

การปรับปรุงคุณภาพหินคลุกเกรดออยจีโอโพลีเมอร์
สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง



นายสุเมธ วรรณทะนะ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

การปรับปรุงคุณภาพหินคลุกเกรดออยจีโอโพลีเมอร์ สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบโครงการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ปรีชาพร โกษา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุเมธ วรรณทะนะ : การปรับปรุงคุณภาพหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สำหรับใช้เป็นวัสดุ
ชั้นพื้นทาง (STABILIZATION OF MODIFIED CRUSH ROCK - FLY ASH
GEOPOLIMER AS BASE PAVEMENT MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรียาพร โภษา

วัสดุหินคลุกที่มีคุณสมบัติไม่ได้มาตรฐานงานทางมักจะทำการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่ง
กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานสูงและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ขึ้น
สู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ในการแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาการนำวัสดุที่
เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาใช้แทนปูนซีเมนต์ การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสัดส่วนของหินคลุกกับเถ้าลอย
ระยะเวลาในการบ่มที่มีผลต่อกำลังพัฒนากำลังอัดแกนเดียว สัดส่วนของหินคลุกกับเถ้าลอย
กำหนดไว้ 3 สัดส่วน คือ 95:5, 90:10, และ 85:15 และสัดส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดร
อกไซด์ คือ 50:50 และระยะเวลาบ่มกำหนดที่ 7, 14 และ 28 วัน

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction Test)
พบว่าค่าความแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยและปริมาณของเถ้าลอยจะส่งผลต่อ
ค่าปริมาณความชื้นน้อยมาก ส่วนกำลังอัดของหินคลุกจีโอโพลิเมอร์แปรผันตรงตามระยะเวลาการ
บ่ม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงซึ่งกำหนดกำลังอัดแกนเดียวที่อายุ
บ่ม 7 วัน ต้องไม่น้อยกว่า 1.72 เมกกะปาสกาล สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ที่
มีปริมาณการจราจรต่ำ และ 2.41 เมกกะปาสกาล สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางดินซีเมนต์
ที่มีปริมาณการจราจรสูง พบว่าทุกสัดส่วนให้กำลังอัดที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กรมทางหลวง
กำหนด เมื่อตรวจสอบภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าตัวอย่างเกิดกระบวนการ
ชะละลายซิลิกาและอลูมินาจากเม็ดเถ้าลอยจนเกิดรูพรุนอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการ
เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ดี

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการปรับปรุงคุณภาพคลุกด้วยเถ้าลอย จีโอโ
ลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยสัดส่วนของเถ้าลอยที่เหมาะสมควรใช้สัดส่วนของ เถ้าลอยอยู่
ที่ร้อยละ 10 ถึง 15 จึงจะเพียงพอกับปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ และทำให้เกิดการชะละลายเพื่อ
นำเอาซิลิกาและอลูมินามาสร้างปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่มากเพียงพอจนสามารถพัฒนากำลังได้
อย่างต่อเนื่องตามช่วงอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SUMETH WANTANA: STABILIZATION OF MODIFIED CRUSH ROCK-
FLY ASH GEOPOLIMER AS BASE PAVEMENT MATERIAL.

ADVISOR : ASST. PROF. PREEYAPHORN KOSA, Ph.D.

Marginal crushed rock (CR) is generally stabilized with Ordinary Portland cement. The cement production consumes energy significantly and emits carbon dioxide (CO₂) to atmosphere, leading to greenhouse effect. Geopolymer is a green binder, which use fly ash (FA) as a precursor. This thesis attempts to investigate effects of liquid alkaline activator, curing time and Crushed to FA ratio on unconfined compressive strength (UCS). The crushed rock: FA ratios are 95:5, 90:10 and 85:15, the sodium silicate solution: sodium hydroxide solution (Na₂SiO₃ : NaOH) ratios are 50:50 and the curing times are 7, 14 and 28 days.

The results of modified compaction test show that the maximum dry density decreases with increasing fly ash content and the amount of fly ash will affect the optimum moisture content. The UCS of geopolymer crushed rocks varied according to curing time duration, which met the requirement of the Department of Highways, which are 1.72 MPa for low traffic loads and 2.41 MPa for high traffic loads, respectively. The study also revealed that all the three ratios provided greater UCS than the requirement of the Department of Highways. The scanning electron microscopy analysis showed that the samples developed higher UCS as a result of silica and alumina leaching from FA, which left the FA with etching holes. This well indicated geopolymerization.

This research shows the possibility of marginal crushed rock quality improvement with FA geopolymer to stabilize base layers. The suggested fly ash content is about 10 to 15% so that the amount of alkaline solution is sufficient to leach out silica and alumina to create a sufficiently flexible polymerization system that can continually improve its performance over the extended life span. Besides, future works on the investigation of durability, permeability and cost effectiveness are recommended.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2017

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาโครงการมหาบัณฑิตครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และแนะนำช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการอำนวยความสะดวกในการดำเนินการศึกษาค้นคว้านี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยาพร โกษา และผู้สอนรายวิชา ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน คุณชาญยุทธ กองเกิด ผู้อำนวยการส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์สำนักทางหลวงชนบทที่ 3 ที่กรุณาตรวจสอบให้คำแนะนำ และผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขอขอบพระคุณ รวมทั้งขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และเพื่อนนักศึกษาปริญญาโทรุ่น 14 หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภคทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือและกำลังใจระหว่างการศึกษาและทำโครงร่างมหาบัณฑิตฉบับนี้

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์ จากการศึกษาครั้งนี้ ขอน้อมรำลึกพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนบูรพาจารย์และผู้ที่มีพระคุณที่ให้การแนะนำอบรม ทั้งการสนับสนุนด้วยดีตลอดมา จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุเมธ วรรณทะนะ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ช |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา..... | 4 |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 หินคลุก..... | 5 |
| 2.2 การบดอัด (Compaction)..... | 8 |
| 2.3 กำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compressive strengths, UCS)..... | 10 |
| 2.4 มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (Standards)..... | 10 |
| 2.5 เถ้าลอย (Fly Ash)..... | 11 |
| 2.5.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย..... | 11 |
| 2.5.2 รูปร่างของเถ้าลอย..... | 13 |
| 2.5.3 ความละเอียด..... | 14 |
| 2.5.4 การหาดัชนีกำลัง..... | 15 |
| 2.5.5 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน..... | 15 |
| 2.5.6 โครงสร้างผลึก..... | 16 |
| 2.6 Geopolymer..... | 18 |
| 2.6.1 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์..... | 19 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.7 | ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator) | 22 |
| 2.7.1 | โซเดียมไฮดรอกไซด์ | 22 |
| 2.7.2 | สารละลายโซเดียมซิลิเกต | 22 |
| 2.8 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 23 |
| 3 | วิธีดำเนินการศึกษา | 28 |
| 3.1 | การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ | 28 |
| 3.2 | การเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง | 29 |
| 3.2.1 | เตรียมสัดส่วนมวลรวม | 29 |
| 3.2.2 | เตรียมสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali-activator) | 29 |
| 3.2.3 | การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Crushed rock-FA-Geopolymer) | 29 |
| 3.3 | การทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength, UCS) | 30 |
| 3.4 | การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค | 30 |
| 4 | ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล | 32 |
| 4.1 | คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ | 32 |
| 4.1.1 | หินคลุก (Crushed Rock) | 32 |
| 4.1.2 | เถ้าลอย (Fly Ash) | 33 |
| 4.2 | ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ | 35 |
| 4.3 | กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength, UCS) | 36 |
| 4.4 | ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค | 37 |
| 5 | สรุปและข้อเสนอแนะ | 40 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย | 40 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ | 41 |
| | เอกสารอ้างอิง | 42 |
| | ประวัติผู้เขียน | 48 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก..... | 6 |
| 2.2 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์กรมทางหลวง..... | 6 |
| 2.3 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์กรมทางหลวงชนบท..... | 7 |
| 2.4 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618..... | 12 |
| 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ.2533–2541..... | 13 |
| 2.6 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ เถ้าลอยอำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง..... | 15 |
| 2.7 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์..... | 21 |
| 2.8 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว..... | 23 |
| 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ..... | 30 |
| 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก..... | 32 |
| 4.2 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัย..... | 33 |
| 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly Ash)..... | 34 |

สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ลักษณะทางกายภาพของหินคลุก..... | 5 |
| 2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) ถ้ำลอยขยาย (5,000 เท่า)..... | 14 |
| 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน..... | 16 |
| 2.4 รูปทรงสี่หน้าของ SiO ₄ (SiO ₄ tetrahedral)..... | 17 |
| 2.5 โครงสร้างผลึกβ-ควอร์ซฉายลงบนระนาบ (0001)..... | 17 |
| 2.6 โครงสร้างผลึกของα-ควอร์ซโครงสร้างผลึกของ α-ควอร์ซ ฉายลงบน (0001)..... | 18 |
| 2.7 กระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า..... | 18 |
| 2.8 ผิวของถ้ำลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 10 นาที..... | 20 |
| 2.9 การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization)..... | 21 |
| 3.1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการทดลอง..... | 31 |
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) หินคลุก และ (ข) ถ้ำลอย..... | 34 |
| 4.2 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา..... | 35 |
| 4.3 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์..... | 36 |
| 4.4 ค่ากำลังอัดของหินคลุกถ้ำจีโอโพลิเมอร์..... | 37 |
| 4.5 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ (CR: FA = 95:5) บ่มที่อุณหภูมิห้อง..... | 38 |
| 4.6 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ (CR: FA = 90:10) บ่มที่อุณหภูมิห้อง..... | 38 |
| 4.7 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ (CR: FA = 85:15) บ่มที่อุณหภูมิห้อง..... | 39 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการคมนาคมขนส่งเป็นระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานที่สำคัญยิ่งต่อการพัฒนาประเทศทั้ง ทางน้ำ ทางอากาศ และทางบก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขนส่งทางบกเป็นที่นิยมแพร่หลายและเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศของประเทศไทย การขนส่งทางบกมีความสะดวกในการก่อสร้างตลอดจนมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน อีกทั้งสามารถก่อสร้างได้ครอบคลุมหลากหลายภูมิประเทศตลอดจนสามารถรองรับต่อความต้องการขยายการตัวทางเศรษฐกิจได้อย่างดี การขนส่งทางบกแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ การขนส่งทางรางและทางถนน การขนส่งทางถนนถือว่าเป็นหัวใจหลักของการขนส่งทางบก จะเห็นได้ว่าปัจจุบันรัฐบาลได้ให้ความสำคัญในการสร้างถนนและขยายถนนเชื่อมโยงระหว่างจังหวัดต่าง ๆ ได้อย่างทั่วถึงกัน จนทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง นับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นอันเนื่องมาจากแหล่งวัสดุที่ได้ตามมาตรฐานถูกนำมาใช้แล้วเป็นจำนวนมาก ประกอบกับสังคมเริ่มตระหนักมากขึ้นถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมทำให้การหาแหล่งวัสดุใหม่ ๆ เป็นไปด้วยความยากลำบาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุก่อสร้างประเภทดินลูกรังหรือหินโมชนิดต่าง ๆ ที่เป็นวัสดุพื้นฐานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

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

ปัญหาการขาดแคลนแหล่งวัสดุส่งผลกระทบต่อต้นทุนการก่อสร้างและความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างทาง ดังนั้น สถาบันการศึกษาและหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องกับ งานวิศวกรรมกรรมทางได้วิจัยเพื่อหาวัสดุใหม่ทดแทนวัสดุก่อสร้างพื้นฐานจากธรรมชาติรวมทั้งการหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุธรรมชาติที่ไม่ได้มาตรฐานให้สามารถเป็นวัสดุวิศวกรรมได้ อันจะนำมาซึ่งการลดต้นทุนค่าขนส่งวัสดุที่ได้มาตรฐานจากแหล่งวัสดุที่ห่างไกลจากสถานที่ก่อสร้าง

ปัจจุบันเทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติในงานก่อสร้างทางถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อขจัดปัญหาการขาดแคลนวัสดุวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้ปูนซีเมนต์ ผสมกับวัสดุธรรมชาติและบดอัดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม (กำลังต้านทานแรงเฉือนการอัดตัว การบวมตัว และการหดตัว) อย่างไรก็ตาม การได้มาซึ่งหินปูนซึ่งเป็นวัสดุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาด้านการทำลายธรรมชาติสิ่งแวดล้อมจากการระเบิดแหล่งหิน และกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน การผลิตปูนซีเมนต์ปริมาณ 1 ตันจะต้องปล่อย ก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์) ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณ 1 ตัน (Davidovits et al.2002)

หินคลุกจัดเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในการก่อสร้างถนนทางราบหินคลุกที่ใช้ในการก่อสร้างถนน ส่วนใหญ่เป็นหินปูนที่ได้จากการระเบิดภูเขาหิน อย่างไรก็ตาม การระเบิดภูเขาที่มีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียง เช่นเสียงดัง ฝุ่นคุ้งกระจาย เป็นต้น ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้เกิดข้อบังคับเพื่อลดการระเบิดภูเขาหิน ซึ่งก่อให้เกิดการขาดแคลนปริมาณวัสดุหินคลุกที่มีคุณภาพสูงเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างชั้นทาง อย่างไรก็ตาม ในระหว่างขั้นตอนของอุตสาหกรรมการผลิตหินคลุกนั้นมีเศษหินบางส่วนที่มีขนาดอนุภาคเล็กไม่เหมาะสมในการนำมาบดอัดเพื่อเป็นชั้นทางกล่าวคือจัดได้ว่าเป็นวัสดุค้อยคุณภาพสำหรับงานก่อสร้างถนน

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

ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตและการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์เก่าล้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาไหม้ถ่านหินในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตพลังงานไฟฟ้า มักนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมิน่าเป็นองค์ประกอบหลัก (วัสดุปอซโซลานิก) ไม่เพียงแต่จะประยุกต์ใช้กับปูนซีเมนต์เท่านั้น เถ้าล้อยยังใช้เป็นวัสดุตั้งต้น (Precursor) ในการผสมกับสารกระตุ้นเพื่อผลิตสารเชื่อมประสาน จีโอโพลิเมอร์ (Chindapasirt et al., 2007)

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้วัสดุทั้งสองชนิด (เถ้าลอยและหินคลุกที่ไม่ได้มาตรฐาน) เพื่อใช้เป็นวัสดุในชั้นพื้นทางการทดสอบ ประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดและเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง เพื่อเป็นข้อมูลในการสนับสนุนให้มีการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกใหม่ในการใช้วัสดุดังกล่าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงวัสดุหินคลุก (Crushed rock) ตามมาตรฐานการก่อสร้างทางของกรมทางหลวงด้วยสารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
- 1.2.2 ศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ และเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของกรมทางหลวง สำหรับวัสดุชั้นพื้นทาง
- 1.2.3 เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าลอย และหินคลุก

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 แหล่งวัสดุ
 - หินคลุก (Crushed rock) ที่ไม่ได้มาตรฐานจากโรงโม่หิน จังหวัดชลบุรี
 - เถ้าลอย จากแหล่งผลิตโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง
- 1.3.2 สัดส่วนผสมของวัสดุรวม

สัดส่วนระหว่างหินคลุกกับเถ้าลอย (FA) คิดเป็นร้อยละโดยมวลและมี 3 สัดส่วน

ดังนี้

- FA 5%, 10%, 15% of Crush rock

1.3.3 สารเร่งปฏิกิริยา Alkaline Activators

สารเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activators) เป็นส่วนผสมระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เกรด CR53 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยใช้สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50 : 50$ ผสมกันแล้วเติมน้ำให้ได้เท่ากับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ในแต่ละสัดส่วนแล้วนำไปผสมกับ เถ้าลอย (FA) ในอัตราส่วน 0.4 ของเถ้าลอย (FA)

1.3.4 การทดลองและการวิเคราะห์ผลทดลอง

- ทดสอบการรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) ของตัวอย่างวัสดุในแต่ละสัดส่วนผสม เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างทางได้
- วิเคราะห์หัตถิพลของจีโอโพลิเมอร์ต่อการพัฒนากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

- 1.4.1 นำผลการศึกษาที่ได้ไปกำหนดเป็นมาตรฐานในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุประเภทหินคลุก เพื่อใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นพื้นทางในงานก่อสร้างทาง
- 1.4.2 เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้เป็นแนวทางในการนำถ้ำลอยและจีโอโพลิเมอร์ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุที่ไม่ได้มาตรฐานในการก่อสร้าง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หินคลุก

วัสดุพื้นทางหินคลุก หมายถึง วัสดุมวลรวมหิน โม่ (Crushed rock soil aggregate type) สำหรับใช้ในการก่อสร้างถนน โดยก่อสร้างบนชั้นพื้นทางหรือชั้นอื่นใดซึ่งผ่านการตรวจสอบแล้ว



รูปที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของหินคลุก

โดยมาตรฐานที่ใช้ในการคัดเลือกวัสดุในการก่อสร้างทางในประเทศไทย ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

2.1.1 กรมทางหลวงมี 2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. มาตรฐานที่ ทล.-ม.201/2544 โดยกำหนดขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุกไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก

| ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล | |
|-------------------------|---------------------------|-------|
| | A | B |
| 50 (2 นิ้ว) | 100 | 100 |
| 25.0 (1 นิ้ว) | - | 75-95 |
| 9.5 (3/8 นิ้ว) | 30-65 | 40-75 |
| 4.75 (เบอร์ 4) | 25-55 | 30-60 |
| 2.00 (เบอร์ 10) | 15-40 | 20-45 |
| 0.425 (เบอร์ 40) | 8-20 | 15-30 |
| 0.075 (เบอร์ 200) | 2-8 | 5-20 |

ที่มา : กรมทางหลวง, 2544

2. มาตรฐานที่ ทล.-ม.203/2556 โดยกำหนดขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุกที่จะนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวง

| ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล | | |
|-------------------------|---------------------------|-------|--------|
| | B | C | D |
| 50 (2 นิ้ว) | 100 | - | - |
| 25.0 (1 นิ้ว) | 75-95 | 100 | 100 |
| 9.5 (3/8 นิ้ว) | 40-75 | 50-85 | 60-100 |
| 4.75 (เบอร์ 4) | 30-60 | 35-65 | 50-85 |
| 2.00 (เบอร์ 10) | 20-45 | 25-50 | 40-70 |
| 0.425 (เบอร์ 40) | 15-30 | 15-30 | 25-45 |
| 0.075 (เบอร์ 200) | 5-20 | 5-15 | 5-20 |

ที่มา : กรมทางหลวง, 2556

2.1.2 กรมทางหลวงชนบทมี 1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. มาตรฐานที่ มทข. 203-2545 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base)

ตารางที่ 2.3 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบท

| ขนาดตะแกรง มาตรฐาน | น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ | | |
|-----------------------|--------------------------------|---------|---------|
| | ชนิด ก. | ชนิด ข. | ชนิด ค. |
| 2 นิ้ว | 100 | 100 | - |
| 1 นิ้ว | - | 75-95 | 100 |
| 3/8 นิ้ว | 30-65 | 40-75 | 50-85 |
| เบอร์ 4 | 25-55 | 30-60 | 35-65 |
| เบอร์ 10 | 15-40 | 20-45 | 25-50 |
| เบอร์ 40 | 8-20 | 15-30 | 15-30 |
| เบอร์ 200 | 2-8 | 5-20 | 5-15 |

ที่มา : กรมทางหลวงชนบท, 2545

ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1.1 มีค่าของความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.202 “วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่เกินร้อยละ 40

1.2 มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.213 “วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้งที่นำมาใช้

1.3 ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate)

การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

1.4 มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 1

- 1.5 ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร
- 1.6 มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102 “วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- 1.7 มีค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 103 “วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index” ไม่เกินร้อยละ 6
- 1.8 มีค่า CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 109 “วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟสทริตเมนต์ที่ความแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

2.2 การบดอัด (Compaction)

การบดอัดหินคลุก คือ การเพิ่มความหนาแน่นของหินคลุกโดยการไล่อากาศออก ระดับการบดอัดสามารถวัดได้จากหน่วยน้ำหนักแห้งของหินคลุก เมื่อเติมน้ำลงไป ในหินคลุก น้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางทำให้หินคลุกอ่อนนุ่มขึ้น เม็ดหินคลุกสามารถเลื่อน ไถลข้ามกันและเคลื่อนตัวไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดหินคลุกได้ง่ายขึ้น ในช่วงแรกหน่วยน้ำหนักแห้งของหินคลุกจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเกินกว่าค่า ๆ หนึ่งแล้ว การเพิ่มขึ้นของน้ำจะทำให้หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลง การลดลงของหน่วยน้ำหนักแห้งเกิดเนื่องจากปริมาณน้ำที่เข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดหินคลุกมีมากเกินไป จนทำให้เม็ดหินคลุกไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ได้ ปริมาณน้ำที่ทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{d,max}$) เรียกว่า ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ส่วนปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณน้ำเหมาะสม เรียกว่า ปริมาณน้ำทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณน้ำเหมาะสม (Dry and wet sides of optimum moisture content) ตามลำดับ ปัจจุบันการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำเหมาะสมนิยมกระทำในห้องปฏิบัติการตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.109/2517 วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR และนำผลทดสอบไปใช้สำหรับควบคุมคุณภาพการบดอัดเมื่อคอนกรีตบดอัดในสนาม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เป็นการทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic compaction) เพื่อสร้างกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับปริมาณน้ำ ซึ่งกระทำโดยการนำหินคลุกที่ต้องการบดอัดในสนามมาบดอัดในแบบหล่อมาตรฐาน และพลังงานที่ใช้สำหรับบดอัดจะถูกกำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ และการควบคุมการก่อสร้าง การสร้างกราฟการบดอัดจะทำการบดอัดที่ปริมาณน้ำ 5 ถึง 7 จุด และในแต่ละจุดของการบดอัดจำเป็นต้องเปลี่ยนตัวอย่างหินคลุกใหม่ ทั้งนี้เพื่อขจัดผลที่หินคลุกจะเกิดการแตกหักและสึกลงเมื่อถูกบดอัดซ้ำ โดยเฉพาะหินคลุกที่มีเม็ดขนาดใหญ่หรือหินคลุกเม็ดหยาบ ตัวอย่างเช่น หินคลุกลูกรังหรือหินคลุกที่เกิดจากการผุกร่อนของหิน (Residual Soil) และหินคลุกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เหลือใช้จากการข่อยหิน ดินเหล่านี้จะแตกหักง่ายเมื่อทำการบดอัดซึ่งจะส่งผลให้หน่วยน้ำหนักที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง ส่วนหินคลุกเม็ดละเอียด เช่น หินคลุกเหนียว และดินตะกอน จะมีค่าปริมาณน้ำเหมาะสมสูงกว่าหินคลุกเม็ดหยาบ เมื่อถูกบดอัดจะจับตัวกันเป็นแท่งแน่นยากต่อการแยกหินคลุกออกกลับมาใช้งานใหม่ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการบดอัดจึงควรเปลี่ยนหินคลุกตัวอย่างใหม่ทุกครั้ง ในการกำหนดรูปแบบ และพลังงานบดอัด ในปัจจุบันมีสองรูปแบบได้แก่ การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ทดสอบตามวิธีการทดลอง Compaction Test แบบตามมาตรฐาน (เทียบเท่า ASTM D 698) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 107/2517 และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor) ทดสอบตามวิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (เทียบเท่า ASTM D 1557) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 108/2517 ใช้ในการทดสอบสำหรับงานที่ต้องการค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด เช่น งานก่อสร้างสนามบิน ทางหลวง เป็นต้น

โดยทั้งสองรูปแบบ จะใช้แบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว หรือเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 5 นิ้ว ก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุที่นำมาทดสอบรูปแบบและพลังงานบดอัด ดังแสดงในตาราง โดยที่พลังงานการบดอัดต่อหน่วยปริมาตร (E) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ต่อไปนี้

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

เมื่อ N_B คือ จำนวนครั้งในการตกกระทบหินคลุกของค้อนใน 1 ชั้น N_L คือ จำนวนชั้นของการบดอัด W_H คือ น้ำหนักของค้อน L_H คือ ระยะที่ค้อนตกกระทบหินคลุก และ V_M คือ ปริมาตรของแบบหล่อ และในการเลือกขนาดของแบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM จะพิจารณาจากขนาดของเม็ดหินคลุกที่นำมาบดอัด โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- ถ้าหินคลุกตัวอย่างค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้แบบหล่อขนาด 4 นิ้ว

- ถ้าหินคลุกตัวอย่างข้างบนตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แต่ข้างบนตะแกรง ขนาด 3/8 นิ้ว ไม่เกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้แบบหล่อขนาด 4 นิ้ว
- ถ้าหินคลุกตัวอย่างข้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แต่ข้างบนตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว ไม่เกินกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้แบบหล่อขนาด 6 นิ้ว

2.3 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS)

ใช้การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว เช่นเดียวกับ งานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ แบบในที่หรืองานหินคลุกซีเมนต์ชั้นพื้นทางเดิมผสมผิวแอสฟัลติกคอนกรีตเดิมผสมปูนซีเมนต์หรืองานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) ดำเนินการตามมาตรฐานการทดสอบดังกล่าว การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามวิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน (เทียบเท่า AASHTO T 280) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 105/2515 นำตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบออกจากแบบ (mold) แล้วบ่มโดยใช้พลาสติกห่อเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดให้เอาพลาสติกออกแล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง นำขึ้นจากน้ำปล่อยให้แห้งด้วยอากาศจนมีสภาพอึดตัวผิวแห้ง นำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength, UCS)

2.4 มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (Standards)

มาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (Standards) สำหรับการศึกษานี้ ประกอบด้วย

- มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมคอนกรีต (Cement Modified Crushed Rock Base) ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 203-2556
- มาตรฐานพื้นทางหินคลุก ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม 201-2544
- วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (เทียบเท่า AASHTO T 180) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 108/2517
- วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน (เทียบเท่า AASHTO T 280) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 105/2515
- วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.101/2515
- วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL.) ของดิน ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.102/2515
- วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดิน ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.103/2515
- วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.202/2515

- วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.109/2517
- วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205/2517

2.5 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผ่าถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหินเถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโลมีสีเทาเทาดำหรือน้ำตาลเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของ ซิลิกาและอลูมินาเมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาคแต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหินอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาของการเผาดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผ่าถ่านหิน

2.5.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

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

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการเผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตามมาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.4

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

เพียงพอนอกจากนี้ ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกินร้อยละ 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดระยะเวลาก่อตัวได้และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วยนอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

| Chemical composition | Class of Fly Ash | |
|--|------------------|------|
| | F | C |
| ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์อลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 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 |

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

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition(LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มากการควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลในรูปของ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-Aggregate ขึ้นได้ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลมากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาจะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เกาะ พ.ศ.2433 - 2541 ซึ่งข้อมูลได้มาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่า ร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าเถ้าลอยแหล่งอื่นที่มีอยู่ในประเทศไทยส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10

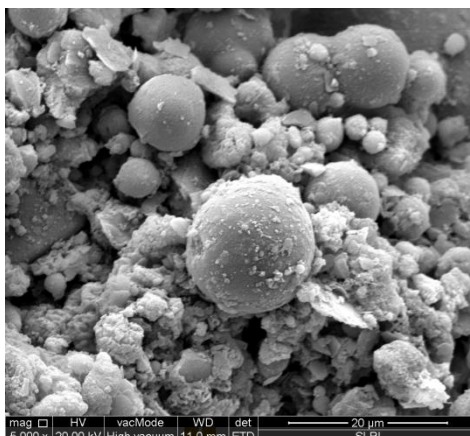
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่าง ปี พ.ศ. 2533–2541

| 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 |

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

2.5.2 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยมเมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปางโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลมดังรูปที่ 2.2 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้ (Chindaprasirt, Jaturapitakkul, Chalee, & Rattanasak, 2009)



รูปที่ 2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอยขยาย (5,000 เท่า)

2.5.3 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือ ส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่านอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี particle size-analysis หรือ วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัมการทดสอบเทอร์บิดิเมเตอร์ (turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบ ทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกัน ได้มากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมากแต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางการบอกขนาดของอนุภาค โดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ
 เถ้าลอยอำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง

| Simple Type | Specific Gravity | Retained on Sieve 325 % | Air Permeability (cm ³ /mg) | Mean Particle Size (micron) |
|-------------|------------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| ซีเมนต์ | 3.15 | - | 3580 | 14.7 |
| เถ้าลอย | 2.33 | 31.2 | 2310 | 27.1 |

ที่มา : http://research.rid.go.th/vijais/pdf/Coal_Concrete1.pdf

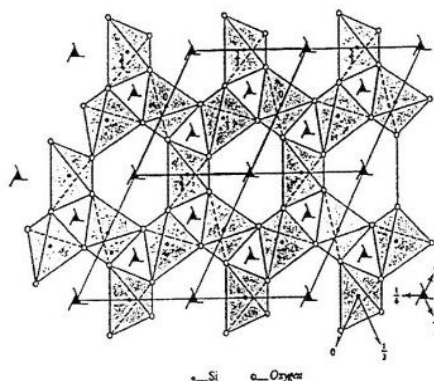
จะเห็นว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

2.5.4 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของ มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตาม มาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลานโดยกำหนดไว้ว่าไม่ควร ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน เพื่อแสดงถึงอัตราการเกิดหรือ ความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย

2.5.5 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน

โครงสร้างผลึกซิลิกาอสัณฐานจะมีการเรียงตัวกันของอะตอมหรืออนุภาคยังไม่เป็น ระเบียบดังแสดงในภาพที่ 2.4 และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการ จัดเรียงตัวของอะตอมใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกซิลิกาซึ่งผลึกซิลิ กาดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกต่างๆคือควอร์ซ ไทรคไลไมท์และคริส ไทรบอไลท์โดยที่แต่ละ โครงสร้าง จะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน (Makino et al., 1999)

(ก) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดใหญ่ของซิลิกาอสัณฐาน (Si₄₀₀O₈₀₀ cluster)

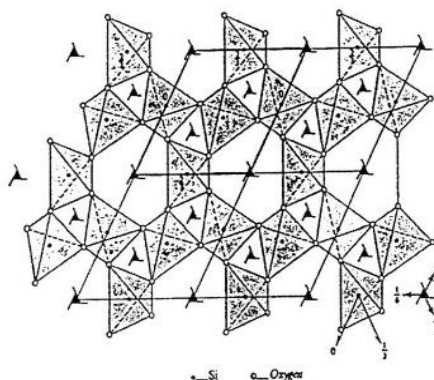
(ข) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดเล็กของซิลิกาอสัณฐาน (Si₂₇O₇₂ cluster)

(O คืออะตอมของออกซิเจน, ● คืออะตอมของซิลิกอน)

2.5.6 โครงสร้างผลึก

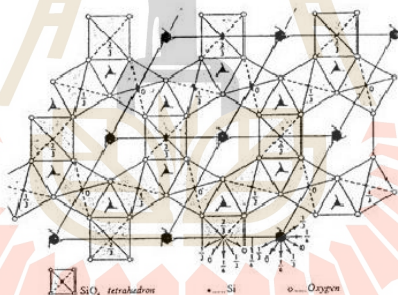
โครงสร้างผลึกซิลิกามีอยู่ 3 โครงสร้างคือควอartz ไทรคิมิตและคริสโทรบอลไลท์ โดยแต่ละโครงสร้างผลึกจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะเป็นไปอย่างช้า ๆ จากโครงสร้างผลึกรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่งดังนั้น โครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงจะยังคงมีอยู่ ณ ที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างและแต่ละโครงสร้างผลึกจะมีโครงสร้างที่ต่างกัน 2 โครงสร้าง คือ α - จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและ β - จะเกิดที่อุณหภูมิสูง (Deer et al., 1971)

โครงสร้างผลึกซิลิกาแต่ละโครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุล SiO₄ ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเกาะอยู่ที่มุมและอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลางประกบกันอยู่เป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าของ SiO₄ (SiO₄ tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในแต่ละ โครงสร้างผลึกซิลิกาอะตอมออกซิเจนจะเกาะกับอะตอมซิลิกอน 2 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงในการเปลี่ยนโครงสร้างระหว่าง α - กับ β - เช่น α -ควอartz ไปเป็น β -ควอartz การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมเพียงเล็กน้อยในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกับที่อุณหภูมิสูงเช่น โครงสร้างผลึกแบบควอartz เปลี่ยนไปเป็น ไทรคิมิตหรือคริสโทรบอลไลท์การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดเนื่องจากการสลายของพันธะและการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอม (Deer et al., 1971)



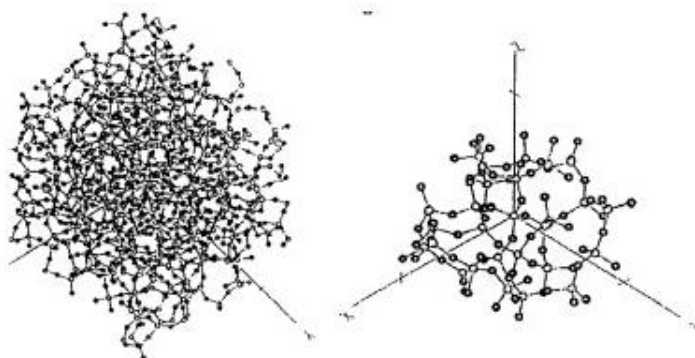
รูปที่ 2.4 รูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 (SiO_4 tetrahedral) (Deer et al., 1971)

β -ควอ์ซมีสมมาตรแบบหกเหลี่ยม (hexagonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ $P6_{22}$ หรือ $P6_3$ และหน่วยเซลล์ (unit cell) หนึ่งหน่วยประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) 3 โมเลกุล ซึ่งประกอบกันเป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้า ดังแสดงในภาพที่ 2.6



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึก β -ควอ์ซฉายลงบนระนาบ (0001) (Deer et al., 1971)

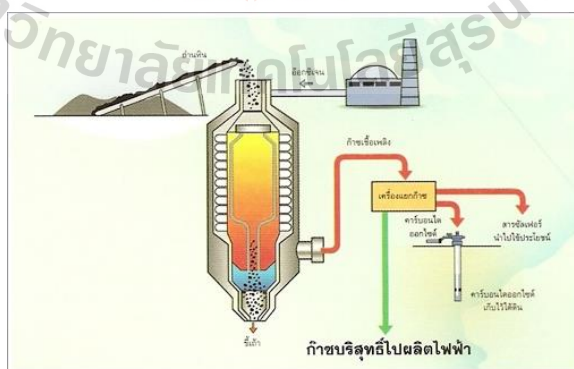
จะเห็นได้ว่าหน่วยรูปทรงสี่หน้าเกาะกลุ่มเป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.7 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์คือ a 5.01 Å และ c 5.47 Å α -ควอ์ซมีสมมาตรแบบไตรกอนอล (trigonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ $P3_2$ หรือ $P3_1$ ในหน่วยเซลล์หนึ่งเซลล์ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) 3 โมเลกุล โครงสร้างผลึกของ α -ควอ์ซมีลักษณะคล้าย ๆ β - คือมีการเกาะตัวกันของรูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 เป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมแต่จะมีการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึก ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์ คือ a 4.913 Å และ c 5.405 Å (Deer et al., 1971)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของ α -ควออร์ซ โครงสร้างผลึกของ α -ควออร์ซ
ฉายลงบน (0001) (Deer et al., 1971)

2.6 Geopolymer

จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และปัญหาการกำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมทำให้เกิดแรงกระตุ้นในการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าวมากขึ้นในปัจจุบันได้มีการวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตวัสดุใหม่มากขึ้นมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลงแต่ยังคงคุณสมบัติการเป็นวัสดุประสานที่ดีโดยสารที่ใช้ผสมดังกล่าวเป็นสารปอซโซลานซึ่งไม่มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเองแต่เมื่อผสมกับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้สารปอซโซลานที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่เถ้าลอยโดยเถ้าลอยเป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

(<https://inhumba.com/2008/07/100/what-is-energy-5>)

ในช่วงเวลาไม่นานนี้นักวิจัยชาวต่างประเทศหลายท่านได้พยายามศึกษาการผลิตคอนกรีตแบบใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม คอนกรีตดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบกับสารละลายซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดชัน ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ซึ่งมีชื่อเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) หรือมีสูตรทางเคมี คือ



เมื่อ M คือ โลหะอัลคาไลน์

n คือจำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่หรือ degree of polycondensation

z คือตัวเลข 1, 2 หรือ 3 และ

w คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ้าผ่านหินมีส่วนประกอบ SiO₂ และ Al₂O₃ เป็นองค์ประกอบหลัก หากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์จะสามารถทำให้เกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีต (Ismail et al., 2013)

และ (Davidovits, 2015) ได้กล่าวถึงการใช้อัลคาไลน์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ปล่อย CO₂ ต่ำกว่าซีเมนต์คอนกรีต ประมาณ 62-66%

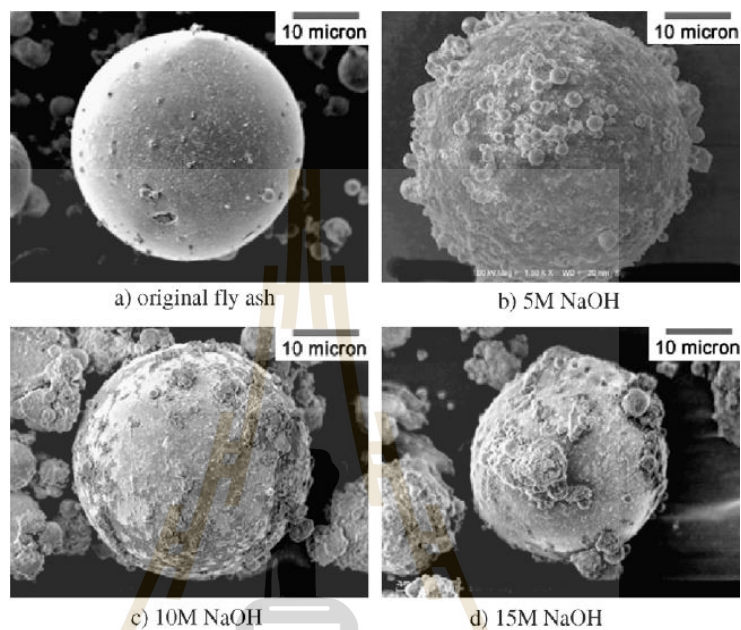
2.6.1 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารพอลิอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางลักษณะวิทยา (Morphology) แน่นอนเป็นส่วนประกอบของอสัณฐาน (Amorphous phase) และสารกึ่งผลึก (Semicrystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) จึงเป็นสารซิลิกาและอลูมินาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อผสมสารละลายอัลคาไลเบสจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงได้และก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดีปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) การชะละลาย (Dissolution)

ถ้าหรือสารตั้งต้นเมื่อผสมสารละลายที่มีความเป็นเบสสูงเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดการชะละลายของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากผิว ซิลิกอนและอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส เกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของเม็ดตัวอย่างแล้วละลายที่ถูกระด้วย

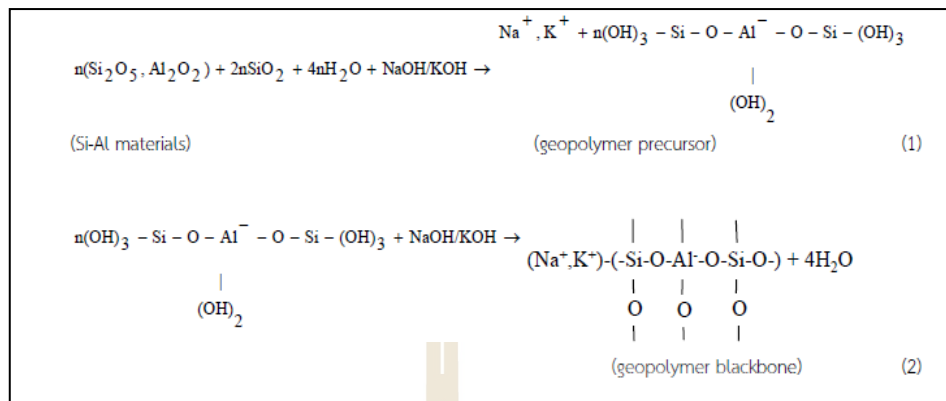
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงในรูป 2.8 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการชะของแก้วความเข้มข้นที่มากขึ้นทำให้เกิดการชะของอ็อนซิลิกอนและอลูมิเนียมออกมาจากผิวของแก้วมาก



รูปที่ 2.8 ผิวของแก้วลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ 10 นาที (Rattanasak & Chindaprasirt, 2009, 2014; Rattanasak, Pankhet, & Chindaprasirt, 2011)

2) การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization)

อ็อนซิลิกอนและอลูมิเนียมที่จะถูกชะออกมาเกิดการรวมตัวกับ อ็อนออกซิเจนอยู่ในรูปทรง เหลี่ยมสี่หน้าเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si และ Al ได้ สารประกอบอลูมิโนซิลิเกต $[Si - O - Al - O]$ ดังกลไกที่เสนอโดย Hua และ van Deventer ตามสมการในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทำปฏิกิริยาถูกโซ่ (Polymerization) (Van Deventer et al., 2007 ; Van Deventer et al., 2012 ; Van Deventer et al., 2010)

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จะใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกันตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์และซีโอไลต์การสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึกอีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ (Van Deventer et al., 2007 ; Van Deventer et al., 2012 ; Van Deventer et al., 2010)

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์ (Rattanasak et al., 2010)

| | การสังเคราะห์ซีโอไลต์ | ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ |
|-----------------------|---|--|
| สารตั้งต้น | สารละลายเชิงซ้อน Al+ สารละลายเชิงซ้อน Si | วัสดุ ที่มี Al-Si เป็น ส่วนประกอบ+สารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต (ในรูปของแข็งหรือของเหลว) |
| ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น | การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ในสารละลาย | การระเหยของแข็งที่มี Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เพสต์ |
| ปฏิกิริยาช่วงปลาย | การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย | การแพร่และควบแน่นของสารเชิงซ้อน Al และ Si ที่ระเหยออกมาในเพสต์ |

ตารางที่ 2.7 (ต่อ)

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

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator)

2.7.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มี การล้างไขมันออก เช่น อุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

2.7.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำจัดเป็นด่างลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

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

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2539

โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือชนิดที่ 2 ตาม ม.อ.ก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

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

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Davidovits (1991) นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ประมาณ 0.20 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50 น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ ดังจะเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกกะปาสกาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ จีโอโพลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัว

น้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ ในปริมาณต่ำ

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

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัสดุขี้เถ้าที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถาถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลต์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

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

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

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกะปาสคาล อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความชื้นเหลือได้ขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมิลดลง

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับเกลือที่ใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Ohsawa et al. (1984) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิคลิก

(Picric acid) และกรดไซลิกเซลิค (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเม็ดถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเม็ดถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเม็ดถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิคริก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดไซลิกเซลิคอย่างมาก

Alonso and Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของเพสต์จีโอโพลีเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยากับต่างของจีโอโพลีเมอร์ที่ทำจากเม็ดถ่านหิน และพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเม็ดถ่านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับต่าง ผิวของเม็ดถ่านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เม็ดถ่านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของต่าง ขนาดอนุภาคของเม็ดถ่านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอโพลีเมอร์และนำเข้าไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลีเมอร์ที่มีเนื้อเป็นผนังคล้ายกระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

Gordon (1984) กล่าวถึงการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified materials และ Bound modified materials โดยที่ Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่มลงไปอย่างมากเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูง Kuhlman (1989) กล่าวว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีวิศวกรทำจากยางมะตอยโดยการนำวิศวกรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ในช่วงปี ค.ศ. 1942 ถึง 1958 ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งานทั้งวิศวกรยืดหยุ่นที่ชำรุดเสียหายและวิศวกรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข (2556) ได้นำเสนอคุณสมบัติทางกายภาพ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวค่าแคลิฟอร์เนียเบริงเรโซแบบแช่น้ำของหินคลุกปลายตะแกรงและหินคลุกปลายตะแกรงผสมซีเมนต์ ผลการศึกษาแสดงว่า คุณสมบัติต่างๆ มีค่าสูงกว่าที่ค่าที่ถูกกำหนดไว้ ตามมาตรฐานกรมทางหลวงในการนำมาก่อสร้างเป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง

ปฏิมาพร สุขมาก และคณะ (2556) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดในถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์ ได้แก่ อัตราส่วนของถ้ำลอยต่อดิน, อัตราส่วนของสารกระตุ้นกับถ้ำลอย และ

อุณหภูมิที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของสารกระตุ้นที่ 0.7 และอัตราส่วนของสารกระตุ้นกับเถ้าลอยที่ 0.6 จะทำให้วัสดุมีกำลังอัดสูงที่สุด

Arul Arulrajah et al. (2016) ได้ศึกษาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับเถ้าลอยตะกรันเหล็ก แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับวัสดุแบบเดิม จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าการอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ผสมกับตะกรันเหล็ก 5 % เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุรีไซเคิล

Hoy and Horpibulsuk (2016) ได้ศึกษาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ RAP ที่ผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเถ้าลอยและสารปรับคุณสมบัติ NaOH และ Na_2SiO_3 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนา กำลังอัดต่อไปอีกส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนา กำลังอัดไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

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

อิทธิกร ภูมิพันธ์และคณะ(2016) ในการศึกษาได้มีการนำ RAP มาผสมกับเถ้าลอยแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกรัน และได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า RAP สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นทาง / วัสดุรองพื้นทางเมื่อใช้ตะกรันเหล็ก 10% S มาผสมกับ RAP

สมชาย ลีลาประภากรณ์และคณะ(2150) ได้ศึกษาการพัฒนาความแข็งแรงของหินคลุกที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์เพื่อเป็นวัสดุชั้นทาง จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของหินคลุกเมื่อเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วย การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ การหาค่าความชื้นเหมาะสมของตัวอย่าง การบดอัดตัวอย่าง การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อ ดังต่อไปนี้

3.1 การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

การหาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุกที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ใช้มาตรฐานและข้อกำหนดการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวก็จะอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวง ดังต่อไปนี้

- 3.1.1 มีค่าของความสึกหรอ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.202 “วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่เกินร้อยละ 40
- 3.1.2 มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.213 “วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้งที่น่ามาใช้
- 3.1.3 ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate)

การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

- 3.1.4 มีขนาดกะทัดดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 1
- 3.1.5 ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร
- 3.1.6 มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102 “วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- 3.1.7 มีค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 103 “วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index” ไม่เกินร้อยละ 6

3.1.8 มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 109 “วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟสทรีตเมนต์ที่ความแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.2 การเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง

3.2.1 เตรียมสัดส่วนมวลรวม

สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้ ดังนี้ สัดส่วนของหินคลุก (Crushed rock) ต่อ etailoy (FA) จำนวน 3 สัดส่วน คือ Crush rock : FA = 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15

3.2.2 เตรียมสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkali-activator)

ตัวเร่งปฏิกิริยา(Alkali-activator) ในการศึกษาครั้งนี้ คือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (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 10 โมลาร์ โดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์เกล็ด (ความบริสุทธิ์ 99%) จากบริษัท วิทยาธรรม จำกัด ผสมกับน้ำกลั่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้สารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา (Liquid Alkali Activator) เตรียมจากการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีสัดส่วน ดังนี้ สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50 : 50$ ผสมกับวัสดุตั้งต้น(หินคลุกและetailoy) ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ในแต่ละสัดส่วน

3.2.3 การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Crushed rock-FA-Geopolymer)

การผสมหินคลุก etailoy ตามสัดส่วนที่กำหนด (Crush rock : FA = 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15) เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาของแต่ละสัดส่วน ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50 : 50$) ผสมกับวัสดุตั้งต้น (Binder) โดยใช้เวลาผสมประมาณ 5-10 นาที ในแต่ละสัดส่วน สัดส่วนมีความเหมาะสมที่จะบดอัด จากนั้นบดอัดตามการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor compaction) ทล.-ท 108/2517 ในการเก็บตัวอย่างหลังจากบดอัดแล้วจะห่อด้วยพลาสติกใสเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27-30 °C) ที่มีอายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะทำการเก็บตัวอย่างจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อความถูกต้องแม่นยำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

| ตัวอย่าง | อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบ | | อายุการบ่ม (จำนวนตัวอย่าง) | | |
|----------|------------------------------|---|----------------------------|--------|--------|
| | CR : FA | Na ₂ SiO ₃ : NaOH | 7 วัน | 14 วัน | 28 วัน |
| 1 | 95 : 5 | 50 : 50 | 3 | 3 | 3 |
| 2 | 90 : 10 | 50 : 50 | 3 | 3 | 3 |
| 3 | 85 : 15 | 50 : 50 | 3 | 3 | 3 |

หมายเหตุ CR: หินคลุก (Crushed rock)

FA: เถ้าลอย (Fly Ash)

Na₂SiO₃: สารละลายโซเดียมซิลิเกต

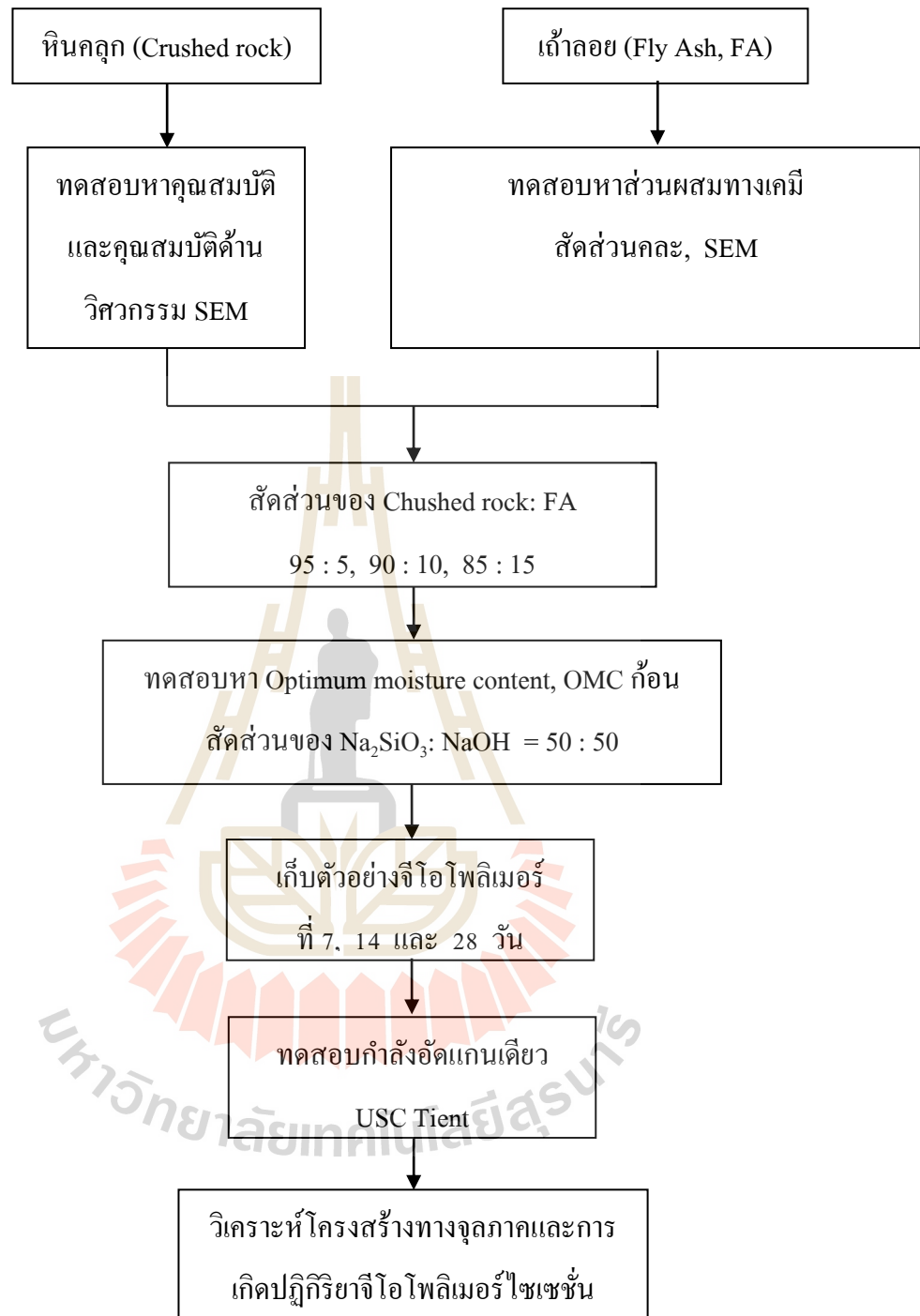
NaOH : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมน้ำที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์

3.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวก่อนตัวอย่าง เมื่อครบกำหนดวันที่จะทดสอบแกะพลาสติกออกจากก้อนตัวอย่างนำไปแช่น้ำเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อน 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบกำลังอัด โดยตัวกำลังอัดที่ควบคุมจะต้องไม่น้อยกว่า 1.74 MPa (Base Line1) เป็นกำลังอัดสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรต่ำ (Light traffic) และ 2.41 MPa (Base line2) ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพหินคลุกซีเมนต์ สำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง (High traffic) ตามลำดับ

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่างเพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างวัสดุที่ปรับปรุงด้วย จีโอโพลิเมอร์แสง โดยใช้เครื่องส่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยนำชิ้นส่วนของวัสดุขนาดเล็กจากกึ่งกลางของก้อนวัสดุหลังจากทดสอบกำลังอัดแล้ว โดยใช้เครื่องมือรุ่น JEOL JSM-6400



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อดังนี้

4.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย หินคลุก ซึ่งเป็นวัสดุตั้งต้นที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ etailoy ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานและเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ ที่กล่าวมาข้างต้นเหล่านี้ คือ วัสดุตั้งต้นในการศึกษาครั้งนี้รายละเอียด มีดังต่อไปนี้

4.1.1 หินคลุก (Crushed Rock)

หินคลุกที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ เก็บมาจากโรงโม่หินไทยพิทักษ์ ตำบล เหมืองอำเภอ เมือง จังหวัดชลบุรี ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแสดงในตารางที่ 4.1 และลักษณะทางกายภาพแสดงในรูปที่ 4.1 (ก)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของหินคลุก

| Content | Crushed Rock | Standard for base course |
|---------------------------|--------------|--------------------------|
| Specific gravity | 2.83 | |
| Liquid limit | Non Liquid | ≤ 25 |
| Plastic limit | Non Plastic | ≤ 6 |
| Plastic index | Non Plastic | ≤ 6 |
| Maximum dry unit weight | 2.257 | ≥ 1.440 |
| Optimum moisture content | 6.97 | |
| CBR at 95% of dry density | 85.30 | ≥ 80 |
| LA abrasion | 31.91 | ≤ 40 |

ที่มา : กรมทางหลวง, 2544

ตารางที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัย

| ขนาดตะแกรง มาตรฐาน | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล | |
|-----------------------|---------------------------|-----------------|
| | C | ตัวอย่างหินคลุก |
| 2" | - | 100 |
| 1" | 100 | 100 |
| 3/8" | 50-85 | 72.80 |
| เบอร์ 4 | 35-65 | 47.35 |
| เบอร์ 10 | 25-50 | 25.88 |
| เบอร์ 40 | 15-30 | 12.25 |
| เบอร์ 200 | 5-15 | 4.53 |

ที่มา : กรมทางหลวง, 2556

ความถ่วงจำเพาะมีค่า 2.83 ชิดจํากัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง ประเทศไทย (กำหนดค่าชิดจํากัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอ (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 31.1 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40 %) ซี.บี.อาร์. (CBR) ที่ร้อยละ 85.3 (ค่า CBR" ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต) ขนาดคละของวัสดุหินคลุกจัดอยู่ใน class C ซึ่งมาตรฐานฐานหินคลุกที่ใช้ในกรมทางหลวงมีอยู่ 2 Class คือ Class A และ Class B วัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัยจึงถือว่าเป็นวัสดุตกเกรด

4.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางซึ่งเป็นแหล่งเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และมีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างคงที่ เถ้าลอยจากแหล่งนี้ได้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อย่างกว้างขวาง องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของเถ้าลอย ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี X - ray fluorescence (XRF) แสดงไว้ ดังตารางที่ 4.3 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 38.53 CaO ร้อยละ 20.49 Fe_2O_3 ร้อยละ 14.85 และ Al_2O_3 ร้อยละ 13.76 ผลรวมของ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3) เท่ากับ 67.14 จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C (Type C) หรือเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium FA) และปริมาณ $\text{SO}_3 = 0.86$ (ข้อกำหนดไม่เกินร้อยละ 5) ค่า $\text{LOI} = 0.52$ (ข้อกำหนดไม่เกินร้อยละ 6) จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้ ลักษณะทางกายภาพและสัดส่วนคละของเถ้าลอยที่นำมาใช้ แสดงในรูปแบบที่ 4.1 (ข) และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly Ash)

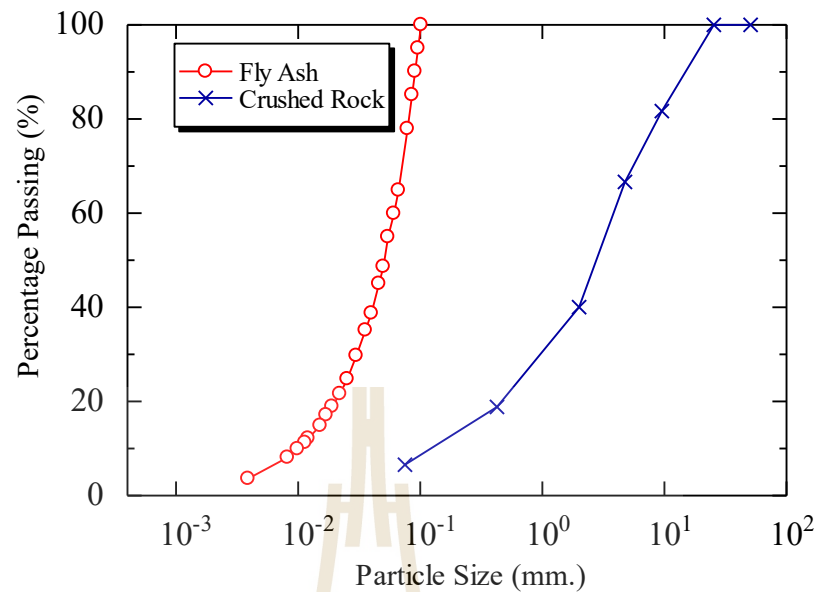
| Chemical compositions (%wt) | FA |
|---|-------|
| Silicon Dioxide (SiO ₂) | 38.53 |
| Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃) | 20.49 |
| Iron Oxide (Fe ₂ O ₃) | 14.85 |
| Calcium Oxide (CaO) | 13.76 |
| Magnesium Oxide (MgO) | 3.10 |
| Potassium Oxide (K ₂ O) | 1.76 |
| Sodium Oxide (Na ₂ O) | 0.58 |
| Sulfur Trioxide (SO ₃) | 0.86 |
| Loss on Ignition (LOI) | 0.52 |



(ก) หินคลุก

(ข) เถ้าลอย

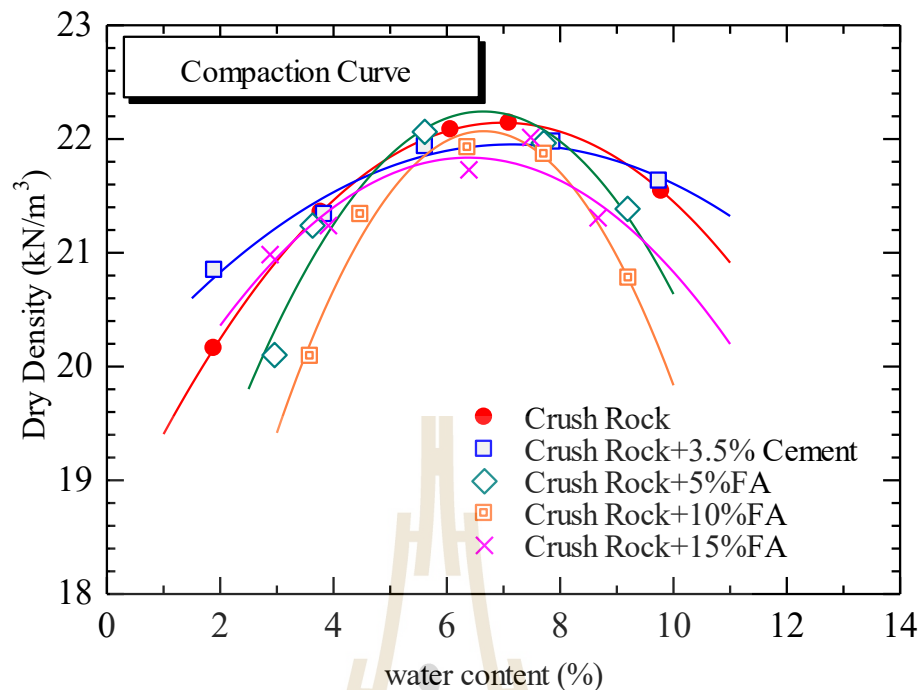
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) หินคลุก และ (ข) เถ้าลอย



รูปที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

4.2 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

หินคลุกที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ การทดสอบการบดอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ดำเนินการเพื่อหาค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\rho_{d,max}$) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) โดยการนำมาผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในสัดส่วนที่เหมาะสม (ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์) รูปที่ 4.3 แสดงกราฟบดอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน สำหรับส่วนผสม (CR:FA = 95:5, 90:10, 85:15) และตัวเร่งปฏิกิริยา ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50:50$)

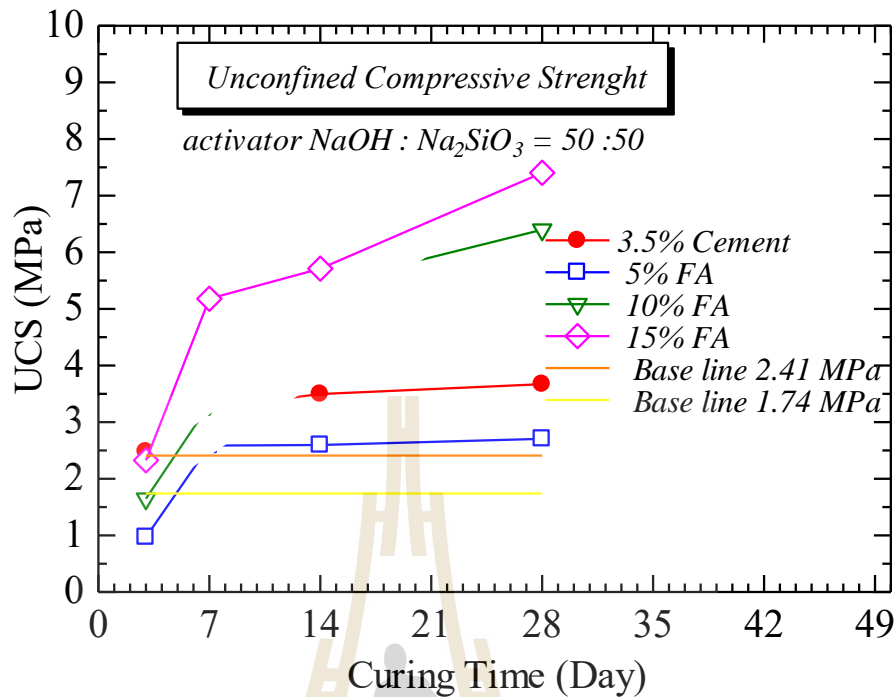


รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\rho_{d,max}$) มีค่า 22.14, 21.97, 22.06, 21.92, และ 22.01 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.97, 6.00, 6.64, 6.65 และ 6.76 ตามลำดับ ผลของ FA ที่มีต่อค่าความหนาแน่นแห้งของวัสดุรวม (หินคลุก + เถ้าลอย) เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย ในมวลรวมมากขึ้น ความหนาแน่นแห้งของวัสดุรวมมีแนวโน้มลดลง ส่วนผลที่มีต่อค่า OMC พบว่า ปริมาณของเถ้าลอย ส่งผลน้อย ทำให้ค่า OMC ที่ได้ในแต่ละสัดส่วนของวัสดุรวม (หินคลุก + เถ้าลอย) มีค่าไม่แตกต่างกันมาก (6.64% - 6.76%)

4.3 กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) แบบแช่น้ำของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่สัดส่วนผสม (CR:FA = 95:5, 90:10, 85:15) และ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Na_2SiO_3 : NaOH = 50:50) ที่อายุบ่มที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 4.4



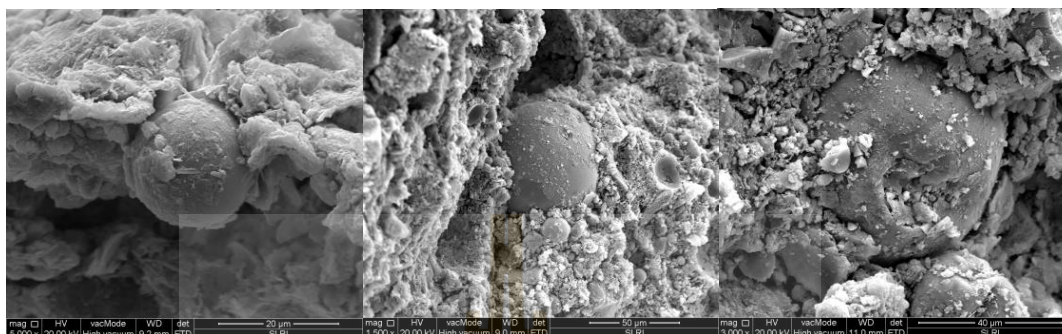
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังอัดของหินคลุกเจ้าจีโอโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่ากำลังอัดของหินคลุกเจ้าจีโอโพลิเมอร์ที่มีการพัฒนากำลังขึ้นตามอายุบ่ม แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มสัดส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 28 วันมากกว่าตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ 3.5% (กำลังรับแรงอัด 3.67 MPa) คือ สัดส่วนของหินคลุกกับเถ้าลอย (CR:FA = 90:10 และ 85:15) มีค่ากำลังรับแรงอัด 5.80 และ 6.59 MPa ตามลำดับ และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 28 วันน้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ 3.5% สัดส่วนของหินคลุกกับเถ้าลอย (CR:FA = 95:5) มีค่ากำลังรับแรงอัด 2.13 MPa นอกจากนี้ทุกส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 1.74 MPa (Base Line1) เป็นกำลังอัดสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรต่ำ (Light traffic) และ 2.41 MPa (Base line2) ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพหินคลุกซีเมนต์ สำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง (High traffic)

4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

ลักษณะภาพโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์จะดูเหมือนว่าจะอยู่ในขั้นตอนของการชะละลายเอาซิลิกาออกมาจากเถ้าลอย (Fernandez-Jimenez et al., 2005) จะเห็นว่าที่ผิวของเถ้าลอยมีรูพรุนเป็นจำนวนมากเนื่องจากการกัดกร่อนของตัวเร่ง จะมีลักษณะแตกต่างกันชัดเจนตามระยะเวลาบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับขั้นตอนของกระบวนการ จีโอโพลิเมอร์

ไรเซชัน (Fernandez-Jimenez et al., 2005) ที่สอดคล้องกับกำลังอัดของตัวอย่าง หินคลุกเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 ที่พัฒนาขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7



(ก) 7 วัน

(ข) 14 วัน

(ค) 28 วัน

รูปที่ 4.5 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์ (CR:FA = 95:5) บ่มที่อุณหภูมิห้อง

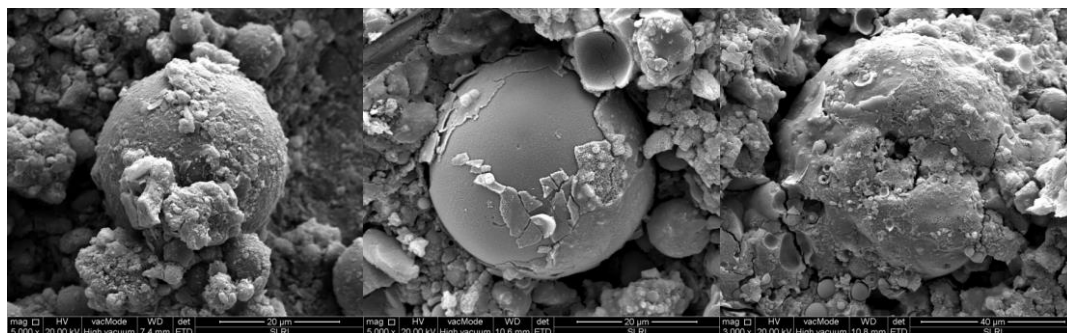


(ก) 7 วัน

(ข) 14 วัน

(ค) 28 วัน

รูปที่ 4.6 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์ (CR: FA = 90:10) บ่มที่อุณหภูมิห้อง

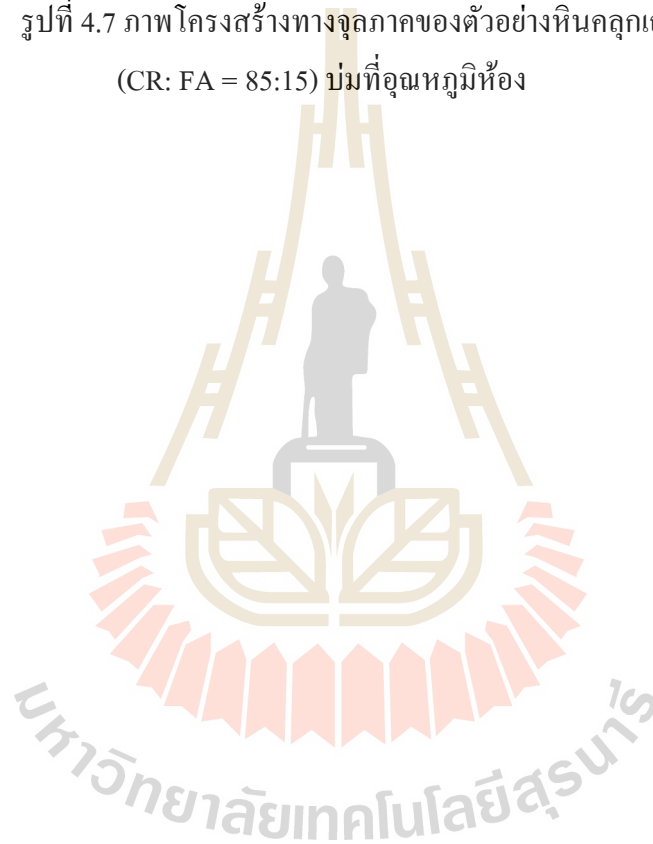


(ก) 7 วัน

(ข) 14 วัน

(ค) 28 วัน

รูปที่ 4.7 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยซีไอโพลีเมอร์
(CR: FA = 85:15) บ่มที่อุณหภูมิห้อง



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ของ การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงวัสดุหินคลุก (Crushed Rock) เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ด้วยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ตามสัดส่วนต่าง ๆ และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยประเด็นสำคัญของงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 5.1.1 กำลังอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วน CR:FA = 95:5, 90:10 และ 85:15 ที่ผสมด้วยสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50:50$ มีการพัฒนากำลังจาก อายุบ่ม 7 วัน ถึง 28 วัน และที่อายุบ่ม 7 วัน ทุกส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 1.74 MPa (Base Line 1) เป็นกำลังอัดสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรต่ำ (Light traffic) และ 2.41 MPa (Base line 2) ซึ่งเป็นกำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สำหรับ งานปรับปรุงคุณภาพหินคลุกซีเมนต์ สำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง (High traffic) โดยสัดส่วนของเถ้าลอยที่เหมาะสมควรใช้สัดส่วนของเถ้าลอยอยู่ที่ร้อยละ 10 ถึง 15 จึงจะทำให้ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มีความเข้มข้นเพียงพอให้เกิดการชะละลาย เพื่อนำเอาซิลิกาและอลูมินา มาสร้างปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่มากเพียงพอจน สามารถพัฒนากำลังได้อย่างต่อเนื่องตามช่วงอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น
- 5.1.2 ตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วน CR:FA = 95:5, 90:10 และ 85:15 ที่ ผสมด้วยสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50:50$ มีการพัฒนากำลังจากอายุ บ่ม 7 วัน ถึง 28 วัน และที่อายุบ่ม 7 วัน ทุกสัดส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 3.5 % และ กำลังอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ สัดส่วน CR:FA = 90:10 และ ที่ผสมด้วยสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 50:50$ มี การพัฒนากำลังอัดขึ้นเรื่อย ๆ มากกว่าตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 3.5 % จนถึง อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า สามารถใช้สารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ แทนปูนซีเมนต์ได้
- 5.1.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ มีประโยชน์ เพื่อให้เห็นลักษณะความแตกต่างตามระยะเวลาการบ่มของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ซึ่ง

จำเป็นทำให้เห็นขั้นตอนและกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันหรือการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ได้อย่างชัดเจน

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาในอนาคต ควรศึกษาหาสัดส่วนผสมที่ลดต้นทุนในการการก่อสร้างและสามารถทำงานได้เหมาะสม (Practical) โดยได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของงานก่อสร้างทาง เช่น การลดสัดส่วนของเถ้าลอย หรือ Na_2SiO_3 หรือ NaOH เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Na_2SiO_3 การซึ่งยังมีราคาแพงอยู่ในขณะนี้ นอกจากนี้ ควรศึกษาด้านความคงทน หรือ อิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของหินคลุกเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์



เอกสารอ้างอิง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2560) (ออนไลน์) แหล่งที่มา :

:<http://maemoh.egat.com/ash/index.php.pp.13>. [8 กรกฎาคม 2560]

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

กรมทางหลวง. (2556). มาตรฐานที่ ทล.-ม.203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

(Cement Modified Crushed Rock Base).

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

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

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

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

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

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

กรมทางหลวง. (2517). วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108/2517 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน.

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

กรมทางหลวง. (2517). วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205/2517 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง.

คมกริช เวชศาสตร์, สุทธิรักษ์ บุชากุล, ปาริฉัตร ปั่นทอง และสุรเดช เหม่มพุก. (2553) การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.

เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด. (2551). (ออนไลน์) แหล่งที่มา :

<https://inhumba.com/tag/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99/page/4/>. [24 พฤศจิกายน 2560]

สมิตร ส่งพิริยะกิจ. (2548). **อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการอัดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์**. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34.

สมิตร ส่งพิริยะกิจ. (2556). (ออนไลน์) **คุณสมบัติของถ่านหิน**. แหล่งที่มา :

http://research.rid.go.th/vijais/pdf/Coal_Concrete1.pdf/ pp.15. [24 พฤศจิกายน 2560]

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท. (2545) **มาตรฐานที่ มทข. 203-2545 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base)**. pp.7

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

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2539. **โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม มาตรฐานเลขที่ มอก. 433-2539**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.

American Concrete Institute, ACI 232.2R-96, (2000). **Use of fly ash in concrete**, In 2000 ACI Manual of Concrete Practice, Part2, Michigan, ACI.pp:11.

American society for testing and materials. (1995). **ASTM C 618- 94a: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete**. Annual book of ASTM standards.Vol. 04.02, pp. 304 -306.pp:11.

American Society for Testing and Material. (2005). **ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.pp:12.

Alonso S, Palomo A. (2001). **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature activator concentration and solids ratio**. Cement and Concrete Research. ; 29(1-2), pp. 55-62.

Arulrajah A, Mohammadinia A, Phummiphan I, Horpibulsuk S, Samingthongd W. (2016) **Stabilization of Recycled Demolition Aggregates by Geopolymers comprising Calcium Carbide Residue, Fly Ash and Slag precursors**. Construction and Building Materials 114, 864-873.

- Bakharev T. (2004) **Durability of geopolymer material in sodium and magnesium sulfate solution.** Cement and Concrete Research; 35(6), pp. 1233-1246.
- 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.
- Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. (2009). **Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers.** Waste Management, 29(2), pp. 539-43.
- Chindaprasirt P. et al. (2007) **Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash.** Construction and Building Materials, 21, pp. 1492-1499.
- Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. (2006). **Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer.** Cement and Concrete Composites, 29(3), pp. 224-229.
- Davidovits J, (2015), **False Values on CO₂ Emission For Geopolymer Cement/Concrete** published In Scientific Papers, Technical Paper #24, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org.
- Davidovits J. (1991) **Geopolymers.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 37(8), pp. 1633-56.
- Davidovits J, Buzzi L, Rocher R, Gimeno D, Marini C, Tocco S. (1999). **Geopolymeric cement based on low cost geologic material.** Results from the European Research project GEOCIS-TEM. In: Davidovits et al. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere 99, pp. 83-96.
- Deer, W. A., Howie, R. A., and Zussman, J. (1971). **An Introduction to the Rock-Forming Minerals.** Longman, London.
- Fernandez-Jimenez A, Palomo M, Criado M. (2005). **Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model.** Eduardo Torroja Institute (CSIC), 28080 Madrid, Spain. Cement and Concrete Research 35, pp. 1204 – 1209
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan, BV. (2003). **The effect of mixture composition and curing temperature on the compressive strength of fly ash-based**

- geopolymer concrete.** The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, Indonesia, CMT 14-CMT 18.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. (2004). **Brief Review of Development of Geopolymer Concrete.** American Concrete Institute, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y. (2009). **Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay.** Soils and Found, 49(1), pp. 85-98.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Chinkulkijniwat A, Raksachon Y, Suddeepong A. (2010). **Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations.** Constr and Build Mater, 24(10), 2011-21.
- Horpibulsuk S, Katkan W, A. Apichatvullop. (2008). **An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test.** Soils and Found, 48(1), pp. 115-25.
- Horpibulsuk S, Katkan W, Naramitkornburee A. (2009). **Modified Ohio's curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils.** Geotechnical Testing Journal, ASTM, 32(1), pp. 64-75.
- Hoya M, Horpibulsuk S, Arulrajah A. (2016). **Strength development of Recycled Asphalt Pavement – Fly ash geopolymer as a road construction material.** Construction and Building Materials 117, pp. 209-219.
- 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.
- Leelapraphaporn S, Phummiphan I, Sukmak P, Horpibulsuk S. (2005). **Strength and Microstructure Development of Crushed Rock Soil Aggregate Stabilized with Fly Ash Geopolymer.** The 20th National Convention on Civil 8-10 July 2015, Chonburi, Thailand.

- Makino, T., Ishida, T. 1999. **Microwave Dielectric Relaxation of Bound Water to Silica, Alumina, and Silica–Alumina Gel Suspensions.** Journal of Colloid and Interface Science vol. 212, Issue 1, P. 144-151.
- Ohsawa S, Asaga K, Goto S, Daimon M. (1985). **Quantitative determination of fly Ash in the hydrated fly ash – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ system.** Cement and Concrete Research, 15(2), pp. 357-366.
- Phummiphan I, Menglim Hoy M, Horpibulsuk S, Arulrajah A, Wattana K, Siridaothong S. (2016). **Strength Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Stabilized by Fly Ash, Calcium Carbide Residue and Slag Geopolymer in PavmentApplications.** Sixth International Symposium on Rural Roads, Swissotel Le Concorde, Bangkok, Thailand, Nov. 14-15, 2016.
- Phummiphan I, Horpibulsuk S, Phoo-ngernkham T, Arulrajah A, Shen S. L. **Marginal Lateritic Soil Stabilized with Calcium Carbide Residue and Fly Ash Geopolymers as a Sustainable Pavement Base Material.** J. Mater. Civ. Eng., 04016195.
- Rattanasak U, Chindaprasirt P. (2009). **Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer.** Miner Eng, 22(12), pp. 1073-8.
- Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, and Chindaprasirt P. (2011). **NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature.** Fuel, 90(6), pp. 2118-24.
- Sukmak P, and Horpibulsuk S. (2012). **Strength development in geopolymer brick.** Construction and Building Materials (Under review).
- Sukmak P, Horpibulsuk S, Shen S. L. (2013). **Strength development in clay–fly ash geopolymer.** Construction and Building Materials, 40, pp. 566-574.
- 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 Jaarsveld J, Van Deventer J, Lorenzen L. (1998). **Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash.** Metall Mater Trans B, 29(1), pp. 283-91.
- 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.



ประวัติผู้เขียน

นายสุเมธ วรรณทะนะ เกิดวันที่ 20 มกราคม 2526 ณ จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากอำเภอเมือง จังหวัดเลย ในปีการศึกษา 2543 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา จากคณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ปัจจุบันทำงานที่บริษัท เอพี(ไทยแลนด์) จำกัด(มหาชน) ซึ่งเป็นบริษัทที่ทำธุรกิจเกี่ยวกับบ่อสังหาริมทรัพย์ จึงทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในหลักสูตรดังกล่าว ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2558 จากการวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านการปรับปรุงคุณภาพหินคลุกถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์เป็นอย่างดี

