernkhamet al., 2015)

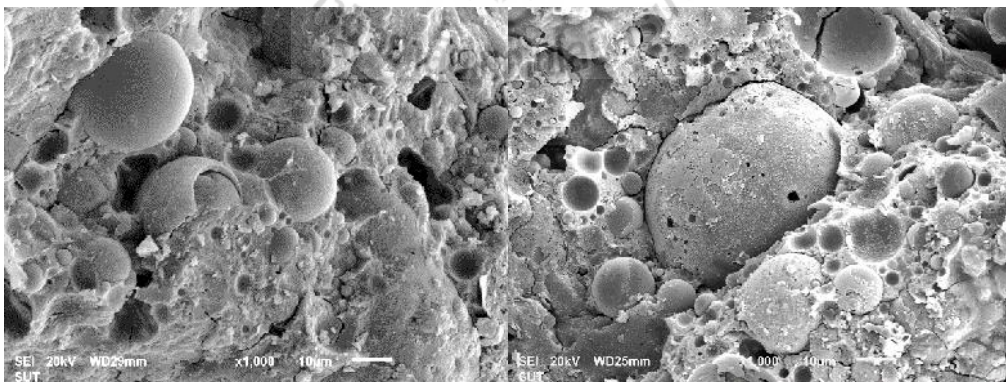
4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

รูปที่ 4.11 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ ที่สัดส่วน Soil:FA:Slag = 60:30:10 และสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ และ $40:60$ บ่มที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเป็นการจำลองสภาพการก่อสร้างหรือใช้งานจริง รูปที่ 4.11(ก) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ แสดงผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์บนผิวของเม็ดลอมมากกว่าตัวอย่างที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$ (รูปที่ 4.14(ข)) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14(ค) และ (จ) ที่อายุบ่ม 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ของตัวอย่างที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน การจัดเรียงโครงสร้างของเม็ดดินกับเม็ดลอมที่หนาแน่นขึ้น เกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นที่ผิวตัวอย่างและเม็ดลอมอย่างชัดเจน ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์นี้ ยังสามารถพัฒนากำลังต่อไปได้อีก ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ ในรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.14(ง) และ (ฉ) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$ ที่อายุบ่ม 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีลักษณะที่คล้ายกันไม่แตกต่างกันมากนัก และสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่มทั้งสองนี้ ยังอยู่ในขั้นตอนการชะละลายซิลิกาและอลูมินาจากผิวเม็ดลอม ทั้งนี้เนื่องจากการที่ตัวอย่างมีปริมาณของ Na_2SiO_3 ต่ำจะมีสารเชื่อมประสานน้อย ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงแรกต่ำกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณ Na_2SiO_3 สูง

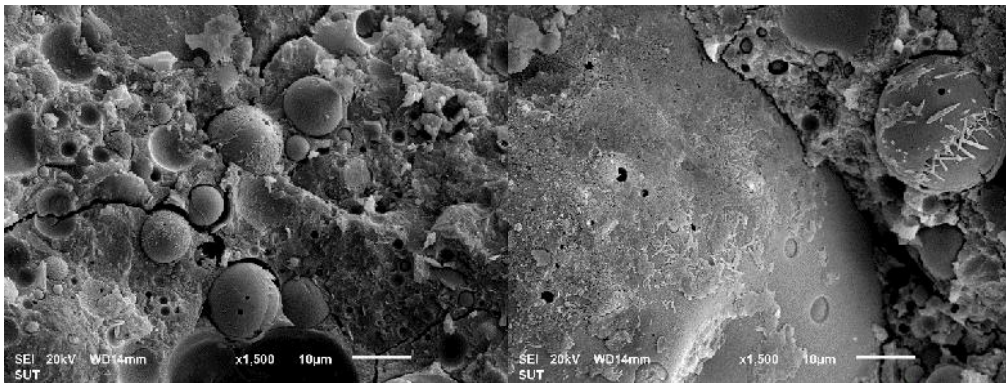
รูปที่ 4.12 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วน Soil:FA:Slag = 40:30:30 และสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ = 90:10 และ 40:60 บ่มที่อุณหภูมิห้อง เพื่อยืนยันการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ ของตัวอย่างที่มีปริมาณ Na_2SiO_3 ต่ำและสูง ตัวอย่างที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ = 90:10 และ 40:60 มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และเป็นไปในลักษณะเดียวกับ รูปที่ 4.11 ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ Soil:FA:slag = 50:30:20 ของทุกสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่อายุบ่ม 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะเห็นขั้นตอนและลักษณะการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ ขึ้นต้นของกระบวนการชะละลาย ซึ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มที่มีสัดส่วนของ NaOH ต่ำ และสูง



(ก) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ = 90:10, อายุบ่ม 7 วัน (ข) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ = 40:60, อายุบ่ม 7 วัน

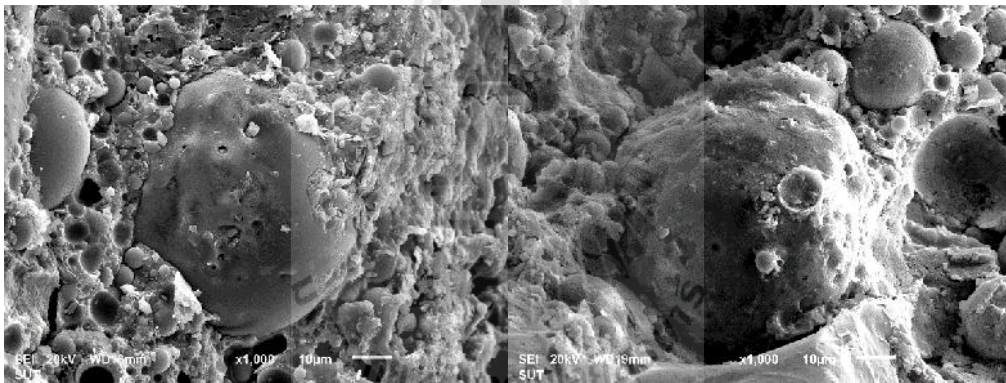


(ค) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ = 90:10, อายุบ่ม 14 วัน (ง) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ = 40:60, อายุบ่ม 14 วัน

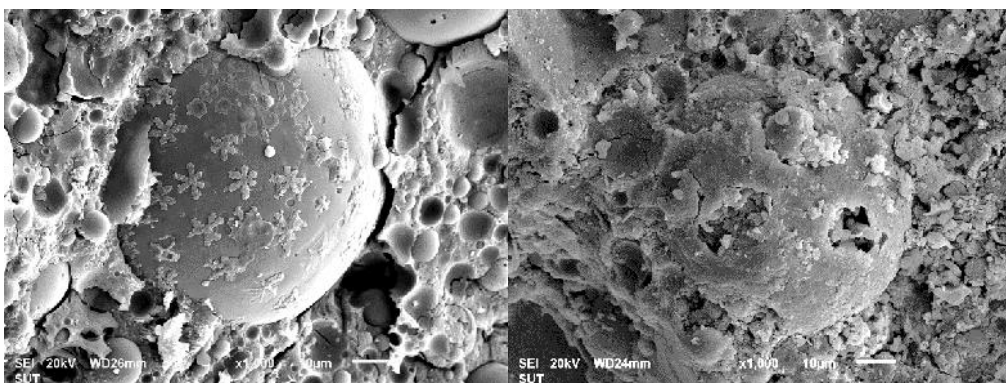


(จ) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$, อายุบ่ม 28 วัน (ฉ) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$, อายุบ่ม 28 วัน

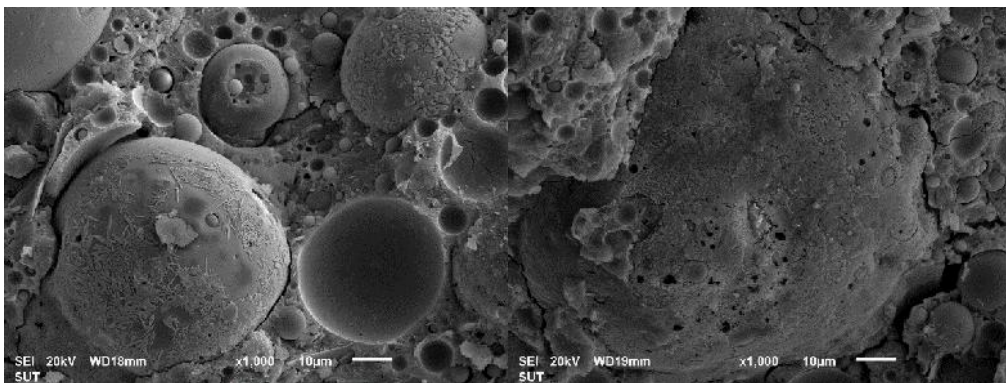
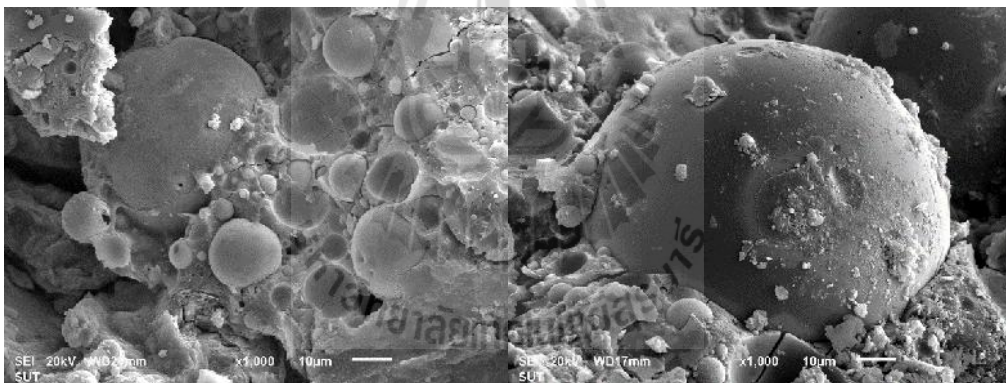
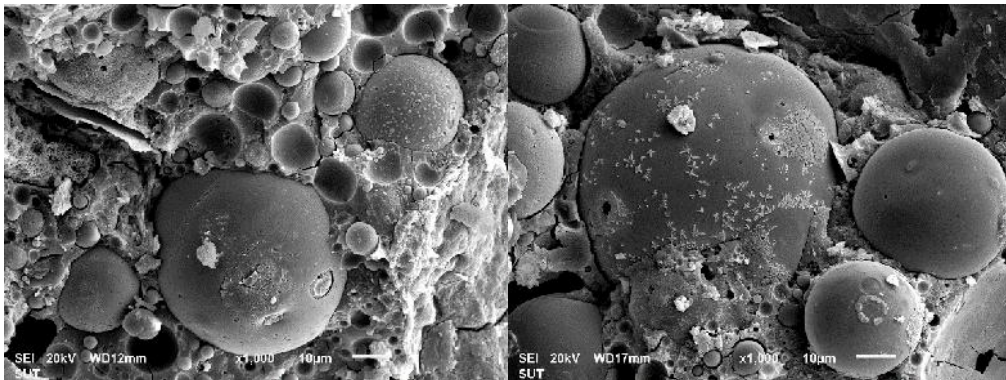
รูปที่ 4.11 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ Soil:FA:slag = 60:30:10 ของอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ และ 40:60 บ่มที่อุณหภูมิห้อง

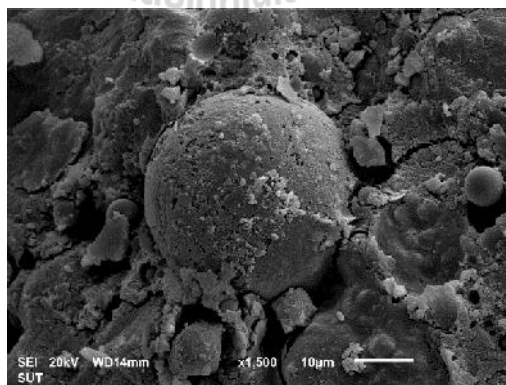
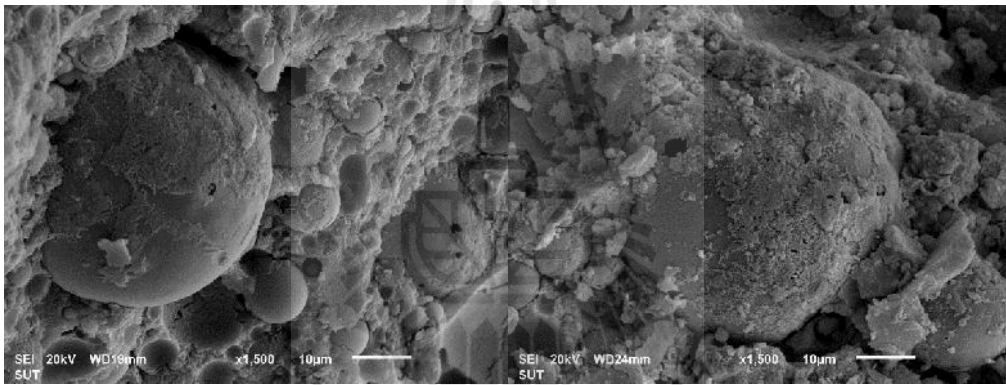
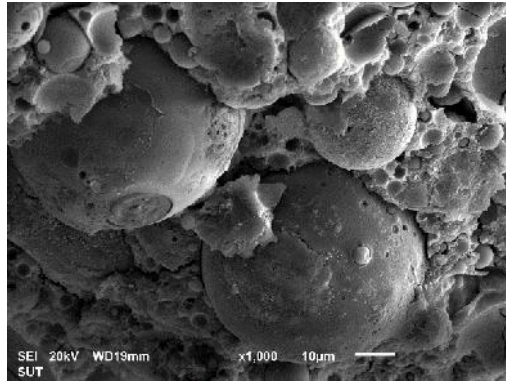


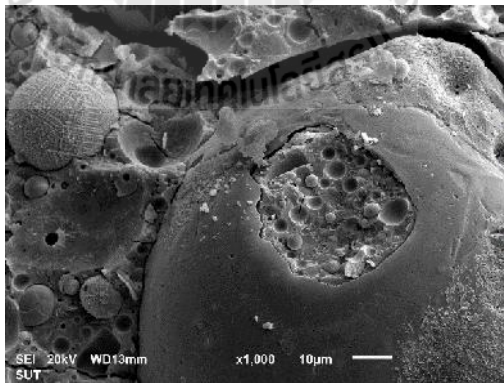
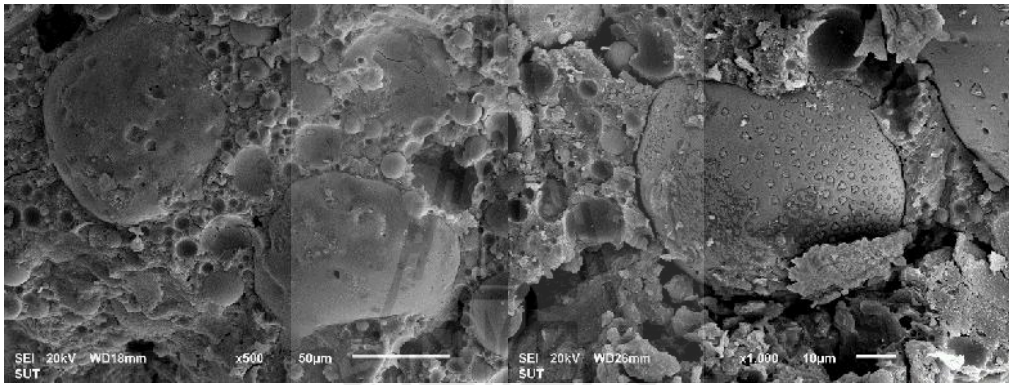
(ก) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$, อายุบ่ม 7 วัน (ข) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$, อายุบ่ม 7 วัน



(ค) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$, อายุบ่ม 14 วัน (ง) $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$, อายุบ่ม 14 วัน







รูปที่ 4.15 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วน Soil:FA:slag = 50:30:20 และสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 90:10$ บ่มที่อุณหภูมิห้องลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามระยะเวลาบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับขั้นตอนของกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Fernandez-Jimenez, et al., 2005) ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์นี้ ที่อายุ 7 และ 28 วัน พัฒนาขึ้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข)



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ในบทนี้จะสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ของ การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงวัสดุดินลูกรัง (Lateritic Soil) ที่ไม่ได้มาตรฐานศึกษาการ พัฒนากำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ตามสัดส่วนผสมต่าง ๆ และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของ ดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์โดยประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วน Soil:FA:slag = 60:30:10, 50:30:20 และ 40:30:30 ที่ผสมด้วยสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0$ และ 90:10 มีการพัฒนา กำลังจากอายุบ่ม 7 วัน ถึง 28 วัน ได้สูงกว่าสัดส่วนอื่น และที่อายุบ่ม 7 วัน ตัวอย่างที่ผสมด้วย สัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เกือบทุกสัดส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 1.72 MPa (Base line 1) ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงดินซีเมนต์ (soil cement) และตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทสำหรับงานปรับปรุงชั้นพื้นทางเดิมด้วย ปูนซีเมนต์ หรืองานชั้นพื้นทางสำหรับการปรับปรุงด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุกลับมาใช้ใหม่ (Pavement In-place recycling) นอกจากนี้ เกือบทุกสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ให้ค่า กำลังอัดสูงกว่า 2.42 MPa (Base line 2) ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ยกเว้นเพียง สัดส่วน Soil:FA:slag = 60:30:10 ที่ผสมด้วย $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 40:60$ เท่านั้น ที่ให้กำลัง อัดต่ำกว่า 1.72 MPa

5.1.2 สัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานคือ สัดส่วนที่ผสมด้วย $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 50:50$ และ 40:60 เนื่องจากมีสัดส่วนของน้ำมาก ทำให้สามารถผสมได้ง่ายและ นอกจากนี้ยังสามารถบดอัดได้ง่ายกว่าสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ส่วนสัดส่วนอื่น ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH} = 100:0, 90:10$ และ 80:20) ถึงแม้จะให้ค่ากำลังสูง แต่เนื่องจากมีสัดส่วนของ Na_2SiO_3 ซึ่งมี ลักษณะเหนียวข้น ทำให้ผสมกับดินลูกรัง ได้ลดย และ ตะกรันเหล็ก ได้ยาก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การทำงานจริงได้ยากเช่นเดียวกัน

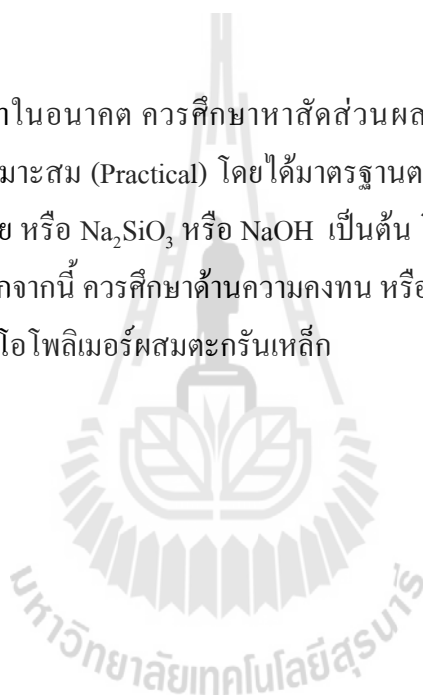
5.1.3 ตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมตะกรันเหล็กและผสมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ สูง จะให้กำลังอัดในช่วงต้นสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสมตะกรันเหล็กและเมื่อ

ทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่มที่ 28 วัน สัดส่วนที่ผสมด้วยตะกรันเหล็กให้กำลังอัดสูงกว่าสัดส่วนที่ไม่ได้ผสมตะกรันเหล็กเกือบทุกสัดส่วน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ตะกรันเหล็กที่ใช้สามารถเป็นตัวเสริมกำลังของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี

5.1.4 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ มีประโยชน์เพื่อให้เห็นลักษณะความแตกต่างตามระยะเวลาบ่มของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจำทำให้เห็นขั้นตอนและกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันหรือการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์อย่างชัดเจน

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาในอนาคต ควรศึกษาหาสัดส่วนผสมที่ลดต้นทุนในการก่อสร้างและสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม (Practical) โดยได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของงานก่อสร้าง เช่น การลดสัดส่วนของเถ้าลอย หรือ Na_2SiO_3 หรือ NaOH เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Na_2SiO_3 ซึ่งยังมีราคาแพงอยู่ในขณะนี้ นอกจากนี้ ควรศึกษาด้านความคงทน หรืออิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของดินลูกรังจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกรันเหล็ก

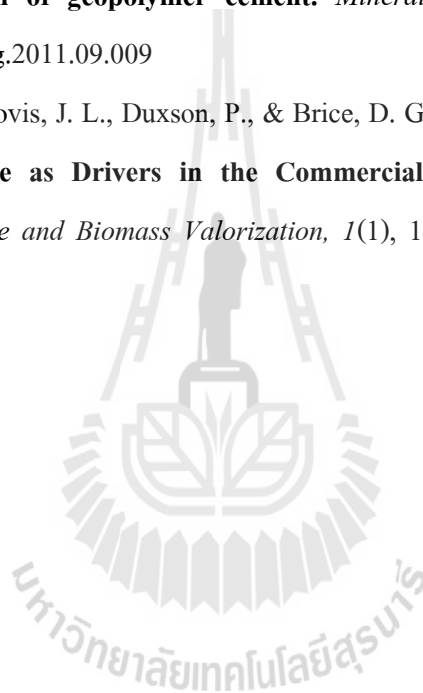


รายการอ้างอิง

- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). **Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer.** *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224-229.
- Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., & Hanjitsuwan, S. (2012). **Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems.** *Journal of Materials Science*, 47(12), 4876-4883. doi: 10.1007/s10853-012-6353-y
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., & Rattanasak, U. (2009). **Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers.** *Waste Manag*, 29(2), 539-543. doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.023
- Chindaprasirt, P., Jenjirapanya, S., & Rattanasak, U. (2014). **Characterizations of FBC/PCC fly ash geopolymeric composites.** *Construction and Building Materials*, 66, 72-78. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.067
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). **Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste.** *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.012
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Brice, D. G., Kilcullen, A. R., Van Deventer, J. S. J. (2013). **Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes.** *Construction and Building Materials*, 48, 1187-1201. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.106
- J. Davidovits, "Geopolymer Cement," *Geopolymer Cement, a review*, 2013.
- Kandhal, P.S and Hoffiman, G.I (1997), "Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in it-Mix Asphalt mixtures", *Transportation Research Record*, No. 1583, pp.3 28-36
- Lucio, A. (1981), *Physico-Chemical Metallurgy*, Vo. 2, Belo Horizonta

- Machado, A. T. A. (2000), "**A Comparative Study on Test Methods for Evaluating Steel Slag Expansion**", M.Sc. Thesis, University of Sao Paulo, Brazil
- Mancio, M. (2001), "**Contribution to the Study of Volumetric Instability of Electric Arc Furnace of Steel Slag**", M.Sc. Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil
- Mathur, S, Soni, S. K., and Murty, A. (1999), "**Utilization of Industrial Wastes in Low-Volume Rodas**", Transportation Research Record, No. 1652, pp. 245-256
- Rattanasak, U., & Chindapasirt, P. (2009). **Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer.** *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078. doi: 10.1016/j.mineng.2009.03.022
- Rattanasak, U., & Chindapasirt, P. (2014). **Properties of alkali activated silica fume–Al(OH)₃–fluidized bed combustion fly ash composites.** *Materials and Structures*. doi: 10.1617/s11527-014-0413-5
- Rattanasak, U., Chindapasirt, P., & Suwanvitaya, P. (2010). **Development of high volume rice husk ash alumino silicate composites.** *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 17(5), 654-659. doi: 10.1007/s12613-010-0370-0
- Rattanasak, U., Pankhet, K., & Chindapasirt, P. (2011). **Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer.** *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 18(3), 364-369. doi: 10.1007/s12613-011-0448-3
- Rohde, L. Nunez, W.p., and Ceratti, J.A.P.(2003), "**Electric arc furnace steel slag. Base material for low-volume rodas**", Transportation Research Record, No. 1819, Vol. 2, pp. 201-207
- Sherwood, P. T. (1995), "**The Use of Waste and Recycled Materials in Roads**", Transport, Proc. of Institute of Civil Engineers, May 1995, pp. 116-124
- Shi, C. (2004), "**Steel Slag- Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties**", *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 16, No. 3, pp 230-236

- Sukmak, P., De Silva, P., Horpibulsuk, S., & Chindaprasirt, P. (2014). **Sulfate Resistance of Clay-Portland Cement and Clay High-Calcium Fly Ash Geopolymer.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04014158.
- van Deventer, J. S., Provis, J. L., Duxson, P., & Lukey, G. C. (2007). **Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products.** *J Hazard Mater*, 139(3), 506-513. doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.044
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). **Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement.** *Minerals Engineering*, 29, 89-104. doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.009
- van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Brice, D. G. (2010). **Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials.** *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 145-155. doi: 10.1007/s12649-010-9015-9





ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Chanyuth Kongkerd, Suksun Hopibulsuk, Itthikorn Phummiphan, Patimaporn Sukmak and Wirasak Chantra. 2557. **The Strength Development of Lateritic Soil Stabilized with Slag - Fly Ash Geopolymer.** การประชุมวิชาการการขนส่งแห่งชาติ ครั้งที่ 9 (The 9th National Transport Conference), โรงแรมราม่า การ์เด้น กรุงเทพฯ. 20-21 พฤศจิกายน พ.ศ.2557.





The Strength Development of Lateritic Soil Stabilized with Slag - Fly Ash Geopolymer

Chanyuth Kongkerd¹ Suksun Hopibulsuk² Itthikorn Phummiphon³ Padmaporn Sukmak⁴ and Wirasak Chantra⁵

^{1,2,5} Department of Rural Roads, Thailand

^{1,2,3} School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

⁴ School of Civil Engineering, Walailak University, Thailand

Abstract

This paper studies the strength development of lateritic soil stabilized with slag and fly ash (FA) geopolymer. The objective of this study is to determine the effects of proportion changes of alkaline activators and curing times on the compressive strength. The marginal lateritic soil for subbase material was stabilized with slag - Fly Ash. The proportion of soil: FA: slag is fixed at 60:30:10. A liquid alkaline activator is a mixture of sodium silicate (Na_2SiO_3) solution and 5 molar concentration of sodium hydroxide (NaOH) solution. The proportions of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ were 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 50:50 and 40:60. The geopolymer specimens were identified with unconfined compressive strength testing at ambient temperature in 7, 14, 28 and 60 days for curing time. These compressive strengths are compared with the 70% soil and 30% FA geopolymer at ambient temperature in 7, 28 and 60 days. This study shows that it is an experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer and suggests that it is possible to use it for subbase materials.

Keywords: Geopolymer, Lateritic soil, Soil stabilizer, Fly ash, Microstructure.

1. Introduction

In road construction, marginal materials are often stabilized with ordinary Portland cement (OPC) for pavement applications. The production of OPC is an energy-intensive process and emits a very large amount of greenhouse gas - CO_2 into the atmosphere (Davidovits 1991, Davidovits 1994, Davidovits 1994, Davidovits 1994, Davidovits 2002, Davidovits 2013). The production of 1 tons of Portland cement clinker

directly generates 0.55 tons of chemical - CO_2 and requires the combustion of carbon-fuel to yield an additional 0.40 tons of carbon dioxide. So, it is simplified that the production of 1 ton of Portland cement release about 1 ton of carbon dioxide (Davidovits 2013).

Geopolymer is an inorganic aluminosilicate material synthesized by alkaline activation of materials rich in alumina (Al_2O_3) and silica (SiO_2). It is formed through polycondensation of tetrahedral silica (SiO_4) and alumina (AlO_3), which are linked with other by sharing all the oxygen atoms (Davidovits 1991). The chemical structure of geopolymer can generally be expressed as :



Where M is the alkaline element, - indicates the presence of a bond, x is 1, 2, or 3, and n is the degree of polymerization (Davidovits 1991).

The mechanism of geopolymerization involves the dissolution of Al and Si in the alkaline, then transportation of dissolved species, followed by a polycondensation forming a 3D network of aluminosilicate structures (Silva and Sagoe-Crenstil 2008, Silva and Sagoe-Crenstil 2009). Three typical structures of geopolymer are:

Poly (sialate) (-Si-O-Al-O-),

Poly (sialate-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-),

Poly (sialate-disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-).

Currently, utilization of various kinds of waste materials in a range of civil engineering applications including pavements materials has been researched continuously. The sustainable alternative materials that have been researched include recycled concrete aggregates (RCA), reclaimed asphalt pavement (RAP), recycled glass, industrial and manufacturing waste and other forms of municipal wastes. Moreover, Research has been increasingly undertaken as well as investigated the replacement usage of

alternative binders, which is low the greenhouse gas – CO₂, to the Portland cement (Phetchuay, Horpibulsuk et al. 2014).

This research aims to investigate the possibility of using geopolymers to stabilize a marginal lateritic soil to be sustainable subbase materials. The effects of alkaline activator and curing time on the compressive strength stabilized with slag - fly ash geopolymer are investigated and discussed.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Soil sample

The studied soil is a marginal lateritic soil collected from a pit in Rayong, Thailand. The specific gravity is 2.58. The liquid limit, plastic limit, and plastic index are 27.72, 21.65, and 6.07, respectively according to ASTM D4318 (2010). The compaction characteristics under modified Proctor compaction as described in D1557 (ASTM 2012) are the maximum dry unit weight of 20.85 kN/m³ and optimum moisture content (OMC) of 8.0%. California Baring Ratio (CBR) value is 14.7% at 95% of maximum dry density. Los Angeles abrasion de-scribed by C131 (ASTM 2006) is 52.9%. Based on the Unified Soil Classification System (USCS), the soil is classified as Silty clayey sand (SC-SM) according to D2487 (ASTM 2011). Based on the AASHTO system (D3282 (ASTM 2009)), the soil is classified as A-2-4(0). The particle size distribution was determined by sieve analysis test (via Figure 1).

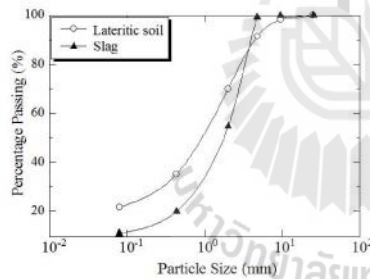


Figure 1. Particle size distribution of lateritic soil and slag.

2.2 Fly ash

Fly ash (FA) was obtained from Mae Moh power plant in Northern Thailand. The chemical compositions of FA are shown in Table 1 by X-ray fluorescence (XRF). The major components of FA are 36.00% SiO₂, 26.73% CaO, 17.64% Fe₂O₃, and 16.80% Al₂O₃. According to C618 (ASTM 2012), it is categorized as Class C, high-calcium FA

(CaO > 10%). The microstructure of lateritic soil and FA are shown in Figure 2. The FA particles are generally fine and spherical in shape.

Table 1. The chemical composition of marginal lateritic soil, fly ash (FA) and slag.

Chemical composition (%)	Marginal lateritic soil	Fly ash (FA)	Slag
SiO ₂	77.81	36.00	15.00
Al ₂ O ₃	4.42	16.80	5.50
Fe ₂ O ₃	10.93	17.64	22.50
CaO	1.13	26.73	27.50
MgO	N/A	N/A	7.50
SO ₃	1.36	N/A	N/A
K ₂ O	2.33	1.83	N/A
TiO ₂	1.33	0.48	N/A
MnO ₂	0.55	0.15	5.50
B ₂ O	0.38	N/A	N/A

2.3 Slag

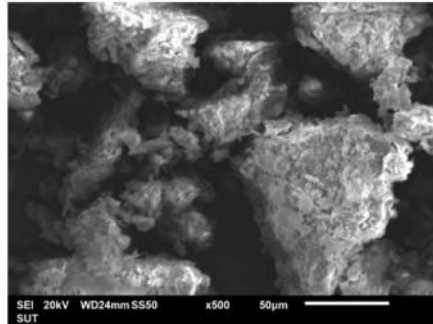
Slag was obtained from steel industrial factory, Siam Steel Mill Services Co. Ltd., in Chonburi province, Thailand. The chemical compositions of slag are shown in Table 1. The major components of slag are 27.50% CaO, 22.50% Fe₂O₃, and 15.50% SiO₂. The microstructure of slag is shown in Figure 2. The particles are normally irregular in shape. The particle size distribution and the microstructure of slag are also shown in Figure 1 and Figure 2, respectively.

2.4 Liquid alkaline activator

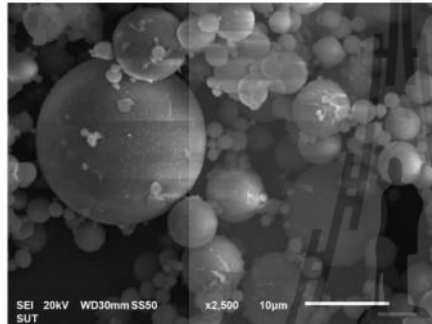
The liquid alkaline activator was a mixture of sodium silicate (Na₂SiO₃) solution, composed of 15.50% Na₂O and 32.75% SiO₂ by weight as well as 5 molar concentrations of sodium hydroxide (NaOH) solution.

2.5 Lateritic soil – slag – FA geopolymer

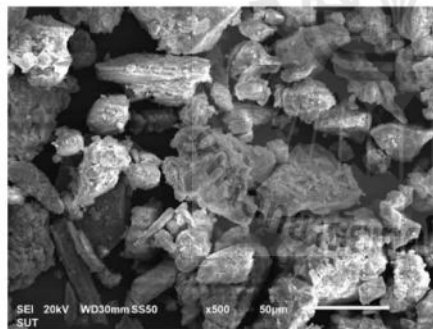
The lateritic soil – slag – FA geopolymer was a mixture of soil, slag, FA and liquid alkaline activator (Na₂SiO₃ and NaOH). In this study, the proportion of soil: FA: slag was fixed at 60: 30: 10. The Na₂SiO₃: NaOH ratios were 100:0, 90:10, 80:20, 50:50, and 40:60. The amount of liquid alkaline activator was determined under modified Proctor compaction at maximum dry unit weight and optimum activator content for each proportion.



(a) Lateritic soil



(b) FA



(c) slag

Figure 2. SEM image of: (a) lateritic soil, (b) FA, and (c) slag.

The lateritic soil, slag, FA, and liquid alkaline activator were mixed for 5-10 min, and then the mixture was compressed in cylindrical molds according to the procedure of modified Proctor compression. The specimens were cured at ambient temperature (27 – 30 °C) and humidity

conditions. After the curing period of 7, 14, 28, and 60 days, the samples were tested for unconfined compressive strength (ASTM D1633) (2007).

2.6 Methods

Unconfined compressive strengths of lateritic soil – slag - FA geopolymer samples were examined at four different ingredients and curing periods of 7, 14, 28, and 60 days. The results were reported using mean compressive strength values of at least three samples to check for consistency. These compressive strengths were compared with the previous study of lateritic soil – FA geopolymer investigated by Phummiphon et. al (2014).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The modified Proctor compaction curves of lateritic soil – FA geopolymer are shown in Figure 3, which demonstrated maximum dry unit weight ($\gamma_{d,max}$) and optimum liquid alkaline activator content (%L). On the same line with this, The maximum dry unit weight ($\gamma_{d,max}$) of lateritic soil – slag - FA geopolymer was studied at different ingredients.

3.1 Compaction characteristic of soil – FA geopolymer

The compaction curves of 70% lateritic soil – 30% FA geopolymer are different and depend on the ratios of Na_2SiO_3 : NaOH. The maximum dry unit weight ($\gamma_{d,max}$) of specimens mixed with liquid alkaline activator (Na_2SiO_3 : NaOH) of 100:0, 90:10, 80:20, and 50:50 were 20.21, 20.56, 19.56, and 20.45 kN/m^3 , respectively. Additionally, the optimum liquid alkaline activator contents of sequent ingredients are 19.6%, 19.13%, 18.38%, and 15.68%, respectively (via Figure 3).

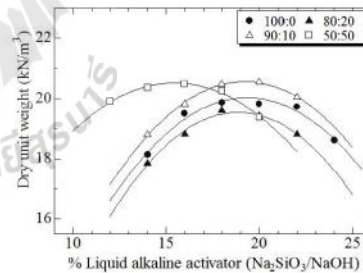


Figure 3. Compaction curves of the marginal lateritic soil – FA geopolymer at different ingredients

3.2 Compaction characteristic of soil – slag – FA geopolymer

The compaction curves of lateritic soil – slag - FA geopolymer for the alkaline activator (Na_2SiO_3 : NaOH) proportion of 100:0, 90:10, 80:20, 50:50, and 40:60 are presented in Figure 4. In sequence of

activator proportions, the maximum dry unit weight (γ_{dmax}) of specimens were 19.52, 20.77, 20.63, 20.61 and 20.47 kN/m^3 , respectively. Furthermore, the optimum liquid alkaline activator contents are 17.16%, 16.18%, 15.48%, 13.33 and 12.00%, respectively.

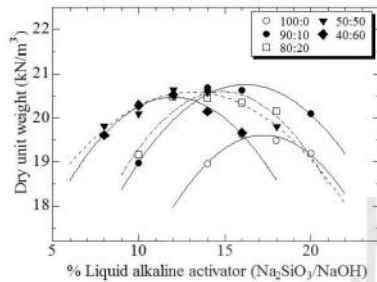


Figure 4. Compaction curves of the marginal lateritic soil – slag - FA geopolymer at different ingredients

3.3 Unconfined compressive strength

Figure 5 presents compressive strength of lateritic soil – slag - FA geopolymer cured at ambient temperature for five different ingredients of Na_2SiO_3 : NaOH (100:0, 90:10, 80:20, 50:50, and 40:60). The maximum compressive strength of total specimens are found at Na_2SiO_3 : NaOH of 90:10 and 80:20 (about 9,250 kPa) at early stage of geopolymerization for 7 days, which period is commonly controlled the strength requirement as 1,716 kPa (base line) specified by the national road authority in Thailand such as Department of Highways and Department of Rural Roads (DH-S204/2000 2000, DRR244-2013 2013). The compressive strength of all proportions of Na_2SiO_3 : NaOH are higher than the base line strength except the 40:60 at 7 days curing with 1,525 kPa.

The Na_2SiO_3 : NaOH ratios of 90:10 and 80:20 insignificantly differ in strength between 7 to 14 days curing, while the minimum strength is discovered at the 40:60. According to since 7 to 60 days curing, the strength of all proportions increased continually. The strength of 90:10 ratio was higher than the others, whereas the two greatly increasing rate of strength were discovered in that the proportion containing more NaOH solution as 50:50 and 40:60 between 28 to 60 days curing. In 60 days curing, all proportions have become progressively in strength and have different rate.

Figure 6 shows the effect of curing time on the compressive strength of lateritic soil – slag - FA geopolymer at ambient temperature for different ingredients of Na_2SiO_3 : NaOH . The strength of 90:10 and 80:20 ratios dramatically rise during 7 to 28 days. The strength

increasing of 100:0 and 90:10 ratios are rather similar trend. On the same line with this, the proportion of 50:50 and 40:60 are alike.

As shown in Figure 7, with the comparison on the compressive strength of 70% lateritic soil – 30% FA geopolymer and 60% lateritic soil – 10% slag – 30% FA geopolymer with Na_2SiO_3 : NaOH ratios of 90:10 at 7, 28, and 60 days curing in ambient temperature, the compressive strengths of the sample with 10% slag are higher than another in all curing time. The compressive strengths of the sample mixed with 10% slag to without slag sample are greater than 29%, 58%, and 60% at curing time of 7, 28, and 60 days, respectively.

The factors controlling the strength development in the lateritic soil - slag - FA geopolymer are liquid alkaline activator content and curing time (Sukmak, Horpibulsuk et al. 2013). The precursor of geopolymer binder is also important affecting the compressive strength. Especially, in this study adding slag in the soil – FA geopolymer increases strength evidently. In addition, the possible factors affecting the mechanical properties of geopolymer are types and particle size distributions and amorphous content of source material, curing condition, water content, and chemical composition of the precursor (Si/Al and Na/Al ratios) (Zhang, Guo et al. 2013). Presently, the most commonly used liquid alkaline activator is the mixture of sodium silicate (Na_2SiO_3) solution and sodium hydroxide (NaOH) solution.

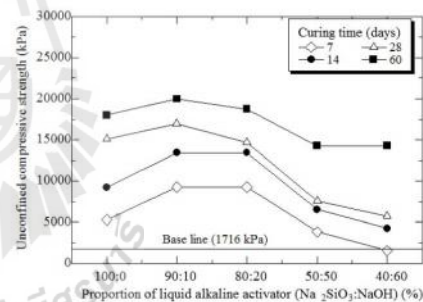


Figure 5. Compressive strength of lateritic soil – slag - FA geopolymer cured at ambient temperature for different ingredients of Na_2SiO_3 : NaOH .

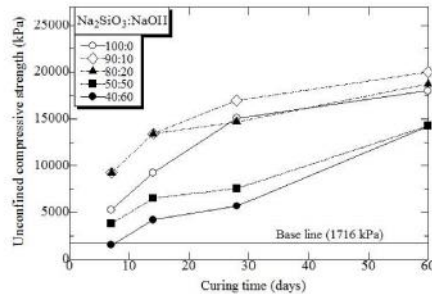


Figure 6. Effects of curing time on the compressive strength of lateritic soil - slag - FA geopolymer at ambient temperature

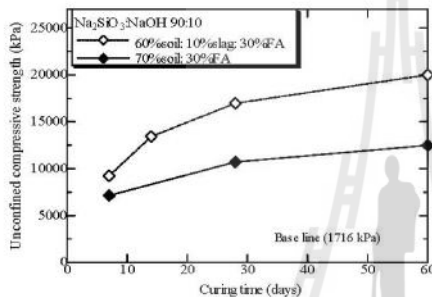


Figure 7. The compressive strength of lateritic soil - FA geopolymer with 10% slag and without slag of the Na_2SiO_3 : NaOH ratios of 90:10 at ambient temperature.

4. Conclusions

In this study, the possibility of using slag - FA based geopolymer as a soil stabilizer in marginal lateritic soil for subbase material in pavement applications is confirmed. The compressive strength of lateritic soil - slag - FA geopolymer stabilized soil are much higher than the lateritic soil - FA geopolymer and higher than 50% at 28 days curing time. Furthermore, the compressive strength of almost entire proportions of Na_2SiO_3 : NaOH are higher than the base line strength specified by the national road authority in Thailand at 7 days curing time. The compressive strengths of all proportions continuously increase from 7 to 60 days curing. So, the long-term performances of lateritic soil - slag - FA geopolymer in terms of unconfined compressive strength requires further studied and satisfies that the slag - FA geopolymer can improve the mechanical properties of the lateritic soil. This study has significant impacts on pavement applications. Future work should be done to determine the appropriate proportion of ingredient for subbase and the effective cost for of soil stabilization.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to acknowledge Miss Pimsin Chanprasert for providing SEM testing. The financial support from Department of Rural Roads and the Thailand Research Fund under the TRF Senior Research Scholar program Grant No. RTA5680002 is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- ASTM C131-06 (2006). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International.
- ASTM C535-12 (2012). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International.
- ASTM C618-12a (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International.
- ASTM D1557-12 (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³), ASTM International.
- ASTM D1633-00 (2007). Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, ASTM International.
- ASTM D2487-11 (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International.
- ASTM D3282-09 (2009). Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, ASTM International.
- ASTMD4318-10 (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International.
- Davidovits, J. (1991). "Geopolymer: inorganic polymeric new materials." *Journal of Thermal Analysis* 37: 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). "Geopolymers: Man-Made Rock: Geosynthesis And The Resulting Development Of Very Early High Strength Cement." *Journal of Materials Education* 16(2&3): 91-139.
- Davidovits, J. (1994). "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries." *World Resource Review* 6(2): 263-278.
- Davidovits, J. (1994). "Properties Of Geopolymer Cements." *Alkaline Cements and Concretes*, KIEV, Ukraine.

- Davidovits, J. (2002). Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. Geopolymer 2002 Conference. Melbourne, Australia: 1-9.
- Davidovits, J. (2013). "Geopolymer Cement." Geopolymer Cement, a review.
- DH-S204/2000 (2000). Standard of soil cement base, Department of Highway.
- DRR244-2013 (2013). Standard of soil cement base, Department of Rural Roads.
- Phetchuay, C., S. Horpibulsuk, C. Saksiripattanapong, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah and M. M. Disfani (2014). "Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer." Construction and Building Materials **69**: 285-294.
- Phummiphon, I., S. Horpibulsuk and P. Sukmak (2014). Strength and Microstructure of Marginal Lateritic Soil-Fly Ash Geopolymer. International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development, 27-29 August 2014, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Silva, P. D. and K. Sagoe-Crenstil (2008). "The Effect of Al₂O₃ and SiO₂ On Setting and Hardening of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O Geopolymer Systems." Journal of the Australian Ceramic Society **44**(1): 39-46.
- Silva, P. D. and K. Sagoe-Crenstil (2009). "The Role of Al₂O₃, SiO₂ and Na₂O Amorphous → Crystalline Phase Transformation in Geopolymer Systems." Journal of the Australian Ceramic Society **45**(1): 63-71.
- Sukmak, P., S. Horpibulsuk, S.-L. Shen, P. Chindaprasirt and C. Saksiripattanapong (2013). "Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer." Construction and Building Materials **47**: 1125-1136.
- Zhang, M., H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang and M. Tao (2013). "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer." Construction and Building Materials **47**: 1468-1478.

ประวัติผู้เขียน

นายชาญยุทธ กองเกิด เกิดเมื่อ พ.ศ. 2518 ณ จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากอำเภอโนนศิลา จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2537 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ. 2543 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้ารับราชการ ตำแหน่งวิศวกรโยธา ที่สำนักงานโยธาธิการจังหวัดตาก กรมโยธาธิการ เมื่อปี พ.ศ. 2545 ได้โอนย้ายมารับราชการที่กรมทางหลวงชนบท ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 3 (ชลบุรี) ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในหลักสูตรดังกล่าว ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2555 จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านการปรับปรุงคุณสมบัติดินลูกรังด้วยสแลกจีโอโพลิเมอร์เป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง