

กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย  
จีโอโพลีเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตผง



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2560

กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย  
จีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตผง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ

(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จุฬารักษ์ เขตบุญไสย : กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตผง (STRENGTH OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT STABILIZED WITH FLY ASH GEOPOLYMER BY USING SODIUM SILICATE POWDER AS ACTIVATOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

ปัจจุบันได้เริ่มนำวัสดุชั้นพื้นทางเดิมกลับมาใช้ในการกีดพื้นทางเดิมแล้วผสมด้วยซีเมนต์หรือเรียกว่า pavement recycling เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุ อย่างไรก็ตามการก่อสร้างโดยใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพผสมซีเมนต์ในบางสายทางเกิดการแตกร้าวบนผิวทางเมื่อเปิดการจราจรได้ไม่นาน เนื่องจากการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ไม่เหมาะสม ประสิทธิภาพของการควบคุมงานและคุณภาพของวัสดุในขณะที่ก่อสร้าง ความแข็งแรงและความคงทน รวมทั้งวิธีการออกแบบโครงสร้างทางสำหรับดินซีเมนต์ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้มีจุดประสงค์การศึกษาอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอย (FA) จีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตผงต่อกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement , RAP) โดยได้กำหนดความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ที่ 8 โมลล์ และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อโซเดียมซิลิเกตผง 5:10,5:20,10:10,10:20 โดยคิดเป็นร้อยละโดยมวล และระยะเวลาบ่มที่กำหนดที่ 7,14 และ 28 วัน เพื่อหาอัตราส่วนเถ้าลอยต่อโซเดียมซิลิเกตผงที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังอัดได้สูงสุด โดยเทียบตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

ผลการศึกษา พบว่า ภายใต้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสม มีค่ามากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโซเดียมซิลิเกต ซึ่งส่งผลให้ปริมาณความชื้นสูงสุดมากขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยยังมีผลทำให้ความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มลดลง ในส่วนค่ากำลังอัดพบว่าค่ากำลังแปรผันตรงตามระยะเวลาการบ่ม กำลังอัดสัดส่วนที่ผ่านการทดสอบ มี 3 สัดส่วน คือ สัดส่วน (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5:5,10:10, \text{และ} 10:5$ ) ให้กำลังอัดสูงกว่า 17.5 ksc และ 24.5 ksc และค่ากำลังไม่ผ่าน 1 สัดส่วน คือ (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5:10$ )

นอกจากนี้ผลการศึกษาตัวอย่างที่สัดส่วน (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10:5$ ) ที่ปริมาณความชื้นสูงสุดมีการพัฒนากำลังที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 วันถึง 28 วัน สูงกว่ามาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ผลจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า โซเดียมซิลิเกตผงสามารถให้ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มีความเข้มข้นเพียงพอให้เกิดการชะละลายเพื่อนำเอาซิลิกาและอลูมินา มาสร้างปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ที่มากเพียงพอจนสามารถพัฒนากำลังได้ โดยสัดส่วนไม่เกิดร้อยละ 10 จึงจะเหมาะสม

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

JUTAKORN KHETBOONSAI : STRENGTH OF RECLAIMED ASPHALT  
PAVEMENT STABILIZED WITH FLY ASH GEOPOLYMER BY USING  
SODIUM SILICATE POWDER AS ACTIVATOR. ADVISOR : ASSOC.  
PROF. AVIRUT CHINULKIJNIWAT, Ph.D.

The pavement recycling is generally used to solve a shortage of constructing materials. Nevertheless, in some cases using mixed stabilized materials with cement in construction causes damage to pavements which shorten than their design lives. This is because of inappropriate cement content, inefficient inspection, quality of materials, durability, strength and also structural soil-cement designs. This thesis aims to illustrate an effectiveness of using fly ash geopolymer (FA) by mixing sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) powder with a constant rate of sodium hydroxide (NaOH) solution, 8 moles, but the proportion of mixing FA and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  were used in four different ratios; 5:10, 5:20, 10:10 and 10:20 in different curing times; 7 days, 14 days and 28 days, respectively. It is due to finding an appropriate ratio between FA and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  which can provide the maximum level of compressive strength regarding the rural road department's standard.

The results revealed that at an over standard of compressive strength, the maximum dry unit weight of the mixed material increased with an increase of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  as well. Apart from that, it also affected on the increase a maximum of humidity level but when FA were increased, dry density was trended to decrease. Considering to the compressive strength, it was found that it directly depended on the curing times at three acceptable ratios of FA :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ; 5:5, 10:10 and 10:5 (unacceptable ratio was 5:10) with the highest compressive strength at 17.5 and 24.5 kilogram per square centimetres (ksc). Additionally, it was found that at a FA: $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ratio of 10:5 the maximum of humidity level increased at the curing time between 7 and 28 days, it was higher than rural road department's standard. The outcome of this thesis can be concluded that  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  is able to provide efficient alkaline activator for leaching and taking silica and alumina to polymerization reaction which is sufficient to generate compressive strength with appropriate maximum ratio of The proportion of 10% will be appropriate.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature \_\_\_\_\_  
Academic Year 2017 Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาโครงการมหابัณฑิตครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และแนะนำช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการอำนวยความสะดวกในการดำเนินการศึกษาค้นคว้านี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข หัวหน้าหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ที่ช่วยชี้แนะเกี่ยวกับการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้สอนรายวิชา ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการดำเนินการค้นคว้าการศึกษาครั้งนี้

คุณชาญยุทธ กองเกิด ผู้อำนวยการส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์สำนักทางหลวงชนบทที่ 3 ที่กรุณาตรวจสอบให้คำแนะนำและชี้แนะเกี่ยวกับการใช้วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบในครั้งนี้

และผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ท้ายนี้คุณงามความดีที่เกิดจากโครงการมหابัณฑิตเล่มนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ นายเจษฎา เขตบุญไสย ผู้เป็นบิดา และนางระเบียบ เขตบุญไสย ผู้เป็นมารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และเป็นกำลังใจในการศึกษาครั้งนี้ตลอดมาและบุคคลต่าง ๆ ที่กล่าวถึงไม่หมด ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้แก่ผู้วิจัย จนกระทั่งโครงการมหابัณฑิตฉบับนี้สำเร็จ

จุฬารัตน์ เขตบุญไสย

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ค    |
| สารบัญ.....   | ง    |
| สารบัญตาราง.....  | ช    |
| สารบัญรูปภาพ.....   | ฉ    |
| บทที่   |      |
| 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                           | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                                  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....  | 2    |
| 1.3.1 แหล่งวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....                             | 2    |
| 1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)..... | 3    |
| 1.3.3 สัดส่วนผสมของวัสดุ.....                                     | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                | 3    |
| 2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                    | 4    |
| 2.1 บทนำ.....   | 4    |
| 2.2 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า.....                                | 4    |
| 2.3 เถ้าลอย.....  | 5    |
| 2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย.....   | 5    |
| 2.3.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย.....          | 6    |
| 2.4 จีโอโพลิเมอร์.....  | 8    |
| 2.4.1 ปฏิกริยาการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์.....                        | 10   |
| 2.5 สารเร่งปฏิกิริยา (ALKALINE ACTIVATOR).....                    | 14   |
| 2.5.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์.....                                      | 14   |
| 2.5.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต.....                                 | 14   |
| 2.6 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก.....                           | 14   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.7   | การทดสอบหาคูณสมบัติของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า.....  | 16 |
| 2.7.1 | การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis).....   | 16 |
| 2.7.2 | การหาค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits).....  | 16 |
| 2.7.3 | วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน<br>(modified compaction test) มทข.(ท) 501.2- 2545.....                                      | 18 |
| 2.7.4 | วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า C.B.R. (California Bearing Ratio)<br>ทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทข.(ท) 501.3-2545.....                 | 21 |
| 2.7.5 | การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว<br>(Unconfined Compressive Strength, UCS) มทข.(ท) 303-2545.....                                       | 22 |
| 2.8   | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 23 |
| 3     | วิธีดำเนินการศึกษา.....   | 27 |
| 3.1   | การเก็บตัวอย่าง.....  | 27 |
| 3.2   | การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ.....  | 27 |
| 3.3   | การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....   | 28 |
| 3.4   | การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว<br>(UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH, UCS).....  | 33 |
| 4     | การศึกษาผลทดลองและการวิจารณ์ผล.....   | 35 |
| 4.1   | คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ.....  | 35 |
| 4.1.1 | วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล.....   | 35 |
| 4.1.2 | เถ้าลอย (Fly Ash).....  | 36 |
| 4.2   | ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....   | 38 |
| 4.3   | กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว<br>(UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH, UCS).....  | 40 |
| 5     | สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....   | 41 |
| 5.1   | อิทธิพลของการบดอัด อัตราส่วน ปริมาณเถ้าลอยและโซเดียมซิลิเกตผงที่มี<br>ผลกระทบต่อหน่วย น้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม..... | 41 |
| 5.2   | กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์<br>โดยโซเดียมซิลิเกตผง.....                               | 41 |
| 5.3   | กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์<br>โดยโซเดียมซิลิเกตเหลว.....                             | 42 |
| 5.4   | ข้อเสนอแนะ.....   | 42 |

เอกสารอ้างอิง..... 43

ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ..... 46

ภาคผนวก ข ข้อมูลทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST..... 48

ภาคผนวก ค ตารางกำลังอัดแกนเดียว  
 (UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTHS, UCS)..... 51

ประวัติผู้เขียน..... 57





## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C168.....  | 6    |
| 2.2 ขนาดผลของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก.....   | 15   |
| 2.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้และข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน<br>และแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....   | 20   |
| 2.4 แรงมาตรฐาน (Standard Load) ในการคำนวณหาค่า CBR.....   | 21   |
| 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต<br>รีไซเคิล (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP).....                              | 32   |
| 4.2 ขนาดผลของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลใช้ในงานวิจัย.....   | 36   |
| 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย.....  | 37   |
| ก.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ถนนหลวงหมายเลข<br>331 เขต ต.บ่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี.....  | 47   |
| ข.1 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST<br>a.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M).....                                  | 49   |
| ข.2 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST<br>b.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....                                   | 49   |
| ข.3 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST<br>c.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M).....                                 | 50   |
| ข.4 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST<br>d.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....                                  | 50   |
| ค.1 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน<br>a.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M).....  | 52   |
| ค.2 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน<br>a.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)..... | 52   |
| ค.3 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน<br>a.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)..... | 52   |
| ค.4 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน<br>b.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....   | 53   |

|      |   |    |
|------|---|----|
| ค.5  | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน                               |    |
|      | b.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....                             | 53 |
| ค.6  | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน                               |    |
|      | b.) RAP + FA(5%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....                             | 53 |
| ค.7  | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน                                |    |
|      | c.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M).....                           | 54 |
| ค.8  | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน                               |    |
|      | c.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M).....                           | 54 |
| ค.9  | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน                               |    |
|      | c.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M).....                           | 54 |
| ค.10 | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน                                |    |
|      | d.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....                            | 55 |
| ค.11 | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน                               |    |
|      | d.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....                            | 55 |
| ค.12 | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน                               |    |
|      | d.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M).....                            | 55 |
| ค.13 | กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน                                |    |
|      | d.) RAP + FA(10%) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M) (โดยใช้โซเดียมซิลิเกตเหลว)..... | 56 |

## สารบัญรูปลูกภาพ

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือพอลิไซอะเลต (ที่มา : Jimenez, et al. (2004)).....   | 9    |
| 2.2 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันของจีโอโพลิเมอร์ (ที่มา : Jimenez, et al. (2004)).....                                   | 9    |
| 2.3 ผิวของถ้ำลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ 10 นาที (Rattansak & Chindaprasirt, 2009, 2014; Rattanasak, Pankhet, & Chindaprasirt, 2011).... | 11   |
| 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์(Davidovits,1991).....  | 12   |
| 2.5 แบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาของ Activator กับ Fly ash (Fernández-Jiménez et al., 2005).....   | 13   |
| 2.6 แบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Shi et al.,2011).....  | 14   |
| 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าปริมาณความชื้นตารางที่.....  | 19   |
| 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเกาะของดินกับค่ากำลังอัดแกนเดียว.....   | 22   |
| 3.1 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีเก่าจากหลวงหมายเลข 331 เขต ต.บ่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี.....  | 27   |
| 3.2 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP).....  | 28   |
| 3.3 การทดสอบขนาดเม็ดวัสดุ.....  | 28   |
| 3.4 การทดสอบ Atterberg limits.....  | 29   |
| 3.5 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test).....   | 29   |
| 3.6 การทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R).....  | 30   |
| 3.7 การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS).....   | 30   |
| 3.8 ลักษณะตัวอย่างแต่ละสัดส่วน.....   | 31   |
| 3.9 สัดส่วนผสมวัสดุปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า.....   | 32   |
| 3.10 การผสมวัสดุปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า.....  | 33   |
| 3.11 การทดสอบการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS).....  | 33   |
| 3.12 ลักษณะแนวการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ.....  | 34   |
| 4.1 ภาพถ่าย SEM ของถ้ำลอย (FA).....   | 37   |
| 4.2 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....  | 38   |

4.3 กราฟการบดอัดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....39

4.4 กราฟกำลังอัดแบบแกนเดียวของวัสดุตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ.....40



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการก่อสร้างงานทางนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีมาตรฐานและคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดงานทาง ซึ่งในปัจจุบันวัสดุโครงสร้างทางที่มีคุณภาพตามข้อกำหนดในแต่ละภูมิภาคนั้นเริ่มขาดแคลน และต้องมีการขนส่งวัสดุทางภูมิภาคอื่นมาใช้ในการก่อสร้างและซ่อมแซมทางในพื้นที่ดังกล่าว ทำให้เป็นการเพิ่มต้นทุนในการก่อสร้างและการขนส่ง และยังมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของชั้นทางโดยตรง และก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นการนำวัสดุท้องถิ่นมาใช้โดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้นสามารถช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างลดปัญหาความเสียหายของโครงสร้างทางและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ สำหรับประเทศไทยนั้น กรมทางหลวงได้นำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางด้วยซีเมนต์ มาใช้เป็นระยะเวลาอันยาวนานกว่า 30 ปีสำหรับงานชั้นพื้นทาง(base)และรองพื้นทาง(subbase) และในปัจจุบันได้เริ่มนำวัสดุชั้นพื้นทางเดิมกลับมาใช้ในการกัดพื้นทางเดิมแล้วผสมด้วยซีเมนต์ หรือเรียกว่า pavement recycling เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุดังกล่าว อย่างไรก็ตามการก่อสร้างโดยใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพผสมซีเมนต์ในบางสายทางเกิดการแตกร้าวบนผิวทางเมื่อเปิดการจราจรได้ไม่นานจากการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ไม่เหมาะสม ประสิทธิภาพของการควบคุมงานและคุณภาพของวัสดุในขณะก่อสร้าง ความแข็งแรงและความคงทน รวมทั้งวิธีการออกแบบโครงสร้างทางสำหรับดินซีเมนต์

ปัจจุบันเทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติในงานก่อสร้างทาง ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อขจัดปัญหาการขาดแคลนวัสดุ วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้ปูนซีเมนต์ ผสมกับวัสดุธรรมชาติและบดอัดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม (กำลังต้านทานแรงเฉือนการอัดตัว การบวมตัวและการหดตัว) อย่างไรก็ตาม การได้มาซึ่งหินปูนซึ่งเป็นวัสดุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาด้านการทำลายธรรมชาติสิ่งแวดล้อมจากการระเบิดแหล่งหิน และกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดปัญหา โลกร้อนการผลิตปูนซีเมนต์ปริมาณ 1 ตันจะต้องปล่อย ก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์) ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณ 1 ตัน (Davidovits et al.2002)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นสารเชื่อมประสานชนิดใหม่ของโลกปัจจุบัน ซึ่งเป็นส่วนผสมของสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) และวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมิน่าเป็นองค์ประกอบหลักสารกระตุ้น สารกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution, NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) วัสดุจีโอโพลิ

เมอร์นี้จัดเป็น Green material ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก่อให้เกิด (Greenhouse effect) จีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงในการเตรียมตัวอย่างปลดปล่อย CO<sub>2</sub> ต่ำ จีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดและความคงทนที่เหนือกว่าปูนซีเมนต์ (Sukmak et al.2014)

Davidovits (1970) ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ซึ่งมีองค์ประกอบของอลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลหรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ วัสดุที่มีปริมาณอลูมินาและซิลิกามากและใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ตะกรันเหล็ก (Slag) เป็นต้น (Palomo et al., 1999) ซึ่งล้วนแต่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรม และยังมีซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume, SF) ที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเช่นกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอย (FA) จีโอโพลิเมอร์โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผงต่อกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง เปรียบเทียบกำลังอัดด้วยวิธีการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ระยะเวลาในการบ่ม ปริมาณสัดส่วนผสม และผลการวิเคราะห์ด้านต้นทุนระหว่างมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่นำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผง แต่ละสัดส่วนจะเสนอในส่วนท้ายของงานวิจัย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผงมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเน้นศึกษาด้านกำลังอัดของวัสดุสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

### 1.3.1 แหล่งวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) จากถนนหลวงหมายเลข 331 เขต ต.ป่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี
- เถ้าลอย (FA) ชนิด F จากโรงไฟฟ้ามาบตาพุด จังหวัดระยอง
- โซเดียมซิลิเกตผง (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)

### 1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

ทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพ

- ทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.8-2545
- ทดลองหาขีดจำกัด Liquid Limit (L.L) ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.5-2545 และ ทดลองหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plasticity Index (P.I.) ตามมาตรฐาน มทช. (ท) 501.6-2545

ทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

- ทดสอบการบดอัด (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน มทช. (ท) 501.2-2545
- ทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R) ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.3-2545
- ทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 303-2545

### 1.3.3 สัดส่วนผสมของวัสดุ

สัดส่วนระหว่างมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย(FA) จีโพลิเมอร์ โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผง ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) คิดเป็นร้อยละโดยมวลและมีสัดส่วนดังนี้

- a.) RAP + FA(5%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (10%) + NaOH (8M)
- b.) RAP + FA(5%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (5%) + NaOH (8M)
- c.) RAP + FA(10%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (10%) + NaOH (8M)
- d.) RAP + FA(10%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (5%) + NaOH (8M)

สารเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activators) เป็นส่วนผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้สัดส่วนคงที่ 8 โมล และสำหรับทุกอัตราส่วนการผสมใช้ระยะเวลาในการบ่มที่ 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน ให้ได้กำลังอัดเท่ากับ 17.5 ksc. และ 24.5 ksc.

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบกำลังอัดผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย จีโพลิเมอร์ โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.4.2 ทราบถึงอิทธิพลของโซเดียมซิลิเกตผงที่มีผลต่อกำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ปัจจุบัน การก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานทางถนนได้เพิ่มปริมาณมากขึ้น งบประมาณด้านการก่อสร้างและบำรุงรักษาถนนก็เพิ่มขึ้นในแต่ละปี ในขณะเดียวกัน ปริมาณการจราจร น้ำหนักบรรทุก ก็เพิ่มขึ้นมากเช่นกัน ซึ่งเป็นผลจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ และเพื่อเป็นการรองรับการพัฒนาทางด้านคมนาคมขนส่งและโลจิสติกส์ เศรษฐกิจ สังคม และความมั่นคงของประเทศ โดยถนนผิวจราจรแบบยืดหยุ่น หรือถนนลาดยาง (Flexible Pavement) เป็นที่นิยมใช้ในการก่อสร้างตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยหน่วยงานหลักอย่างกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท มีถนนลาดยางในความรับผิดชอบกว่า 61,000 กิโลเมตร (88.8%) และ 43,000 กิโลเมตร (90.6%) ตามลำดับ เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องค่าก่อสร้างต่ำกว่า บำรุงรักษาง่าย และขั้บขี่สบายกว่า เมื่อเทียบกับถนนแบบคอนกรีต อย่างไรก็ตาม อายุการใช้งานของถนนลาดยางจะสั้นกว่า เมื่อใช้งานมาระยะเวลาหนึ่ง ย่อมเกิดความเสียหายตามอายุการใช้งาน ดังนั้น จึงต้องมีการซ่อมแซมบำรุงรักษาหรือรีอิวทางลาดยางเดิมออก เพื่อทำผิวจราจรใหม่ ให้มีสภาพการใช้งานที่ดีอยู่เสมอ

#### 2.2 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ สามารถทำได้สองวิธี ได้แก่วิธีที่นำเอาวัสดุไปผสมใหม่ที่โรงงานผลิต (In-Plant Recycling) และวิธีการหมุนเวียนวัสดุแบบในที่ (In-Place Recycling) ซึ่งระบบ In-Place Recycling นั้นมีข้อดีอันสำคัญคือสามารถรีอิววัสดุชั้นทางและ ทำการปรับปรุง/ผสมใหม่ ในที่ก่อสร้างได้ทันที ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุในงาน In-Place Recycling ของกรมทางหลวงนั้น โดยทั่วไปจะใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมให้คุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานจากการสำรวจพบว่าการใช้ซีเมนต์ผสมเพิ่มในการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางแบบในที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกับถนนที่มีความหนาของชั้นผิวทางแอสฟัลต์ไม่มาก (ประมาณ 5-10 ซม.) แต่พบว่าการทำ In-Place Recycling โดยใช้ซีเมนต์ผสมเพิ่มนั้น ไม่เหมาะสมกับโครงการถนนที่มีชั้นผิวทางแอสฟัลต์หนา (15 ซม.หรือมากกว่า) เนื่องจากต้องใช้ซีเมนต์ในสัดส่วนที่มากจนอาจทำให้เกิดการหดตัวของซีเมนต์สูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการแตกร้าวในวัสดุที่หมุนเวียน (Shrinkage Cracks) ซึ่งที่ผ่าน ได้มีความพยายามแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการชูดไส (Mill) ผิวทางเดิมออกเพื่อลดความหนาของชั้นแอสฟัลต์หรือปูเพิ่มไว้ที่ส่วนบนของชั้นแอสฟัลต์ซึ่งทั้งสองวิธีทำให้ต้องเพิ่มขึ้นตอนในการก่อสร้างและขัดแย้งกับแนวทางในการนำ



วัสดุเดิมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งผิวทางที่นำมาปรับปรุงคุณภาพ เรียกว่า Reclaimed Asphalt Pavement หรือ RAP

วัสดุ RAP ประกอบด้วยวัสดุมวลรวมและยางแอสฟัลต์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น เป็นมวลรวมเพื่อผสมกับยางแอสฟัลต์ใหม่ในกระบวนการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต หรือ อาจนำกลับมาใช้เป็นชั้นพื้นทาง การนำ RAP มาใช้ในงานวิศวกรรมโดยตรงอาจประสบปัญหา เนื่องจาก RAP บดอัดได้ไม่ดีและมีกำลังอัดต่ำแม้จะปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์แล้วก็ตาม เนื่องจากขนาดผลึกไม่ดีและยางแอสฟัลต์ที่มีอยู่ในส่วนผสม อย่างไรก็ตาม ข้อดีของ RAP คือ มีวัสดุคัดเลือกชั้นดี เช่น หินคลุก เป็นส่วนผสมหลัก

### 2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash, FA) เป็นเถ้าหรือวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกกันว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้

#### 2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- 1.) ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มี ปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) ต่ำ
- 2.) ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็น ส่วนใหญ่ มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยชนิดนี้ เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้วยังมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย

ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C168

| ข้อกำหนดทางเคมี   | ชนิด |      |
|---|------|------|
|   | F    | C    |
| SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> อย่างต่ำ, ร้อยละ | 70.0 | 50.0 |
| SO <sub>3</sub> อย่างสูง, ร้อยละ  | 5.0  | 5.0  |
| ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ  | 3.0  | 3.0  |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงสุด, ร้อยละ   | 6.0  | 6.0  |
| ปริมาณอัลคาไลสูงสูงเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O, ร้อยละ   | 1.5  | 1.5  |

มีการทดลองนำเถ้าลอยมาผสมกับน้ำพบว่า จะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้มีสมบัติการเชื่อมประสาน (Cementitious) จึงมีแนวคิดที่จะใช้เถ้าลอยในอุตสาหกรรม ซีเมนต์และเนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพคล้าย ปูนซีเมนต์ กล่าวคือ มี SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> รวมกันในปริมาณที่เหมาะสม มีความละเอียดสูง ทำปฏิกิริยากับต่าง Ca(OH)<sub>2</sub> ได้ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตเช่นเดียวกับ ปูนซีเมนต์ แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



ดังนั้นจึงสามารถนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตได้โดยการนำมาผสมในคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นการลดการใช้พลังงานและลดปัญหาสภาวะโลกร้อน เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมาก การนำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับเป็นการลดการใช้พลังงานลดการใช้วัตถุดิบลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และลดต้นทุนการผลิตรวมทั้งเป็นการกำจัดเถ้าลอย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งอีกด้วย

### 2.3.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสม

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

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการเผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาอลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอนอกจากนี้ ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) กำหนดไม่ให้เกินร้อยละ 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดระยะเวลาก่อนตัวได้และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วยนอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มากการควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$  Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-Aggregate ขึ้นได้ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาจะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

## 2.4 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymers) หรือเรียกอีกอย่างว่า พอลิไซอะเลต (Polysialate) เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Davidovits, J., 1999) ทำให้สามารถเกิดการก่อตัว แข็งตัว และให้กำลังอัดได้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างต่างๆ จะทำให้เราได้วัสดุประสานที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมดเลยทีเดียว และในอนาคตข้างหน้า คาดการณ์ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างต่างๆ

โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ของสารตั้งต้น โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.3



โดย

M คือ ธาตุอัลคาไลน์

- คือ การยึดเกาะพันธะ (bond)

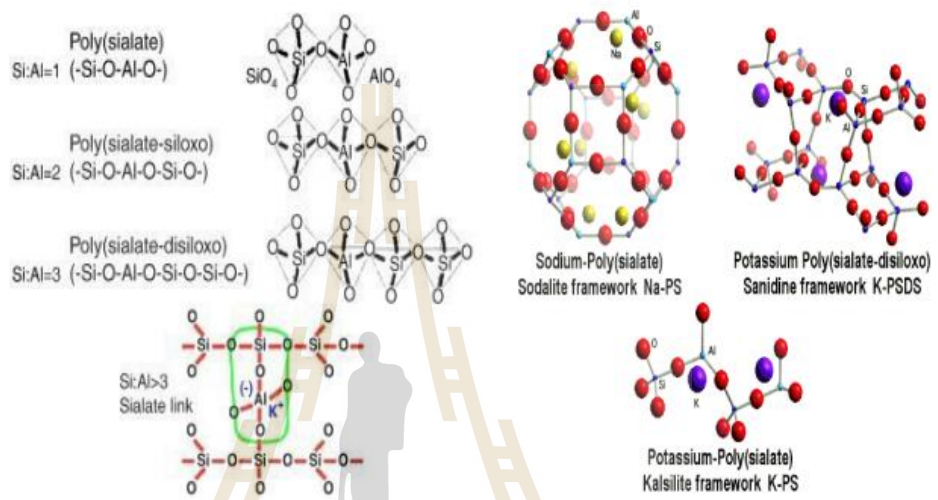
Z คือ จำนวนโมเลกุลของ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

n คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่  
หรือ Degree of Polymerization

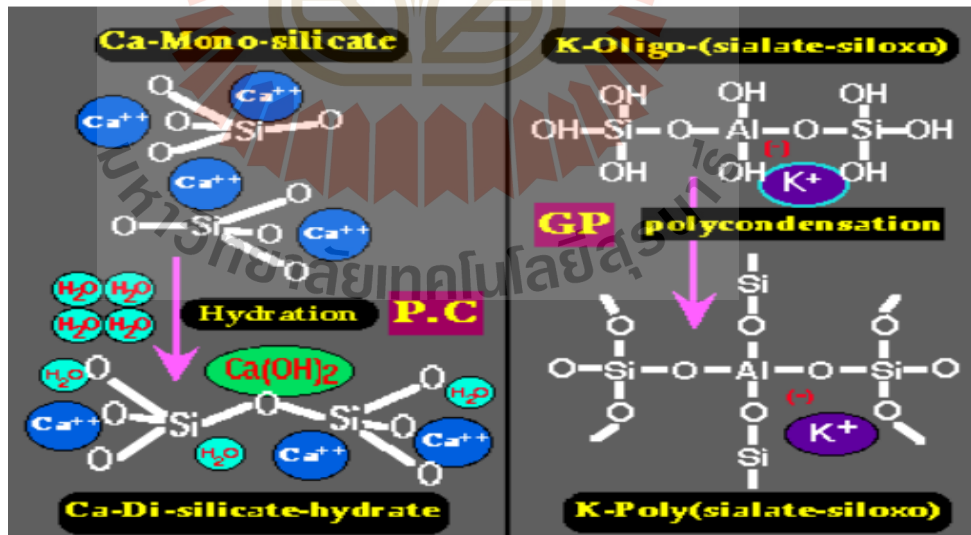
w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสานในลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่

หน้า (Tetrahedral) ของ  $[AlO_4]^-$  และ  $[SiO_4]^+$  โดยมีโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม ( $Na^+$ ) หรือ โพแทสเซียม ( $K^+$ ) ในการทำประจุสมดุล ณ ตำแหน่งของ  $[AlO_4]^-$  ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งในการสังเคราะห์ จีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้การใช้พลังงานลดลงไปมากและต้นทุนในการผลิตต่ำลงซึ่งการใช้พลังงานลดลงจะนำไปสู่การลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนอีกด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือพอลิไซอะเลต (ที่มา : Jimenez, et al. (2004))



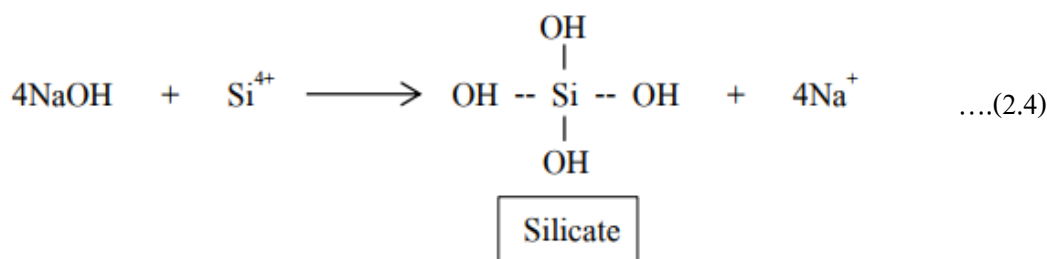
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันของ จีโอโพลิเมอร์ (ที่มา : Jimenez, et al. (2004))

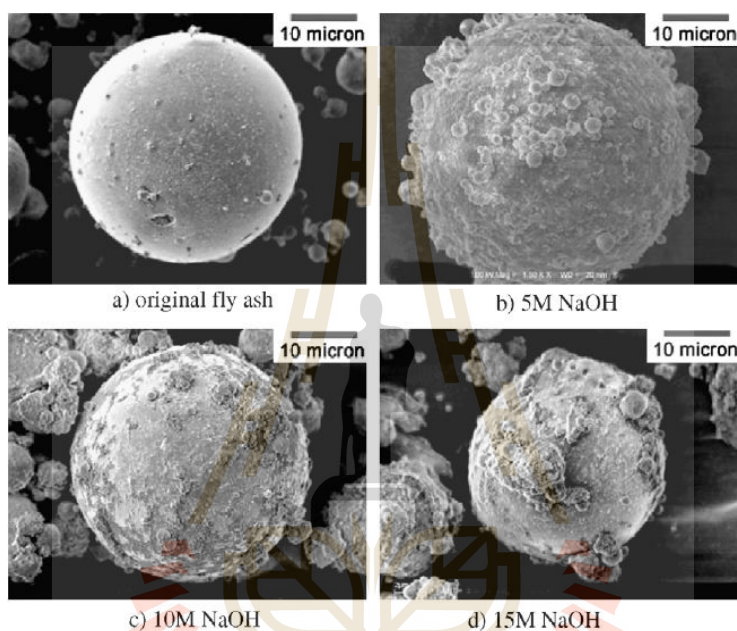
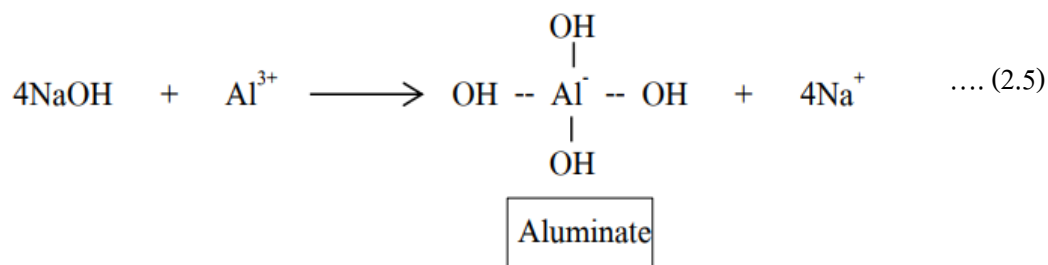
จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะประกอบกันด้วยสารเชื่อมประสานของสารประกอบ ที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และ แคลเซียมออกไซด์ แต่การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ซึ่งใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และ อะลูมิเนียม (Al) โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น โมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.2

#### 2.4.1 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

สารจีโอพอลิเมอร์เป็น สารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มี ส่วนประกอบเป็นสาร ลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) และสารกึ่งผลึก (Semi-crystalline) สารตั้งต้น ในการทำจีโอพอลิเมอร์ จึงเป็นสารประกอบที่มีซิลิกาและอะลูมินาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาของ จีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน (Jimenez, et al., 2004) คือ

- 1) การชะละลาย (Dissolution) เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับ สารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่าง ๆ ออกมา โดยอะลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมามากเนื่องจากเป็นสารหลัก ได้เป็นหน่วยพรีซิเดียมสามเหลี่ยม ด้านเท่าสี่ด้านของ Si และ Al ที่เกิด โคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล (Jimenez, et al., 2004) สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 (Hench, 1998)

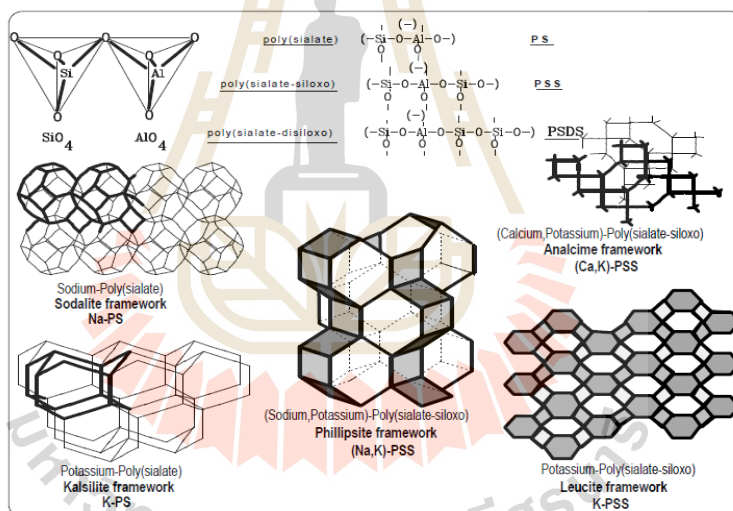
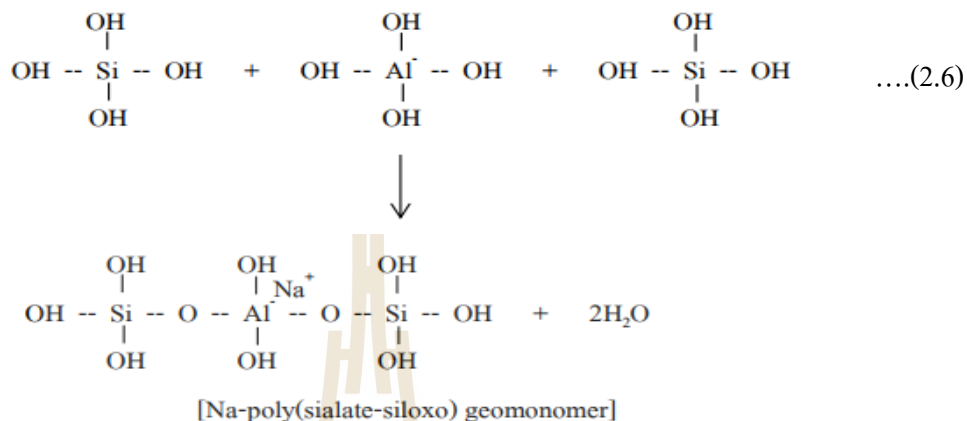




รูปที่ 2.3 ผิวของเถ้าลอยเมื่อชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ 10 นาที (Rattanasak & Chindaprasirt, 2009, 2014; Rattanasak, Pankhet, & Chindaprasirt, 2011)

- 2) การทำปฏิกิริยาควมน้ำและลูกโซ่ (Condensation-polymerization) ในปฏิกิริยาการควมน้ำจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้นกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-stable) ที่มีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยพีรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สามและสี่หน่วย ได้แก่ พอลิไซอะเลต (Polysialate, PS) พอลิไซอะเลตไซลอคโซ (Polysialate

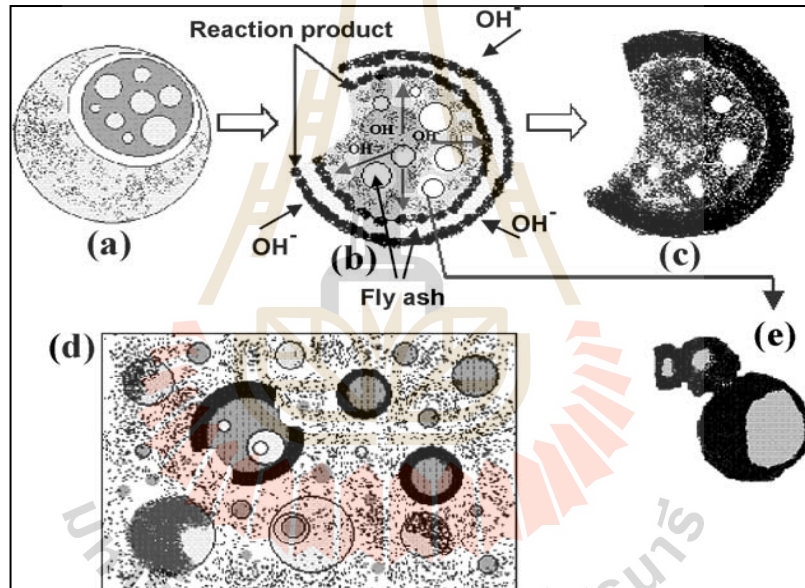
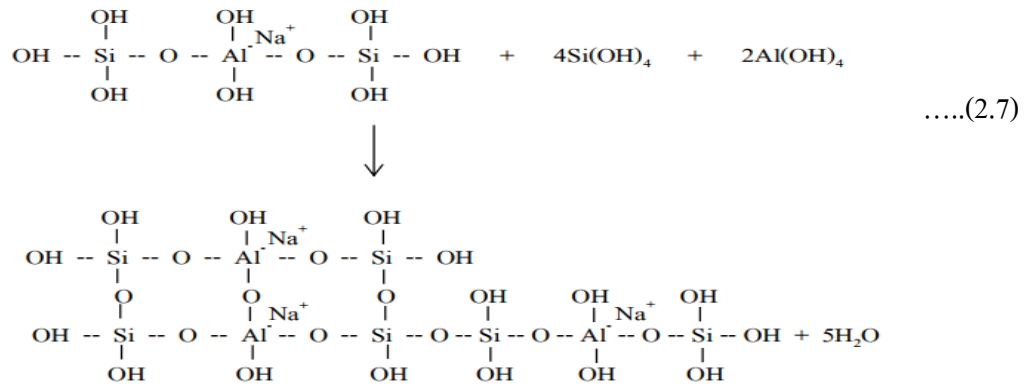
siloxo, PSS) และพอลิไซโออะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ เกิดปฏิกิริยาเคมี (Hench, 1998) ดังสมการที่ 2.6



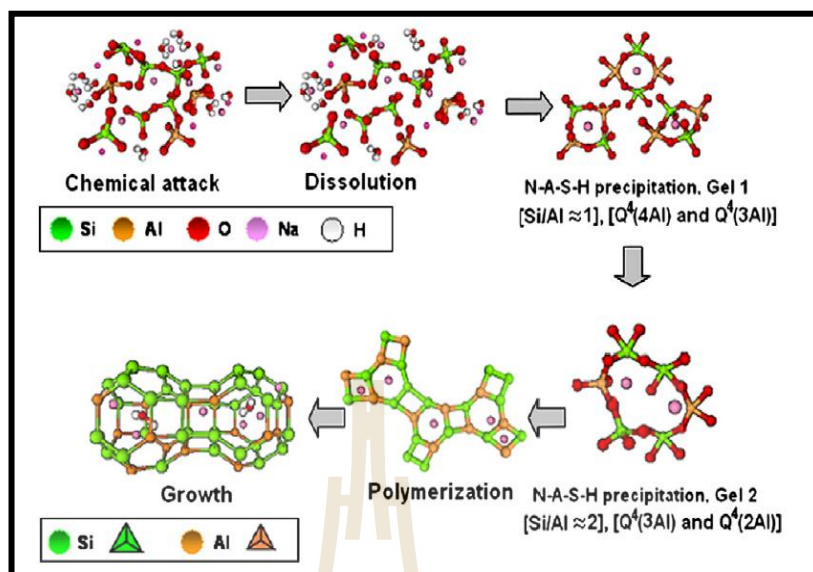
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์(Davidovits,1991)

จากนั้นจะทำปฏิกิริยาสุกโซ่ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะของพอลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้ ดังสมการที่ 2.7 (Hench, 1998)





รูปที่ 2.5 แบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาของ Activator กับ Fly ash  
(Fernández-Jiménez et al., 2005)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Shi et al.,2011)

## 2.5 สารเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator)

### 2.5.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลายของเกลือคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขมัน เช่น อุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

### 2.5.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

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

## 2.6 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก

มทข. 203-2545

### ขอบข่าย

วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก หมายถึง วัสดุซึ่งมีขนาดคละกันสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก นำมาเสริมบนชั้นรองพื้นทาง หรือ ชั้นคั่นทาง

### คุณสมบัติ

- ปราศจากก้อนดินเหนียว (Clay Lump) วัสดุจำพวกเชล (Shale) รากไม้ หรือวัชพืชอื่น ๆ
- มีอัตราส่วนคละสม้าเสมอประกอบด้วยส่วนหยาบและส่วนละเอียด
- ส่วนหยาบต้องเป็นหินโม
- ส่วนละเอียดเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบ หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปน เพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบทก่อน
- ค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่า 25
- ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่า 6
- ค่าจำนวนส่วนร้อยละของความสึกหรอ (Percentage of Wear) ไม่มากกว่า 40
- ค่า ซี.บี.อาร์ จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้ง สูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density) ตาม มทช.(ท) 501.3 : วิธีการทดสอบเพื่อหา ค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R.) หรือ ไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง
- มีมวลคละผ่านตะแกรง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก

| ขนาดของตะแกรง<br>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    |

## 2.7 การทดสอบหาคุณสมบัติของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า

### 2.7.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis)

การทดสอบนี้เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Particle Size Distribution) ทั้งชนิดเม็ดละเอียดและหยาบ โดยให้ผ่านตะแกรงจากขนาดใหญ่จนถึงขนาดเล็กที่มีขนาดช่องผ่าน 0.075 มม. (เบอร์ 200) แล้วเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ผ่านหรือค้างบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่าง

การกระจายขนาดเม็ดดิน มักแสดงด้วยกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดใน สเกลลอการิทึม (Logarithmic Scale) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าที่ระบุ (Percent Finer) ซึ่งเรียกว่า กราฟการกระจายขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve)

#### วิธีการคำนวณ

หามวลที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด โดยชั่งหามวลของตัวอย่างที่ค้างบนแต่ละตะแกรงมวลที่หายไป (เมื่อเอามวลของตัวอย่างที่ค้างในทุกตะแกรงรวมกันแล้วหักออกจากรวมของตัวอย่างอบแห้งทั้งหมดที่ใช้การทดลอง) คือ มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) รวมกับน้ำหนักที่ค้างบน Pan

$$\text{ร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100$$

หามวลที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

$$\text{ร้อยละค้างสะสม} = \text{ผลบวกสะสมของร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรงที่หยาบกว่า}$$

$$\text{ร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง} = 100 - \text{ร้อยละค้างสะสม}$$

ที่มา; ตามมาตรฐาน มทข. (ท) 501.8

### 2.7.2 การหาค่าขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits)

#### 2.7.2.1 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าลิมิตเหลว (Liquid Limit : LL.) มทข.(ท) 501.5-254

หมายถึง ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดของมวลดินที่ใส่อยู่ในถ้วยทองเหลืองครึ่งทรงกลม และมวลดินถูกปาดให้เป็นร่องรูปตัววีขนาดมาตรฐาน โดยมีฐานด้านล่างกว้าง 2 มม. ภายหลังจากการเคาะถ้วยทองเหลืองจำนวน 25 ครั้ง ด้วยอัตราเร็วในการเคาะ 2 ครั้งต่อวินาที โดยมีระยะตกกระทบ 1 ซม. แล้วทำให้ดินไหลมาชนกันยาว ประมาณ 12.7 มม.

### คำนวณหาปริมาณน้ำในดินได้จากสูตร

$$W = \frac{\text{มวลของน้ำ (กรัม)}}{\text{มวลของดินแห้ง (กรัม)}} \times 100$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำในดิน มีหน่วยเป็นกรัม

#### การรายงานผล

1. เขียน Flow curve ลงในตารางช่องกราฟ จากปริมาณน้ำในดิน (water content) และจำนวนครั้งที่เคาะ (number of blows) เป็นเส้นตรงให้ผ่านหรือใกล้เคียงอย่างน้อย 3 จุด
2. Liquid Limit คือ ปริมาณน้ำในดินที่ได้จากการลากเส้นตรงจากจำนวนที่เคาะ 25 ครั้ง ตัดกับ Flow curve

#### 2.7.2.2 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าลิมิตพลาสติก (Plastic Limit : PL) มทช. (ท) 501.6-2545

หมายถึง ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในมวลดินเมื่อมวลดินถูกคลึงให้เป็นเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. แล้วดินแตกร้าวออกไม่สามารถคลึงให้เป็นเส้นต่อเนื่องกันได้

#### วิธีการคำนวณ

คำนวณหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plasticity Index (P.I.) ได้จากสูตร

$$\text{Plastic Limit (P.L.)} = \frac{\text{มวลของน้ำ (กรัม)}}{\text{มวลของดินแห้ง (กรัม)}} \times 100$$

$$\text{Plasticity Index (P.I.)} = \text{L.L.} - \text{P.L.}$$

ในกรณีที่ตัวอย่างมีทรายปนมาก ให้ค่า Plastic Limit ก่อนค่า Liquid Limit ถ้าเป็น Non-Plastic จะไม่ต้องทดลองหาค่า Liquid Limit

#### การรายงานผล

ให้รายงานผลการทดลองโดยใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่งยกเว้นกรณีต่อไปนี้

1. ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่า Plastic Limit ได้ให้รายงานค่า PI. ว่า “N-P (Non – Plastic)”
2. ในกรณีที่ค่า Plastic Limit มากกว่า หรือเท่ากับ Liquid Limit ให้รายงานค่า PI. ว่า “N-P”

### 2.7.2.3 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าลิมิตหดตัว (Shrinkage Limit :SL) มทข. (ท) 501.7-2545

หมายถึง ปริมาณน้ำที่มากที่สุดในมวลดิน ซึ่งเมื่อปริมาณน้ำดังกล่าวลดลงแล้วไม่ทำให้ปริมาตรรวมของมวลดินลดลงตามไปด้วย

### 2.7.3 วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified compaction test)

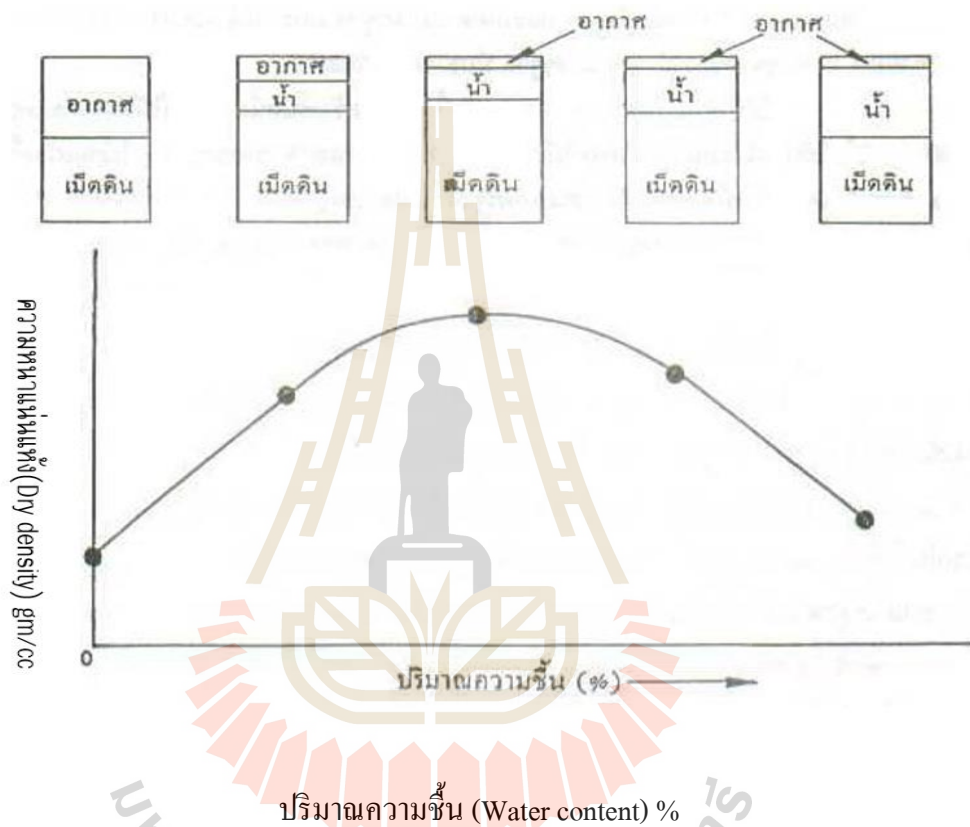
#### มทข.(ท) 501.2- 2545

การบดอัด เป็นกระบวนการที่ใช้แรง หรือน้ำหนัก หรือพลังงานจากเครื่องกล กระทำให้เม็ดดินเบียดตัวชิดกันเพื่อเพิ่มความแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว ลดการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) เครื่องมือกลที่ใช้ในการบดอัด เช่นรถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง รถบดดินแคะ รถบดชนิดสันสะเทือน เป็นต้น การเลือกจะใช้เครื่องมือชนิดใดขึ้นอยู่กับประเภทของดินหรือวัสดุที่จะบดอัด การบดอัดดินจะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวเชื่อมประสาน กล่าวคือ ถ้าน้ำมีอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบ ๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การประสานเชื่อมไม่ดีพอที่จะที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว R.R. Proctor (1993) ได้กำหนดวิธีการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่นของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบัน ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้น พลังงานที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีการทดสอบการบดอัดดิน โดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้และข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน

สำหรับพื้นที่จริงพลังงานที่ใช้ในการบดอัดเปรียบได้กับจำนวนครั้งที่เครื่องจักรบดอัดวิ่งผ่าน แต่สำหรับในห้องปฏิบัติการทดลองจะถูกเปลี่ยนมาเป็นการกระทุ้งตามวิธีการทดลองของ Proctor โดยค่าพลังงานในการบดอัดนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของค้อนกระทุ้ง ความสูงของระยะปล่อย จำนวนชั้นของการบดอัด จำนวนครั้งที่กระทุ้งต่อชั้น และปริมาตรของโมล

การบดอัดให้ได้ความแน่น (Density) ตามความต้องการของการใช้งานจะต้องอาศัยน้ำ เนื่องจากน้ำที่อยู่โดยรอบเม็ดดินจะทำให้เม็ดดินมีการเลื่อนตัวเข้ามาชิดกัน ได้มีโครงสร้างที่มีความแน่นขึ้น อากาศจะถูกขับออกจากดินทำให้ช่องว่างในดินลดลง ดังนั้นดินที่มีปริมาณความชื้น

มากขึ้นก็จะได้ค่าความแน่นแห้งสูงขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งอากาศในดินส่วนมากได้ถูกขับออกมาแล้ว และทำให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) โดยปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ความแน่นแห้งสูงสุดนี้ เรียกว่า Optimum Moisture Content หากเติมน้ำเข้าไปในดินอีกก็จะทำให้ค่าความแน่นแห้งต่ำลงได้ทั้งนี้เพราะ น้ำส่วนที่เติมเข้าไปจะไปแทนที่บางส่วนของอนุภาคดิน ทำให้เม็ดดินเลื่อนห่างจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าปริมาณความชื้น

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้และข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน และแบบสูงกว่ามาตรฐาน

| วิธีการทดสอบ             | ขนาดของแบบ (เส้นผ่านศูนย์กลางของ Mold) | น้ำหนักตุ้ม (ปอนด์) | ระยะยกตุ้ม (นิ้ว) | จำนวนชั้นการบดอัด (ชั้น) | จำนวนครั้งการบดอัด (ครั้ง) | ดินที่ใช้ทดสอบคือดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด | หมายเหตุ |
|--------------------------|--|---------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------|---|----------|
| แบบมาตรฐาน               |  |                     |                   |                          |                            |   |          |
| วิธี ก. Standard Proctor | 4 นิ้ว                                 | 5.5                 | 12                | 3                        | 25                         | ¾ นิ้ว                                    | มทช.(ท)  |
| วิธี ข. AASHTO T -99     | 6 นิ้ว                                 | 5.5                 | 12                | 3                        | 56                         | ¾ นิ้ว                                    | 501.1-   |
| วิธี ค. Standard Proctor | 4 นิ้ว                                 | 5.5                 | 12                | 3                        | 25                         | เบอร์ 4                                   | 2545     |
| วิธี ง. AASHTO T -99     | 6 นิ้ว                                 | 5.5                 | 12                | 3                        | 56                         | เบอร์ 4                                   |          |
| แบบสูงกว่ามาตรฐาน        |  |                     |                   |                          |                            |   |          |
| วิธี ก. Modified Proctor | 4 นิ้ว                                 | 10                  | 18                | 5                        | 25                         | ¾ นิ้ว                                    | มทช.(ท)  |
| วิธี ข. AASHTO T -180    | 6 นิ้ว                                 | 10                  | 18                | 5                        | 56                         | ¾ นิ้ว                                    | 501.2-   |
| วิธี ค. Modified Proctor | 4 นิ้ว                                 | 10                  | 18                | 5                        | 25                         | เบอร์ 4                                   | 2545     |
| วิธี ง. AASHTO T -180    | 6 นิ้ว                                 | 10                  | 18                | 5                        | 56                         | เบอร์ 4                                   |          |

### วิธีการคำนวณ

- 1) กำหนดหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100$$

เมื่อ  $W$  = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

$M_1$  = มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

$M_2$  = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

- 2) กำหนดหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\gamma_{\text{wet}} = \frac{W_{\text{wet}}}{V}$$

$\gamma_{\text{wet}}$  = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$W_{\text{(wet)}}$  = มวลของดินเปียกที่บดอัดในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม

$V$  = ปริมาตรของแบบ หรือปริมาตรของดินเปียกที่บดอัดในแบบมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

- 3) กำหนดหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{\text{(wet)}}}{1 + \frac{W}{100}}$$



|                |   |
|----------------|---|
| $\gamma_d$     | = ความแน่นแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  |
| $\gamma_{wet}$ | = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| $\omega$       | = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ                          |

#### 2.7.4 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า C.B.R. (California Bearing Ratio) ทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทข.(ท) 501.3-2545

คอนกรีตสำหรับผิวหน้าถนน หรือใช้กับเขื่อน (ส่วนคลองระบายน้ำ) ต้องมีความแข็งแรงต่อการสึกกร่อน ดังนั้นมวลรวมหยาบจึงต้องมีความแข็งแรงต่อการสึกกร่อน โดยทั่วไป ยิ่งการลดน้ำหนัก จากการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบมีน้อยเท่าไร การลดน้ำหนักเนื่องจากสึกกร่อนของคอนกรีตยิ่งมีน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงควรทดสอบหาการลดน้ำหนักเนื่องจากการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่องมือ ทดสอบความสึกหรอของแองเจลีต (Los Angeles Abrasion) และเป็นตัวชี้ว่าจะใช้วัสดุนี้กับคอนกรีตสำหรับผิวหน้าถนน หรือ เขื่อน ได้หรือไม่

การกำหนดวิธีทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการก่อสร้างถนน ซึ่งมีการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นมากขึ้น ได้นำวิธีการทดสอบคุณสมบัติแบบ C.B.R. (California Bearing Ratio) เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและก่อสร้างถนน และวิธีการดังกล่าวก็เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันทั่วไป

C.B.R. Test เป็นวิธีการทดสอบวัดค่าแรงเฉือน (Shearing Resistance) ของวัสดุที่บดอัดจนแน่นดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ Optimum Moisture Content) โดยการใช้ท่อนเหล็กตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วกดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่ออนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักมาตรฐานที่ได้จากการทดลองกดบนหินมาตรฐาน บดอัดแน่นที่ความลึกของการจมตัวเท่ากันค่าที่ได้นี้เรียกว่า “เปอร์เซ็นต์ C.B.R.” โดยน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Load) มีค่าดังนี้

ตารางที่ 2.4 แรงมาตรฐาน (Standard Load) ในการคำนวณหาค่า CBR

| ค่าการจมตัว<br>(Penetration)<br>มิลลิเมตร | น้ำหนักมาตรฐาน<br>(Standard Load)<br>กิโลกรัม | ค่าน้ำหนักมาตรฐาน<br>(Standard Unit Load)<br>กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร |
|---|---|--|
| 2.54 (0.1")                               | 1,360.8 (3,000 lb)                            | 70.3 (1,000 lb/in <sup>2</sup> )                                       |
| 5.08 (0.2")                               | 2,041.2 (4,500 lb)                            | 105.46 (1,500 lb/in <sup>2</sup> )                                     |
| 7.62 (0.3")                               | 2,585.5 (5,700 lb)                            | 133.59 (1,900 lb/in <sup>2</sup> )                                     |
| 10.16 (0.4")                              | 3,129.8 (6,900 lb)                            | 161.71 (2,300 lb/in <sup>2</sup> )                                     |
| 12.70 (0.5")                              | 3,538.0 (7,800 lb)                            | 182.81 (2,600 lb/in <sup>2</sup> )                                     |

วิธีคำนวณ CBR เป็นร้อยละจากสูตร

$$\text{CBR} = \frac{X}{Y} \times 100$$

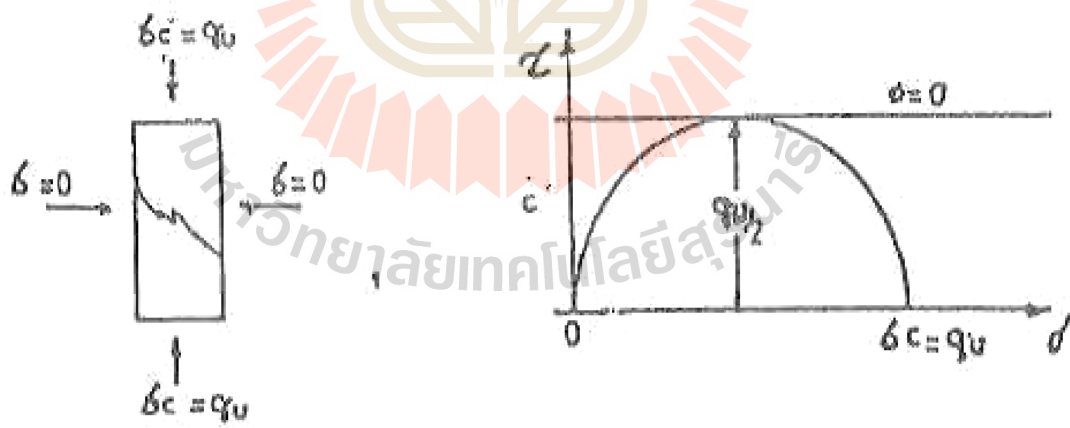
เมื่อ X = ค่าแรงกดที่อ่านได้อ่านต่อหน่วยพื้นที่ของท่อนกด (สำหรับ Penetration ที่ 2.54 มิลลิเมตร หรือ 0.1 นิ้ว และที่เพิ่มขึ้นอีกทุก ๆ 2.54 มิลลิเมตร)

Y = ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Load) กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (จากตารางที่ 2.4)

### 2.7.5 การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) มทข.

(ท) 303-2545

ค่ากำลังอัดแกนเดียว (UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH) ของดิน คือ ค่าหน่วยแรงสูงสุด (MAXIMUM STRESS) ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกหรือรูปเหลี่ยม (PRISMATIC) จะรับได้โดยไม่มีแรงดันข้างจากสมการของมอร์คูลอมป์ (MOHR-COULOMB EQUATION)\* ในกรณีที่เป็นดินเหนียวอ่อนอิ่มตัว  $\tan \phi = 0$  จะได้  $\tau = c$  ถ้าลองนำค่าหน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดินมาเขียนลงในกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้ดังรูป โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเกาะของดินกับค่ากำลังอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) นั่นคือ  $c = \sigma_c / 2 = q_u / 2$



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเกาะของดินกับค่ากำลังอัดแกนเดียว

#### 2.7.5.1 วิธีคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปในระหว่างการทดสอบ (AC)

$$A_c = A / (1 - \epsilon)$$

$$\epsilon = \Delta L / L_0$$

เมื่อ

$L$  = การทรุดตัวในแนวดิ่งของแท่งตัวอย่างที่น้ำหนักกดใด ๆ อ่านได้จากมาตรวัด

$\epsilon$  = ความเครียด ตามแนวดิ่งที่น้ำหนักกดใด ๆ

$L_0$  = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

$A$  = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

2.7.5.2 คำนวณหาหน่วยแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (STRESS) สำหรับน้ำหนักกดใด ๆ

$$\sigma_c = P / A_c$$

เมื่อ

$P$  = น้ำหนักกด

$A_c$  = พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไป

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hoy Menglim และ S. Horpibulsuk (2016) ได้ศึกษาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ RAP ที่ผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเกลือและสารปรับคุณสมบัติ NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนา กำลังอัดต่อไป อีกส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนา ค่ากำลังอัดไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

อิทธิกร ภูมิพันธ์และคณะ(2016) ในการศึกษานี้ได้มีการนำ RAP มาผสมกับเกลือแคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกรัน และได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า RAP สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทาง / วัสดุรองพื้นทางเมื่อใช้ตะกรันเหล็ก 10% S มาผสมกับ RAP

Gordon (1984) กล่าวถึงการใส่สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified Materials และ Bound Materials Modified Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound Materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่ม ลงไปอย่างมาก เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าสูง และอาจต้านทานหน่วยแรงดึงได้

Kuhlman (1989) กล่าวไว้ว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีผิวจราจรทำจากยางมะตอย โดยการนำผิวจราจรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่

ในช่วงปี 1942-1958 ต่อมาในปี 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งาน ทั้งวิศวกรยึดหยุ่นที่ชำรุดเสียหาย และวิศวกรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี

Tabensky (1990) กล่าวว่า การนำวัสดุเก่ามาใช้งานอีกครั้ง (Recycling) ไม่ใช่เรื่องใหม่ แต่มีรายงานว่า Florida Department of Transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่าด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนน และ Orange County California ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง กับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5-7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับวัสดุชั้นล่าง เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow Municipal Airport และ Mohave County Airport.

อาทิศ อินทรา (2556) ได้ทำการศึกษาหินคลุก (CR) ผสมกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด กำลังอัด และความคงทนของวัสดุผสม ระหว่าง CR และ RAP ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ RAP ด้วยพลังงานการบดอัดที่ให้กับวัสดุผสมที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากภายใน RAP มีคุณสมบัติการดูดซับพลังงานการบดอัดสูงกว่าหินคลุก ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ และปริมาณ CR แสดงได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรง รอบเปียกสลับแห้งทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสม และส่งผลให้กำลังอัดของวัสดุผสมลดลง กำลังอัด ที่รอบเปียกสลับแห้งค่าหนึ่ง ที่การบดอัดสภาวะหนึ่ง (ด้านแห้ง ด้านเปียก และปริมาณความชื้นเหมาะสม) สามารถประมาณได้จากกำลังอัดในสภาวะเปียกเริ่มต้น (ก่อนการทดสอบเปียกสลับแห้ง) ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานทางได้ โดยร้อยละของการสูญเสีย น้ำหนักมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของ Portland Cement Association สำหรับทุกอัตราส่วนผสม CR : RAP และปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่าร้อยละ 3

วรารุ เล็กวิเชียร (2537) ได้ศึกษาการนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้งานใหม่ (RAP) ปรับสภาพโดยใส่สารผสมเพิ่ม (Rejuvenator) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะทางกายภาพ ที่ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า มีคุณสมบัติเปลี่ยนกลับเหมือน เช่นข้อกำหนดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ จากการทดลอง ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.88 โดยน้ำหนักของวัสดุ มวลรวม เมื่อนำวัสดุใหม่และสารปรับสภาพมาผสม และทดสอบด้วยวิธีการ มาร์แชลล์แล้วพบว่า ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 4.90 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุผิวทางได้ และได้คุณสมบัติตาม

ข้อกำหนดของกรมทางหลวงทุกประการ จากการวิจัยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าสามารถนำไปใช้ในการบูรณะซ่อมแซมถนนในประเทศไทยได้

นิรชร นกแก้ว และคณะ (2559) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ต่างกัน โดยใช้วัสดุรวมรวมหินปูนจำนวน 1 แห่่ง ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 ของมวลรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เท่ากับร้อยละ 5 ของมวลรวม โดยใช้วิธีมาร์แชลล์และเกณฑ์ชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ RAP ไม่คัดแยกขนาด มีค่าความหนาแน่น 2.397 ถึง 2.402 กรัมต่อมิลลิเมตร ช่องว่าง อากาศร้อยละ 3.9 ถึง 4.0 ช่องว่างระหว่างวัสดุรวมรวมร้อยละ 14.6 ถึง 14.7 ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ร้อยละ 73.3 ถึง 72.8 เสถียรภาพ 2,310 ถึง 2,260 ปอนด์ และค่าการไหล 12 ถึง 15 นอกจากนี้พบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวมทำให้ได้คุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตาม ข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมเฉพาะงาน Asphalt Hot-Mix Recycling

อาวุธ โพธิ์อุดม (2553) ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ผลทดสอบ Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetrometer Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) และหาคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยทำการเก็บตัวอย่างผิวทางเดิม จาก ถนนสาย 2034 ตอนหน้าพระลาน-บ้านครัว จังหวัดสระบุรี โดยแบ่งตัวอย่างผิวทางเดิม ออกเป็น 2 ส่วนคือ วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ประกอบด้วยตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับหินเกล็ด อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ประกอบด้วยตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับ หินคลุกอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร โดยปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของมวลรวมแห้ง ใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงสุด (1.0\*OMC) และ ปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุ ตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงสุด (1.25\*OMC) พลังงานบดอัด 277.50 ตัน/ลูกบาศก์เมตร ท่อนเหล็กกลมตันกด Unsoaked CBR ขนาด พื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว อายุ 2 และ 3 วัน จากผลงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาค่าความสัมพันธ์ ระหว่าง Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetrometer Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) สามารถใช้เป็นแนวทางกำหนดค่า field CBR ใน สภาพจริงของชั้นทางงานถนน เพื่อใช้ในการงานตรวจ สอบวิเคราะห์และนำมาใช้สำหรับการควบคุมงาน และการออกแบบงานถนน

Hardjite et al. (2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิมีมต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.095 และ 0.120 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อ

โซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถ้านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถ้านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านแปรผันตามอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$  กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกกะปาสคาล 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) จะช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Arul Arulrajah และคณะ (2016) ได้ศึกษาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับเถ้าลอยตะกรันเหล็ก แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับวัสดุแบบเดิม จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าการอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ผสมกับตะกรันเหล็ก 5 % เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุรีไซเคิล

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเหมาะสมของกำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผง เพื่อใช้ปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทางในโครงสร้างทาง ตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าในเขตพื้นที่จังหวัดชลบุรี ขั้นตอนการดำเนินการประกอบด้วย

#### 3.1 การเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าจากหลวงหมายเลข 331 เขต ต.บ่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี



รูปที่ 3.1 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าจากหลวงหมายเลข 331 เขต ต.บ่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

นำตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาตรวจสอบสิ่งเจือปน เช่นเศษไม้ วัชพืชออกจากนั้นนำมาคลุกให้เข้ากัน ทำให้ส่วนที่จับเป็นก้อนแตกออกจากกัน โดยใช้ค้อนยางทุบ และเตรียมตัวอย่างที่จะเป็นตัวแทนของวัสดุ โดยใช้เครื่องแบ่งตัวอย่าง จากนั้นนำไป อบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ ที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.2 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

### 3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากนั้นนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทช.202-2545

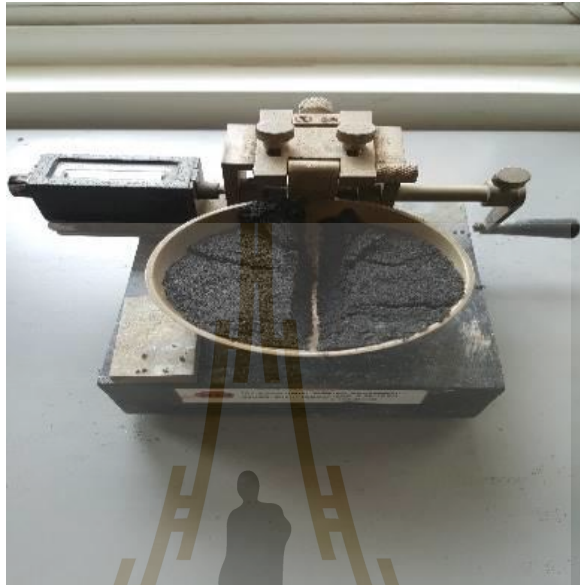
1. ทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.8-2545



รูปที่ 3.3 การทดสอบขนาดเม็ดวัสดุ



2. ทดลองหาขีดจำกัด Liquid Limit (L.L) ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.5-2545 และ ทดลองหาค่า Plastic Limit (P.L.) และ Plasticity Index (P.I.) ตามมาตรฐาน มทช. (ท) 501.6-2545



รูปที่ 3.4 การทดสอบ Atterberg limits

3. ทดสอบการบดอัด (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.2-2545



รูปที่ 3.5 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

4. ทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R) ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.3-2545



รูปที่ 3.6 การทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์ (C.B.R)

5. ทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 303-2545



รูปที่ 3.7 การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

6. เตรียมสัดส่วนระหว่างมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย(FA) จี โอลิเมอร์ โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผง ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) คิดเป็นร้อยละโดยมวลและมี สัดส่วนดังนี้

- a.) RAP + FA(5%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (10%) + NaOH (8M)
- b.) RAP + FA(5%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (5%) + NaOH (8M)
- c.) RAP + FA(10%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (10%) + NaOH (8M)
- d.) RAP + FA(10%) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (5%) + NaOH (8M)



ตัวอย่าง a.



ตัวอย่าง b.



ตัวอย่าง c.



ตัวอย่าง d.

รูปที่ 3.8 ลักษณะตัวอย่างแต่ละสัดส่วน

7. เตรียมสัดส่วนของสารตัวเร่งปฏิกิริยา (liquid alkaline activator, LA) ผู้วิจัยทำการเตรียมส่วนผสมเถ้าลอยและ โซเดียมซิลิเกตผงในอัตราส่วน 5:10 , 5:5 , 10:10 และ 10:5 ผสมกับวัสดุตั้งต้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลลาร์ ที่ละลายน้ำกลั่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่ความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content ,OMC) ทำการบดอัด ในแต่ละสัดส่วน



รูปที่ 3.9 สัดส่วนผสมวัสดุปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า

8. การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Crushed rock-FA-Geopolymer) โดยเตรียมวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอยและ โซเดียมซิลิเกตผงให้เข้ากัน และเติมน้ำที่ทำการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมให้ทั่ว จากนั้นบดอัดตามวิธีการทดลองความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor compaction) มทช.(ท) 501.2-2545 ในการเก็บตัวอย่างหลังจากบดอัดแล้วจะห่อด้วยพลาสติกใสเก็บไว้ ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27-30 O<sup>c</sup>) ที่มีอายุ บ่ม 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะทำการเก็บตัวอย่างจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อความถูกต้องแม่นยำ



รูป 3.10 การผสมวัสดุปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า

### 3.4 การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

ตัวอย่างที่ถูกบ่มในถุงพลาสติกเมื่อครบอายุการบ่มที่จะทดสอบแล้ว นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วผึ่งให้แห้งประมาณ 15 นาที ก่อนนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด วิธีการทดลองหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 303-2545 โดยค่ากำลังอัดที่ควบคุมจะต้องไม่น้อยกว่า 17.5 และ 24.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูป 3.11 การทดสอบการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)



รูป 3.12 ลักษณะแนวการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



## บทที่ 4

### การศึกษาผลทดลองและการวิจารณ์ผล

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษา คุณสมบัติพื้นฐาน คุณสมบัติด้านกำลังอัด และความทนทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ทำการปรับปรุงด้วยเถ้าลอย จีโพลีเมอร์ โดยใช้โซเดียมซิลิเกตแบบผง ผลจากการศึกษาทั้งหมดจะนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท และวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนที่มีประสิทธิภาพที่สุดในเชิงวิศวกรรม

#### 4.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ได้จากโครงการซ่อมแซมถนนหลวงหมายเลข 331 เขต ต.บ่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่กรมทางหลวงชนบทที่ 3 รับผิดชอบ มีลักษณะสีเทาดำมีปริมาณดินเม็ดหยาบมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งเป็นวัสดุตั้งต้นที่จะต้องทำการปรับปรุงคุณภาพ เถ้าลอย และสารจีโพลีเมอร์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล

วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ได้จากโครงการซ่อมแซมถนนในเขตพื้นที่จังหวัดชลบุรี ที่กรมทางหลวงชนบทที่ 3 รับผิดชอบ ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

| Content                   | Reclaimed Asphalt Pavement | Standard for base course |
|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Specific gravity          |                            |                          |
| Liquid limit              | Non Liquid                 | $\leq 25$                |
| Plastic limit             | Non Plastic                | $\leq 6$                 |
| Plastic index             | Non Plastic                | $\leq 6$                 |
| Maximum dry unit weight   | 2.116                      | $\geq 1.440$             |
| Optimum moisture content  | 7.52                       |                          |
| CBR at 95% of dry density | 38                         | $\geq 80$                |
| LA abrasion               | 38.09                      | $\leq 40$                |

ตารางที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลใช้ในงานวิจัย

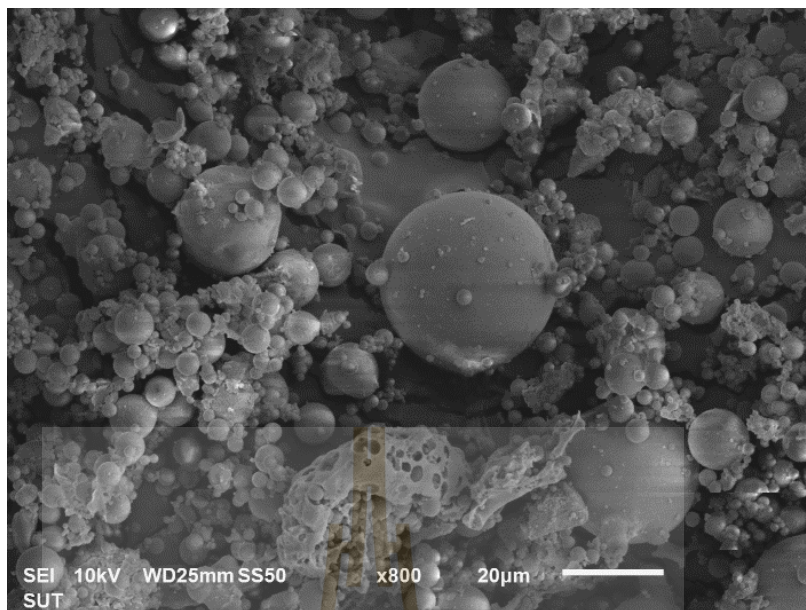
| ขนาดตะแกรง | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล |              |
|------------|---------------------------|--------------|
|            | ชนิด ก.                   | ตัวอย่าง RAP |
| 2"         | 100                       | 100          |
| 1"         | -                         | 100          |
| 3/8"       | 30-65                     | 68.58        |
| เบอร์ 4    | 25-55                     | 44.43        |
| เบอร์ 10   | 15-40                     | 23.48        |
| เบอร์ 40   | 8-20                      | 7.18         |
| เบอร์ 200  | 2-8                       | 2.18         |

จากทดสอบขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) มีค่าต่ำมาก ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอ (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 38.09 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40 %) จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่า CBR ของหินคลุกที่ใช้ในการศึกษานี้ มีค่าเพียง 38.09% เท่านั้น ในขณะที่มาตรฐานตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท สำหรับงานโครงสร้างชั้นพื้นทาง ต้องไม่น้อยกว่า 80% และจากตาราง 4.2 ขนาดส่วนคละของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลจัดอยู่ในชนิด ก. ซึ่งจัดอยู่ในวัสดุที่กรมทางหลวงชนบทกำหนด

#### 4.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย (Fly ash, FA) ที่ใช้ในการศึกษา ได้มาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี ของบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง มีส่วนประกอบทางเคมีที่ได้มาจากการทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) คือ  $\text{SiO}_2 = 61.98\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 29.29\%$ ,  $\text{CaO} = 1.81\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3.37\%$  และ  $\text{SO}_3 = 1.18\%$  และตามมาตรฐาน ASTM C618 จำแนกเป็นเถ้าลอยชนิด F รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยจากการถ่ายภาพด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) มีลักษณะเป็นทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และขนาดคละของเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 4.3

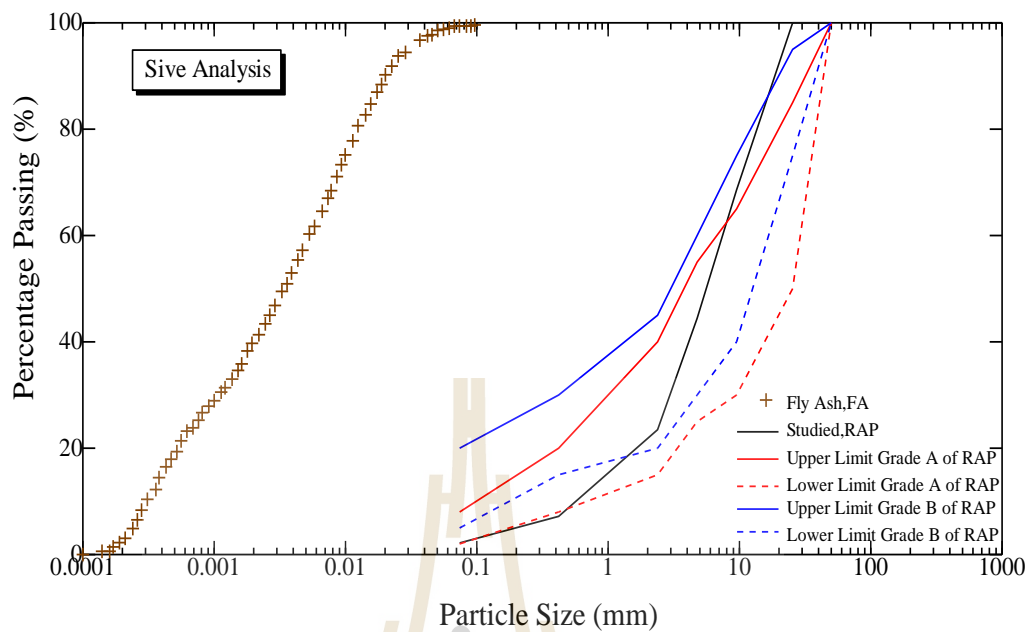




รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย (FA)

ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

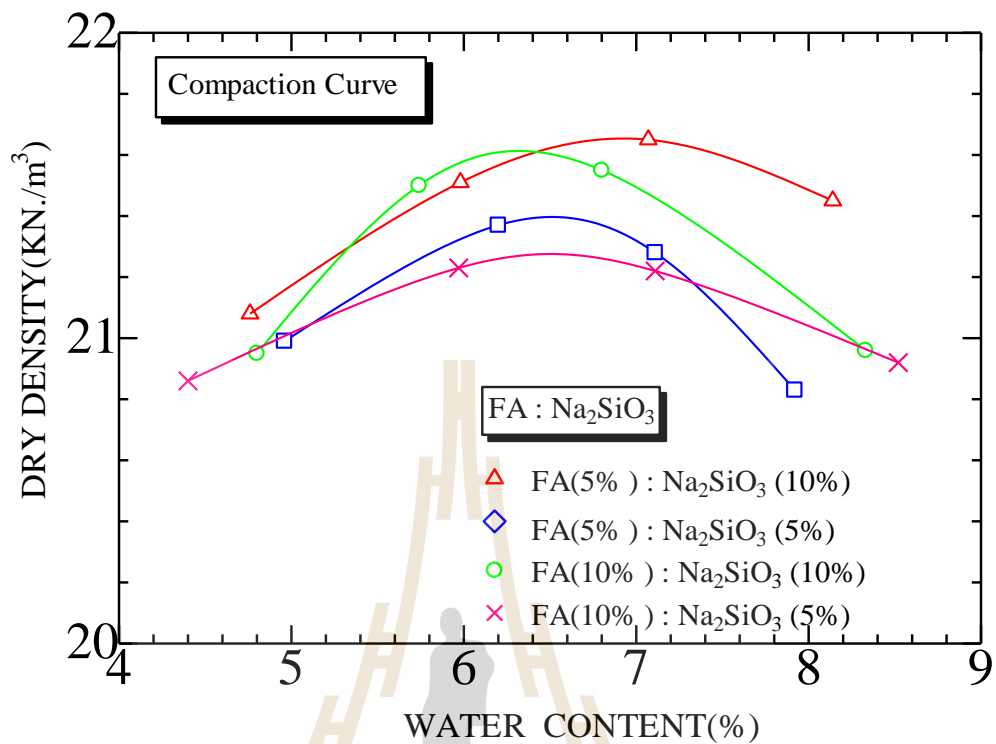
| Chemical composition (%)       | FA    |
|--------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 61.98 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 29.29 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.37  |
| CaO                            | 1.81  |
| SO <sub>3</sub>                | 1.18  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.30  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.84  |



รูปที่ 4.2 ขนาดผลของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

#### 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

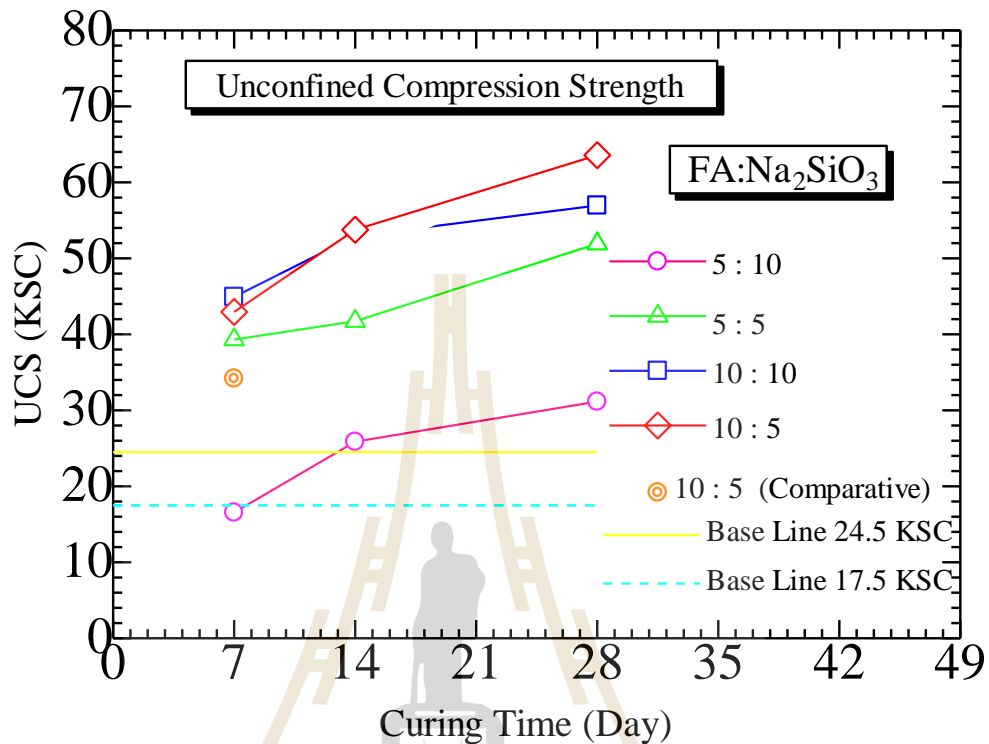
การทดสอบการบดอัดของวัสดุฟิวแอชพ่นต์คอนกรีตเก่า ถ้ำลอย จีโอพอลิเมอร์ เพื่อหาค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density,  $\rho_{d,max}$ ) และปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซิลิเกตผงและถ้ำลอยในสัดส่วนต่างๆ ดังนี้ (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5:10, 5:5, 10:10, 10:5$ )



รูปที่ 4.3 กราฟการบดอัดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 แสดงการบดอัดตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ullaoy จีโอพอลิเมอร์ และโซเดียมซิลิเกตผง ในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด(Maximum dry density,  $\rho_{d,max}$ ) เท่ากับ 21.63,21.40,21.60, และ 21.16 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.92,6.34,6.56, และ 6.51 ตามลำดับ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์ullaoyมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งของวัสดุมีแนวโน้มลดลง และเปอร์เซ็นต์โซเดียมซิลิเกตผงมากขึ้นก็จะส่งผลทำให้ปริมาณความชื้นสูงสุด (OMC) มากขึ้นตามไปด้วย

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



รูปที่ 4.4 กราฟกำลังอัดแบบแกนเดียวของวัสดุตัวอย่างที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุตัวอย่างที่มีการพัฒนากำลังขึ้นตามอายุการบ่ม แบ่งสัดส่วนออกเป็น 4 ส่วนผสม ซึ่งทำการผสมสัดส่วนของแก้วลอยและโซเดียมซิลิเกตผงได้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน สัดส่วน A (FA: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>=5%:10%) กำลังรับแรงอัด 31.15 ksc สัดส่วน B (FA: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>=5%:5%) กำลังรับแรงอัด 51.92 ksc สัดส่วน C (FA: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>=10%:10%) กำลังรับแรงอัด 56.80 ksc สัดส่วน D (FA: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>=10%:5%) กำลังรับแรงอัด 63.10 ksc ซึ่งทุกสัดส่วนให้กำลังอัดสูงกว่า 17.5 ksc (Base Line1) เป็นกำลังอัดสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรต่ำ (Light traffic) และมากกว่า 24.5 ksc (Base line2) สำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง (High traffic)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการศึกษาด้านกำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ โดยใช้โซเดียมซิลิเกตผง ในสัดส่วนต่างๆ เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนสำหรับชั้นพื้นทาง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

#### 5.1 อิทธิพลของการบดอัด อัตราส่วน ปริมาณเถ้าลอยและโซเดียมซิลิเกตผงที่มีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

ภายใต้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของวัสดุผสม มีค่ามากขึ้นตามปริมาณ โซเดียมซิลิเกตที่มากขึ้น B (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5\%:5\%$  และ A (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5\%:10\%$ ) เมื่อให้ค่าปริมาณเถ้าลอยคงที่ ที่ 5% จะได้ค่าความหนาแน่นแห้ง B(21.40  $\text{kN/m}^3$ ) และ A(21.64  $\text{kN/m}^3$ ) และที่ ปริมาณ เถ้าลอย คงที่ ที่ 10% D (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10\%:5\%$ ) และ C (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10\%:10\%$ ) จะได้ความหนาแน่นแห้ง D(21.16  $\text{kN/m}^3$ ) และ C(21.60  $\text{kN/m}^3$ ) ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มมากขึ้นตามด้วย เมื่อให้ค่าปริมาณเถ้าลอยคงที่ ที่ 5% จะได้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม B (6.34%)และ A(6.92%) และเมื่อให้ค่าปริมาณเถ้าลอยคงที่ ที่ 10% จะได้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม D(6.51%)และ C(6.56%) อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยยังมีผลทำให้ความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มลดลง เมื่อให้ค่าปริมาณปริมาณ โซเดียมซิลิเกตผงคงที่ ที่ 5% A (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5\%:10\%$ )และ C (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10\%:10\%$ ) มีค่าความหนาแน่นแห้ง A(21.64  $\text{kN/m}^3$ ) และ C(21.60  $\text{kN/m}^3$ ) และเมื่อให้ค่าปริมาณปริมาณ โซเดียมซิลิเกตผงคงที่ ที่ 10% A (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5\%:10\%$ )และ C (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10\%:10\%$ ) มีค่าความหนาแน่นแห้ง B(21.40  $\text{kN/m}^3$ ) และ D(21.16  $\text{kN/m}^3$ )

#### 5.2 กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตผง

กำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตผง สัดส่วน (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5:10,5:5,10:10,$  และ  $10:5$ ) มีการพัฒนากำลังทุกสัดส่วนที่ระยะเวลาการบ่ม 7วัน 14วัน และ 28วัน ซึ่งระยะเวลาการบ่มที่ 7วัน กำลังอัดสัดส่วนที่ผ่าน มี 3 สัดส่วน คือ สัดส่วน (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5:5,10:10,$  และ  $10:5$ ) ให้กำลังอัดสูงกว่า 17.5 ksc (Base Line 1)

และ 24.5 ksc (Base line 2) ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกลมทางหลวงชนบท และค่ากำลังไม้น่าน 1 สัดส่วน คือ (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=5:10$ ) ซึ่งทั้ง 4 สัดส่วนมีค่ากำลังอัดมีการพัฒนาตามระยะการบ่ม โดยสัดส่วนโซเดียมซิลิเกตผงที่เหมาะสมควรจะไม่เกินร้อยละ 10 จึงจะทำให้ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มีความเข้มข้นเพียงพอให้เกิดการชะละลายเพื่อนำเอาซิลิกาและอลูมินา มาสร้างปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่มากเพียงพอจนสามารถพัฒนากำลังได้อย่างต่อเนื่องตามช่วงอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตผง สัดส่วนที่ (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10:5$ ) ที่ปริมาณความชื้นสูงสุดมีการพัฒนา กำลังที่ระยะเวลาการบ่มที่ 7 วันถึง 28 วัน สูงกว่ามาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ผลจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า โซเดียมซิลิเกตผงสามารถให้ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มีความเข้มข้นเพียงพอให้เกิดการชะละลายเพื่อนำเอาซิลิกาและอลูมินา มาสร้างปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่มากเพียงพอจนสามารถพัฒนากำลังได้ โดยสัดส่วนไม่เกิดร้อยละ 10 จึงจะเหมาะสม

### 5.3 กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตเหลว

กำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยโซเดียมซิลิเกตเหลว สัดส่วน (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10:5$ ) ในการเปรียบเทียบ ที่ระยะการบ่ม 7 วัน โดยทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ค่ากำลังอัดที่ได้ เท่ากับ 34.19 ksc ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนที่ใช้โซเดียมซิลิเกตผงในอัตราส่วนเดียวกัน ระยะการบ่ม 7 วัน เท่ากับ 42.94 ksc จะเห็นว่าอัตราส่วนที่ใช้โซเดียมซิลิเกตผงจะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ทั้ง 2 สัดส่วนยังให้ค่ากำลังอันที่สูงกว่า 17.5 ksc (Base Line 1) และ 24.5 ksc (Base Line 2) ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกลมทางหลวงชนบท

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบสัดส่วน (FA:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ทำให้ทราบว่าปริมาณโซเดียมซิลิเกตผงปริมาณที่ใช้อยู่ที่ร้อยละ 5 ถึง 10 ซึ่งปริมาณร้อยละ 10 คือปริมาณที่มากที่สุด แต่มาทำการลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตลงร้อยละ 5 ตัวอย่างวัสดุให้กำลังที่มากขึ้น นอกจากนี้การศึกษาอาจจะทำการลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตที่ปริมาณร้อยละต่าง ๆ เพื่อหาสัดส่วนที่ดีที่สุด เนื่องจากเมื่อปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นเหมาะสมสูงขึ้นตาม ผลคือขั้นตอนการบดอัดลำบากและยังทำให้ก้อนตัวอย่างไม่คงสภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- นิรชร นกแก้ว และคณะ. (2559). สมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP). วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2559.
- วรารุช เล็กวิเชียร. (2537). การนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้งานใหม่ (RAP) ปรับสภาพโดยใส่สารผสมเพิ่ม (Rejuvenator). วิทยานิพนธ์ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย.
- สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา. (2549). มาตรฐานวิธีทดสอบหาความลึกหอรบของวัสดุเม็ดหยาบ มทข. (ท) 501.9-2549. กรมทางหลวงชนบท.
- \_\_\_\_\_. (2545). มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก. มทข. 203-2545. กรมทางหลวงชนบท.
- \_\_\_\_\_. (2545). มาตรฐานวิธีทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ. มทข. (ท) 501.62545. กรมทางหลวงชนบท.
- \_\_\_\_\_. (2545). มาตรฐานวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน. มทข. (ท) 501.2-2545. กรมทางหลวงชนบท.
- \_\_\_\_\_. (2545). มาตรฐานวิธีทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. มทข. (ท) 501. 32545. กรมทางหลวงชนบท.
- \_\_\_\_\_. (2545). มาตรฐานงานหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (Pavement In – Place Recycling) มทข. 242-2555. กรมทางหลวงชนบท.
- อาทิตย์ อินทรา. (2556). หินคลุก (CR) ผสมกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาวูช โพธิ์อุดม. (2553). ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ผลทดสอบ Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetrometer Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) และคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีที่ 23 ฉบับที่ 74 พฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2553

- 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.
- Chindapeasirt P., Chalee W., Jaturapitakkul C., and Rattanasak U.,(2009). **Comparative study on the characteristics of fly ash nad bottom ash geopolymers**. *Waster Management*. Vol. 29. No. 2. Pp. 539-543.
- Davidovits, J. (1991). **Geopolymers**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1991;37(8) :163356.
- Davidovits, J. (1999). **Chemistry of Geopolymeric Sytems**. *Terminology*. Proceedings: 2<sup>nd</sup> International confrence on geopolymer, Franc : Paris,PP.9-40.
- 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](http://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 etal. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere 99, pp. 83-96.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Cridi, M. (2004). **Microstruture Development of alkali-actived fly ash cement: a descriptive model**. *Cement and Concrete Research*. 35. 1204-1209.
- Gordon, R.G. (1984). **Recent Experiences and Developments in Design an Comstruction of Cement Stabilized Pavement**. Australian Road Research Board Symposium. 12 p.
- Hebch, L. (1998). **SOL-GEL SILCA**. Properties, Processing and Technology Transfer.Noyes Publication.
- Harjito, D., Wallah, S.E., Sumajiouw, D.M.J., and Rangn, B.V. (2003). **The Effect of Mixture Composition ang Curing Temperrature on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Gropolymer Concrete**. The Ninth East Asai-Pasific Conferncr on Struturel Engineering and Construction. Indonesai : Bali CMT 14-CMT 18.



- 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.
- M. Hoy, S. Horpibulsuk, and A. Arulrajah. (2016). **Strength development of Recycled Asphalt Pavement – Fly ash geopolymer as a road construction material.** Construction and Building Materials, vol. 117, pp. 209-219, 2016.
- M. Hoy, S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, and A. Arulrajah. (2016). **Environmental impact on recycled asphalt pavement-fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material.** Science of the Total Environment (Tentatively accepted for publication). 2016b
- Pankhet k. and Rattanasak U. (2010). **Effect of Admixture on the Properties of Fly Ash Geopolymer.** KMUTT Research and Development Journal. 33 (2), pp. 121-132
- 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.
- Tabensky, W. (1990). **Road Recycling in US.** Shir of Buln Buln Memo. No. 83. 66-73.



ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ถนนหลวงหมายเลข 331  
เขต ต.ป่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

| การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ          | ผลการทดสอบ                |
|---------------------------------|---------------------------|
| ขนาดตะแกรง                      | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล |
| 2"                              | 100                       |
| 1"                              | -                         |
| 3/8"                            | 30-65                     |
| เบอร์ 4                         | 25-55                     |
| เบอร์ 10                        | 15-40                     |
| เบอร์ 40                        | 8-20                      |
| เบอร์ 200                       | 2-8                       |
| LL.%                            | NP                        |
| PI.%                            | NP                        |
| GRADATION                       | ก                         |
| Optimum moisture content(%)     | 7.52                      |
| Maximum dry unit weight(gm./cc) | 2.116                     |
| CBR at 95% of dry density       | 38                        |
| LA abrasion(%)                  | 38.09                     |



ตารางที่ ข.1 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST

a.) RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

| DETERMINATION No.         |         | 4%    | 6%    | 8%    | 10%    |
|---------------------------|---------|-------|-------|-------|--------|
| WT. MOLD + COMPACTED SOIL | gm.     | 5657  | 5725  | 5762  | 5763   |
| WT. MOLD                  | gm.     | 3557  | 3557  | 3557  | 3557   |
| WT. SOIL                  | gm.     | 2100  | 2168  | 2205  | 2206   |
| WET DENSITY               | gm./cc. | 2.208 | 2.280 | 2.319 | 2.320  |
| <b>DRY DENSITY</b>        | gm./cc. | 2.108 | 2.151 | 2.165 | 2.145  |
| WATER CONTENT             |         |       |       |       |        |
| CONTAINER No.             |         | 10    | 11    | 12    | 13     |
| WT. CONTAINER + WET SOIL  | gm.     | 75.17 | 60.69 | 88.30 | 102.87 |
| WT. CONTAINER + DRY SOIL  | gm.     | 72.50 | 58.19 | 83.55 | 96.36  |
| WT. WATER                 | gm.     | 2.67  | 2.50  | 4.75  | 6.51   |
| WT. CONTAINER             | gm.     | 16.35 | 16.38 | 16.40 | 16.42  |
| WT. DRY SOIL              | gm.     | 56.15 | 41.81 | 67.15 | 79.94  |
| <b>WATER CONTENT</b>      | %       | 4.76  | 5.98  | 7.07  | 8.14   |

ตารางที่ ข.2 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST

b.) RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

| DETERMINATION No.         |         | 4%    | 6%    | 8%    | 10%    |
|---------------------------|---------|-------|-------|-------|--------|
| WT. MOLD + COMPACTED SOIL | gm.     | 5652  | 5715  | 5725  | 5695   |
| WT. MOLD                  | gm.     | 3557  | 3557  | 3557  | 3557   |
| WT. SOIL                  | gm.     | 2095  | 2158  | 2168  | 2138   |
| WET DENSITY               | gm./cc. | 2.203 | 2.269 | 2.280 | 2.248  |
| <b>DRY DENSITY</b>        | gm./cc. | 2.099 | 2.137 | 2.128 | 2.083  |
| WATER CONTENT             |         |       |       |       |        |
| CONTAINER No.             |         | 10    | 11    | 12    | 13     |
| WT. CONTAINER + WET SOIL  | gm.     | 63.32 | 70.69 | 78.30 | 112.99 |
| WT. CONTAINER + DRY SOIL  | gm.     | 61.10 | 67.52 | 74.19 | 105.90 |
| WT. WATER                 | gm.     | 2.22  | 3.17  | 4.11  | 7.09   |
| WT. CONTAINER             | gm.     | 16.35 | 16.38 | 16.40 | 16.42  |
| WT. DRY SOIL              | gm.     | 44.75 | 51.14 | 57.79 | 89.48  |
| <b>WATER CONTENT</b>      | %       | 4.96  | 6.20  | 7.11  | 7.92   |

ตารางที่ ข.3 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TES

c.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

| DETERMINATION No.         |         | 4%    | 6%    | 8%    | 10%   |
|---------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| WT. MOLD + COMPACTED SOIL | gm.     | 5638  | 5712  | 5739  | 5709  |
| WT. MOLD                  | gm.     | 3550  | 3550  | 3550  | 3550  |
| WT. SOIL                  | gm.     | 2088  | 2162  | 2189  | 2159  |
| WET DENSITY               | gm./cc. | 2.196 | 2.273 | 2.302 | 2.270 |
| <b>DRY DENSITY</b>        | gm./cc. | 2.095 | 2.150 | 2.155 | 2.096 |
| <b>WATER CONTENT</b>      |         |       |       |       |       |
| CONTAINER No.             |         | 10    | 11    | 12    | 13    |
| WT. CONTAINER + WET SOIL  | gm.     | 72.46 | 71.86 | 78.96 | 80.01 |
| WT. CONTAINER + DRY SOIL  | gm.     | 69.89 | 68.85 | 74.98 | 75.12 |
| WT. WATER                 | gm.     | 2.57  | 3.01  | 3.98  | 4.89  |
| WT. CONTAINER             | gm.     | 16.31 | 16.38 | 16.49 | 16.45 |
| WT. DRY SOIL              | gm.     | 53.58 | 52.47 | 58.49 | 58.67 |
| <b>WATER CONTENT</b>      | %       | 4.80  | 5.74  | 6.80  | 8.33  |

ตารางที่ ข.4 ตารางการทดสอบการบดอัด COMPACTKION TEST

d.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

| DETERMINATION No.         |         | 4%    | 6%    | 8%     | 10%    |
|---------------------------|---------|-------|-------|--------|--------|
| WT. MOLD + COMPACTED SOIL | gm.     | 5621  | 5689  | 5712   | 5709   |
| WT. MOLD                  | gm.     | 3557  | 3557  | 3557   | 3557   |
| WT. SOIL                  | gm.     | 2064  | 2132  | 2155   | 2152   |
| WET DENSITY               | gm./cc. | 2.170 | 2.242 | 2.266  | 2.263  |
| <b>DRY DENSITY</b>        | gm./cc. | 2.079 | 2.115 | 2.116  | 2.085  |
| <b>WATER CONTENT</b>      |         |       |       |        |        |
| CONTAINER No.             |         | 10    | 11    | 12     | 13     |
| WT. CONTAINER + WET SOIL  | gm.     | 65.04 | 76.09 | 100.72 | 105.18 |
| WT. CONTAINER + DRY SOIL  | gm.     | 62.99 | 72.72 | 95.12  | 98.21  |
| WT. WATER                 | gm.     | 2.05  | 3.37  | 5.60   | 6.97   |
| WT. CONTAINER             | gm.     | 16.35 | 16.38 | 16.40  | 16.42  |
| WT. DRY SOIL              | gm.     | 46.64 | 56.34 | 78.72  | 81.79  |
| <b>WATER CONTENT</b>      | %       | 4.40  | 5.98  | 7.11   | 8.52   |



ตารางที่ ค.1 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน

a.RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |
| A1                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.29      | 11.52 | 83.23             | 405          | 1,730              | 20.78                     | 16.55                             |
| A2                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.91      | 10.65 | 93.52             | 173          | 739                | 7.90                      |                                   |
| A3                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.57      | 10.90 | 87.78             | 431          | 1,841              | 20.97                     |                                   |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 16.55              | KSC.                      |                                   |

ตารางที่ ค.2 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน

a.RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |
| A1                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 11.32      | 11.52 | 100.68            | 686          | 2,930              | 29.10                     | 25.87                             |
| A2                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.76      | 10.65 | 90.90             | 398          | 1,700              | 18.70                     |                                   |
| A3                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.88      | 10.90 | 92.97             | 649          | 2,772              | 29.82                     |                                   |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 25.87              | KSC.                      |                                   |

ตารางที่ ค.3 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน

a.RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |
| A1                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.10      | 11.52 | 80.12             | 594          | 2,537              | 31.67                     | 31.15                             |
| A2                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.54      | 10.65 | 87.25             | 836          | 3,571              | 40.92                     |                                   |
| A3                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.60      | 10.90 | 88.25             | 431          | 1,841              | 20.86                     |                                   |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 31.15              | KSC.                      |                                   |



ตารางที่ ค.4 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน

b.) RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |  |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |  |
| B1                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.28      | 11.52 | 83.00             | 740          | 3,161              | 38.08                     | 39.31                             |  |
| B2                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.28      | 10.65 | 83.00             | 756          | 3,229              | 38.90                     |                                   |  |
| B3                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.25      | 10.90 | 82.52             | 791          | 3,378              | 40.94                     |                                   |  |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 39.31              | KSC.                      |                                   |  |

ตารางที่ ค.5 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน

b.) RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |  |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |  |
| B1                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.13      | 11.52 | 80.63             | 797          | 3,404              | 42.22                     | 41.73                             |  |
| B2                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.14      | 10.65 | 80.72             | 738          | 3,152              | 39.05                     |                                   |  |
| B3                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.20      | 10.90 | 81.71             | 840          | 3,588              | 43.91                     |                                   |  |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 41.73              | KSC.                      |                                   |  |

ตารางที่ ค.6 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน

b.) RAP + FA(5%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |  |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |  |
| B1                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.18      | 11.52 | 81.39             | 867          | 3,703              | 45.50                     | 51.92                             |  |
| B2                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.29      | 10.65 | 83.10             | 1127         | 4,814              | 57.93                     |                                   |  |
| B3                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.18      | 10.90 | 81.46             | 998          | 4,263              | 52.33                     |                                   |  |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 51.92              | KSC.                      |                                   |  |

ตารางที่ ค.7 กำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน

c.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |  |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm. | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |  |
| C1                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.13      | 11.52 | 80.66             | 851          | 3,635              | 45.06                     | } 44.93                           |  |
| C2                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.15      | 10.65 | 80.98             | 655          | 2,798              | 34.55                     |                                   |  |
| C3                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.36      | 10.90 | 84.30             | 1089         | 4,651              | 55.18                     |                                   |  |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | <b>44.93</b>       | KSC.                      |                                   |  |

ตารางที่ ค.8 กำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน

c.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |  |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm. | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |  |
| C1                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.56      | 11.52 | 87.58             | 902          | 3,853              | 43.99                     | } 52.77                           |  |
| C2                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.58      | 10.65 | 87.91             | 1063         | 4,540              | 51.64                     |                                   |  |
| C3                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.43      | 10.90 | 85.47             | 1254         | 5,356              | 62.66                     |                                   |  |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | <b>52.77</b>       | KSC.                      |                                   |  |

ตารางที่ ค.9 กำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน

c.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |  |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm. | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |  |
| C1                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.74      | 11.52 | 90.59             | 1404         | 5,997              | 66.19                     | } 56.80                           |  |
| C2                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.60      | 10.65 | 88.25             | 914          | 3,904              | 44.24                     |                                   |  |
| C3                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.26      | 10.90 | 82.68             | 1161         | 4,959              | 59.98                     |                                   |  |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | <b>56.80</b>       | KSC.                      |                                   |  |

ตารางที่ ค.10 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน

d.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |
| D1                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.15      | 11.52 | 80.98             | 862          | 3,682              | 45.47                     | 42.94                             |
| D2                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.14      | 10.65 | 80.72             | 1025         | 4,378              | 54.23                     |                                   |
| D3                                      | 30 เม.ย. 18 | 7 พ.ค. 18   | 7           | 10.13      | 10.90 | 80.66             | 550          | 2,349              | 29.12                     |                                   |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 42.94              | KSC.                      |                                   |

ตารางที่ ค.11 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 14 วัน

d.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |
| D1                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.13      | 11.52 | 80.56             | 1184         | 5,057              | 62.77                     | 54.23                             |
| D2                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.15      | 10.65 | 80.91             | 958          | 4,092              | 50.57                     |                                   |
| D3                                      | 30 เม.ย. 18 | 14 พ.ค. 18  | 14          | 10.15      | 10.90 | 80.91             | 935          | 3,994              | 49.36                     |                                   |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 54.23              | KSC.                      |                                   |

ตารางที่ ค.12 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 28 วัน

d.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No.                              | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|   |             |             |             | D cm.      | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |
| D1                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.25      | 11.52 | 82.58             | 1186         | 5,066              | 61.34                     | 63.10                             |
| D2                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.13      | 10.65 | 80.66             | 1073         | 4,583              | 56.82                     |                                   |
| D3                                      | 30 เม.ย. 18 | 28 พ.ค. 18  | 28          | 10.15      | 10.90 | 80.98             | 1349         | 5,762              | 71.15                     |                                   |
| Average Ultimate Compressive Strength = |             |             |             |            |       |                   |              | 63.10              | KSC.                      |                                   |

ตารางที่ ค.13 กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strengths, UCS) อายุบ่ม 7 วัน

d.) RAP + FA(10%) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (5%) + NaOH (8M) (โดยใช้โซเดียมซิลิเกตเหลว)

Proving Ring 084-10-029-002-55

K. Factor = (division x 0.0419)

KN.

| Sample No. | Date Molded | Date Broken | Curing days | Dimensions                              |       |                   | Dial Reading | Ultimate LOAD Kgf. | UCS. kg./cm. <sup>2</sup> | Average UCS. kg./cm. <sup>2</sup> |  |
|------------|-------------|-------------|-------------|---|-------|-------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
|            |             |             |             | D cm.                                   | H cm  | A cm <sup>2</sup> |              |                    |                           |                                   |  |
| D1         | 12 มี.ย. 18 | 19 มี.ย. 18 | 7           | 10.10                                   | 11.80 | 80.12             | 740          | 3,161              | 39.45                     | } 34.19                           |  |
| D2         | 12 มี.ย. 18 | 19 มี.ย. 18 | 7           | 10.10                                   | 11.70 | 80.12             | 653          | 2,789              | 34.81                     |                                   |  |
| D3         | 12 มี.ย. 18 | 19 มี.ย. 18 | 7           | 10.10                                   | 11.80 | 80.12             | 531          | 2,268              | 28.31                     |                                   |  |
|            |             |             |             | Average Ultimate Compressive Strength = |       |                   |              | <b>34.19</b>       | KSC.                      |                                   |  |



## ประวัติผู้เขียน

นายจุฑากรณ์ เขตบุญไสย เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน 2534 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนศรีราชาพิทยาคม จังหวัดอุดรธานี และในปี 2553 ได้เข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาเมื่อปี พ.ศ.2557 หลังจากจบการได้เข้าทำงานในบริษัทเอกชน ตำแหน่งวิศวกรประจำโครงการ ซึ่งเป็นบริษัทก่อสร้างหิมาลัย ทางผู้ศึกษาจึงได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อระดับปริญญาโททางด้านการบริหารงานก่อสร้าง ซึ่งทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้มีการเปิดหลักสูตรบริหารงานก่อสร้างและสาธารณสุขโลก ทางผู้ศึกษาจึงได้ตัดสินใจเข้ารับการศึกษาระดับมหาบัณฑิต ในปี พ.ศ.2559 จากการศึกษาทำให้ผู้เขียนมีความรู้ความสนใจในด้านการศึกษานำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ โดยโซเดียมซิลิเกตผงเป็นอย่างดี

