

การปรับปรุงวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอพอลิเมอร์
เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง



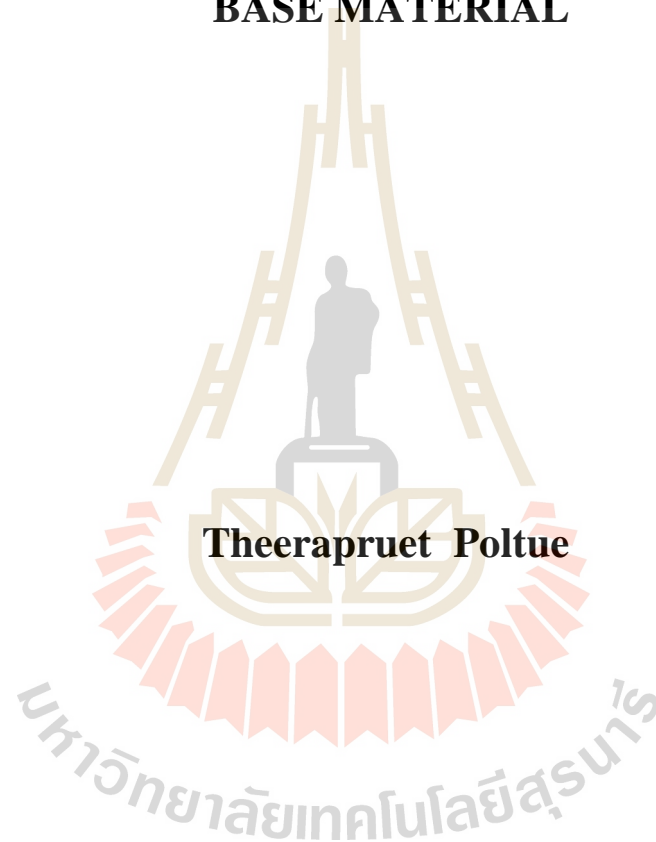
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**IMPROVEMENT OF RECYCLED CONCRETE
AGGREGATE BY USING FLY ASH-RICE HUSK
ASH BASED GEOPOLYMER AS A PAVEMENT
BASE MATERIAL**



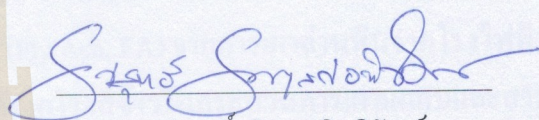
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2017

การปรับปรุงวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอพอลิเมอร์
เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

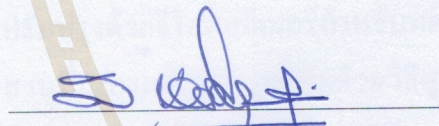
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



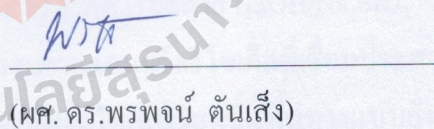
(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ



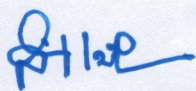
(ศ. ดร. สุขสันต์ ทอพิบูลสูง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



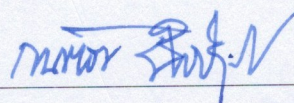
(ผศ. ดร. พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธีร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีรพทธี พลดี : การปรับปรุงวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอ
พอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (IMPROVEMENT OF RECYCLED CONCRETE
AGGREGATE BY USING FLY ASH-RICE HUSK ASH BASED GEOPOLYMER
AS A PAVEMENT BASE MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์
หอพิบูลสุข, 43 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้มวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้จากส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly Ash, FA) จากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ที่ได้จากโรงสีข้าวในกระบวนการเผาแกลบและสารเชื่อมประสาน (Liquid Alkaline Activator, L) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) อัตราส่วน FA/RHA ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 และ 0/100 อัตราส่วน NaOH/ Na_2SiO_3 เท่ากับ 50/50 60/40 80/20 และ 100/0 ตัวอย่างมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์สำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดียวถูกเตรียมที่ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม และบดอัดด้วยวิธีสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) การทดสอบกำลังอัดกระทำที่อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน และ 60 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน FA/RHA และอายุบ่ม และตามการลดลงของอัตราส่วน NaOH/ Na_2SiO_3 เมื่อพิจารณากับมาตรฐานด้านกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทสำหรับวัสดุชั้นพื้นทาง เถ้าแกลบซึ่งมีราคาถูกกว่าเถ้าลอยสามารถใช้แทนที่เถ้าลอยได้สูงสุดถึงร้อยละ 76.8 และ 87.1 ที่สารละลาย NaOH/ Na_2SiO_3 = 50/50 และ 50/50 ตามลำดับ งานวิจัยนี้ช่วยยืนยันว่าวัสดุมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบยั่งยืนที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ธีรพทธี พลดี
[ลายมือชื่อ]

THEERAPRUET POLTUE : IMPROVEMENT OF RECYCLED
CONCRETE AGGREGATE BY USING FLY ASH-RICE HUSK ASH
BASED GEOPOLYMER AS A PAVEMENT BASE MATERIAL. THESIS
ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 43 PP.

RECYCLED CONCRETE AGGREGATE/FLY ASH/RICE HUSK ASH/
GEOPOLYMER

This research investigates the possibility of using of Fly Ash-Rice Husk Ash (FA-RHA) based geopolymer for improving the compressive strength of recycled concrete aggregate (RCA) to meet the standard requirements for base material specified by the Department of Highways (DOH) and Department of Rural Roads (DRR), Thailand. Geopolymer was a mixture of FA from coal-burning power plants, RHA from rice mill, which was obtained in the process of burning rice husk, and a liquid alkaline activator (L), which is a mixture of sodium hydroxide solution (NaOH) and sodium silicate solution (Na_2SiO_3). FA/RHA ratios were 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 and 0/100, while the NaOH/ Na_2SiO_3 ratios were 50/50 60/40 80/20 and 100/0. The mixtures were compacted under the modified proctor energy. RCA-FA-RHA geopolymer samples at each NaOH/ Na_2SiO_3 ratio were prepared at the Optimum Liquid alkaline activator Content (OLC) and compacted under modified proctor energy for Unconfined Compressive Strength (UCS) tests. The UCS test was conducted at 7, 28 and 60 days of curing. The test results showed that the UCS of RCA-FA-RHA geopolymer increased as the FA content and curing time increased and the NaOH/ Na_2SiO_3 ratio decreased. By comparing the 7-day UCS results to the specified strength requirement for base material of the DOH and DRR, rice husk ash

was noted to be able to be used in conjunction with fly ash for up to 76.8% and 87.1% at $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ and $50/50$, respectively. This research confirms that RCA-FA-RHA geopolymers can be used as a sustainable stabilized base material.



School of Civil Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนในการช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง ได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้ความกรุณา สนับสนุนและดำเนินการเรื่องทุนการศึกษาทั้งทุนศักยภาพและทุนการศึกษาของผู้ช่วยสอนและวิจัย เพิ่มเติมที่ผู้วิจัยได้รับ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง ที่กรุณาถ่ายทอดวิชาความรู้ ทางด้านวิชาการและสอนประสบการณ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับงานทางด้านงานฐานรากในปัจจุบันด้วยความกรุณาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ที่ประธานกรรมการ ที่กรุณาถ่ายทอดวิชาความรู้รวมไปถึงแนวคิดต่าง ๆ ตลอดจนความเมตตาที่ท่านมอบให้เสมอมา

ขอขอบคุณพี่พนักงานผู้ดูแลห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ และให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยและการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจเสมอมา
ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและญาติครอบครัวทุกท่าน ที่ให้การอบรม เลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันด้วยดีเสมอมา

ธีรพฤทธิ์ พลดี

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ฅ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 4 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... | 4 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบ Geopolymer..... | 5 |
| 2.1.1 วัสดุรีไซเคิลคอนกรีต..... | 5 |
| 2.1.2 เถ้าลอย..... | 6 |
| 2.1.3 เถ้าแกลบ..... | 8 |
| 2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม..... | 9 |
| 2.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ..... | 9 |
| 2.2.2 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ..... | 9 |
| 2.2.3 การหาค่า CBR และค่าการบวมตัว..... | 10 |
| 2.2.4 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้ เครื่อง Los Angeles Abrasion..... | 11 |
| 2.2.5 การทดสอบการบดอัด..... | 11 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.2.6 การทดสอบกำลังอัด..... | 14 |
| 2.3 เทคโนโลยี Geopolymer..... | 14 |
| 2.3.1 พื้นฐานของ Geopolymer..... | 14 |
| 2.3.2 กระบวนการเกิด Geopolymer..... | 15 |
| 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 18 |
| 3.1 บทนำ..... | 18 |
| 3.2 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ..... | 20 |
| 3.2.1 วัสดุรีไซเคิลคอนกรีต..... | 20 |
| 3.2.2 ใ้ลลย..... | 21 |
| 3.2.3 ใ้ลลล..... | 21 |
| 3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ..... | 21 |
| 3.4 การบดอัด..... | 22 |
| 3.5 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว..... | 22 |
| 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล..... | 24 |
| 4.1 บทนำ..... | 24 |
| 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีต..... | 24 |
| 4.3 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยอีโพลีเมอร์ ใ้ลลยและใ้ลลล..... | 25 |
| 4.3.1 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยอีโพลีเมอร์ใ้ลลยและ ใ้ลลล เปรียบเทียบที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วัน ของแต่ละส่วนผสม..... | 25 |
| 4.3.2 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยอีโพลีเมอร์ใ้ลลยและ ใ้ลลล เปรียบเทียบแต่ละส่วนผสมที่อายุบ่ม 7 วัน..... | 31 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวง ชนบทกับปริมาณการใช้ใ้ลลลในแต่ละส่วนผสม..... | 33 |
| 5 บทสรุป..... | 38 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|-------------------------|----|
| 5.1 สรุปผลงานวิจัย..... | 38 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 38 |
| รายการอ้างอิง..... | 39 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 43 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย..... | 7 |
| 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าแกลบ..... | 8 |
| 2.3 ค่า Standard unit load ที่ความลึกต่าง ๆ..... | 10 |
| 2.4 การเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบ Standard proctor และ Modified proctor..... | 12 |
| 3.1 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ..... | 18 |
| 3.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ..... | 21 |
| 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของรีไซเคิลคอนกรีต..... | 23 |
| 4.2 อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในแต่ละอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ..... | 32 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 Construction & Demolition (C&D) Materials..... | 1 |
| 1.2 เถ้าลอย (Fly Ash)..... | 2 |
| 1.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)..... | 3 |
| 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และเปอร์เซ็นต์ความชื้น (water content) ของ Standard Proctor และ Modified Proctor..... | 13 |
| 2.2 การบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทั่วไป..... | 16 |
| 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย..... | 19 |
| 3.2 ขนาดผลของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตเทียบกับมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์..... | 20 |
| 3.3 ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม..... | 23 |
| 4.1 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอย..... | 25 |
| 4.2 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยร้อยละ 80 และเถ้าแกลบร้อยละ 20..... | 26 |
| 4.3 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยร้อยละ 60 และเถ้าแกลบร้อยละ 40..... | 27 |
| 4.4 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยร้อยละ 50 และเถ้าแกลบร้อยละ 50..... | 28 |
| 4.5 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยร้อยละ 40 และเถ้าแกลบร้อยละ 60..... | 29 |
| 4.6 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยร้อยละ 20 และเถ้าแกลบร้อยละ 80..... | 30 |
| 4.7 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าแกลบ..... | 31 |
| 4.8 กำลังอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าแกลบที่อายุบ่ม 7 วัน..... | 32 |
| 4.9 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบ ที่ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ | 34 |
| 4.10 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบ ที่ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 60/40$ | 35 |

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

| | |
|---|----|
| 4.11 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบ ที่ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ | 36 |
| 4.12 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบ ที่ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$ | 37 |









1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของ อัตราส่วนของ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เพื่อใช้เป็น Liquid Alkaline Activator (L) และอัตราส่วนของ FA/RHA ต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตรีไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วย จีโอพอลิเมอร์ที่ทำจาก FA-RHA (FA-RHA geopolymer)

1.2.2 นำเสนออัตราส่วนของ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เพื่อใช้เป็น Liquid Alkaline Activator (L) และอัตราส่วนของ FA/RHA สำหรับปรับปรุงคอนกรีตรีไซเคิลเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การบดอัดใช้ Mold มาตรฐานขนาด 4 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว (101.6 x 116.4 มิลลิเมตร) ใช้วิธีบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) และใช้ค้อนแบบ สูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction hammer) เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว (50.8 มิลลิเมตร) มีมวลรวมทั้งค้อนมี 4.537 กิโลกรัม (10 ปอนด์) มีปลอกที่ทำไว้อย่างเหมาะสม เป็นตัวบังคับให้ระยะตกเท่ากับ 18 นิ้ว และบดอัด 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งใช้อัตราส่วน L content ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$) คือ 50/50 60/40 80/20 และ 100/0 อัตราส่วนของ FA/RHA คือ 100/0 20/80 40/60 50/50 60/40 80/20 และ 100/0 และสำหรับทุกอัตราส่วนการผสมใช้อายุบ่ม คือ 7 วัน 28 วัน และ 60 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของ อัตราส่วนของ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เพื่อใช้เป็น Liquid Alkaline Activator (L) และอัตราส่วนของ FA/RHA ต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตรีไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วย จีโอพอลิเมอร์ที่ทำจาก FA-RHA (FA-RHA geopolymer)

1.4.2 สามารถใช้วัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบจีโอพอลิเมอร์

2.1.1 วัสดุรีไซเคิลคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate, RCA)

วัสดุรีไซเคิลคอนกรีตเกิดจากกระบวนการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง (Construction & Demolition (C&D) Materials) ในงานวิศวกรรมโยธาหรืองานด้านโครงสร้างพื้นฐานและสาธารณูปโภคต่างๆ เช่นงานอาคาร บ้าน งานถนน เป็นต้น การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ของวัสดุ ทั้งของส่วนเม็ดหยาบ (Coarse aggregate) และส่วนเม็ดละเอียด (Fine aggregate) คือคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของวัสดุซึ่งมีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุ โดย Poon and Chan (2006) ได้ทำการศึกษาการใช้ RCA ในชั้นรองพื้นทางโดยใช้ขนาดละเอียดที่ต่างกันซึ่งผลสรุปที่ได้คือสอดคล้องกับข้อกำหนดขนาดละเอียดของพื้นทาง คันดิน ถนนและสะพานตามมาตรฐาน (ASTM D2940, D448) Tam and Tam(2007) ได้ทำการพิจารณาพฤติกรรมทางกายภาพของ RCA และได้สังเกตเห็นค่าความหนาแน่นของ RCA ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2 Mg/m^3 และ 2.65 Mg/m^3 ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนของซีเมนต์ที่ยึดติดอยู่ตามผิวของวัสดุมวลรวม

RCA มีค่าความพรุนที่มาก ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปัญหาการยุบตัวหรือทรุดตัวได้ ซึ่ง Tam and Tam (2007) ได้เก็บค่าการดูดซึมน้ำของ RCA คืออยู่ระหว่างร้อยละ 3 ถึง 10 เปรียบเทียบกับวัสดุที่ได้จากธรรมชาติโดยตรงจะมีค่าไม่เกินร้อยละ 3 (Poon and Chan, 2006) ดังที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า RCA มีค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ความพรุน (porosity) และอัตราการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) มากกว่าวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติ ในปี 2002 Gomez-Soberon ศึกษาค่าความพรุนของ RCA พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 14.86 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติแล้วมีค่าสูงกว่ามากที่ร้อยละ 3 โดยเหตุผลที่ RCA มีความพรุนสูงเนื่องจากปริมาณซีเมนต์มอร์ตาร์เกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม สำหรับการศึกษาค่าการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) Poon and Chan (2006) ได้ทำการวัดค่าการซึมผ่านโดยใช้วัสดุเม็ดละเอียด (Fine aggregate) ของ RCA ได้เท่ากับ $3.83 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ โดยมีค่ามากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติซึ่งมีค่าอยู่ที่ $6.59 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

การทดสอบหาค่า California Bearing Ratio (CBR) เป็นการทดสอบเพื่อระบุความแข็งของวัสดุที่ใช้ในงานจำพวกถนน งานคันดิน งานสะพาน เป็นต้น ในปี 2006 Poon and Chan ได้ทำการศึกษาและพบว่า ระยะเวลาการทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นเวลา 4 วัน แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า CBR เช่นเดียวกันกับค่าการบวมตัวของชั้นรองพื้นทางของ RCA การทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำเวลา 4 วัน ก็ไม่ทำให้ค่าการบวมตัวเปลี่ยนแปลงมากจนมีความสำคัญ

สำหรับการทดสอบหาค่าการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) เป็นการทดสอบที่ใช้ประเมินค่าความต้านทานของวัสดุต่อการสึกหรอและแรงกระแทก ในปี 2010 Courard et al. ได้ทำการทดสอบหาค่าความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ของ RCA โดยรายงานว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 25

ในปี 2009 Melbouci ได้ศึกษาการทดสอบการบดอัดและพฤติกรรมเมื่อนของวัสดุ RCA และได้แนะนำว่า การเพิ่มดินทรายร้อยละ 5 ซีเมนต์ร้อยละ 10 และอนุภาคอิฐ (ขนาดเล็กกว่า 0.125 mm) ร้อยละ 6 สามารถเพิ่มกำลังต้านทานเชิงกลของวัสดุได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของวัสดุงานทางถนนที่มีปริมาณจราจรสูงก็ยังไม่ผ่านข้อกำหนด ต่อมาในปี 2012 Arulrajah et al. ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานทางด้านเทคนิคของ RCA โดยเทียบกับข้อกำหนดวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานการทางในประเทศออสเตรเลีย พบว่า ค่าการสึกหรอ Los Angeles Abrasion แสดงให้เห็นว่าวัสดุ RCA มีความความทนทาน และคุณสมบัติทางเทคนิคที่ได้ทำการศึกษามีสามารถรับรองได้ว่าวัสดุ RCA สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางได้ และผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน

2.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

ข้อมูลจาก U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) ปี 2010 เถ้าลอยเป็นของเสียที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อทำความร้อนหม้อกำเนิดไอน้ำนำไปปั่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเถ้าลอยนี้ได้จากโรงก๊าซไอเสีย (Plant exhaust gases) หลักๆได้จากตัวกรองไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) ส่วนรองลงมาได้จากระบบฟอก (Scrubber system) ในทางกายภาพแล้ว เถ้าลอยมีอนุภาคที่ละเอียด เป็นวัสดุที่เป็นผง มีส่วนประกอบเป็นซิลิกา มีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนใหญ่ประกอบด้วยตะกอนและดินเหนียวทรงกลม

เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นของแข็งเป็นสารแขวนลอยอยู่ในก๊าซไอเสีย โดยปกติแล้วมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5 μm ถึง 100 μm ซึ่งปรากฏอยู่ในสองรูปแบบได้แก่ สัณฐาน ซึ่งมีลักษณะ โคนมน และเรียบเนียน และผลึก ซึ่งมีลักษณะคม แหลม และอันตราย ส่วนมากประกอบด้วย 1) SiO_2 2) Al_2O_3 และ 3) Fe_2O_3

ในปี 2009 Chindaprasirt et al. ได้ศึกษาพบว่า มีโรงไฟฟ้าในประเทศไทยผลิตเถ้าลอยได้ถึง 4,000 ล้านตันต่อปี แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพียง 1,800 ล้านตันต่อปี เท่านั้น ที่เหลือกลายเป็นขยะทิ้งสิ้น สำหรับทั่วโลกมีการประมาณปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตได้จากถ่านหินต่อปี มากกว่า 390,000 ล้านตัน ในปี 1998 โดยประเทศที่เป็นผู้ผลิตหลักคือ จีนและอินเดีย และมีเพียงร้อยละ 14 เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในขณะส่วนที่เหลือถูกกองทิ้งไว้ทั่วไป (Malhotra, 1999) ภายในปี 2010 ปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตได้ทั่วโลกประมาณ 780,000 ล้านตันต่อปี (Malhotra, 2002) เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่ถูกกองทิ้งไว้ตามพื้นที่ต่างๆ เริ่มส่งผลกระทบต่อภาวะสิ่งแวดล้อมโดยรอบพื้นที่นั้นๆ ดังนั้นการนำเถ้าลอยกลับมาใช้ใหม่จึงจำเป็นอย่างยิ่ง จากข้อมูลของ American Coal Ash Association (ACAA) ในปี 2003 การใช้ประโยชน์ของเถ้าลอย เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตมีประโยชน์อย่างสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังช่วยพัฒนาความแข็งแกร่งของคอนกรีตลดการใช้พลังงาน ลดการผลิตก๊าซเรือนกระจก และลดปริมาณเถ้าลอยที่สะสมอยู่ และช่วยประหยัดทรัพยากรและวัชพืชรุกรานชนิดอื่นด้วย

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยมาจากชนิดของถ่านหิน การเผาไหม้ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous coal) มีแคลเซียมและธาตุเหล็กน้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหิน บิทูมินัส (Bituminous coal) คุณลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีขึ้นอยู่กับวิธีการเผาไหม้ แหล่งถ่านหินและรูปร่างอนุภาค องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแต่ละชนิดที่มีหลากหลายแสดงให้เห็นว่ามีถ่านหินหลายชนิดที่ถูกใช้ในโรงไฟฟ้าทั่วโลก (Malhotra and Ramezianpour, 1994) จากมาตรฐาน ASTM C618 (2005) จำแนกเถ้าลอยออกได้ 3 กลุ่มดังนี้ Class N Class F และ Class C ข้อแตกต่างหลักๆ ของทั้ง 3 กลุ่มคือ ปริมาณแคลเซียม (Calcium) ซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเหล็ก (Iron) ในเถ้าลอย คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยได้รับอิทธิพลอย่างมากจากองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน เถ้าลอยสามารถจำแนกได้ตามข้อกำหนด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย (ASTM C618, 2005)

| Chemical requirements | Class N | Class F | Class C |
|---|---------|---------|---------|
| Silicon dioxide (SiO ₂) + aluminum oxide (Al ₂ O ₃) + iron oxide (Fe ₂ O ₃), min , % | 70 | 70 | 50 |
| Sulfur trioxide (SO ₃), max , % | 4 | 5 | 5 |
| Moisture content, max , % | 3 | 3 | 3 |
| Loss on ignition, max , % | 10 | 6 | 6 |

Class N คือ วัสดุปอซโซลาน (pozzolans) ธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการหรือผ่านกระบวนการเผาที่มีคุณสมบัติผ่านข้อกำหนดในกลุ่มนี้เช่นดินเบา (diatomaceous earths) หินเชิร์ต (cherts) และหินดินดาน(shales) ที่มันวาว หินเถ้าภูเขาไฟ (tuffs) และเถ้าภูเขาไฟ (volcanic ashes) และวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติที่น่าพอใจเช่นดินดานและดินเหนียวบางชนิด

Class F คือ เถ้าที่ได้มาจากกระบวนการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous coal) ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ที่ให้ไว้ในที่นี้ สำหรับเถ้าแกลบในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติปอซโซลานิก (pozzolanic properties)

Class C คือ เถ้าที่ได้มาจากกระบวนการเผาถ่านลิกไนต์ (Lignite) หรือถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous coal) ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ที่ให้ไว้ในที่นี้ สำหรับเถ้าในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic properties) และมีคุณสมบัติซีเมนต์ (Cementitious properties)

2.1.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ask, RHA)

ในปี 2009 Naiya et al. กล่าวว่า แกลบหรือเรียกอีกอย่างว่าเปลือกข้าวคือส่วนที่ปกปิดเมล็ดข้าวมีลักษณะแข็ง โดยปกติเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าว เถ้าแกลบ (Rice Husk Ask, RHA) เป็นผลผลิตที่ได้หลังจากการเผาแกลบในเตาเผาซึ่งสามารถนำออกมาได้จากเครื่องมือดักจับอนุภาคที่ติดตั้งบริเวณด้นปล่องควันไฟ

จากการศึกษา RHA market study ในปี 2003 ข้าวมีปริมาณคิดเป็น 1% ของพื้นผิวดินของโลกและเป็นแหล่งทรัพยากรอาหารหลักสำหรับประชากรพันล้านคนในปัจจุบัน ทั่วโลกมีการประเมินผลผลิตข้าวมีปริมาณมากถึง 600 ล้านตันต่อปี ดังนั้นแกลบก็ถูกผลิตเป็นจำนวนมากตามไปด้วย ประมาณร้อยละ 20 ของเมล็ดข้าวเป็นแกลบและปริมาณการผลิตคือ 120 ล้านตันต่อปี สำหรับกระบวนการทำให้แกลบกลายเป็นเถ้าแกลบ (RHA) ทำให้เกิดเถ้าแกลบคิดเป็นร้อยละ 20 ของแกลบทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าแกลบ

| SiO ₂ (Amorphous) | SiO ₂ (Crystalline) | K ₂ O | C | Total |
|------------------------------|--------------------------------|------------------|----|-----------|
| >90 | <1.5 | <2.3 | <6 | 99.8 %Wt. |

เถ้าแกลบมีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบา โดยพื้นที่ผิวสัมผัสภายนอกมากและเต็มไปด้วยซิลิกาโดยปกติแล้วจะมีซิลิกาอยู่ประมาณร้อยละ 90 – 95 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบซึ่งจัดทำโดย Agriletric Research Company ในปัจจุบันวิธีการที่เป็นที่นิยมในการกำจัดเถ้าแกลบคือนำไปกองทิ้งไว้ในพื้นที่เก็บขยะซึ่งทำให้เกิดมลพิษทาง

สิ่งแวดล้อมรวมไปถึงมลพิษทางอากาศและปัญหาการปล่อยพื้นที่ให้ร้าง (Costa et al., 1999) เนื่องจากปริมาณของเถ้าแกลบที่ผลิตขึ้นทุกๆ ปี ดังนั้นวิธีการหรือกระบวนการกำจัดเถ้าแกลบที่มีประสิทธิภาพควรได้รับการพัฒนาอย่างเร่งด่วน

2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

2.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Particle Size Distribution)

การหาขนาดเม็ดวัสดุเป็นการทดสอบหนึ่งในหลายๆ การทดสอบที่ต้องรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์ขนาดวัสดุโดยใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ (Sieve Analysis) โดยจะได้ออกมาเป็นเส้นการกระจายขนาดของตัวอย่างวัสดุ คำนวณได้จากน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ โดยเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปจนมีขนาดเล็กที่สุด คือตะแกรงขนาดเบอร์ 200 สำหรับขนาดตะแกรงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ผู้ทำการทดสอบได้อ้างอิง

ตามมาตรฐาน ASTM D422-63 การคำนวณร้อยละผ่านตะแกรง (Percent Finer) ดังต่อไปนี้

1. ร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรง =
$$\frac{\text{น้ำหนักดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100$$
2. ร้อยละการค้างสะสม = ผลบวกสะสมของร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรงที่หยาบกว่า
3. ร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (% Finer) = 100 ร้อยละค้างสะสม

2.2.2 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific gravity และ Water absorption)

ความถ่วงจำเพาะของวัสดุใดๆ คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของเนื้อวัสดุนั้นต่อน้ำหนักน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C ที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานสำคัญอีกค่าหนึ่ง ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาตรช่องว่าง (Void Volume) ความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ความพรุน (Porosity) และอื่น ๆ ได้ ทั้งยังจะทำให้คาดได้ว่ามวลดินนั้นๆ ประกอบด้วยธาตุสารอะไรเป็นองค์ประกอบ

ตามมาตรฐาน AASHTO T85-70 การคำนวณความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำได้ดังนี้

1. Bulk Specific Gravity =
$$\frac{A}{B-C}$$
2. Water Absorption =
$$\frac{B-A}{A} \times 100$$

- เมื่อ A = มวลของวัสดุอบแห้งในอากาศ มีหน่วยเป็นกรัม
 B = มวลของวัสดุที่อิ่มตัวด้วยน้ำและมีผิวแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม
 C = มวลของวัสดุในน้ำ มีหน่วยเป็นกรัม

2.2.3 การหาค่า California Bearing Ratio (CBR) และค่าการบวมตัว (Swelling ratio)

CBR test เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือน (Shearing resistance) ของดินที่บดอัดจนแน่นดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ Optimum moisture content) โดยการใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตรฐานที่ได้จากการทดลองกด piston ขนาดเดียวกันนี้บนหินที่บดอัดแน่นที่ความลึกของ penetration เท่ากัน ค่าที่ได้นี้เรียกว่า “ร้อยละ CBR” เทียบอัตราส่วนเป็นร้อยละของ Standard Unit load เขียนเป็นสมการของอัตราส่วนได้ดังนี้

$$\text{CBR} = \frac{\text{Test Unit Load}}{\text{Standard Unit Load}} \times 100$$

ค่า standard unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว บนหินคลุกมาตรฐานบดอัดแน่นขนาดต่าง ๆ กันหลายขนาดมีค่ามาตรฐานดังตารางที่ 2.3 ตารางที่ 2.3 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่าง ๆ

| Penetration (in) | Unit load (Psi) |
|------------------|-----------------|
| 0.1 | 1000 |
| 0.2 | 1500 |
| 0.3 | 1900 |
| 0.4 | 2300 |
| 0.5 | 2600 |

ค่าร้อยละ CBR โดยทั่วไปแล้ว จะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าผลปรากฏออกมาว่าร้อยละ CBR ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่าที่ความลึก 0.1 นิ้ว การทดลองควรจะต้องกระทำซ้ำอีกครั้ง ซึ่งถ้าค่าร้อยละ CBR ที่ได้มายังเป็นไปในรูปเดิม ก็ให้ใช้ค่า ร้อยละ CBR ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

สำหรับค่าการบวมตัววัดจากขั้นตอนการอ้อมตัวด้วยน้ำของตัวอย่างโดยวัดการเปลี่ยนแปลงของความสูงในแนวตั้งของตัวอย่างโดยคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าการบวมตัว} = \frac{\text{ผลต่างระหว่างการอ่าน Dial gauge ครั้งแรกและครั้งสุดท้าย}}{\text{ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง}} \times 100$$

2.2.4 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles

Abrasion

มวลรวมหยาบขนาดเล็กปกติใช้เป็นส่วนผสมหลักในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยอาจลดขนาดตามความเหมาะสมเช่นประกอบด้วยมวลรวมหยาบที่มีขนาดค่อนข้างโต และใกล้เคียงกัน (Coarse grade) มวลรวมหยาบที่มีขนาดโตไม่แตกต่างกันมากนักเป็นส่วนใหญ่ (Open grade) มวลรวมหยาบและละเอียดคละกัน (Dense grade) หรือ มวลรวมละเอียดเป็นส่วนใหญ่ (Fine grade) เมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ แอสฟัลต์เหลว (Cutback) แอสฟัลต์ผสมน้ำ (Emulsified asphalt) หรือน้ำมันดินที่ได้จากการกลั่นถ่านหิน (Tar) ใช้ลาดผิวทางเพื่อด้านการสึกหรอ (Wearing surface) เนื่องจากน้ำหนัก หรือการเคลื่อนที่ของล้อรถ ซึ่งจะทำให้ผิวสัมผัสขัดสีกระแทก หรือถูกบดขยี้ มวลรวมหยาบที่ดี ควรมีคุณสมบัติทั้งความแข็งแกร่ง (Hardness) ความทนทาน (Soundness) ซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลักได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม น้ำหนัก หรือแรงและเวลาการทดสอบโดยใช้ Los Angeles Abrasion Machine จึงเป็นการจำลอง เพื่อหาความแข็งแกร่ง หรือทนทานของมวลรวมภายใต้ปัจจัยดังกล่าว ความแข็งแกร่ง หรือทนทาน อาจพิจารณา หรือคำนวณจากร้อยละของมวลที่สูญเสียไป (Lose Angles Abrasion Value, LAV) ได้ดังนี้

$$LAV = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100$$

โดยที่ W_i : น้ำหนักของมวลรวมหยาบก่อนทดสอบ

W_f : น้ำหนักของมวลรวมหยาบหลังทดสอบ

ผลต่างระหว่าง W_i และ W_f คือฝุ่นละเอียดที่เกิดจากการขัดสีหรือกระแทกและผ่านตะแกรงเบอร์ 12 (1.7 มิลลิเมตร)

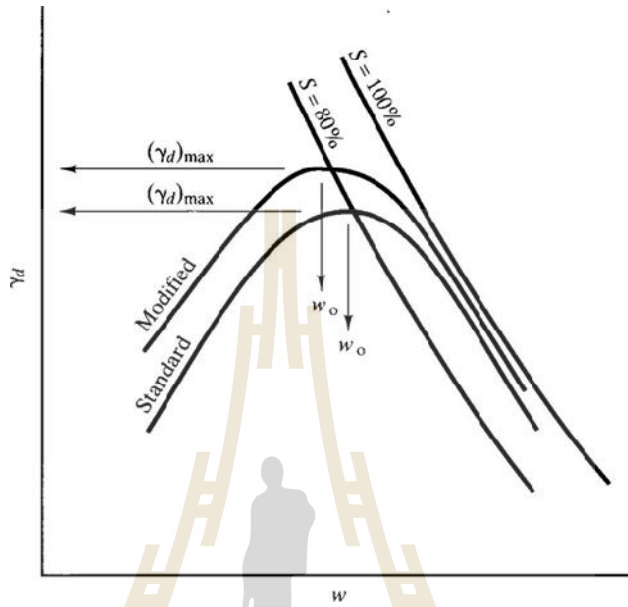
2.2.5 การทดสอบการบดอัด (Compaction test)

วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้ามีน้ำมีอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆมวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้าที่น้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิไฟด์ (Modified Proctor Test)

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor

| Test | Mold size | Weight of Hammer (lb.) | No. of Layer | Height of Drop (in.) | No. of blow per layer | Energy/Vol. ft-lb/ft ³ |
|------------------|-----------|------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Standard Proctor | ø4"x 4.6" | 5.5 | 3 | 12 | 25 | 12,400 |
| | ø6"x 5.0" | 5.5 | 3 | 12 | 56 | 12,400 |
| Modified Proctor | ø4"x 4.6" | 10 | 5 | 18 | 25 | 56,000 |
| | ø6"x 5.0" | 10 | 5 | 18 | 56 | 56,000 |

ในการทำการบดอัดในห้องทดลองซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาฝั่งให้แห้ง แล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาณที่พอเหมาะแล้วเริ่มทำการบดอัดในแบบที่ใช้บดอัด โดยวิธีการที่จะพูดถึงรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นอย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดแต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น จะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า “ความ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\text{ความหนาแน่นแห้ง}(Y_d) = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\text{ร้อยละความชื้นในดิน}(w)}{100}}$$

2.2.6 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test)

การทดสอบกำลังอัดของวัสดุเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้รับแรงอัดว่าจะสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากน้อยเพียงใดและเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสีรูปร่างของวัสดุนั้นด้วย เพื่อที่จะได้นำวัสดุนั้นไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม สำหรับการคำนวณกำลังอัดคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D1633 (2007) ได้ดังนี้

$$\text{ค่ากำลังอัด (Compressive strength)} = \frac{\text{แรงกดสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}}$$

2.3 เทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

2.3.1 พื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์

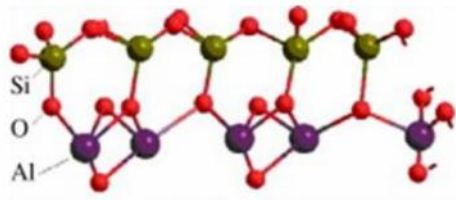
ในปี 1991 ได้มีนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสท่านหนึ่งชื่อว่า Joseph Davidovits ได้ประดิษฐ์และได้ทดลองใช้จีโอพอลิเมอร์ เป็นครั้งแรก สำหรับพื้นฐานของ จีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยธาตุหลักอยู่สองชนิดคือ อลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) ซึ่งธาตุทั้งสองเป็นส่วนประกอบสำคัญขององค์ประกอบโครงสร้างพื้นฐานทางธรณีวิทยา สิ่งอะไรที่เราควรพิจารณาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์เรามีวัสดุใหม่ สารเชื่อมประสานใหม่หรือวัสดุเชื่อมประสานใหม่สำหรับคอนกรีต (Davidovits, 2011) แต่อย่างไรก็ตามจะมีความแตกต่างในการบัญญัติศัพท์เฉพาะทางอยู่บ้างเช่น low-temperature aluminosilicate glass, alkali-activated cement, and hydroceramic ซึ่งขึ้นอยู่กับนักวิจัยว่าจะใช้คำใด แต่สำหรับเทคโนโลยีนี้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในชื่อ “Geopolymer”

นับเป็นเวลามากกว่า 30 ปีแล้วตั้งแต่ Joseph Davidovits ได้เผยแพร่บทความวิจัยชิ้นแรกเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ในปี 1979 แต่ในทางกลับกันแม้ว่าวิทยาการทางจีโอพอลิเมอร์ได้มีการศึกษามาเป็นเวลานานมากกว่า 3 ทศวรรษจนถึงทุกวันนี้ก็ตาม แต่การวิเคราะห์วิจัยในสถาบันการศึกษาต่างๆยังมีน้อยมากในช่วงระยะเวลา 20 ปีแรก ระหว่างปี 1979 และ 1999 มีวารสารทางวิชาการและสิทธิบัตรเพียง 91 ชิ้น และมีเพียงการประชุมวิชาการครั้งเดียวที่มีเนื้อหาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์ไลเซชัน (Geopolymerization) (Xu, 2002) แต่อย่างไรก็ตาม

ตามใน 10 ปีต่อมาการวิจัยเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ก็ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก (Davidovits, 2010) โดยหนึ่งในนั้นคือประเทศจีนเพียงปีเดียว ปี 2010 มีการเผยแพร่บทความเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์เป็นจำนวนมากถึง 135 ชิ้น ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นไปได้หลากหลายแนวทาง ตัวอย่างเช่น วัสดุทนไฟ เครื่องประดับ ฉนวนกันความร้อน วัสดุก่อสร้างดินทนต่ำ กระเบื้องพลังงานต่ำ วัสดุทนความร้อนสูง วัสดุทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ วัสดุประยุกต์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมโรงหล่อโลหะ วัสดุเชื่อมประสานและคอนกรีต สารประกอบสำหรับบำรุงรักษาและเพิ่มกำลังโครงสร้างพื้นฐาน เทคโนโลยีขั้นสูงเกี่ยวกับยางเรซิน การป้องกันกัมมันตภาพรังสีและขยะพิษ งานศิลปะตกแต่ง มรดกทางวัฒนธรรม โบราณคดี และการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ (Davidovits, 2011) จนถึงปัจจุบันนี้ คุณสมบัติต่างๆและการใช้ประโยชน์จาก จีโอพอลิเมอร์ได้ถูกศึกษาแล้วทั้งในด้านวิทยาศาสตร์หลายแขนงและทางด้านอุตสาหกรรมด้วย เช่น เคมีอินทรีย์สมัยใหม่ เคมีกายภาพ เคมีคอลลอยด์วิทยาศาสตร์วิทยาและในทุกแขนงของเทคโนโลยีกระบวนการวิศวกรรม (Davidovits, 2011)

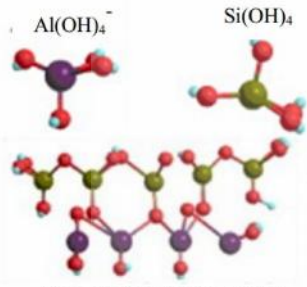
2.3.2 กระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์

ในปี 1988 Joseph Davidovits ให้คำจำกัดความการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) ว่าเป็นกระบวนการคายความร้อนซึ่งมีโอลิโกเมอร์(Oligomer) รวมทั้ง ไดเมอร์(Dimer) และไตรเมอร์(Trimer) เป็นตัวกลางซึ่งโอลิโกเมอร์เป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างมาโครโมเลกุลสามมิติ (Three dimensional macromolecular edifice) ต่อมาในปี 1991 Joseph Davidovits ยังระบุด้วยว่ากระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์อาจจะถือได้ว่าเหมือนกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (zeolite) กล่าวคือปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องของในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์คล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดซีโอไลต์ (zeolite) แม้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เป็นอสัณฐานกึ่งผลึก (semi-crytalline) มากกว่าผลึก (crytalline) โดยทั่วไปแล้วกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนการเกิดกระบวนการสลายตัว (dissolution) กระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ (reorientation) และกระบวนการแข็งตัว (solidification) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (Duxson et al., 2005)



Raw Si-Al material

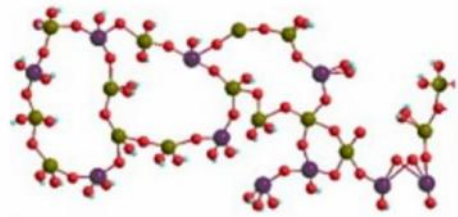
Dissolution \downarrow $\text{H}_2\text{O}, \text{Na}^+/\text{K}^+, \text{OH}^-$



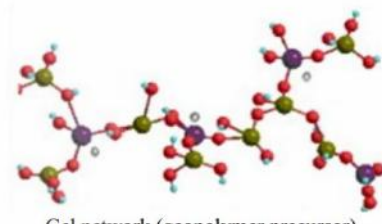
Raw Si-Al material residual

Reorientation \rightarrow

$\text{Na}^+/\text{K}^+, \text{OH}^-$



Solidification \uparrow



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พันธะที่เชื่อมอยู่ระหว่างอนุภาคซิลิกอนหรืออลูมิเนียมกับส่วนที่เป็นเจลได้ ดังนั้นจึงเป็นการเร่งให้กระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของซิลิกอนและอลูมิเนียมเร็วขึ้น

ในขั้นตอนการแข็งตัว (solidification) กระบวนการแข็งตัวเนื่องจากความเย็น (Gelation) ยังคงจัดเรียงและจัดระเบียบอยู่ต่อเนื่องส่งผลทำให้การเชื่อมประสานของเครือข่ายเจลเพิ่มขึ้นและส่งผลให้เครือข่ายอลูมิเนียมสัณฐานหรือกิ่งผลึกสามมิติเกิดประกอบกันเป็นจีโอพอลิเมอร์ ในขั้นตอนนี้ อุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศเป็นสองปัจจัยที่สำคัญต่อการกำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ จีโอพอลิเมอร์ขั้นสุดท้าย (Xu, 2002) Palomo et al. ในปี 1999 กล่าวว่าโดยทั้ง 3 ขั้นตอนที่ผ่านมาข้างต้นนี้ไม่ได้มีลำดับการเกิดที่แน่ชัด กล่าวคือกระบวนการทั้ง 3 ขั้นตอนจะเกิดขึ้นไปพร้อมๆกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดกระบวนการแข็งตัวทั้งสองกระบวนการที่เหลือทั้งกระบวนการสลายตัวและกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ก็เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน



บทที่ 3

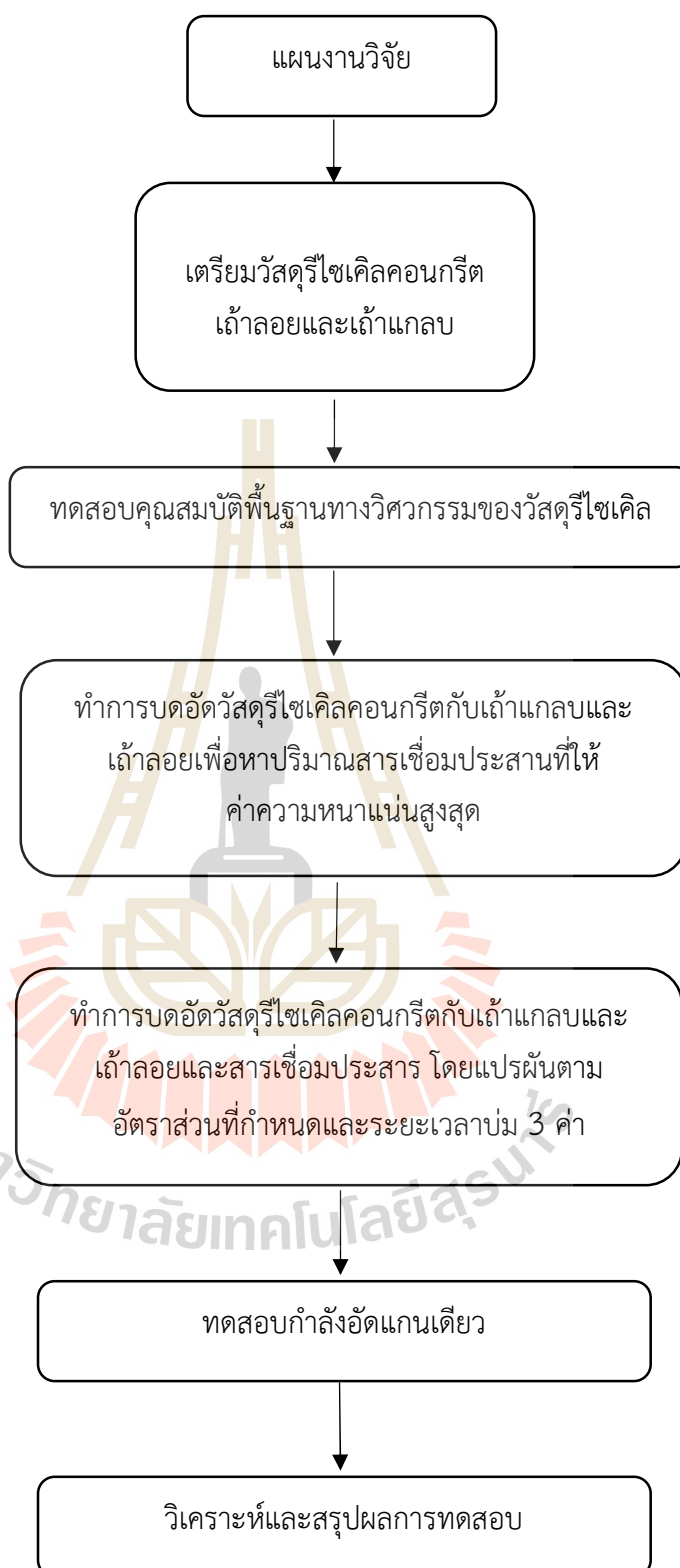
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

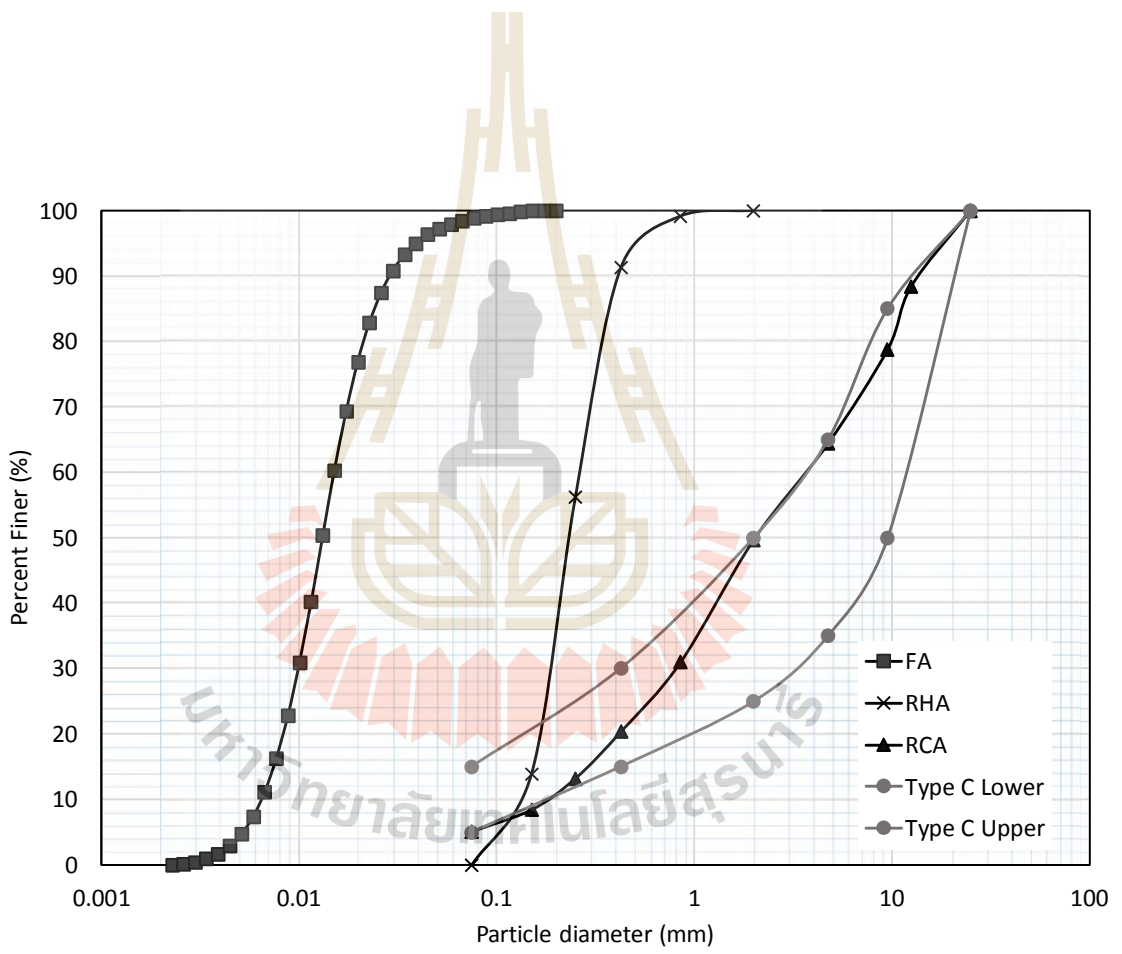
งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษากำล้างอัดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีต (RCA) ที่ได้รับการปรับปรุงด้วย จีโอพอลิเมอร์เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท วัสดุรีไซเคิลคอนกรีตได้จากการย่อยลูกป้อนจากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุงานทาง บริเวณหลังอาคารเครื่องมือ 5 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วัสดุตัวอย่างจะถูกนำมาปรับปรุงการกระจายขนาดของเม็ดดินให้ได้มาตรฐานของชั้นพื้นทาง และผสมกับวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ (ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุตั้งต้น) แล้วทำการบดอัด โดยแปรผันตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยและเถ้าแกลบ อัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ ระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างบดอัดจะถูกนำไปบ่มจนได้อายุ 7 28 และ 60 วัน และทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ผลทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท รายละเอียดจำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ

| ตัวแปร | จำนวน | คำอธิบาย |
|-------------------------------|-------|---|
| พลังงานการบดอัด | 1 | แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) |
| ระยะเวลาบ่ม | 3 | 7 28 และ 60 วัน |
| ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน | 1 | ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นสูงสุด (γ_p) ในการบดอัด |
| อัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสาน | 4 | NaOH/Na ₂ SiO ₃ : 50/50 60/40 80/20 และ 100/0 |
| อัตราส่วนเถ้าลอยและเถ้าแกลบ | 7 | FA/RHA : 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 และ 0/100 |
| จำนวนตัวอย่าง | 3 | ของแต่ละส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม |



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย



3.2.2 เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยมาจากบริษัท ซีแพ็ค จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตคอนกรีตในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานและสาธารณูปโภคภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เถ้าลอยนี้ นำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งเถ้าลอยมีคุณสมบัติทางเคมีตามตารางที่ 3.2

3.2.3 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากโรงสีข้าววิจิตรธัญญา ต.นกออก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา เถ้าแกลบดังกล่าวถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อแยกส่วนหยาบออก ซึ่งส่วนมากเป็นแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเถ้าแกลบมีคุณสมบัติทางเคมีตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

| Chemical compositions(%wt.) | FA | RHA |
|--|-------|-------|
| Silicon Dioxide (SiO ₂) | 38.53 | 90.08 |
| Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃) | 20.49 | 0.78 |
| Iron Oxide (Fe ₂ O ₃) | 14.85 | 0.52 |
| Calcium Oxide (CaO) | 13.76 | 0.60 |
| Magnesium Oxide (MgO) | 3.10 | 0.66 |
| Potassium Oxide (K ₂ O) | 1.76 | 1.35 |
| Sodium Oxide (Na ₂ O) | 0.58 | 0.12 |
| Sulfur Trioxide (SO ₃) | 0.86 | 0.05 |
| Loss on Ignition (LOI) | 0.52 | 0.24 |

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ (Basic engineering properties)

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของวัสดุที่จะใช้ในงานประเภทต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นต้องทดสอบเพื่อให้ผ่านมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล-ม. 203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ซึ่งจะต้องทดสอบคุณสมบัติดังนี้

3.3.1 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 และ C535

3.3.2 การหาค่า CBR (California bearing ratio) และค่าการบวมตัว (Swelling ratio)

ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T193

3.3.3 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดหยาบ (Specific gravity and Water absorption-Coarse aggregate)

ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T85

3.3.4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดละเอียด (Specific gravity and Water absorption-Fine aggregate)

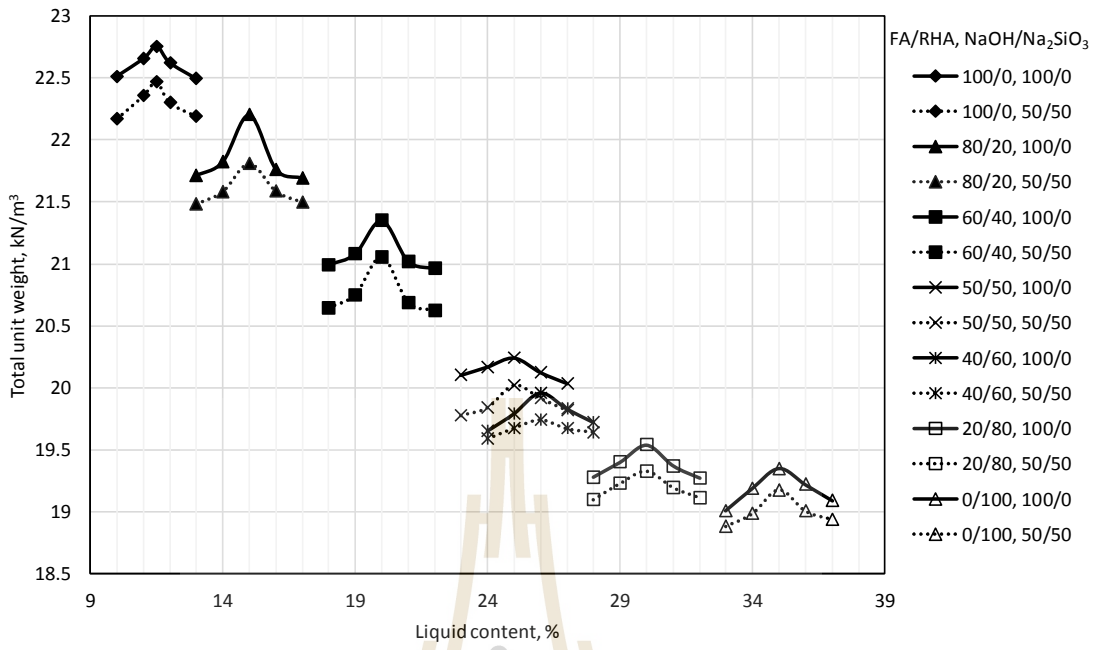
ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T84

3.3.5 การหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นในการบดอัดสูงสุด (Optimum moisture content and Maximum density)

ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T180

3.4 การบดอัดวัสดุ (Compaction)

การบดอัดวัสดุทำในแบบมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว โดยแบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ด้วยค้อนการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน AASTHO T180 ผลการบดอัดจะได้ค่าร้อยละปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่มีความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุรวมที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) เมื่อทำการบดอัดเสร็จ ตัวอย่างจะถูกดันออกจากแบบหล่อโดยใช้แท่นดันตัวอย่าง และตัวอย่างที่ถูกดันออกจากแบบหล่อจะถูกนำไปห่อด้วยพลาสติกเพื่อความคุมความชื้นและบ่มที่อุณหภูมิห้อง



บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่นำมาใช้เป็นวัสดุหลักในการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ผลการทดสอบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบ โดยแยกตามอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งทำการทดสอบที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วัน และผลการทดสอบเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางที่ยอมให้ ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีต

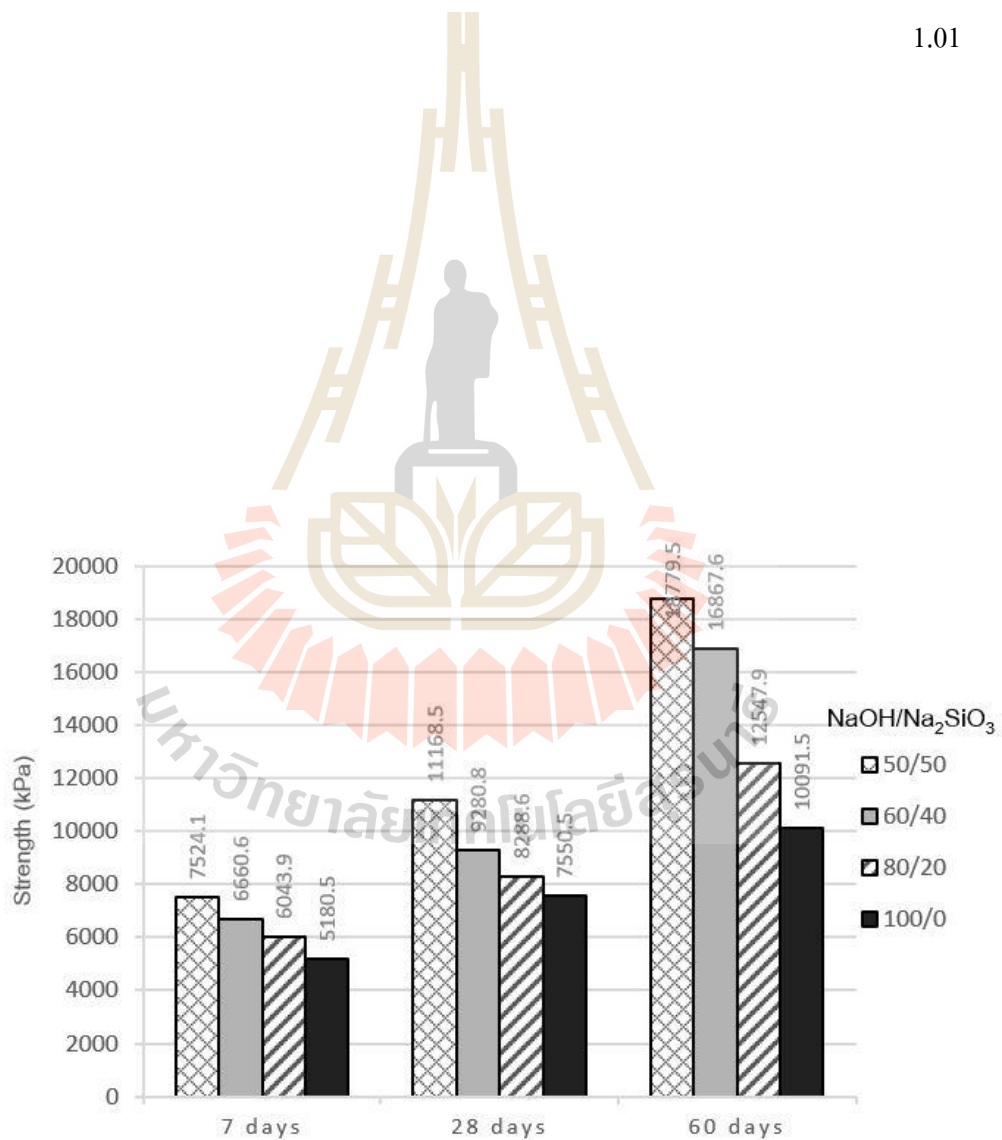
เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตเป็นตัวกำหนดคุณภาพของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบที่ใช้ทำวัสดุชั้นพื้นทาง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตตามมาตรฐานต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

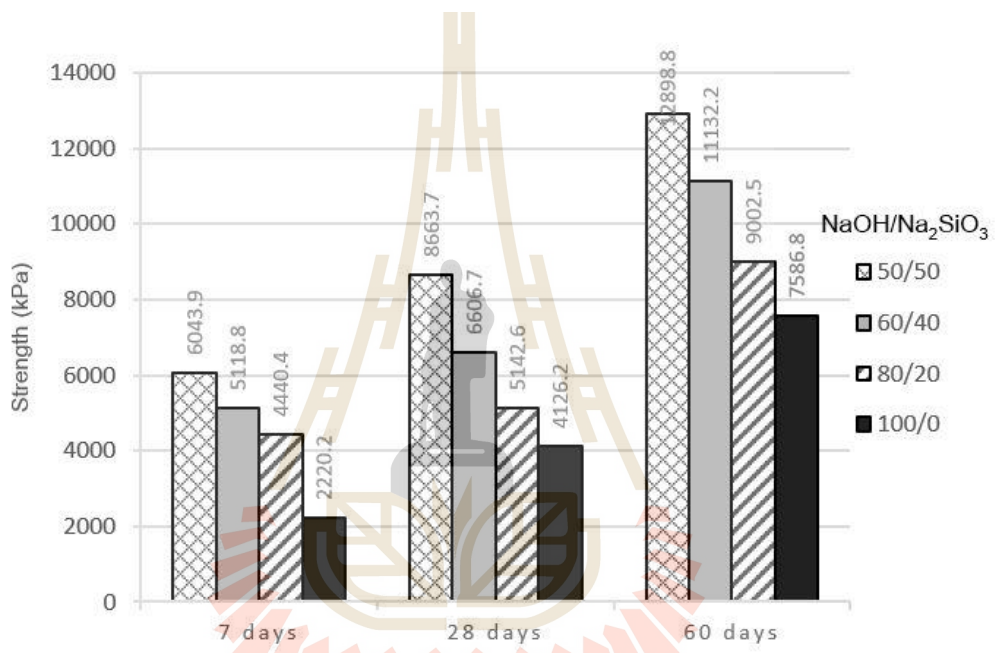
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของรีไซเคิลคอนกรีต

| Basic Engineering Properties | Standard | RCA |
|--|----------------|------------|
| Los Angeles Abrasion <40% | ASTM C131,C535 | 38.96 |
| California bearing ratio >80% | AASHTO T193 | 190 |
| Specific gravity-Coarse aggregate | AASHTO T85 | 2.61 |
| Water absorption-Coarse aggregate, % | AASHTO T85 | 6.0 |
| Specific gravity-Fine aggregate | AASHTO T84 | 2.62 |
| Water absorption-Fine aggregate, % | AASHTO T84 | 9.2 |
| Swelling ratio, % | AASHTO T193 | 0.01 |
| Optimum moisture content, % | AASHTO T180 | 11.6 |
| Maximum Dry Density, g/cm ³ | AASHTO T180 | 1.77 |
| Basic Engineering Properties | | RCA |

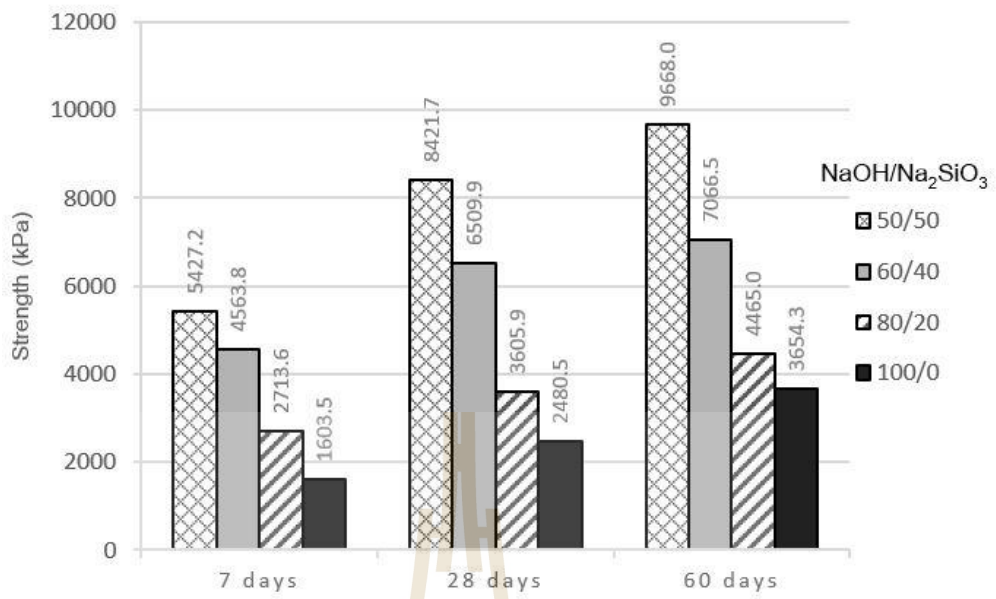
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของรีไซเคิลคอนกรีต

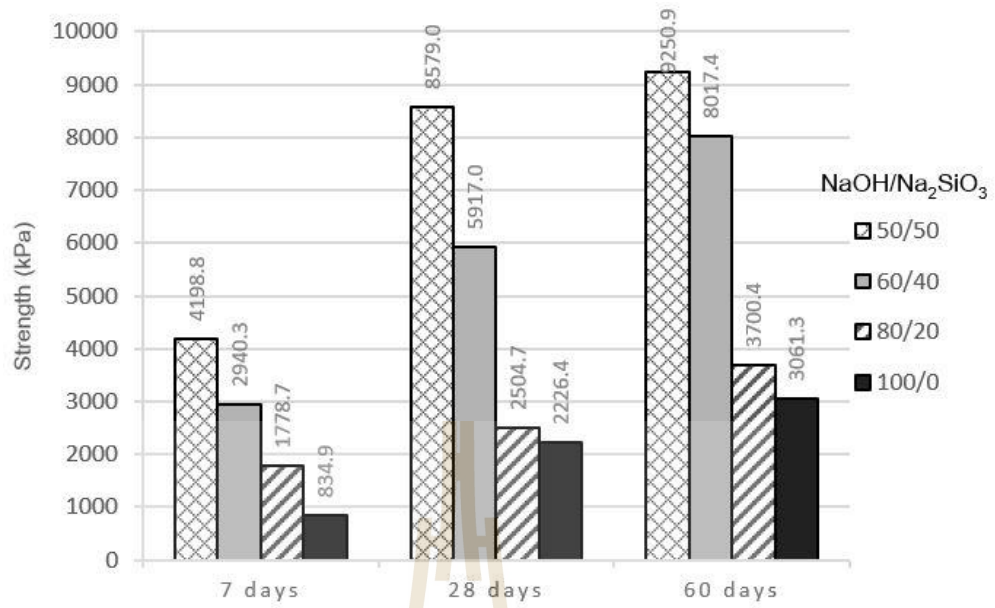
| Basic Engineering Properties | RCA |
|------------------------------|-------|
| USCS Classification | SW |
| D_{10} , mm. | 0.18 |
| D_{30} , mm. | 0.82 |
| D_{60} , mm. | 3.7 |
| C_u | 20.55 |
| C_c | 1.01 |

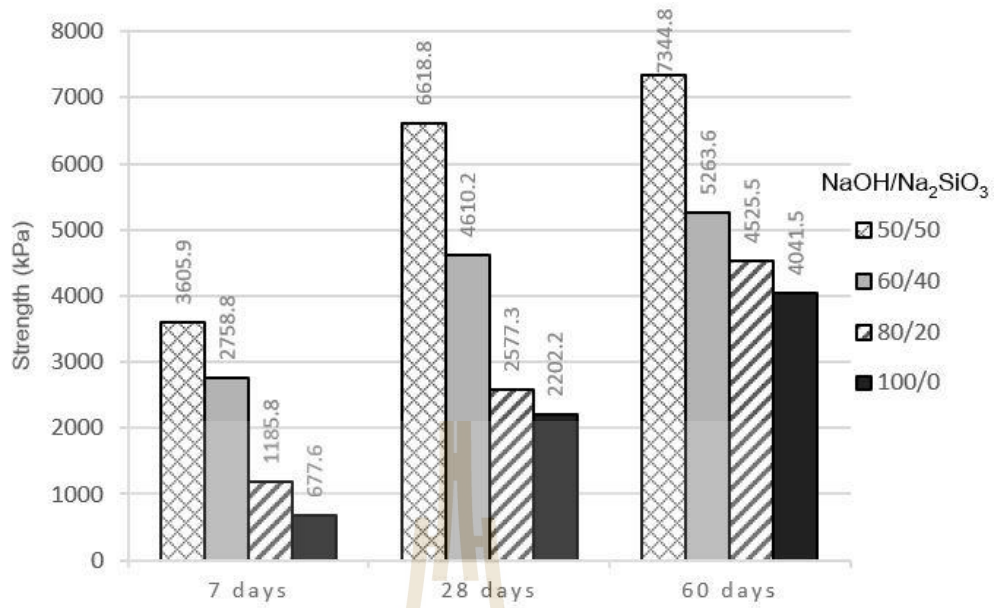


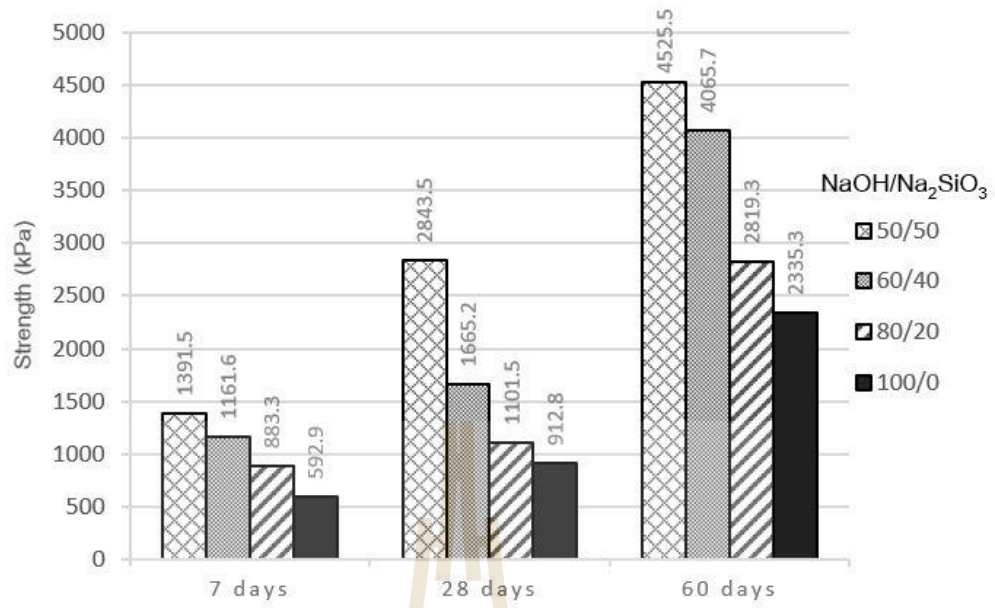


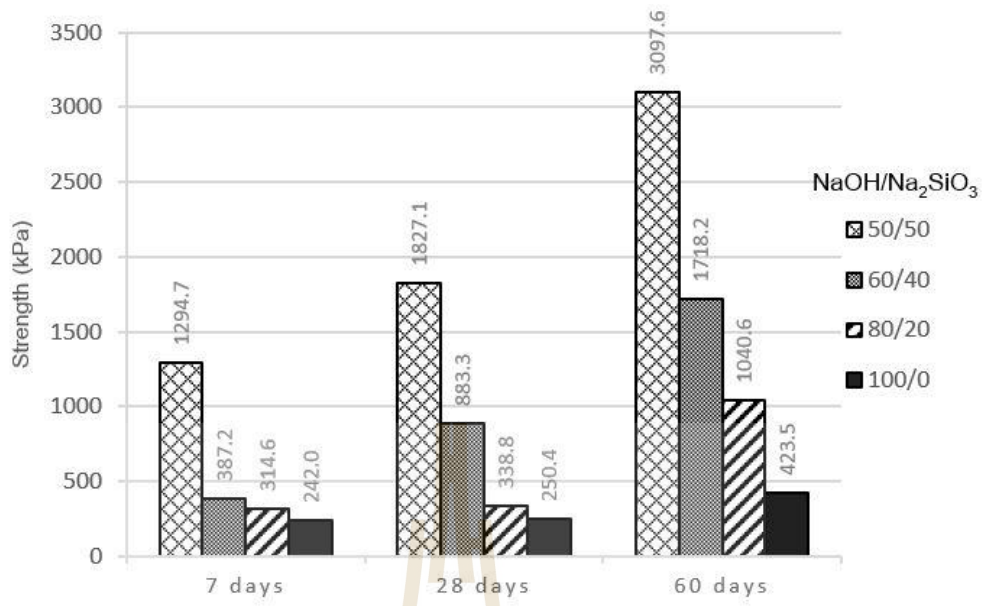
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

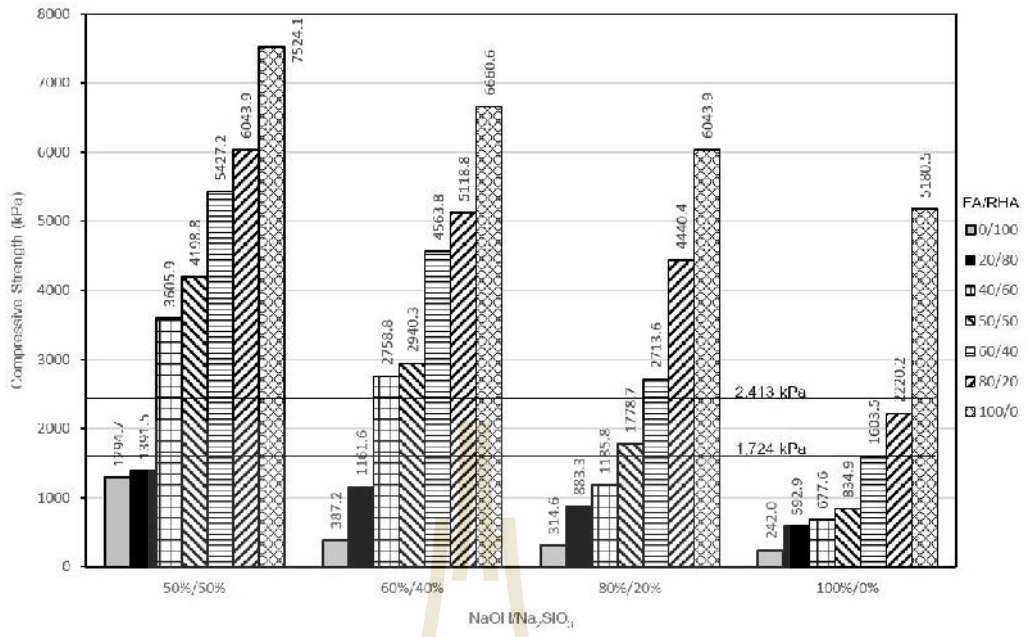












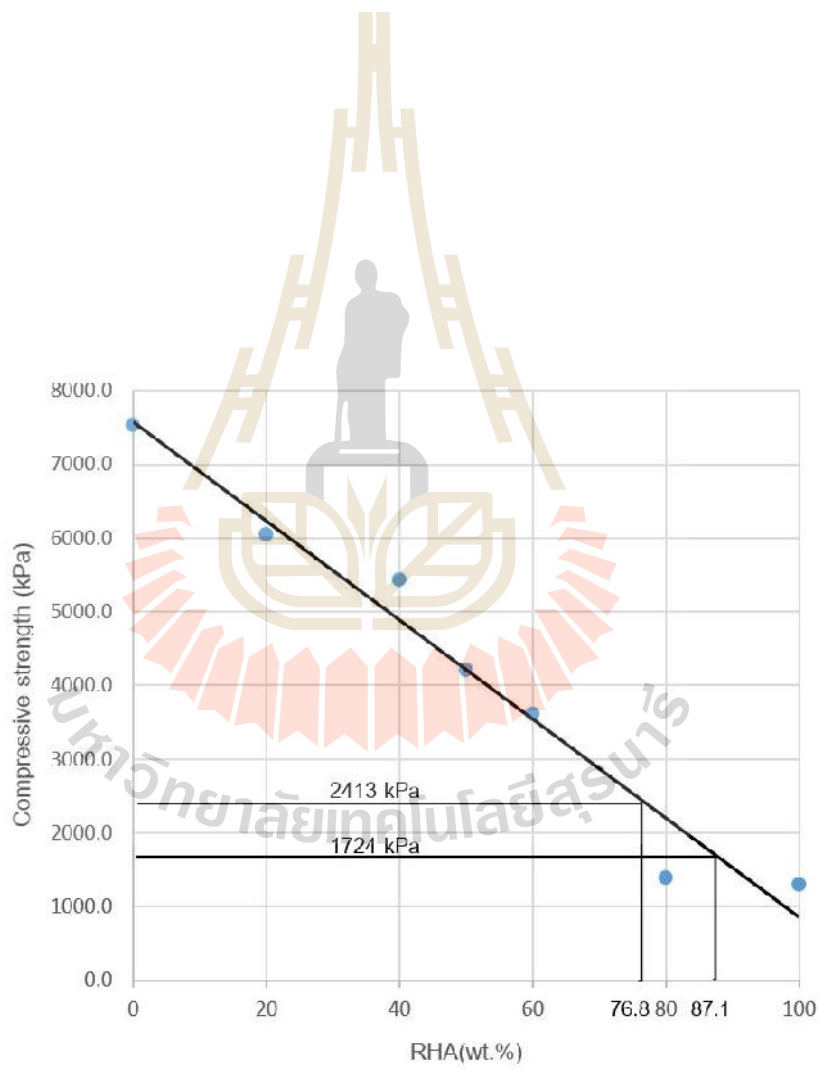
4.4 อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในแต่ละอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

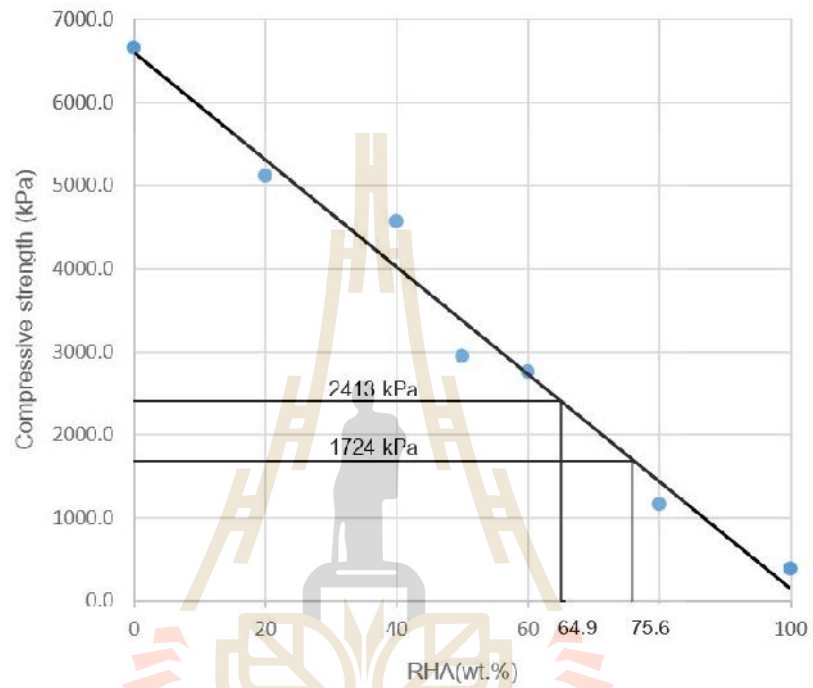
อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในสารตั้งต้นมีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ (Timakul et. al, 2015) พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ของ FA-Kaolin มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.65 ที่อุณหภูมิ 70°C ระยะเวลาบ่ม 96 ชั่วโมง (Chindaprasirt et. al, 2012) ได้เสนอว่าค่าอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์ FA-RHA ที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ 3.20-3.70 (Silva and Sagoe-Crentsil, 2008) เสนออัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้จีโอพอลิเมอร์ Metakaolin มีค่าสูงสุด ภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิ 40°C ระยะเวลา 72 ชั่วโมง มีค่าอยู่ระหว่าง 3.4-3.8

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในแต่ละอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

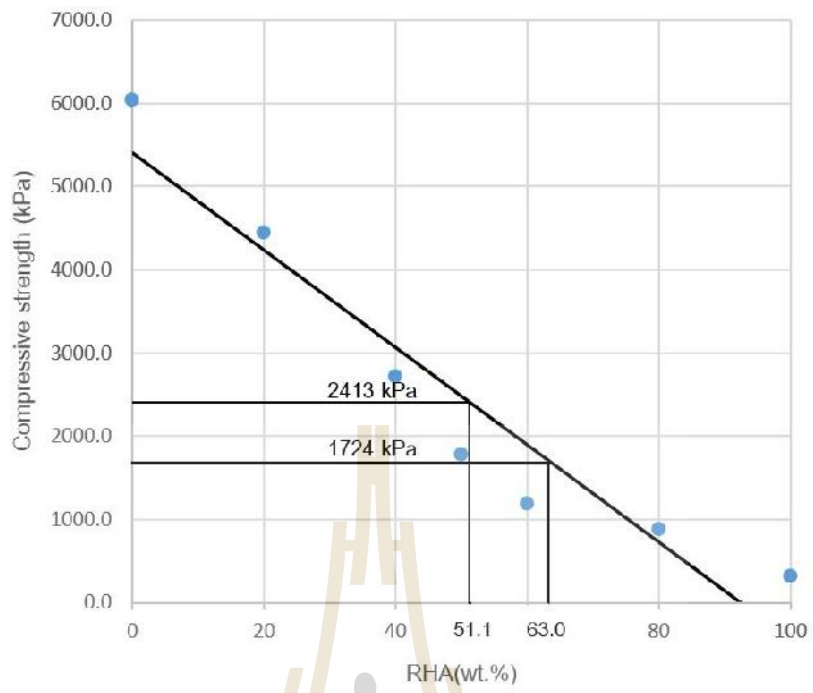
| FA (wt.%) | RHA (wt.%) | $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ |
|-----------|------------|--------------------------------------|
| 100 | 0 | 1.9 |
| 80 | 20 | 3.0 |
| 60 | 40 | 4.7 |
| 50 | 50 | 6.0 |
| 40 | 60 | 8.0 |
| 20 | 80 | 16.9 |
| 0 | 100 | 115.5 |

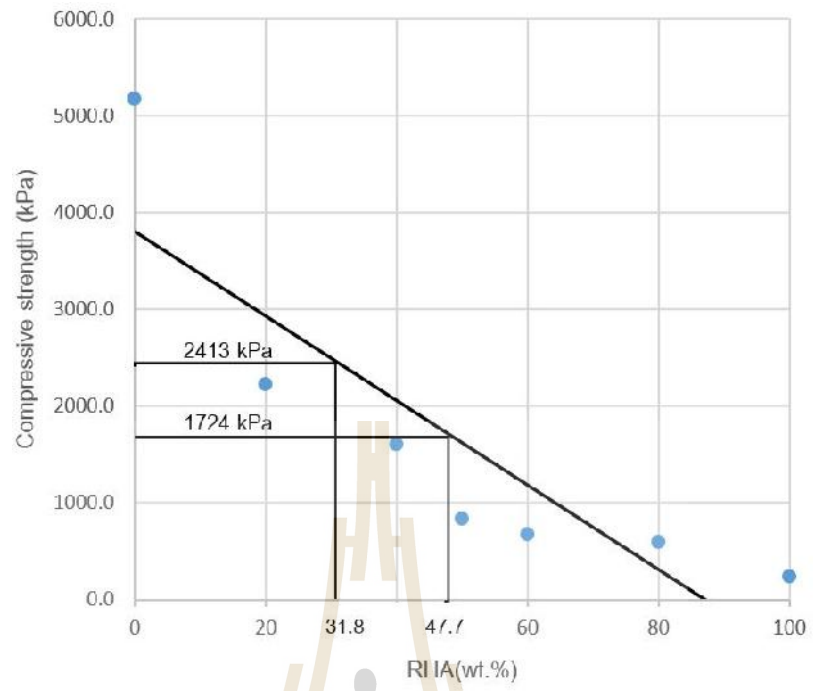
ตารางที่ 4.2 แสดงผลคำนวณอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อัตราส่วน FA/RHA ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณอัตราส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในเถ้าลอยและเถ้าแกลบแปรผันตามอัตราส่วนของ FA/RHA จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน FA/RHA ที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ FA/RHA = 100/0 ซึ่งมีค่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.9$ แตกต่างจากผลการศึกษาที่ผ่านมา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขนาดของเถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่ และทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยอิทธิพลของความละเอียดเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ของ (Hanjitsuwan et. al, 2013) ที่เสนอว่าความละเอียดของเถ้าลอยมีผลต่อกำลังรับแรงอัด แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้กำลังอัดของมวลรวมรีไซเคิลคอนกรีตมีค่าลดลงตามผลการศึกษาที่ผ่านมา งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นของจีโอพอลิเมอร์ เพื่อให้ได้กำลังอัดตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทาง





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง และศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Liquid Alkaline activator (L) และ อัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยและเถ้าแกลบต่อการพัฒนากำลังอัด และเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1.9 ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาที่ผ่านมาอาจเนื่องมาจากขนาดของ เถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่ ทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไร้เซชันต่ำ

4.2 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย (FA) ในอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ (FA/RHA) ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 ในอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุจะเพิ่มขึ้น

4.3 ในการปรับปรุงกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตซีเมนต์ที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท เถ้าแกลบสามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยในสารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ ได้สูงสุดร้อยละ 76.8 และ 87.1 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้จีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นในการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ผลการศึกษาสามารถนำมาขยายผลเพื่อที่จะนำวัสดุที่เหลือใช้อื่น ๆ ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีปริมาณอลูมินาและซิลิกาามาใช้ปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์แทนได้ เพื่อพัฒนาใช้เป็นวัสดุอย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคตได้

รายการอ้างอิง

- Sustainability Victoria. (2010). "Victorian recycling industries annual report 2008-2009." ISSN 1836-9902, Melbourne, VIC, Australia.
- A. Arulrajah, J. Piratheepan, M. M. Y. Ali, and M. W. Bo (2012), "Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 35, No. 5
- Gabr, A. and Cameron, D. (2012). "Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction." *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000447, 754-764.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M., and Bo, M. (2013). "Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications." *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652, 1077-1088.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., and Disfani, M. (2014). "Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000850, 349-357.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M., Bo, M., and Darmawan, S. (2014). "Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001148, 04014186.
- Arulrajah, A., Disfani, M., Haghghi, H., Mohammadinia, A., and Horpibulsuk, S. (2015). "Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends." *Construction and Building Materials*, 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.048, 146-155.
- C. Meyer (2009), The greening of the concrete industry, *Cement & Concrete Composites Res.* 31 601–605

- Davidovits, J. (1991). "Geopolymers: inorganic polymeric new materials." *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656.
- Palomo, A., Grutzeck, M., and Blance, M. T. (1999). "Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future." *Cement and Concrete Research*, 8, 1323-1329.
- Poon, C. S. and Chan, D., (2006), "Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushed Clay Brick as Unbound Road Sub-Base," *Constr. Building Mater.*, Vol. 20, pp. 578–585.
- Tam, V. W. Y. and Tam, C. M., (2007), "Crushed Aggregates Production from Centralized Combined and Individual Waste Sources in Hong Kong," *J. Constr. Building Mater.*, Vol. 21, pp. 879–886.
- Gomez-Soberon, J. M. V., (2002), "Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate: An Experimental Study," *Int. J. Cement Concrete Res.*, Vol. 32, pp.1301–1311.
- Poon, C. S. and Chan, D., (2006), "Paving Blocks Made with Recycled Concrete Aggregate and Crushed Clay Brick," *Constr. Building Mater.*, Vol. 20, pp. 569–577.
- Courard, L., Michel, F., and Delhez, P., (2010), "Use of Concrete Road Recycled Aggregates for Roller Compacted Concrete," *J. Constr. Building Mater.*, Vol. 24, pp. 390–395.
- Melbouci, B. (2009). "Compaction and shearing behavior study of recycled aggregates." *Constr. Build. Mater.*, 23(8), 2723–2730.
- USEPA. <http://www.epa.gov/coalash>
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U.,(2009), "Comparative study on characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, vol. 29, pp.539-543.
- Malhotra, V. M. (1999). "Making concrete "Greener" with fly ash." *ACI Concrete International*, 21(5), 61-66.
- Malhotra, V. M. (2002). "High-performance-volume fly ash concrete." *ACI Concrete International*, 24(7), 1-5.
- ACAA – American Coal Ash Association (2003). "Fly ash facts for highway engineers." Aurora, USA.
- Malhotra, V. M. and Ramezani-pour, A. A. (1994). "Fly Ash in Concrete." Canada Center for Mineral and Energy Technology (CANMET), Canada.

- ASTM – American Society for Testing and Materials (2005). Annual Book of ASTM Standards, C 618 – 05.
- Naiya, T. K., Bhattacharya, A. K., Mandal, S., and Das, S. K. (2009). “The Sorption of Lead(II) Ions on Rice Husk Ash.” *Journal of Hazardous Materials*, 163, 1254-1264.
- Costa, H. M., Visconte, L. L. Y., Nunes, R. C. R., and Furtado, C. R. G. (1999). “The effect of coupling agent and chemical treatment on rice husk ash – filled natural rubber composites.” *Journal of Applied Polymer Science*, 76(7), 1019-1027.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2002), Annual Book of ASTM Standards, D 422 – 63.
- AASHTO (2002), Standard Specifications for Highway and Bridge, 7th edition. Washington D.C., American Association of state Highway and Transportation Officials.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2007), Annual Book of ASTM Standards, D 1633 – 00.
- Davidovits, J. (2011). “Geopolymer chemistry and applications.” Geopolymer Institute, 3rd edition, France.
- Davidovits, J. (2010). “World-wide Increase in Geopolymer Research.”
<http://www.geopolymer.org/science/world-wide-increase-in-geopolymer-research/>
- Davidovits, J. (1988). “Geopolymer chemistry and properties.” Geopolymer 88, First European Conference on Soft Mineralogy, Compiègne, France, 1, 25-48.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., and Van Deventer, J. S. J. (2005). “Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties.” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58.
- Xu, H. (2002). “Geopolymerization of Aluminosilicate Minerals.” PhD thesis, University of Melbourne.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., and Chen, Y. (2009). “Geopolymerization Process of Alkali-Metakaolinite Characterized by Isothermal Calrimetry.” *Thermochimica Acta*, 493, 49-54.

- Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T. and Chindaprasirt, P., 2013, "Influence of Fineness of High Calcium Fly Ash on Properties of Geopolymer Paste," *KMUTT Research and Development*, 36, pp. 399-408.
- Silva, P.D. and Sagoe-Crentsil, K., 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, pp. 39-46.
- Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K. and 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, pp. 4876-4883.
- Timakul, P., Thanaphatwetphisit, K. and Aungkavattana, P., 2015, "Effect of Silica to Alumina Ratio on the Compressive Strength of Class C Fly Ash-Based Geopolymers," *Key Engineering Materials*, 659, pp. 80-84.
- DHS., 2013, "Standard for Cement Modified Crushed Rock Base," DH-S 203/2556, Department of Highways, Thailand.
- SDR., 2013, "Standard for Soil Cement Base," SDR 244-2556, Department of Rural Roads, Thailand.

ประวัติผู้เขียน

นายธีรพฤทธิ์ พลดี เกิดเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านเก่าปอแดง ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนปึกธงชัยประชานิรมิต จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี เกียรตินิยมอันดับหนึ่งในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2555 จากนั้นได้เข้าทำงานที่ บริษัท ชินเท็ค คอนสตรัคชั่น จำกัด(มหาชน) ในตำแหน่ง วิศวกรสนาม (Site Engineer)

ปี พ.ศ. 2556 ได้เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา) และมีบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับชาติจำนวน 1 ฉบับดังนี้

1) วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีที่ 40 ฉบับที่ 4 ตุลาคม - ธันวาคม 2560 ในหัวข้อ กำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไร้เหล็กที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเส้นใยและเส้นใยเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง