

การปรับปรุงมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไชเกิดด้วยเถ้าลอยและเถ้า
แกลเบจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

การปรับปรุงมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไซเกิดด้วยเถ้ายและเถ้า แคลบจีโอฟอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(รศ. ดร.ขวัญกมล ดอนขวา)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กิตติพงษ์ บุญล้อม : การปรับปรุงมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลด้วยเถ้าลอย และเถ้าแกลบ จีโพลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (IMPROVEMENT OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT BY USING FLY ASH-RICE HUSK ASH BASED GEOPOLYMER AS A PAVEMENT BASE MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจฉินวัฒน์

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในจีโพลิเมอร์ ในการปรับปรุงกำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่ได้จากกระบวนการสีข้าว สารเชื่อมประสานคือจีโพลิเมอร์ วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลด้วยเถ้าลอย เถ้าแกลบและสารละลายจีโพลิเมอร์จะถูกบดอัดโดยวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยแปรผันอัตราส่วน FA/RHA ดังนี้ 100/0 60/40 40/60 0/100 และ อัตราส่วนสารเชื่อมประสาน(Liquid ratio) ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$) ดังนี้ 50/50, 80/20, 100/0 ผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุด แกนเดียวพบว่าที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เดียวกัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน FA/RHA เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน FA/RHA ที่เท่ากัน กำลังอัดมีค่าสูงสุดและต่ำสุดที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 80/20 และ 100/0 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน กับมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท พบว่า เถ้าแกลบซึ่งมีราคาถูกลงกว่าเถ้าลอย สามารถใช้แทนที่เถ้าลอยได้สูงสุดถึงร้อยละ 33.9 และ 55.7 ที่ปริมาณสารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ ตามลำดับ งานวิจัยนี้ช่วยยืนยันว่าคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโพลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบยั่งยืน

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

KITTIPONG BOONLORM : IMPROVEMENT OF RECYCLED ASPHALT
PAVEMENT BY USING FLY ASH-RICE HUSK ASH BASED
GEOPOLYMER AS A PAVEMENT BASE MATERIAL. ADVISOR :
ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D.

This research presents the use of Fly Ash-Rice Husk Ash (FA-RHA) based geopolymer for improving the compressive strength of recycled Asphalt Pavement (RAP) to meet the standard requirements for base material specified by the Department of Highway (DOH) and Department of Rural Road (DRR), Thailand. Geopolymer was from a mixture of FA from coal-burning power plants and RHA from rice mill, which was obtained in the process of burning rice husk, with a liquid alkaline activator (L), which is a mixture of sodium hydroxide solution (NaOH) and sodium silicate solution (Na_2SiO_3). FA/RHA ratios were 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 and 0/100, while the NaOH/ Na_2SiO_3 ratios were 50/50 80/20 and 100/0. The mixtures were compacted under the modified proctor energy. RAP-FA-RHA geopolymer samples at each NaOH/ Na_2SiO_3 ratio were prepared at the Optimum Liquid alkaline activator Content (OLC) for Unconfined Compressive Strength (UCS) tests. The UCS test was conducted at 7 days of curing. The test results showed that the UCS of RCA-FA-RHA geopolymer increased as the FA/RHA ratio increase a at the same NaOH/ Na_2SiO_3 ratio. For a particular FA/RHA ratio, NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ provided the highest UCS value while NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$ provided the lowest UCS value. By comparing the 7-day UCS results to the specified strength requirement for base material of the DOH and DRR, rice husk ash was noted to be able to be used in conjunction with fly ash for up to 33.9% and 55.7% at NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$, respectively. This research confirms that RAP-FA-RHA geopolymers can be used as a sustainable stabilized base material.

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 ประธานหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่กรุณาตรวจสอบให้คำแนะนำ และผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขอขอบพระคุณ รวมทั้งขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และเพื่อนนักศึกษาปริญญาโทรุ่น 14 หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภคทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือและกำลังใจระหว่างการศึกษาและทำโครงการมหابัณฑิตฉบับนี้

ขอขอบคุณพี่พนักงานผู้ดูแลห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการมหابัณฑิต

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์จากการศึกษาค้นคว้านี้ ขอน้อมรำลึกพระคุณบิดา มารดา ตลอดจน บุรพจารย์และผู้ที่มีพระคุณ ที่ให้การแนะนำอบรม ทั้งการสนับสนุนด้วยดีตลอดมา ทำให้การศึกษาค้นคว้านี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

กิตติพงษ์ บุญล้อม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	4
2.1.1 มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP).....	4
2.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA).....	4
2.1.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA).....	6
2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	8
2.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Particle Size Distribution).....	8
2.2.2 การทดสอบการบดอัด (Compaction test).....	8
2.2.3 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test).....	11
2.3 เทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer).....	11
2.3.1 พื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์.....	11
2.3.2 กระบวนการการเกิดจีโอพอลิเมอร์.....	12
2.4 มาตรฐานงานทาง.....	14
2.4.1 มาตรฐานพื้นทางงานหินคลุก.....	14

2.4.2	มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)	16
2.5	มาตรฐานวิธีการทดลอง	17
2.5.1	วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน	17
2.5.2	วิธีการทดลองหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)	21
3.	วิธีดำเนินการวิจัย	25
3.1	บทนำ	25
3.2	การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง	26
3.2.1	วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล	26
3.2.2	เถ้าลอย	27
3.2.3	เถ้าแกลบ	27
3.3	การบดอัดวัสดุ	28
3.4	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	28
4.	ผลการศึกษา และวิเคราะห์ผล	29
4.1	บทนำ	29
4.2	การบดอัด	29
4.3	กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบ	30
4.3.1	กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบ (FA/RHA = 0/100) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์	30
4.3.2	กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA = 40/60) ที่ปรับปรุงด้วย จีโอพอลิเมอร์	31
4.3.3	กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA=60/40) ที่ปรับปรุงด้วย จีโอพอลิเมอร์	32
4.3.4	กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์	33
4.3.5	กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลผสม เถ้าแกลบและเถ้าลอยที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน	34

4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวง ชนบทกับปริมาณการใช้เถ้าแกลบในแต่ละส่วนผสม.....	35
4.5	การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	38
4.6	ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emission).....	39
5.	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	42
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	42
5.2	ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป.....	43
	เอกสารอ้างอิง.....	44
	ประวัติผู้เขียน.....	48



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย.....	5
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบ.....	7
2.3	การเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor.....	9
2.4	ขนาดคละ (Grading) ของวัสดุทางหินคลุก.....	15
3.1	จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ.....	25
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย, เถ้าแกลบและ RAP.....	27
4.1	ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด.....	40



สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพถ่ายขยายผิวของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผา.....	6
2.2 ภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบที่บดละเอียด.....	7
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และร้อยละของความชื้น (Water content) ของการบดอัดแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor.....	10
2.4 แบบจำลองกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทั่วไป.....	13
3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	26
3.2 การกระจายขนาดผลึกของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอยและเถ้าแกลบ.....	28
4.1 ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม.....	30
4.2 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบ (FA/RHA=0/100) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์.....	31
4.3 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA=40/60) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์.....	32
4.4 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA=60/40) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์.....	33
4.5 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าลอย (FA/RHA=100/0) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์.....	33
4.6 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	35
4.7 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบ ที่ อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$	36
4.8 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละ เถ้าแกลบ ที่ อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$	37
4.9 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบ ที่ อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$	38
4.10 ราคาเทียบกับอัตราส่วน $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ โดยที่เลือกใช้อัตราส่วน FA/RHA ที่มากที่สุดที่ผ่านมาตรฐาน ทข.(1,724 kPa) และมาตรฐาน ทล. (2,431 kPa).....	39
4.11 ปริมาณ carbon Emission ในแต่ละอัตรา $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50, 80/20$ และ 100/0 เทียบกับ RAP+Cement 4% (1,724 kPa) และ RAP+Cement 7% (2,413 kPa).....	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการก่อสร้างถนนต่าง ๆ โดยก่อสร้างขึ้นมาใหม่ และปรับปรุงถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ตามความต้องการใช้ท้องถนนจากปริมาณรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปิดใช้งานไประยะหนึ่ง มักจะเกิดความเสียหาย เนื่องจากการรับน้ำหนักของยานพาหนะ การเสื่อมสภาพเองของวัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงของ ภูมิอากาศ เช่น การหลุดร่อน การเกิดร่องล้อ และรอยแตกแบบต่างๆ ถ้าไม่มีการซ่อมแซม บำรุงรักษา ถนนจะเกิดความเสียหายมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อการใช้งานของผู้ใช้ถนน และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่มากขึ้น ในกรณีที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพจะถูกรื้อและนำทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ ปัจจุบันมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลได้รับความนิยมนำกลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมสำหรับงานก่อสร้างทางเนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดของแต่ละหน่วยงานที่กำหนด มีความพยายามที่จะใช้ มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ผสมกับวัสดุมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติสำหรับการใช้งานในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนน อย่างไรก็ตามบ่อยครั้งที่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมนั้นยังไม่ถึงข้อกำหนดของหน่วยงานที่ต้องการ (Arulrajah et al., 2011, Taha et al., 1999) Saride et al. (2014) ได้ศึกษาถ้อยในการปรับปรุงคุณสมบัติของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยการแทนที่ด้วยถ้อยในปริมาณที่แตกต่างกัน นักวิจัยจำนวนมากได้รายงานการใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ได้เป็นที่น่าพอใจ (Hoyos et al., 2011, Taha et al., 2003, Taha et al., 2002, Puppala et al., 2011) อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน เนื่องจากการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศ Davidovits et al. (2013) ได้แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.55 ตัน และยังต้องการ การเผาไหม้เชื้อเพลิงคาร์บอนซึ่งก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.4 ตัน ดังนั้นในการผลิตการปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งสิ้นประมาณ 1 ตัน ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นจะต้องใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้วัสดุที่ทดแทนการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

Davidovits (1991) ได้คิดค้นสารเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เรียกว่าจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างวัสดุที่มีปริมาณอลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) มาก กับสารอัลคาไลน์ (Alkaline Activator) วัสดุที่มีปริมาณอลูมินาและซิลิกามากและใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) เป็นต้น (Palomo et al., 1999) ซึ่งล้วนแต่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมทั้งสิ้น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในการปรับปรุงกำลังอัดของ RAP เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง และศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Liquid Alkaline activator (L) และ อัตราส่วนที่เหมาะสมของ FA และ RHA ต่อการพัฒนากำลังอัด และเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญทั้งในด้านการพัฒนาวัสดุพื้นทางอย่างยั่งยืนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของ อัตราส่วนของ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เพื่อใช้เป็น Liquid Alkaline Activator (L) และอัตราส่วนของ FA/RHA ต่อการพัฒนากำลังของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไรซ์เคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจาก FA-RHA (FA-RHA geopolymer)
- 1.2.2 นำเสนออัตราส่วนของ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เพื่อใช้เป็น Liquid Alkaline Activator (L) และอัตราส่วนของ FA/RHA สำหรับปรับปรุงมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไรซ์เคิลเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

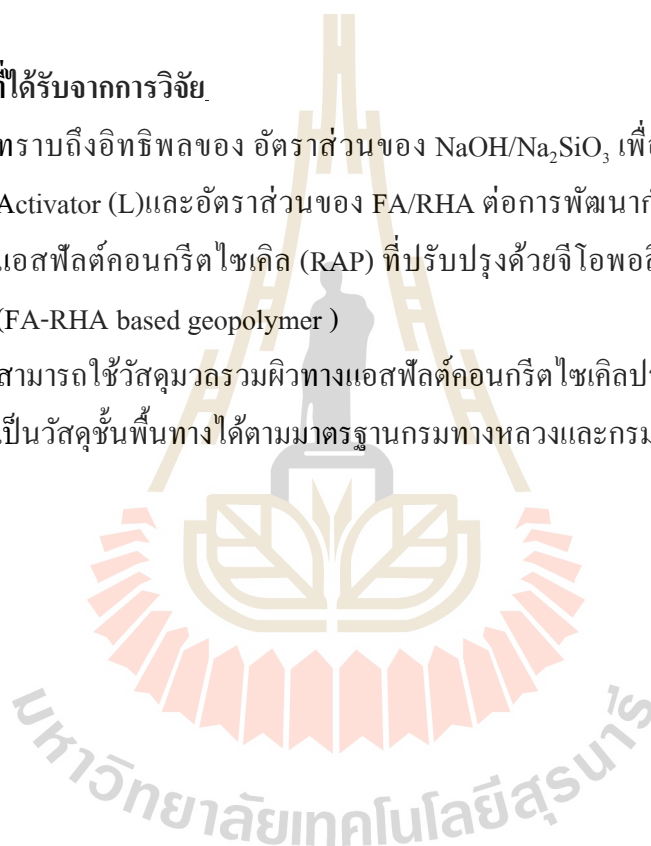
- 1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไรซ์เคิล(RAP) เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA)
- 1.3.2 การบดอัดใช้ Mold มาตรฐานขนาด 4 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว (101.6 x 116.4 มิลลิเมตร) ใช้วิธีบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) และใช้ค้อนแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction hammer) เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว (50.8 มิลลิเมตร) มีมวลรวมทั้งค้อนมี 4.537 กิโลกรัม (10 ปอนด์) มีปลอกที่ทำไว้อย่างเหมาะสมเป็นตัวบังคับให้ระยะตกเท่ากับ

18 นิ้ว และบดอัด 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งใช้อัตราส่วน L content ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$) คือ 50/50 80/20 และ 100/0 โดยใช้ปริมาณเถ้าลอยและเถ้าแกลบ เท่ากับ ร้อยละของน้ำหนัก 30 มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไซเคิล (RAP) อัตราส่วนของ FA/RHA คือ 100/0 60/40 40/60 และ 0/100 และสำหรับ ทุก อัตราส่วนการผสมใช้อายุ บ่มคือ 7 วัน

1.3.3 เปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อกำหนดในการก่อสร้างทางของกรมทางหลวงและ กรมทางหลวงชนบท

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของ อัตราส่วนของ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เพื่อใช้เป็น Liquid Alkaline Activator (L) และอัตราส่วนของ FA/RHA ต่อการพัฒนากำลังของมวลรวมผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีต ไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจาก FA-RHA (FA-RHA based geopolymer)
- 1.4.2 สามารถใช้วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไซเคิลปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท



บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP)

ผิวทางแอสฟัลต์ที่ถูกรื้อถอนออกจากหน้างานบางส่วนถูกนำกลับไปใช้ในการผลิตผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ แต่ส่วนที่เหลือจะนำไปกองไว้ในสถานที่เก็บเป็นขยะที่ไม่ได้ใช้งาน ในแต่ละปีมีการเพิ่มขึ้นของขยะผิวทางแอสฟัลต์จากการซ่อมแซมถนนเป็นจำนวนมาก ผิวทางแอสฟัลต์จากการซ่อมถนนลาดยางดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในงานวิศวกรรมได้ โดยเรียกว่า “Recycled asphalt pavement” หรือ RAP การนำ RAP มาใช้ในงานวิศวกรรมโดยตรงอาจประสบปัญหาการใช้เนื่องจาก RAP บดอัดได้ไม่ดีและมีกำลังอัดต่ำแม้จะปรับปรุงด้วยซีเมนต์แล้วก็ตาม เนื่องจากขนาดคละไม่ดีและยางแอสฟัลต์ที่มีอยู่ในส่วนผสม อย่างไรก็ตาม ข้อดีของ RAP คือ มีวัสดุคัดเลือกชั้นดี เช่น หินคลุก เป็นส่วนผสมหลัก

2.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

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

เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นของแข็งเป็นสารแขวนลอยอยู่ในก๊าซไอเสีย โดยปกติแล้วมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอยู่ในช่วง $0.5 \mu\text{m}$ ถึง $100 \mu\text{m}$ ซึ่งปรากฏอยู่ในสองรูปแบบ ได้แก่ สัณฐาน ซึ่งมีลักษณะ โกงมน และเรียบเนียน และผลึก ซึ่งมีลักษณะคม แหลม และอันตราย ส่วนมากประกอบด้วย 1) SiO_2 2) Al_2O_3 และ 3) Fe_2O_3

ในปี 2009 Chindaprasirt et al. ได้ศึกษาพบว่า มีโรงไฟฟ้าในประเทศไทยผลิตเถ้าลอยได้ถึง 4,000 ล้านตันต่อปี มีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมคอนกรีต 1,800 ล้านตันต่อปี สำหรับทั่วโลกมีการประมาณปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตได้จากถ่านหินต่อปี มากกว่า 390,000 ล้านตัน ในปี 1998 โดยประเทศที่เป็นผู้ผลิตหลักคือ จีนและอินเดีย และมีเพียงร้อยละ 14 เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในขณะที่เหลือถูกกองทิ้งไว้ทั่วไป (Malhotra, 1999) ภายในปี 2010 ปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตได้ทั่วโลกประมาณ 780,000 ล้านตันต่อปี (Malhotra, 2002) เนื่องจากปริมาณเถ้าลอย

ที่ถูกกองทิ้งไว้ตามพื้นที่ต่างๆ เริ่มส่งผลกระทบต่อภาวะสิ่งแวดล้อมโดยรอบพื้นที่นั้นๆ ดังนั้นการนำเถ้าลอยกลับมาใช้ใหม่จึงจำเป็นอย่างยิ่ง จากข้อมูลของ American Coal Ash Association (ACAA) ในปี 2003 การใช้ประโยชน์ของเถ้าลอย เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตมีประโยชน์อย่างสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังช่วยพัฒนาความแข็งแกร่งของคอนกรีต ลดการใช้พลังงาน ลดการผลิตก๊าซเรือนกระจก และลดปริมาณเถ้าลอยที่สะสมอยู่ และช่วยประหยัดทรัพยากรและวัสดุธรรมชาติชนิดอื่นด้วย

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

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย (ASTM C618, 2005)

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

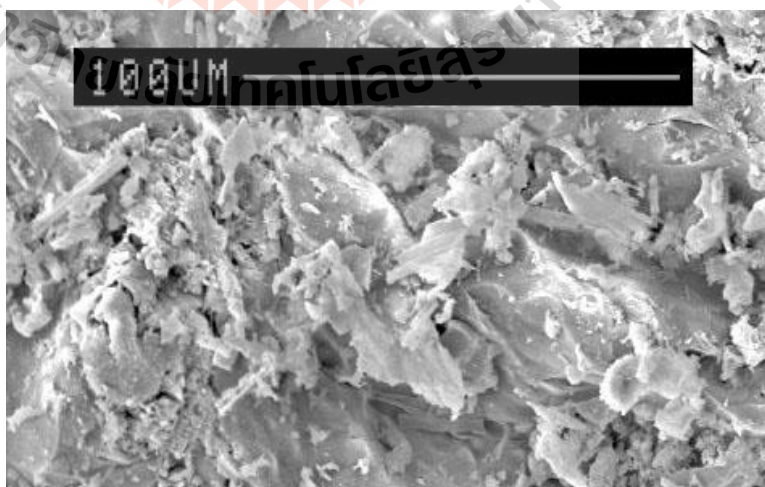
Class N คือ วัสดุปอซโซลาน (pozzolans) ธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการหรือผ่านกระบวนการเผาที่มีคุณสมบัติผ่านข้อกำหนดในกลุ่มนี้เช่นดินเบา (diatomaceous earths) หินเชิร์ต (cherts) และหินดินดาน (shales) ที่มันวาว หินเถ้าภูเขาไฟ (tuffs) และเถ้าภูเขาไฟ (volcanic ashes) และวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติที่น่าพอใจเช่นดินดานและดินเหนียวบางชนิด

Class F คือ ถ่านที่ได้มาจากกระบวนการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือถ่านหิน บิทูมินัส (Bituminous coal) ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ที่ให้ไว้ในที่นี้ สำหรับถ่านในกลุ่มนี้ มีคุณสมบัติปอซโซลานิก (pozzolanic properties)

Class C คือ ถ่านที่ได้มาจากกระบวนการเผาถ่านลิกไนต์ (Lignite) หรือถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous coal) ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ที่ให้ไว้ในที่นี้ สำหรับถ่านในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolan properties) และมีคุณสมบัติซีเมนต์ (Cementitious properties)

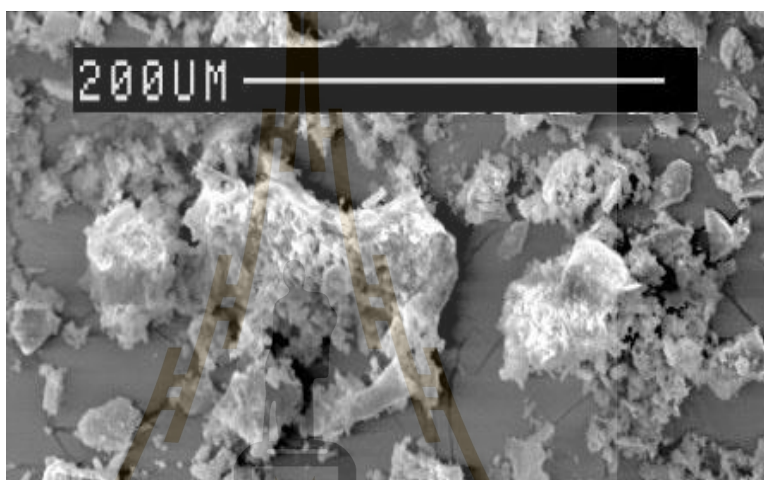
2.1.3 ถ่านแกลบ (Rice Husk Ash, RHA)

ในปีหนึ่งๆประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตันของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กก. และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้ถ่านแกลบ (rice husk ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กก. การเผาแกลบที่อุณหภูมิในช่วง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส จะทำให้ SiO_2 อยู่ในรูปไม่ผลึกซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ถ่านแกลบที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้มีสารอินทรีย์เหลืออยู่และไม่เหมาะสมกับการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ แต่ถ่านแกลบที่อุณหภูมิสูงเกินไปซิลิกาที่ได้จะเป็นผลึกซึ่งจะเอื้อต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและไม่เหมาะต่อการนำไปผสมทำคอนกรีตเช่นกัน การเผาแกลบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส สามารถทำได้โดยการเผาแกลบกองเล็กๆ โดยใช้แกลบหนักประมาณ 20 กก. แกลบที่ได้จะมีสีเทาขาว รูปที่ 2.1 แสดงผิวของถ่านแกลบที่มีรูพรุนสูง ซึ่งจะดูดน้ำเข้าไปในตัวถ่านแกลบได้ง่าย ส่วนรูปที่ 2.2 เป็นรูปถ่ายขยายของถ่านแกลบที่บดละเอียดซึ่งจะเห็นว่าถ่านแกลบมีขนาดเล็กมาก มีรูปร่างไม่แน่นอน และยังคงมีรูพรุนอยู่บ้าง แต่น้อยกว่าก่อนการบดมาก



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายขยายผิวของถ่านแกลบที่ได้จากการเผา

นอกจากนี้ยังนิยมใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี ซึ่งแกลบที่ได้จากโรงสีมีสีดำ และอุณหภูมิของการเผาแกลบจะสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากเวลาในการเผาค่อนข้างสั้น คือต่ำกว่า 10 นาที ทำให้แกลบดำที่ได้ยังอยู่ในรูปไม่เปลี่ยนเป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ และสามารถใส่ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ ซึ่งเมื่อนำไปบดให้ละเอียดจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี การบดแกลบให้ละเอียดเป็นการเพิ่มความไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน แกลบเทาหรือเทาขาวบดละเอียดได้ง่ายกว่าแกลบดำ



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายขยายของแกลบที่บดละเอียด

องค์ประกอบทางเคมีของแกลบแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งพบว่าแกลบมี SiO_2 สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 พบว่าแกลบที่เผาในประเทศไทยมี SiO_2 อยู่ร้อยละ 92.28, 95.36, และ 91.84 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของธาตุอื่นและค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้แกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่าน คาร์บอนสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแกลบ

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	
	ปูนซีเมนต์ประเภท I	แกลบ
SiO_2	20	90
Al_2O_3	5	0.5

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	
	ปูนซีเมนต์ประเภท I	เถ้าแกลบ
Fe ₂ O ₃	3	2.0
CaO	60	0.5
MgO	1.1	0.2
SO ₃	2.4	1.5
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	-
LOI	2	4.7

2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

2.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Particle Size Distribution)

การหาขนาดเม็ดวัสดุเป็นการทดสอบหนึ่งในหลายๆการทดสอบที่ต้องรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์ขนาดวัสดุโดยใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ (Sieve Analysis) โดยจะได้ออกมาเป็นเส้นการกระจายขนาดของตัวอย่างวัสดุ คำนวณได้จากน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ โดยเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปจนมีขนาดเล็กที่สุด คือตะแกรงขนาดเบอร์ 200 สำหรับขนาดตะแกรงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ผู้ทำการทดสอบได้อ้างอิง

ตามมาตรฐาน ASTM D422-63 การคำนวณร้อยละผ่านตะแกรง (Percent Finer) ดังต่อไปนี้

$$1. \text{ ร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100$$

$$2. \text{ ร้อยละการค้างสะสม} = \text{ผลบวกสะสมของร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรงที่}$$

หยาบกว่า

$$3. \text{ ร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (\% Finer)} = 100 - \text{ร้อยละค้างสะสม}$$

2.2.2 การทดสอบการบดอัด (Compaction test)

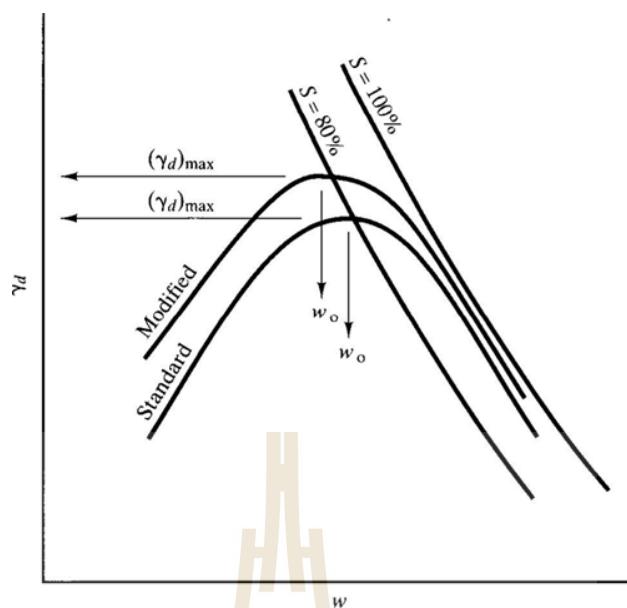
วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้ามีน้ำอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆมวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor

(1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิไฟด์ (Modified Proctor Test)

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor

Test	Mold size	Weight of Hammer (lb.)	No. of Layer	Height of Drop (in.)	No. of blow per layer	Energy/Vol. ft-lb/ft ³
Standard Proctor	๑4"x 4.6"	5.5	3	12	25	12,400
	๑6"x 5.0"	5.5	3	12	56	12,400
Modified Proctor	๑4"x 4.6"	10	5	18	25	56,000
	๑6"x 5.0"	10	5	18	56	56,000

ในการทำการบดอัดในห้องทดลองซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาผึ่งให้แห้ง แล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาณที่พอเหมาะแล้วเริ่มทำการบดอัดในแบบที่ใช้บดอัด โดยวิธีการที่จะพูดถึงรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นอย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดแต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น จะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า “ความหนาแน่นสูงสุด” (Maximum Dry Density, γ_d) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า “ความชื้นที่เหมาะสม” (Optimum Water Content, OWC) ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และร้อยละของความชื้น (Water content) ของการบดอัดแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor

ที่มา <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/>

ถ้าพลังงาน ในการบดอัดสูงขึ้นในดินชนิดเดียวกัน เส้นกราฟการบดอัดจะขยับสูงขึ้น ดังเช่นในรูปที่ 2.3 จะสามารถสังเกตลักษณะพิเศษสองประการ คือ ค่า γ_d ของ Modified Proctor จะสูงกว่า γ_d ของ Standard Proctor และค่าร้อยละความชื้นที่จุด γ_d สูงสุด ซึ่งเรียกว่า ความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) ก็จะลดลงด้วย ขณะที่ γ_d เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะพิเศษนี้เป็นคุณสมบัติของดินโดยทั่วไปเมื่อได้รับการบดอัด

การคำนวณร้อยละความชื้นในดิน (Water content) ความหนาแน่นเปียก (Wet density) และความหนาแน่นแห้ง (Dry density) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละความชื้นในดิน (w)} = \frac{\text{มวลของดินเปียก} - \text{มวลของดินแห้ง}}{\text{มวลของดินแห้ง}} \times 100 \quad \text{..... (2.1)}$$

$$\text{ความหนาแน่นเปียก } (\gamma_t) = \frac{\text{มวลดินเปียก (A)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (V)}} \quad \text{..... (2.2)}$$

$$\text{ความหนาแน่นแห้ง } (\gamma_d) = \frac{P_t}{1 + \frac{\text{ร้อยละความชื้นในดิน (w)}}{100}} \quad \text{..... (2.3)}$$

2.2.3 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test)

การทดสอบกำลังอัดของวัสดุเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้รับแรงอัดว่าจะสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากน้อยเพียงใดและเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุนั้นด้วยเพื่อที่จะได้นำวัสดุนั้นไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม สำหรับการคำนวณกำลังอัดคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D1633 (2007) ได้ดังนี้

$$\text{ค่ากำลังอัด (Compressive strength)} = \frac{\text{แรงกดสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}} \quad \text{..... (2.4)}$$

2.3 เทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

2.3.1 พื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์

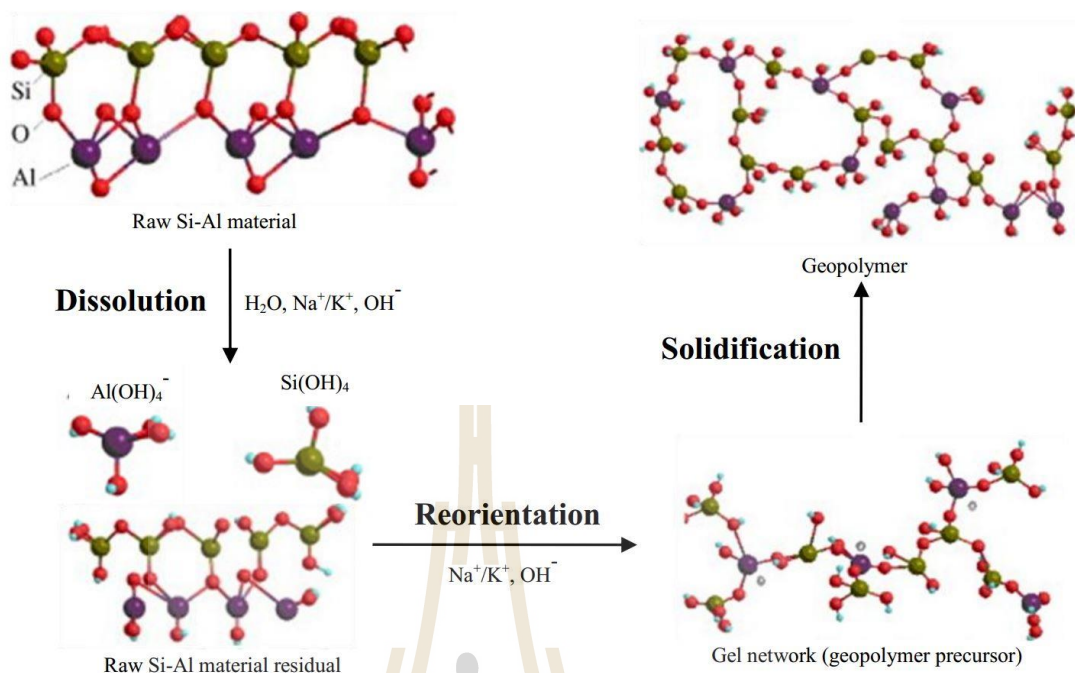
ในปี 1991 ได้มีนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสท่านหนึ่งนามว่า Joseph Davidovits ได้ประดิษฐ์และได้ทดลองใช้จีโอพอลิเมอร์ เป็นครั้งแรก สำหรับพื้นฐานของ จีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยธาตุหลักอยู่สองชนิดคือ อลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) ซึ่งธาตุทั้งสองเป็นส่วนประกอบสำคัญขององค์ประกอบโครงสร้างพื้นฐานทางธรณีวิทยา สิ่งอะไรที่เราควรพิจารณาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์เรามีวัสดุใหม่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

นับเป็นเวลามากกว่า 30 ปีแล้วตั้งแต่ Joseph Davidovits ได้เผยแพร่บทความวิจัยชิ้นแรกเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ในปี 1979 แต่ในทางกลับกันแม้ว่าวิทยาการทางจีโอพอลิเมอร์ได้มีการศึกษามาเป็นเวลานานมากกว่า 3 ทศวรรษจนถึงทุกวันนี้ก็ตาม แต่การวิเคราะห์วิจัยในสถาบันการศึกษาต่างๆยังมีน้อยมากในช่วงระยะเวลา 20 ปีแรก ระหว่างปี 1979 และ 1999 มีวารสารทางวิชาการและสิทธิบัตรเพียง 91 ชิ้น และมีเพียงการประชุมวิชาการครั้งเดียวที่มีเนื้อหา

เกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์ไลเซชัน (Geopolymerization) (Xu, 2002) แต่อย่างไรก็ตามใน 10 ปีต่อมาการวิจัยเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ก็ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก (Davidovits, 2010) โดยหนึ่งในนั้นคือประเทศจีนเพียงปีเดียว ปี 2010 มีการเผยแพร่บทความเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์เป็นจำนวนมากถึง 135 ชิ้น ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นไปได้หลากหลายแนวทาง ตัวอย่างเช่น วัสดุทนไฟ เครื่องประดับ ฉนวนกันความร้อน วัสดุก่อสร้างต้นทุ่นต่ำ กระเบื้องพลังงานต่ำ วัสดุทนความร้อนสูง วัสดุทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ วัสดุประยุกต์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมโรงหล่อโลหะ วัสดุเชื่อมประสานและคอนกรีต สารประกอบสำหรับบำรุงรักษาและเพิ่มกำลังโครงสร้างพื้นฐาน เทคโนโลยีขั้นสูงเกี่ยวกับยางเรซิน การป้องกันกัมมันตภาพรังสีและขยะพิษ งานศิลปะตกแต่ง มรดกทางวัฒนธรรม โบราณคดี และการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ (Davidovits, 2011) จนถึงปัจจุบันนี้ คุณสมบัติต่างๆและการใช้ประโยชน์จาก จีโอพอลิเมอร์ได้ถูกศึกษาแล้วทั้งในด้านวิทยาศาสตร์หลายแขนงและทางด้านอุตสาหกรรมด้วย เช่น เคมีอนินทรีย์สมัยใหม่ เคมีกายภาพ เคมีคอลลอยด์ วิทยา ธรณีวิทยาและในทุกแขนงของเทคโนโลยีกระบวนการวิศวกรรม (Davidovits, 2011)

2.3.2 กระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์

ในปี 1988 Joseph Davidovits ให้คำจำกัดความการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) ว่าเป็นกระบวนการคายความร้อนซึ่งมีโอลิโกเมอร์ (Oligomer) รวมทั้ง ไดเมอร์ (Dimer) และ ไตรเมอร์ (Trimer) เป็นตัวกลางซึ่งโอลิโกเมอร์เป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างมาโคร โมเลกุลสามมิติ (Three dimensional macromolecular edifice) ต่อมาในปี 1991 Joseph Davidovits ยังระบุด้วยว่ากระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์อาจจะถือได้ว่าเหมือนกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (zeolite) กล่าวคือปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ คล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดโอไลต์ (zeolite) แม้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เป็นอสัณฐานกึ่งผลึก (semi-crytalline) มากกว่าผลึก (crytalline) โดยทั่วไปแล้วกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนการเกิดกระบวนการสลายตัว (dissolution) กระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ (reorientation) และกระบวนการแข็งตัว (solidification) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (Duxson et al., 2005)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทั่วไป (Yao et al., 2009)

ในระหว่างขั้นตอนการสลายตัว ทั้งซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) จะถูกสร้างขึ้นเมื่อวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบเข้ามาสัมผัสกับสารประกอบอัลคาไลน์ (Alkaline Solution) ในปี 2002 Hua Xu ได้ระบุเพิ่มเติมว่ากระบวนการเกิดซิลิกอนและอลูมิเนียมอาจพิจารณาจากหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้ ความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ ปริมาณไอออนบวกของกลุ่มธาตุโลหะในสารละลายอัลคาไลน์ เช่น Na^+ K^+ เป็นต้น อัตราการและเวลาในการผสม โครงสร้างภายในของวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียม โดยปัจจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อกระบวนการสลายตัวของซิลิกอนและอลูมิเนียมในวัสดุ

ขั้นตอนต่อมาคือกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ (reorientation) เป็นกระบวนการทำให้ซิลิกอนและอลูมิเนียมแตกตัว (Si^{4+} , Al^{3+}) เป็นโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ยิ่งไปกว่านั้นโอลิโกเมอร์ที่อยู่ในส่วนที่เป็นน้ำจะถูกก่อกวนหรือควบแน่นออกมาในลักษณะเป็นเจล (gel) ในขณะเดียวกันก็เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิกอนและอลูมิเนียมออกจากวัสดุเพิ่มมากขึ้นเมื่อ Si^{4+} , Al^{3+} สลายไปจากผิวของวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมจนเจือจางและหมดไป โดย Hua Xu ในปี 2002 ได้เสนอว่า อัตราการและความแรงของการผสมเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลในขั้นตอนนี้มากที่สุด ระยะเวลาการชะล้างหรือการสลายตัวและความแรงของการกวนหรือผสมสามารถส่งผลให้เกิดการหลุดออกของซิลิกอนและอลูมิเนียมจากผิวของวัสดุที่เพิ่มมากขึ้นได้และการกวนที่รุนแรงสามารถทำลาย

พันธะที่เชื่อมอยู่ระหว่างอนุภาคซิลิกอนหรืออลูมิเนียมกับส่วนที่เป็นเจลได้ ดังนั้นจึงเป็นการเร่งให้กระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของซิลิกอนและอลูมิเนียมเร็วขึ้น

ในขั้นตอนการแข็งตัว (solidification) กระบวนการแข็งตัวเนื่องจากความเย็น (Gelation) ยังคงจัดเรียงและจัดระเบียบอยู่ต่อเนื่องส่งผลทำให้การเชื่อมประสานของเครือข่ายเจลเพิ่มขึ้นและส่งผลให้เครือข่ายอลูมิเนียมสัณฐานหรือกิ่งผลึกสามมิติเกิดประกอปกกันเป็นจีโอพอลิเมอร์ ในขั้นตอนนี้อุณหภูมิและการไหลเวียนของอากาศเป็นสองปัจจัยที่สำคัญต่อการกำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ขั้นสุดท้าย (Xu, 2002) Palomo et al. ในปี 1999 กล่าวว่าโดยทั้ง 3 ขั้นตอน ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ไม่ได้มีลำดับการเกิดที่แน่ชัด กล่าวคือกระบวนการทั้ง 3 ขั้นตอนจะเกิดขึ้นไปพร้อมๆกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดกระบวนการแข็งตัวทั้งสองกระบวนการที่เหลือทั้งกระบวนการสลายตัวและกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ก็เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

2.4 มาตรฐานงานทาง

2.4.1 มาตรฐานพื้นทางงานหินคลุก

ประกอบด้วยหินโม่รวมซึ่งมีขนาดคละ (Grading) อย่างสม่ำเสมอจากใหญ่ไปเล็ก โดย จะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับ การตรวจสอบว่าถูกต้องแล้วโดยการเกลี่ยแต่งและบดอัดให้ถูกต้องตามแนวระดับความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบวัสดุหินโม่รวม (Crush rock aggregate type base) ต้องเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่มีผุ และปราศจากวัสดุอื่นเจือปนจากแหล่ง ที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวง วัสดุจำพวก Shale ห้ามนำมาใช้ ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของ วัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

- 2.4.1.1 ค่าความสึกหรอเมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 202/2515 “วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ไม่เกินร้อยละ 40
- 2.4.1.2 ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 213/2531 “วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ มีค่าไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลอง ทุกครั้งที่นำมาใช้
- 2.4.1.3 ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกับ ส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือ 4

ปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

- 2.4.1.4 ขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 205/2517 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตาราง ที่ 2.5
- 2.4.1.5 ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
- 2.4.1.6 ค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 102/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- 2.4.1.7 ค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 103/2515 วิธีการทดลองหาค่า Plasticity Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดิน” ไม่เกิน ร้อยละ 6

ตารางที่ 2.4 ขนาดคละ (Grading) ของวัสดุทางหินคลุก

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

- 2.4.1.8 ค่า CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 109/2517 “วิธีการทดลองเพื่อหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตและไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟสหรือทริตเมนต์ที่ความแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความหนาแห่งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท.108/2517 5 “วิธีการ

ทดลอง Compaction Test” แบบสูงกว่า มาตรฐานการควบคุมคุณภาพ ขณะก่อสร้างการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกให้ก่อสร้างเป็นชั้น ๆ โดยให้ความหนาเท่าๆกันและแต่ละชั้นไม่เกิน 150 มิลลิเมตร เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางหินคลุกซึ่งแบบกำหนดไว้หนาไม่เกิน 150 มิลลิเมตร จนได้ความยาวพอเหมาะในแต่ละวันแล้วดำเนินการตรวจสอบค่าระดับและทดสอบความหนาแน่นของการบดทับหากผลที่ได้เป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นถัดไปได้ ในกรณีที่แบบพื้นทางหินคลุกกำหนดไว้หนา 200 มิลลิเมตร ให้ผู้รับจ้างก่อสร้างพื้นฐานเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยที่เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางชั้นแรกจนได้พอเหมาะที่จะก่อสร้างพื้นทางในชั้นถัดไปแล้วให้ ดำเนินการทดลองความแน่นของการบดทับ หากผลการทดลองเป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกชั้นถัดไปได้ตามข้อกำหนดก่อนการปูพื้นทางหินคลุกชั้นถัดไปให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วชุ่มชื้นถ้าผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกเรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อนแล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้นผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไปแล้วควรมีความชุ่มชื้นพอควรในขณะที่ทำการปูพื้นทางหินคลุกในชั้นถัดไปเพื่อช่วยให้ชั้นหินคลุกแต่ละชั้นยึดกันดี ผิวหน้าที่หยาบของพื้นทางหินคลุกที่ได้ก่อสร้างไปแล้วที่มีความชื้นพอเหมาะจะช่วยให้เกิดการเกาะยึดที่ดีกับชั้นพื้นทางหินคลุกที่กำลังจะก่อสร้างทับลงไป การทดสอบความหนาแน่นของการบดทับงานพื้นทางหินคลุกจะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห่งสม่ำเสมอ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของความแน่นแห่งสูงสุด ที่ได้จากการทดลองหินคลุกเก็บจากหน้างานในสนามหลังจากคลุกเคล้า ผสมและปูลงบนถนนแล้วตามวิธีการทดลองที่ ทล. – ท. 603/2517 “วิธีการ ทดลองหาความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 10 เมตรต่อ 1 ช่องทางจราจร หรือประมาณพื้นที่ 200 ตารางเมตรต่อ 1 หลุม ตัวอย่าง หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น

2.4.2 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีตคือวัสดุผสมที่ได้จากการผสมร้อนระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ โรงงานผสม (Asphalt Concrete Mixing Plant) โดยการควบคุมอัตรา

ส่วนผสม 6 และอุณหภูมิตามที่กำหนด มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง งานบูรณะ และงานบำรุงทาง โดยการปูหรือเกลี่ยแต่งและบดทับบนชั้นทางที่ได้เตรียมไว้และผ่านการ ตรวจสอบแล้วให้ถูกต้องตามแนวระดับความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดที่ได้แสดงไว้ในแบบมวลรวม ประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลละเอียด (Fine Aggregate) กรณีที่มวลรวมละเอียดไม่พอหรือต้องการปรับปรุงคุณภาพและความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตอาจเพิ่มวัสดุแทรก (Mineral Filler) ด้วยก็ได้ในกรณีที่ไม้ได้ระบุคุณสมบัติของมวลหยาบไว้เป็นอย่างอื่น

2.5 มาตรฐานวิธีการทดลอง

2.5.1 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดลอง Compaction Test วิธีการนี้เป็นการทดลองโดยวิธี Dynamic Compaction เพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างความแน่นของดินกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดทับ เมื่อทำการบดทับนำแบบ (Model) ตามขนาดข้างล่างนี้ด้วยค้อนหนัก 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ระยะปล่อย ค้อนตก 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว)

วิธี ก. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

วิธี ข. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

วิธี ค. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

วิธี ง. แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ดินผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

วิธีการทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้อาศัยวิธีการและปรับปรุงจากการทดลองของเครื่องมือทดลอง ประกอบด้วย

แบบ(Mold) ทำด้วยโลหะแข็งและเหนียว ลักษณะทรงกระบอกกลวง มี 2 ขนาด คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) และจะต้องมีปลอก (Collar) ขนาดเดียวกัน สูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และจะต้องมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบหรือเจาะรูพูนในการทดลองต้องใช้เหล็กโลหะรอง (Spacer Disc) ตามข้อ 2.1.2 รองด้านล่าง เพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) หรืออาจใช้แบบสูง 116.4

มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) โดยไม่ต้องใช้แท่งโลหะรอง แต่ต้องมีฐานที่บดหรือแบบขนาดสูงอื่นใด ซึ่งเมื่อใช้แท่งโลหะรองแล้วได้ความสูงของตัวอย่างในแบบเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)

แท่งโลหะรอง เป็นโลหะรูปทรงกระบอกเพื่อใช้กับแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150.8 เส้นผ่านศูนย์กลาง (5 15/16 นิ้ว) และสูงขนาดต่าง ๆ ซึ่งเมื่อใช้กับแบบแล้วจะเหลือเป็นตัวอย่างสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)

ค้อน (Hammer) ทำด้วยโลหะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีมวลรวมทั้งค้อนถือ 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ต้องมีปลอกที่ทำไว้อย่างเหมาะสมเป็นตัวบังคับให้ระยะตกเท่ากับ 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) เหนือระดับดินที่ต้องการบดทับ จะต้องมีการระบายอากาศอย่างน้อย 4 รู แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9.5 มิลลิเมตร เจาะห่างจากปลายของปลอกทั้ง 2 ข้างประมาณ 19.0 มิลลิเมตร

เครื่องดันตัวอย่าง (Sample Extruder) เป็นเครื่องดันดินออกจากแบบภายหลังเมื่อทดลองเสร็จแล้ว จะมีหรือไม่มีก็ได้ ประกอบด้วยตัว jack ทำหน้าที่เป็นตัวดันและ โครงเหล็กทำหน้าที่ เป็นตัวจับแบบในกรณีที่ไม่มีการใช้สิ่วหรือเครื่องมืออย่างอื่นและตัวอย่างออกจากแบบตาชั่งแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม ซึ่งได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัม สำหรับตาชั่งตัวอย่างทดลอง และตาชั่งแบบ Scale หรือแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ 1,000 กรัม ซึ่งได้รายละเอียดถึง 0.01 กรัม สำหรับหาปริมาณน้ำในดิน

เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส สำหรับอบดินตัวอย่างเหล็กปาด (Straight Edge) เป็นเหล็กคล้ายไม้บรรทัดหนา และแข็งเพียงพอในการตัดแต่งตัวอย่างที่ส่วนบนของแบบมีความยาวไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร แต่ไม่ยาวเกินไปจนกะกะและหนาประมาณ 3.0 มิลลิเมตร ตะแกรงร่อนดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 203 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) สูงประมาณ 5 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีขนาด 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) และขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4)

เครื่องผสมเป็นเครื่องมือจำเป็นอย่างอื่น ๆ ที่ใช้ผสมตัวอย่างกับน้ำ ได้แก่ ถาด ซ้อน พลั่ว เครื่องค้อนยางถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำหรือจะใช้เครื่องผสมแบบ Mechanical Mixer ก็ได้

กระป๋องอบดินสำหรับใส่ตัวอย่างดินเพื่ออบหาปริมาณน้ำในดิน

การเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ ดินหรือหินคลุก หรือ Soil – Aggregate หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดลองให้ดำเนินการ ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุด (Maximum size) มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้งและทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง เมื่อแห้งพอเหมาะแล้ว (มีน้ำประมาณร้อยละ 2 – 3) นำมาร่อนผ่านตะแกรงเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ขนาดระหว่าง 19.0

มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ทำการชั่งหามวลของวัสดุแต่ละ 8 ขนาดที่เตรียมไว้ก็จะทราบมวลของตัวอย่างแต่ละขนาดว่ามีอยู่ขนาดละเท่าใด ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้ทิ้งไปแทนที่ของตัวอย่างด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ด้วยมวลที่เท่ากับตัวอย่าง เช่น มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร อยู่ 2,650 กรัม ก็ให้ใช้ตัวอย่างขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เพิ่มเข้าไปอีก 2,650 กรัม ที่เหลือจะเป็นขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร ตามที่มีจริง ดังนี้ตัวอย่างทั้งหมดที่มวล 9,000 กรัม มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร 2,650 กรัม มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 4,850 กรัม มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร 1,500 กรัม จากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วจะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้ คือ มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 4,850 กรัม มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร 1,500 กรัม จากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วจะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้ คือ มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 2,650 + 4,850 เท่ากับ 7,500 กรัม และมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 1,500 กรัม คลุกตัวอย่างที่ได้ให้เข้ากันถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุดมีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง (มีน้ำประมาณร้อยละ 2 – 3) และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือ แบ่งตัวอย่างแล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากันถ้าต้องการทดสอบตามวิธี ค. หรือ ง. ดังกล่าวในขอบเขตให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้งแล้วใช้ค้อนยางทุบให้ก้อนหลุดจากกันและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) แล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

การทดสอบ Compaction Test จะใช้แบบ (Mold) ขนาดใดก็ได้แล้วแต่ความต้องการตามวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวในขอบเขตและดำเนินการทดสอบ ดังนี้

- 2.5.1.1 นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากันได้ดี
- 2.5.1.2 เติมน้ำปริมาณหนึ่ง โดยปกติมักเริ่มต้นที่ประมาณร้อยละ 4 ต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ให้ความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content)
- 2.5.1.3 คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำ แล้วหรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี
- 2.5.1.4 แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อยโดยประมาณให้ดินแต่ละชั้นเมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 4 ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)
- 2.5.1.5 ทำการบดทับโดยค้อน ดังนี้ ตามวิธี ก. และ ค. จำนวน 25 ครั้ง และ ตามวิธี ข. และ ง. จำนวน 56 ครั้ง 9
- 2.5.1.6 ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำกรบดทับแล้วเป็นชั้น ๆ จำนวน 5 ชั้น มีความสูงประมาณ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) (สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร)

- 2.5.1.7 ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบร้อยเท่าระดับของตอมบนของแบบ (เหลือความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้าให้เติมดินตัวอย่างแล้วใช้ค้อนยางทุบให้น้ำไปซึ่งจะได้มวลของดินตัวอย่าง และมวลของแบบหักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของดินตัวอย่างเปียก (A)
- 2.5.1.8 ในขณะที่เดียวกับที่ทำการบดทับตัวอย่างในแบบให้น้ำดินใส่กระป๋องอบดินเพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินด้วย มวลของดินที่นำไปหาปริมาณน้ำในดิน ขนาดก้อน ใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม และขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม
- 2.5.1.9 คำนวณหาค่าความเปียก ρ_t (Wet Density) และความแน่นแห้ง ρ_d (Dry Density) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน w (Moisture Content)
- 2.5.1.10 ดำเนินการโดยเพิ่มน้ำขึ้นอีกครั้งละ 2 % จนกว่าจะได้ความแน่นลดลงจึงหยุดการทดลอง หรืออาจลดน้ำที่ผสมในกรณีที่ไม่เพิ่มน้ำแล้วได้ความแน่นลดลงเพื่อให้เขียน Curve ได้
- 2.5.1.11 เขียน Curve ระหว่างความแน่นแห้ง ρ_d และปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ w ก็จะทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุด $\text{Max. } \rho_d$ (Maximum Dry Density) และปริมาณน้ำในดิน ที่ให้ความแน่น สูงสุด OMC. (Optimum Moisture Content)

การคำนวณ

1. คำนวณหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$W = ((M_2 - M_1) / M_2) \times 100 \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

M_1 = มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

M_2 = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม 10

2. คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\rho_t = V/A \quad \dots\dots(2.6)$$

เมื่อ ρ_t = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

A = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของแบบหรือปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

3. กำหนดค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = (\rho_t / (1 + (w/100))) \quad \dots\dots (2.7)$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

ในการทำ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานให้รายงานดังนี้

1. ค่าความหนาแน่นสูงสุด มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร (แบบสูงกว่ามาตรฐาน)
2. ค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นสูงสุด เป็นร้อยละ

ตัวอย่างความแน่นแห้งสูงสุด (แบบสูงกว่ามาตรฐาน) เท่ากับ 2.231 กรัมต่อมิลลิเมตร (ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง) ปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 9.8 (ใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง)

2.5.2 วิธีการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

2.5.2.1 การเตรียมตัวอย่างขนาดแท่งตัวอย่าง แท่งตัวอย่างควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 33 มิลลิเมตร (1.3 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุในตัวอย่างต้องไม่เกิน 1 ใน 10 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างและสำหรับแท่งตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 71 มิลลิเมตร (2.8 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุต้องไม่เกิน 1 ใน 6 มีเม็ดวัสดุที่ใหญ่กว่าที่กำหนดไว้ก็ให้หมายเหตุไว้ในแบบฟอร์มอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างให้ได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตรถึง 0.01 นิ้ว โดยใช้ Vernier Caliper หรือเครื่องมือชนิดอื่นที่เหมาะสม

2.5.2.2 ตัวอย่าง Undisturbed เตรียมตัวอย่าง Undisturbed จากแท่งตัวอย่าง Undisturbed ขนาดใหญ่หรือดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโดยใช้ท่อบางแท่ง ตัวอย่างที่ได้จากท่อบางอาจจะทดลองได้เลยโดยไม่ต้องตกแต่งแต่ต้องตัดปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างให้เรียบและมีสัดส่วนดังที่ได้ระบุมาแล้วในการเตรียมตัวอย่างจะต้อง ระวังระวังอย่างให้มีการเปลี่ยนรูปร่างและ

ขนาด หน้าตัดเกิดขึ้นในระหว่างการดันตัวอย่างดินออกจากท่อบาง ถ้าหาก เห็นว่าจะเกิดการอัดตัวอย่างดินหรือจะทำให้ตัวอย่างดินถูกรบกวนก็ให้ตัด แบ่งท่อ บางตามความยาวออกเป็น ส่วน ๆ การเตรียมตัวอย่างถ้าหากเป็นไปได้ก็ควรเตรียมในห้องที่ควบคุมความชื้นเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แท่งตัวอย่างทดลองจะต้องมีหน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่ง ตัวอย่างในการตัดและแต่งปลายทั้งสองข้างของแท่งตัวอย่างถ้าหากมีเม็ด วัสดุที่ทำให้ ผิวหน้าไม่เรียบก็ให้ปิดผิวหน้าด้วยปูนปลาสเตอร์ โดยให้ความหนา น้อย ที่สุดหรือใช้ Hydrostone หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติ คล้ายกันให้ซึ่งหามวลของแท่งตัวอย่างก่อนและหลังการทดลองหาปริมาณ น้ำในดินของแท่งตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างทั้งแท่งหรือส่วนที่เป็นตัวแทน ของแท่งตัวอย่าง

2.5.2.3 ตัวอย่าง Remolded นำตัวอย่างดิน Undisturbed เดิมมาทำดั่งนี้อย่างทั่วถึงใน การทำต้องระวังอย่าให้มีฟองอากาศเข้าไปปนในดิน หลังจากนั้นก็อัดดินลงใน Mold ที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมและมีขนาดตามที่ระบุไว้ เมื่อได้อัดดิน Mold จนเต็มแล้วให้แต่งปลายแท่งตัวอย่างจนเรียบได้หน้าตัดตั้งฉากกับ แกนตามยาวของแท่งตัวอย่างแล้วดัน แท่งตัวอย่างมี Void Ratio และ ปริมาณน้ำในดินใกล้เคียงกับตัวอย่าง Undisturbed เดิมการทดลองโดย วิธี ควบคุมความเครียด (Strain) วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมอันล่าง ของเครื่องกดแล้วเลื่อนจานแผ่นกลมบนบนของเครื่องกดแตะกับผิวบน ของ แท่งตัวอย่าง หมุนหน้าปัดของ Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะทางของ การกด ให้เข็มชี้ที่ศูนย์กลางแท่งตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคิดเป็นความเครียดใน แนวตั้ง 0.5 – 2 เปอร์เซ็นต์ ต่อนาที จนแรงกดและระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างทุก ๆ 30 วินาที ในการใช้อัตราเร็วของความเครียดค่าใดจะต้อง ประมาณว่า ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้แรงกดจนถึงแรงกดสูงสุดจะต้องไม่เกิน 10 นาที เพิ่ม แรงกดต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณน้ำ 13 ในดินโดย นำแท่งตัวอย่างเข้าเตาอบ นอกจากกรณีที่ต้องเตรียมแท่งตัวอย่าง Remolded ก็ให้ใช้ส่วนของดินที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่างได้เขียนรูป สภาพแท่ง ตัวอย่างที่ทดลอง เสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยร้าววัดมุมของรอยแตกร้าว เทียบกับแกนนอน ดินที่อ่อนมากจะมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดมาก

ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองโดยใช้อัตราเร็วของความเครียดสูงในทางตรงกันข้าม ดินที่แข็งหรือแตกง่ายซึ่งมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดน้อย ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองด้วยอัตราเร็วของความเครียดที่ต่ำกว่าการประมาณค่านี้ จะต้องมีประสบการณ์พอเพียงมิฉะนั้นจะต้องใช้เครื่อง กดอย่างเล็ก (Penetrometer) กดลงบน ส่วนของตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้คู่มือเพื่อหา ค่านี้โดยประมาณ

2.5.2.4 กำหนดหาความเครียดในแนวตั้ง สำหรับแรงกดใด ๆ (ϵ) โดยใช้สูตร

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \quad \dots\dots (2.8)$$

เมื่อ ϵ = ระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใด ๆ โดยอ่านจาก Dial Gauge
 L_0 = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

2.5.2.5 กำหนดหาพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใด ๆ (A) โดยใช้สูตร

$$A = A_0 / (1 - \epsilon) \quad \dots\dots (2.9)$$

เมื่อ A_0 = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง

ϵ = ความเครียดตามแนวตั้งที่แรงกดนั้น ๆ

2.5.2.6 กำหนดหาความเค้นสำหรับแรงกดใด ๆ (σ_c) โดยใช้สูตร

$$\sigma_c = P / A \quad \dots\dots(2.10)$$

เมื่อ P = แรงกด

A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้น ๆ

2.5.2.7 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_c และ ϵ โดยใช้ σ_c เป็น แกนตั้ง และ ϵ เป็นแกนนอนจากกราฟหาค่าสูงสุดของ σ_c หรือหา ค่าที่ σ_c ที่ ϵ เท่ากับร้อยละ 20 ได้ในกรณีที่ต้องการจะใช้กราฟอธิบายคุณสมบัติของดินก็ให้แนบแผ่นกราฟนี้รวมไว้ในรายงานผลการทดลองด้วยการรายงาน ให้ รายงานผลการทดลองดังต่อไปนี้ ค่า Unconfined Compressive Strength

ชนิดและรูปร่างของแท่งตัวอย่าง เช่น Undisturbed, Compacted, Remolded, Cylindrical, Prismatic

2.5.2.8 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง

2.5.2.9 ลักษณะดินโดยทั่วไป เช่น ชื่อของดิน สัญลักษณ์ เป็นต้น

2.5.2.10 Initial Density ปริมาณน้ำในดิน และ Degree of Saturation (ถ้าตัวอย่างถูกทำให้อิ่มตัวในห้องปฏิบัติการให้หมายเหตุ Degree of Saturation อีก ค่าหนึ่งไว้ด้วย)

2.3.2.11 ค่าความเครียดที่เค้นสูงสุดเป็นร้อยละ (อ่านจากกราฟ)

2.5.2.12 ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของความเครียดเป็นร้อยละต่อนาที โดยคิดตั้งแต่เริ่มกดจนถึงแรงกดสูงสุด

2.5.2.13 ให้เขียนหมายเหตุในกรณีที่เกิดมีลักษณะผิดปกติในการทดลองหรือแบบรายละเอียดอื่น ๆ ที่คิดว่ามีความจำเป็นต้องใช้อธิบายผลการทดลองข้อควรระวัง ในการดันตัวอย่างออกจากท่อเพื่อใช้ทดลองจะต้องดันไปตามทิศทางเดียวกันกับที่ตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าไปในกระบอกในระหว่างเก็บตัวอย่างเพื่อลดการรบกวนตัวอย่างดินและในการทำตัวอย่าง Remolded ถ้าแท่งตัวอย่างจากการทำ Remolded แล้วได้ความแน่นแตกต่างจากก่อนทำ Remolded ให้นำมาดำเนินการใหม่

บทที่ 3

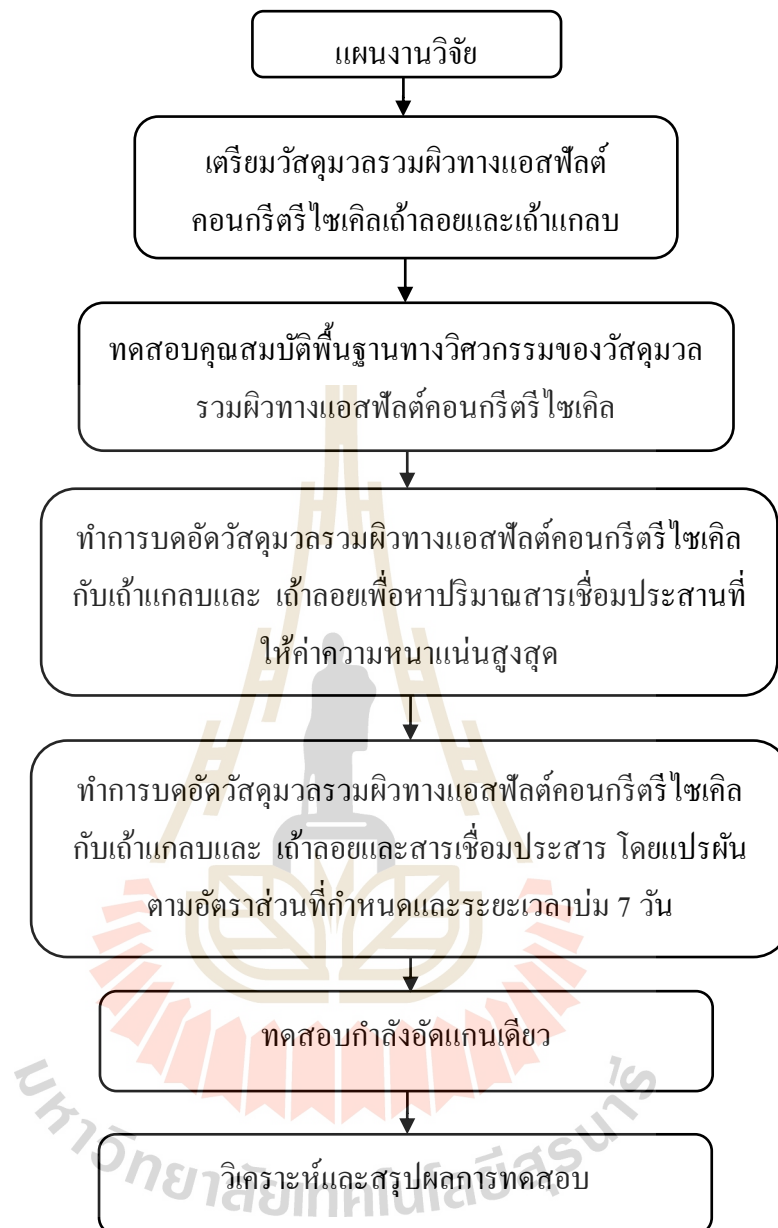
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษากำลั้งอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ได้จากการการรื้อซ่อมแซมถนนของกรมทางหลวงที่ 10 นครราชสีมา วัสดุตัวอย่างจะถูกนำมาปรับปรุงการกระจายขนาดของเม็ดดินให้ได้มาตรฐานของชั้นพื้นทาง และผสมกับวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ (ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุตั้งต้น) แล้วทำการบดอัด โดยแปรผันตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยและเถ้าแกลบ อัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ ระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างบดอัดจะถูกนำไปบ่มจนได้อายุ 7 และทดสอบกำลั้งอัดแกนเดียว ผลทดสอบกำลั้งอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท รายละเอียดจำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ

ตัวแปร	จำนวน	คำอธิบาย
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
ระยะเวลาบ่ม	1	7 วัน (ที่อุณหภูมิห้อง)
ปริมาณความชื้น	1	ปริมาณของเหลวที่เหมาะสม (OLC)
ปริมาณของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ	1	(FA+RHA)/RAP= 30/70
อัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสาน	3	NaOH/Na ₂ SiO ₃ : 50/50 80/20 และ 100/0
อัตราส่วนเถ้าลอยและเถ้าแกลบ	4	FA/RHA : 100/0 60/40 40/60 และ 0/100
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.2 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

3.2.1 วัสดุรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ไซเคิล

วัสดุรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มาจากการรื้อซ่อมแซมถนนของกรมทางหลวงที่ 10 นครราชสีมา วัสดุที่ได้ถูกนำมาแยกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 3/8 ขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 3/8 และเบอร์ 10 และขนาดเล็กกว่า

ตะแกรงเบอร์ 10 ต่อมาวัสดุทั้งสามขนาดถูกนำมาผสมกันในสัดส่วนต่าง ๆ (Trial and error) จนได้ขนาดละเอียดของวัสดุตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล-ม. 205/2532 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม การกระจายขนาดละเอียดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลแสดงดังรูปที่ 3.2 มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 3.2

3.2.2 เถ้าลอย

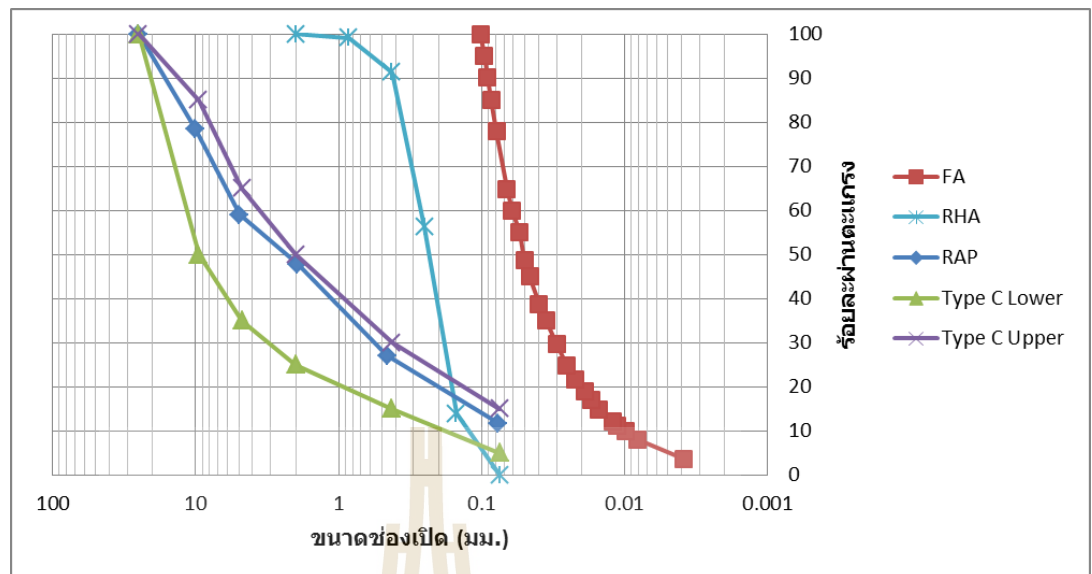
เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยมาจาก โรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งเถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 3.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย (Specific gravity) เท่ากับ 2.53 การกระจายขนาดละเอียดของเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 3.2

3.2.3 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากโรงสีข้าววิจิตรธัญญา ต.นกออก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา เถ้าแกลบดังกล่าวถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อแยกส่วนหยาบออก ซึ่งส่วนมากเป็นแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเถ้าแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 3.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย (Specific gravity) เท่ากับ 2.10 การกระจายขนาดละเอียดของเถ้าแกลบแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย เถ้าแกลบและ RAP

Chemical compositions(%wt.)	FA	RHA	RAP
Silicon Dioxide (SiO ₂)	38.53	90.08	39.45
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	20.49	0.78	9.64
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	14.85	0.52	28.46
Calcium Oxide (CaO)	13.76	0.60	41.93
Magnesium Oxide (MgO)	3.10	0.66	1.33
Potassium Oxide (K ₂ O)	1.76	1.35	1.98
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.58	0.12	0.56
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.86	0.05	3.62
Loss on Ignition (LOI)	0.52	0.24	0.89



รูปที่ 3.2 การกระจายขนาดคละของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล
ถ้ำลอยและถ้ำกลับ

3.3 การบดอัดวัสดุ (Compaction)

การบดอัดวัสดุทำในแบบมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว โดยแบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ด้วยค้อนการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน AASTHO T180 ผลการบดอัดจะได้ค่าร้อยละปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content) ที่มีความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) เมื่อทำการบดอัดเสร็จ ตัวอย่างจะถูกดันออกจากแบบหล่อโดยใช้แท่นดันตัวอย่าง และตัวอย่างที่ถูกดันออกจากแบบหล่อจะถูกนำไปห่อด้วยพลาสติกเพื่อความคุมความชื้น และบ่มที่อุณหภูมิห้อง

3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)

เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบกำหนดที่ 7 วันตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Compressive test ตามมาตรฐาน ASTM D 1633 เพื่อหาค่าแรงกดอัดสูงสุดและนำไปคำนวณค่ากำลังอัดสูงสุดต่อไป

บทที่ 4

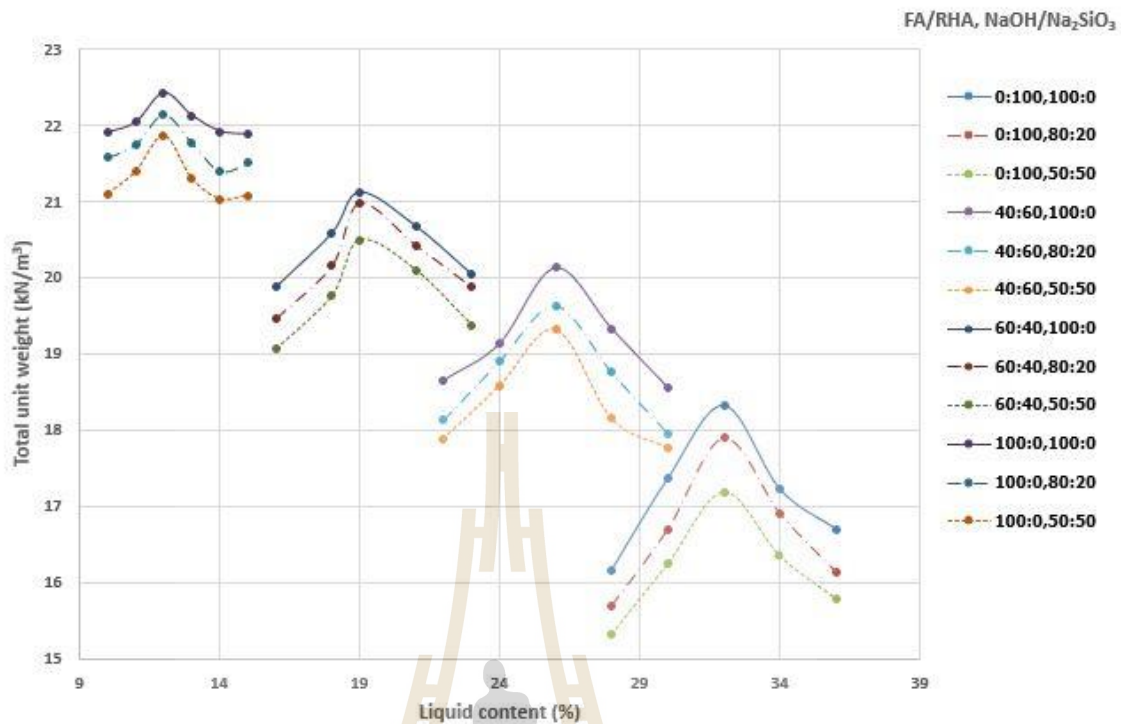
ผลการศึกษา และวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ (RAP) ที่นำมาใช้เป็นวัสดุหลักในการปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ผลการทดสอบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบ โดยแยกตามอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งทำการทดสอบที่อายุบ่ม 7 วันและผลการทดสอบเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางที่ยอมให้ ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

4.2 การบดอัด (Compaction)

การบดอัดวัสดุทำในแบบมาตรฐาน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และสูง 4.6 นิ้ว โดยแบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Energy) ตามมาตรฐาน AASTHO T180 ผลการบดอัดจะได้ค่าร้อยละปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content, OLC) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน FA/RHA เท่ากัน วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่า OLC ใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ไม่ทำให้ค่า OLC เปลี่ยนแปลง อย่งไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วน FA/RHA ลดลง ค่า OLC มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความหนาแน่นรวมมีค่าลดลง เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ต่ำกว่าของเถ้าแกลบเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย

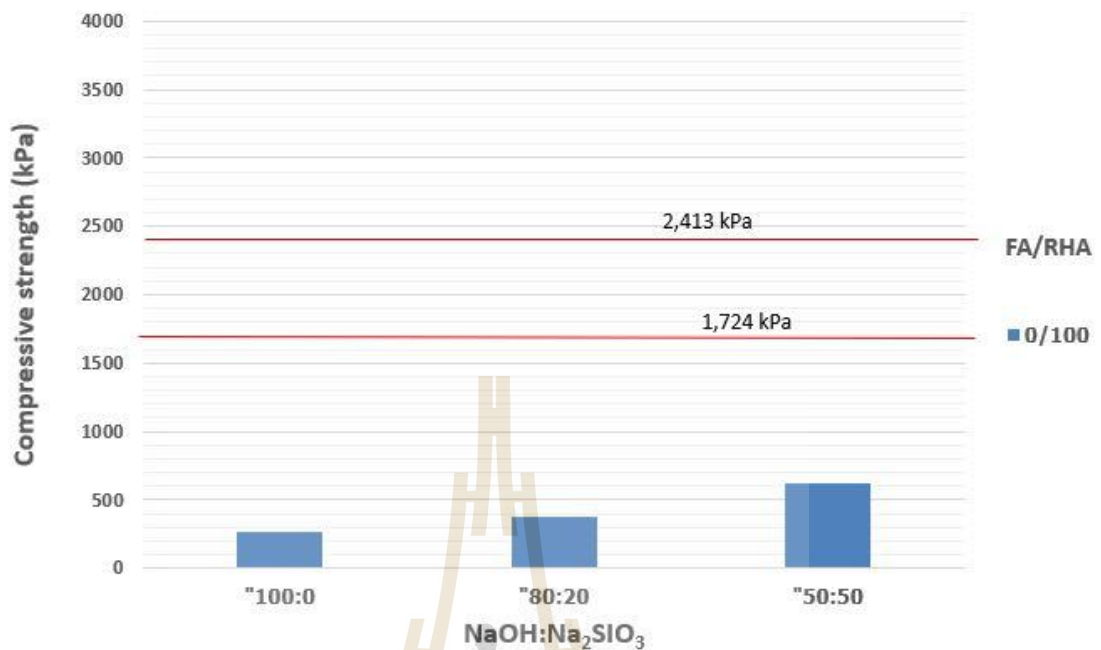


รูปที่ 4.1 ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม

4.3 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วย จีโอพอลิเมอร์ เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัด โดยทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล)

4.3.1 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบ (FA/RHA = 0/100) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์



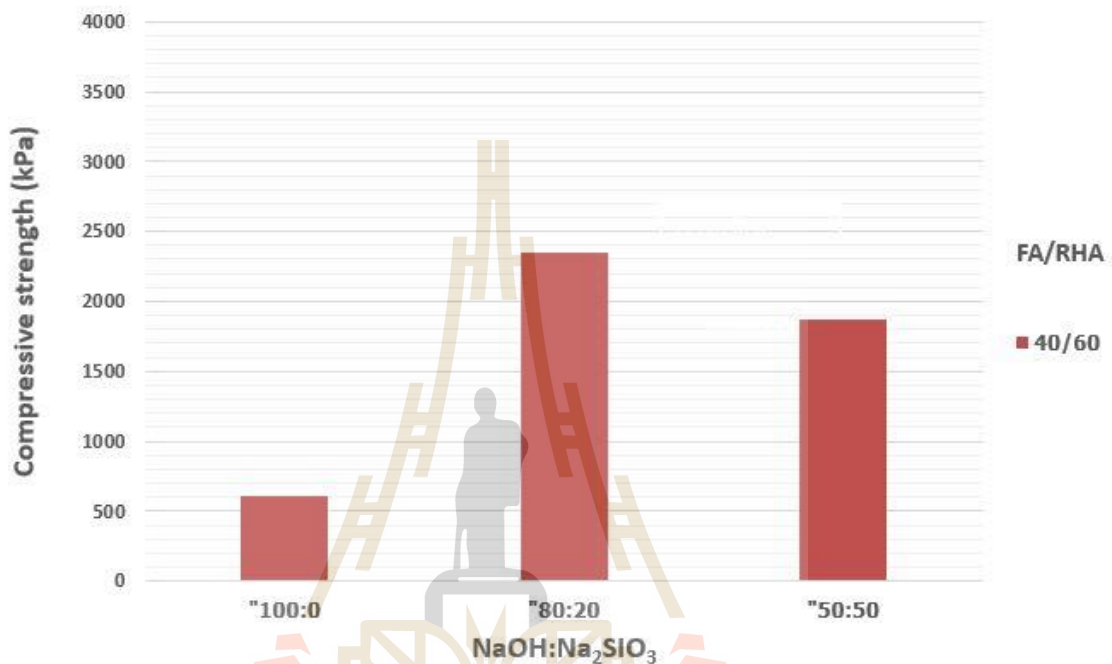
รูปที่ 4.2 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิล ผสมเถ้าแกลบ (FA/RHA=0/100) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์

ผลทดสอบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าแกลบทั้งหมด (FA/RHA = 0/100) แสดงดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า การใช้เพียง NaOH (NaOH/Na₂SiO₃ = 100/0) ให้กำลังอัดของตัวอย่างต่ำที่สุด เมื่ออัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เพิ่มขึ้นกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้ Na₂SiO₃ ร่วมกับ NaOH สามารถเพิ่มกำลังอัดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของตัวอย่างในทุกอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ ยังมีค่าต่ำกว่ากำลังที่ต้องการในการใช้เป็นวัสดุพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท หรืออาจจะกล่าวได้ว่าไม่สามารถใช้เถ้าแกลบเพียงอย่างเดียวในวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิลเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง

4.3.2 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA = 40/60) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์

ผลทดสอบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าแกลบทั้งหมด (FA/RHA = 40/60) แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 100/0 และ 80/20 กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ หลังจากนั้นที่

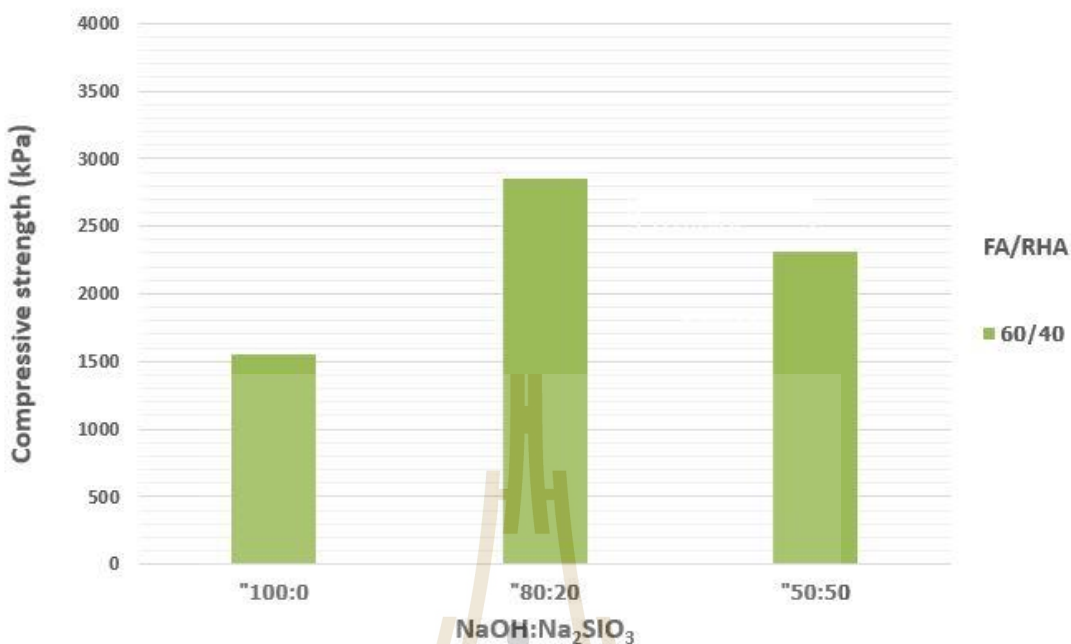
อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 50/50 กำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากสารกระตุ้นโซเดียมซิลิเกต ไตรออกไซด์ (Na₂SiO₃) ไปละลาย ซิลิกาจากเถ้าลอย (Fly Ash) ได้ถูกใช้ไปหมด ทำให้เถ้าลอยส่วนที่เหลือไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งเป็นการเพิ่มเกิดมวลรวมละเอียดในตัวอย่างทดลองจึงทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4.3 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA=40/60) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์

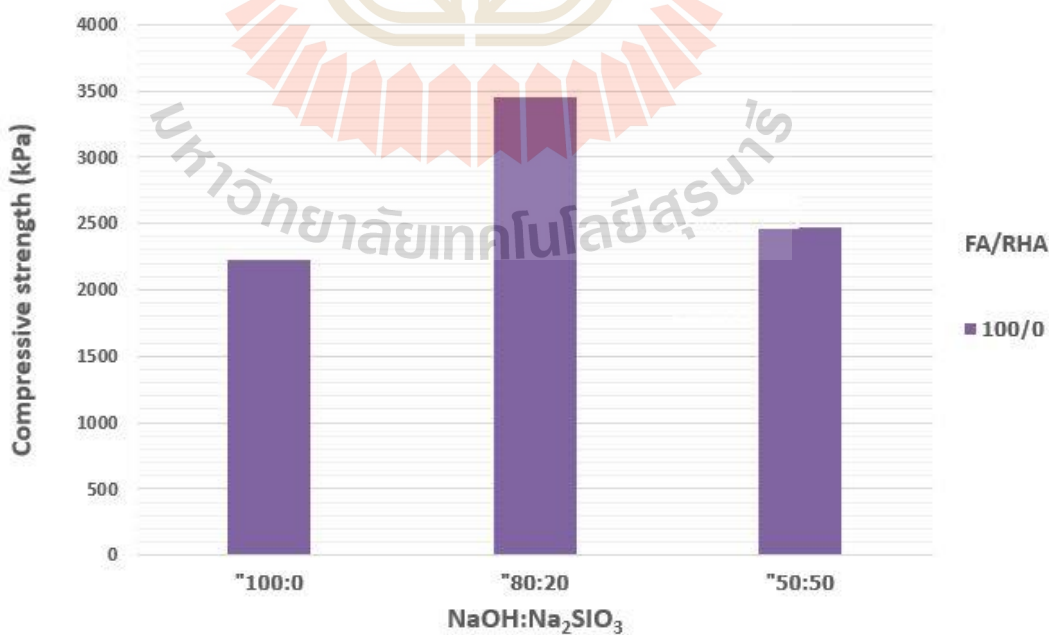
4.3.3 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA=60/40) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์

ผลทดสอบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าแกลบทั้งหมด (FA/RHA = 60/40) แสดงดังรูปที่ 4.4 จากการทดลองจะเห็นได้ว่า กำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน FA/RHA = 0/100 และ FA/RHA = 40/60 เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 100/0 และ 80/20 กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ หลังจากนั้นที่อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 50/50 กำลังอัดมีค่าลดลงเช่นเดียวกับผลทดสอบที่อัตราส่วน FA/RHA = 40/60



รูปที่ 4.4 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (FA/RHA = 60/40) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์

4.3.4 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์



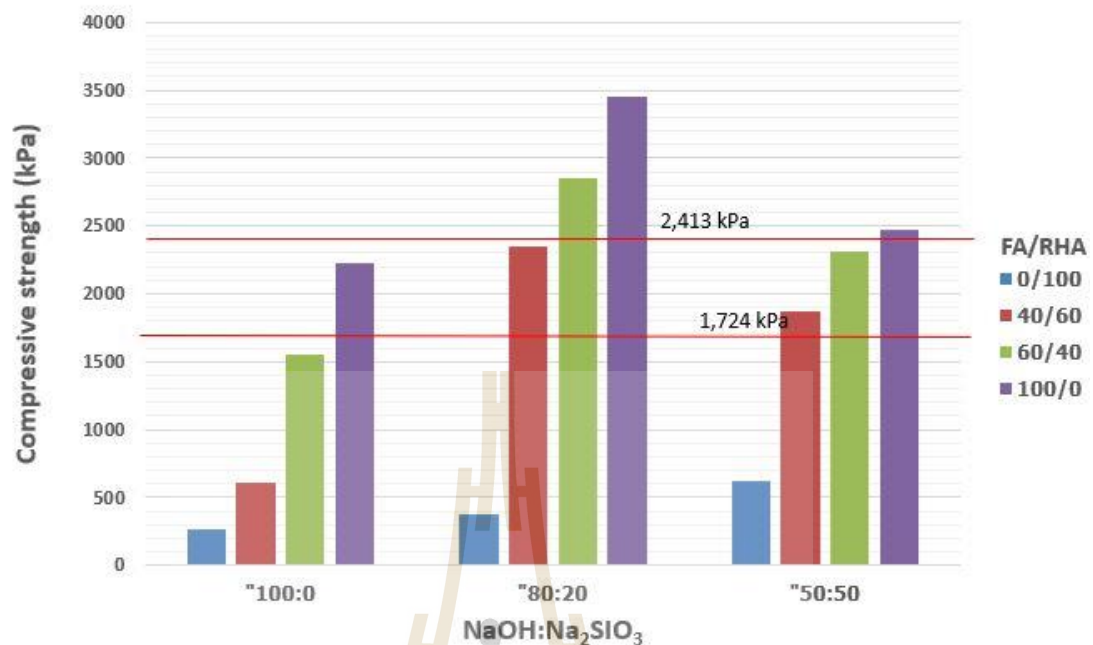
รูปที่ 4.5 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์

จากรูป 4.5 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไตรไซเคิลผสมเถ้าลอย จีโอพอลิเมอร์ (FA/RHA = 100/0) จะเห็นได้ว่ากำลังอัดจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารละลายในอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 80:20 และลดลงในอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ ที่ 50:50 เช่นเดียวกับ ผลทดสอบที่อัตราส่วน FA/RHA = 40/60 และ 60/40

4.3.5 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไตรไซเคิลผสมเถ้าแกลบและเถ้า ลอยที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 4.6 แสดงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไตรไซเคิลผสมเถ้า แกลบและเถ้าลอยที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วัน จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน FA/RHA ที่เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลาย Na₂SiO₃ ที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำกำลังอัด ของตัวอย่างทดสอบที่อายุบ่ม 7 วันมาเปรียบเทียบกับค่ายอมให้ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสม ซีเมนต์ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2,413 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 และ 1,724 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 อัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงมีดังนี้ ที่ค่าส่วนผสม 1) ส่วนผสม NaOH/Na₂SiO₃ = 80/20 อัตราส่วน FA/RHA = 60/40 100/0 2) ส่วนผสม NaOH/Na₂SiO₃ = 50/50 อัตราส่วน FA/RHA = 100/0 และอัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทเพิ่มเติมมีดังนี้

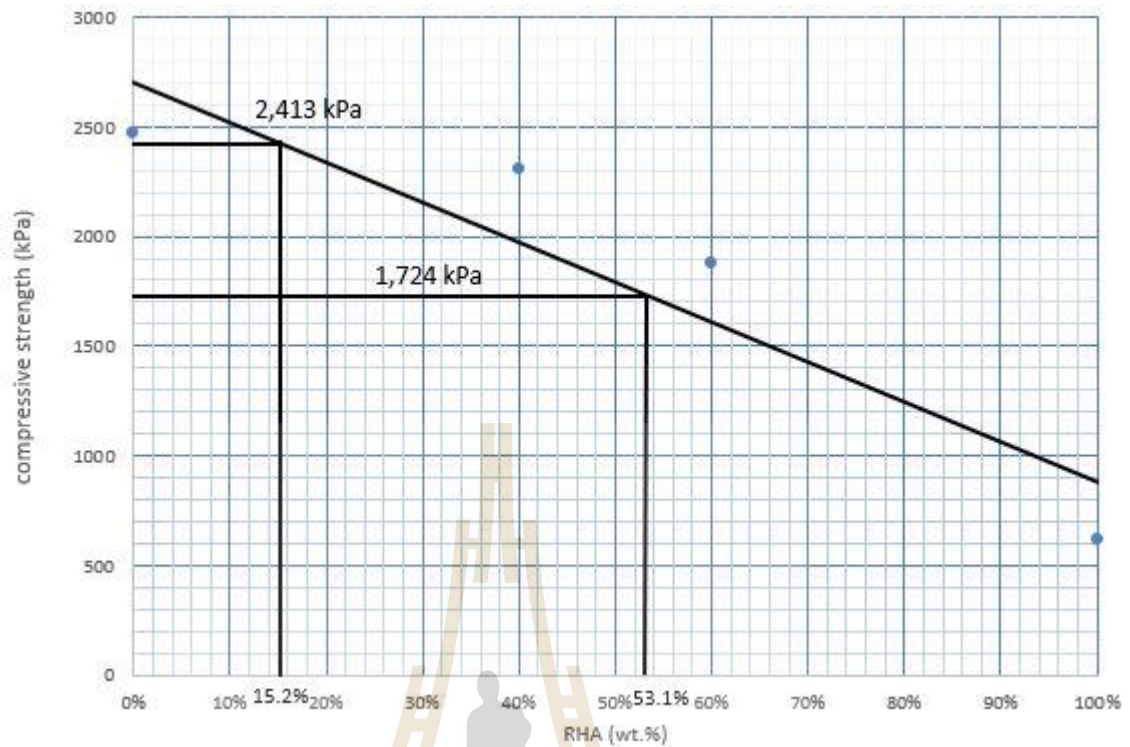
- 1) ส่วนผสม NaOH/Na₂SiO₃ = 100/0 อัตราส่วน FA/RHA = 100/0
- 2) ส่วนผสม NaOH/Na₂SiO₃ = 80/20 อัตราส่วน FA/RHA = 40/60 60/40 และ 100/0
- 3) ส่วนผสม NaOH/Na₂SiO₃ = 50/50 อัตราส่วน FA/RHA = 40/60 60/40 และ 100/0



รูปที่ 4.6 กำลังอัดของวัสดุผสมรวมฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิลผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน

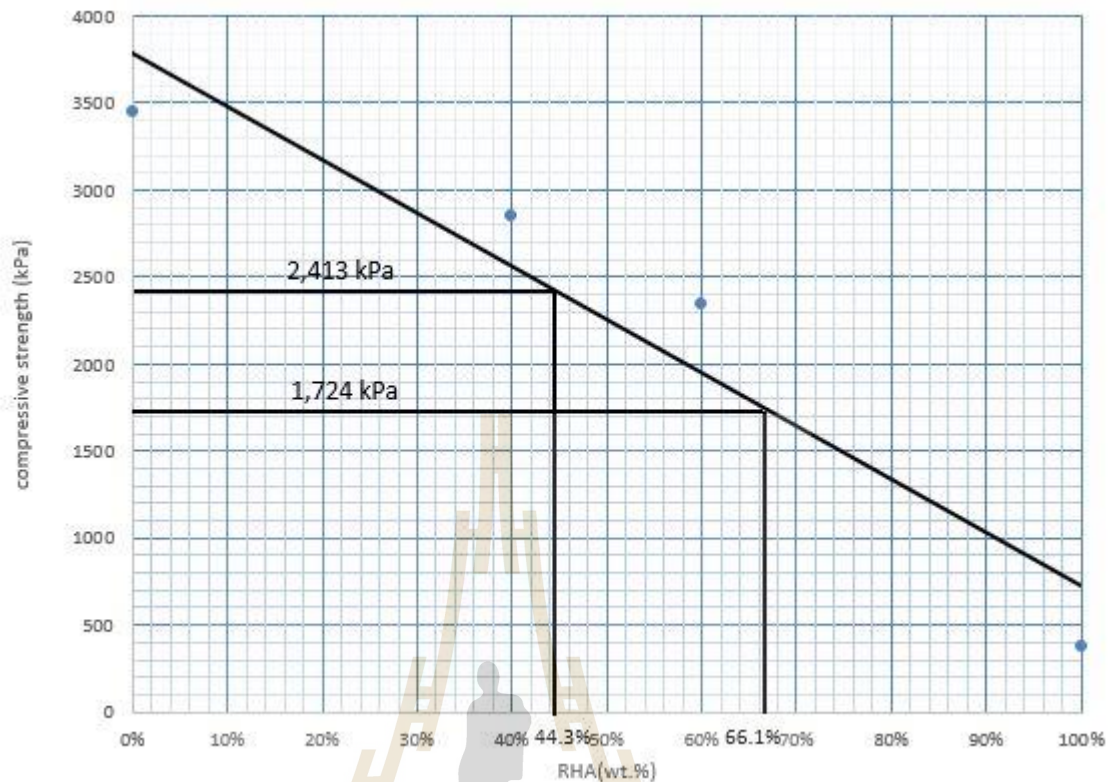
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทกับปริมาณการใช้เถ้าแกลบในแต่ละส่วนผสม

เนื่องจากค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบในแต่ละส่วนผสมยังบอกไม่ได้ชัดเจนว่าควรใช้เถ้าแกลบปริมาณเท่าใดในการทำให้วัสดุผสมรวมฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิลด้วยจีโอพอลิเมอร์สามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทได้ ดังนั้นจึงได้แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณเถ้าแกลบ เพื่อแสดงปริมาณเถ้าแกลบที่ใช้อย่างน้อยที่สุดที่สามารถทำให้วัสดุผสมรวมฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตริไซเคิลด้วยจีโอพอลิเมอร์ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท



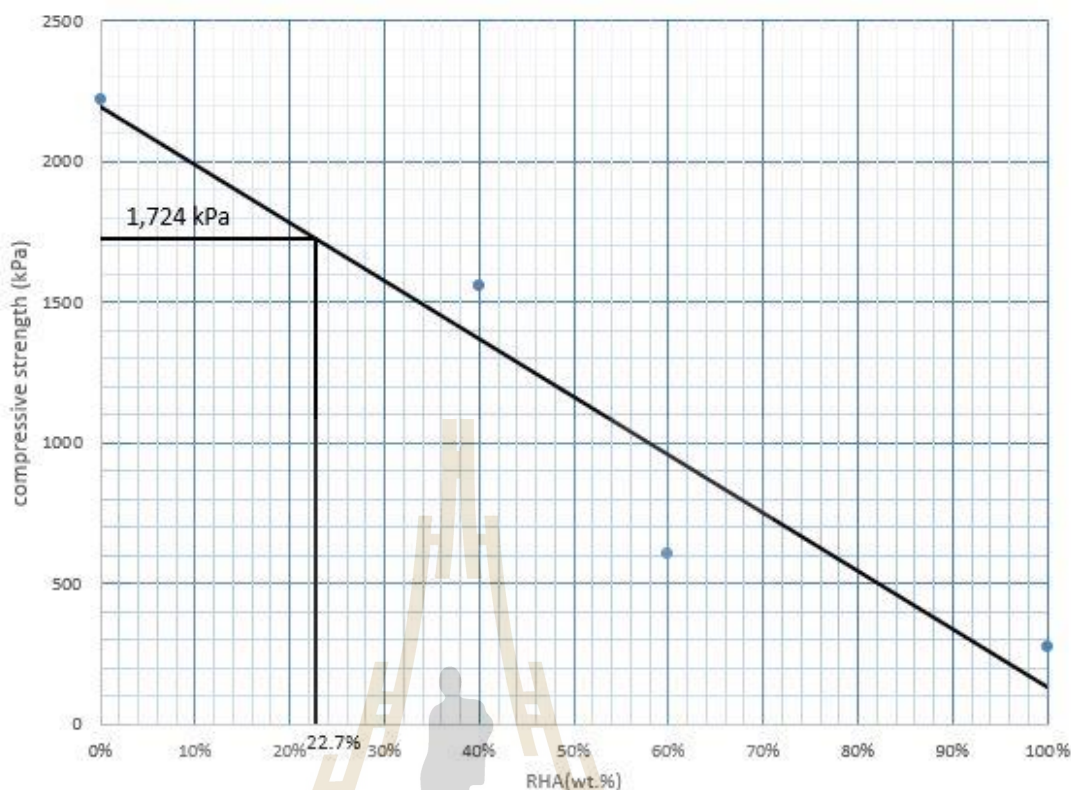
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล และร้อยละเถ้าแกลบที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในเถ้าลอยที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท พบว่า เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 15.2 และ 53.1 สามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยเพื่อใช้ในการทำผิวทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของวัสดุผสมรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล และร้อยละเถ้าแก้วที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับร้อยละการแทนที่เถ้าแก้วในเถ้าลอยที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท พบว่า เถ้าแก้วในปริมาณร้อยละ 44.3 และ 66.1 สามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยเพื่อใช้ในการทำผิวทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทตามลำดับ



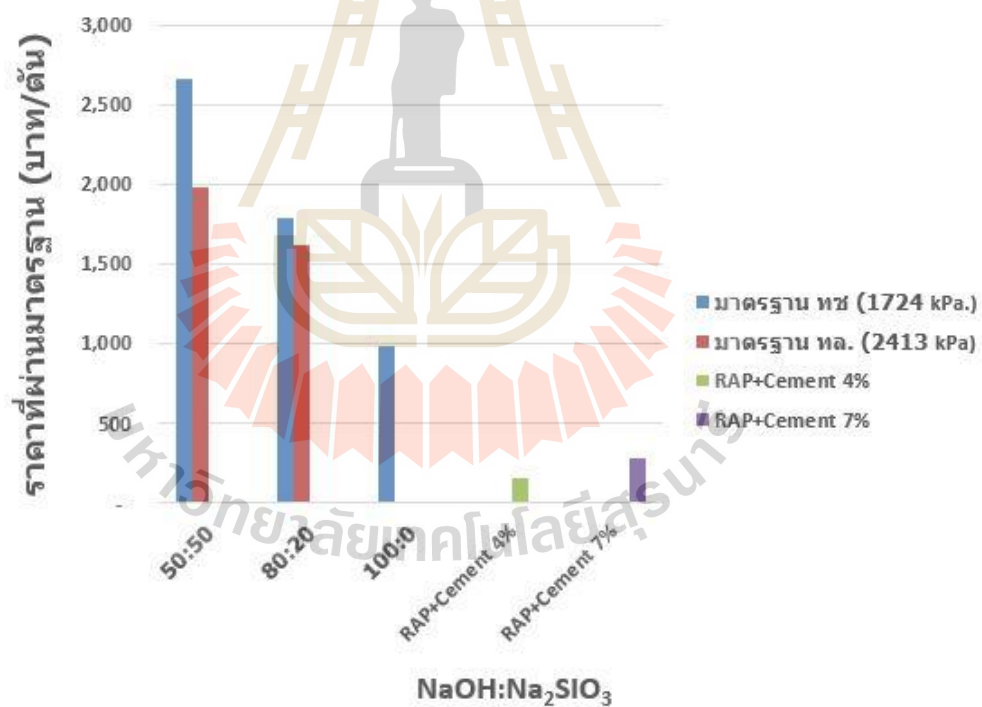
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล และร้อยละเถ้าแกลบที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในเถ้าลอยที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$ เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท พบว่า ไม่มีอัตราส่วนเถ้าแกลบที่รับแรงอัดได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวง แต่มีอัตราส่วนเถ้าแกลบร้อยละ 22.7 สามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยเพื่อใช้ในการทำผิวทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท

4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เนื่องจากความแตกต่างของต้นทุนวัสดุที่ใช้ประกอบการปรับปรุงวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลด้วยจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าลอยในท้องตลาดจะมีต้นทุนมากกว่าเถ้าแกลบมาก โดยเถ้าลอยมีราคาประมาณ 1,000 บาทต่อตัน และเถ้าแกลบมีราคาประมาณ 250 บาทต่อตัน (อ้างอิงจาก กรมควบคุมมลพิษ (<http://www.pcd.go.th>) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ราคา 8.0 บาท/กิโลกรัม จากบริษัทเคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด และ สารโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ราคา 20 บาท/กิโลกรัม จากบริษัทเคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

จากรูปที่ 4.10 แสดงราคาต้นทุนการปรับปรุงวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไรเซิลด้วยจีโอพอลิเมอร์ พบว่า ที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ กับอัตราส่วน $\text{FA}/\text{RHA} = 46.9/53.1$ และ $84.8/15.2$ ซึ่งเป็นค่าร้อยละการแทนที่ RHA ที่มากที่สุด (จากรูป 4.7) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง ตามลำดับ มีต้นทุนสูงที่สุดและต้นทุนสำหรับการปรับปรุงเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทางของกรมทางหลวงมีค่าสูงกว่าของกรมทางหลวงชนบท ขณะที่ ต้นทุนมีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ กับอัตราส่วน $\text{FA}/\text{RHA} = 33.9/66.1$ และ $55.7/44.3$ ซึ่งเป็นค่าร้อยละการแทนที่ RHA ที่มากที่สุด (จากรูป 4.8) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง ตามลำดับ และต้นทุนมีค่าต่ำสุดเมื่อใช้อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$ กับอัตราส่วน $\text{FA}/\text{RHA} = 77.3/22.7$ ซึ่งเป็นค่าร้อยละการแทนที่ RHA ที่มากที่สุด (จากรูป 4.9) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท อย่างไรก็ตาม ไม่มีอัตราส่วน FA/RHA ใดที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงเมื่อใช้อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$



รูปที่ 4.10 ราคาเทียบกับอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ โดยที่เลือกใช้อัตราส่วน FA/RHA ที่มากที่สุดที่ผ่านมาตรฐาน ทข.(1,724 kPa) และมาตรฐาน ทล. (2,413 kPa)

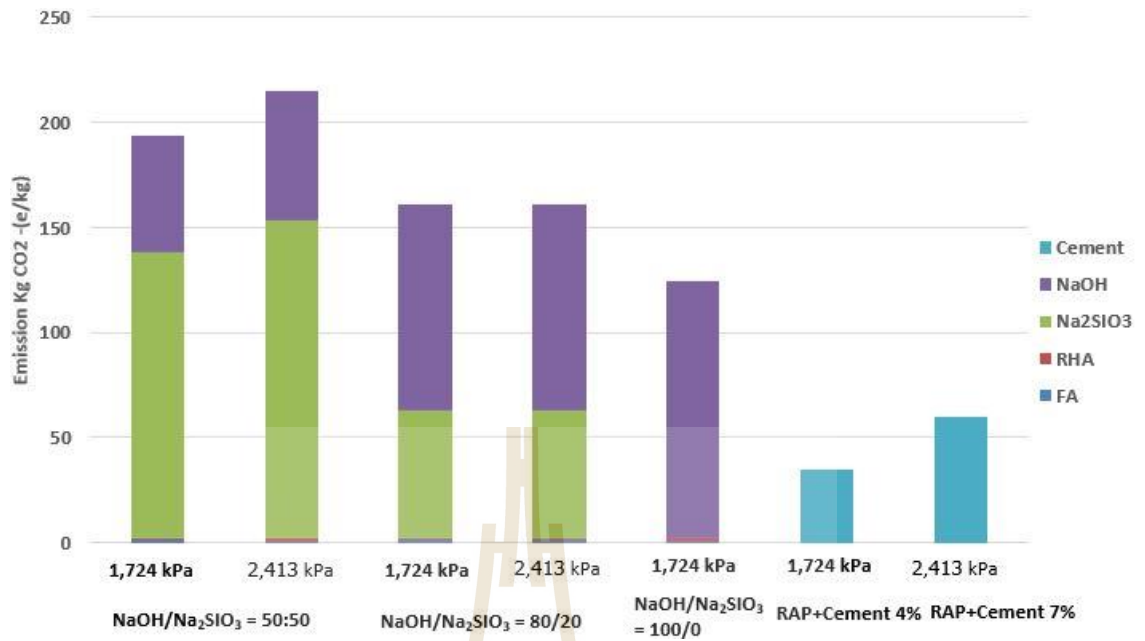
4.6 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emission)

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emission) ของส่วนผสมต่าง ๆ ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์และปูนซีเมนต์ รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการ

ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ของอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ 80/20 และ 100/0 ที่กำลังอัดที่ต้องการสำหรับการใช้เป็นวัสดุพื้นทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท (1,724 kPa และ 2,413 kPa ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่า ในทุกอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ของวัสดุอิพอลิเมอร์ปรับปรุงผิวทางมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซิลิก มีค่าการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ RAP+Cement 4% (1,724 kPa) และ RAP+Cement 7% (2,413 kPa) เนื่องจากการใช้เถ้าแกลบ (RHA) ในส่วนผสมร่วมกับการใช้เถ้าลอย (FA) ส่งผลให้ค่า OLC มีค่าสูงขึ้น โดยที่ค่า OLC เมื่ออัตราส่วน FA/RHA มีค่าลดลง (รูปที่ 4.1) ดังนั้น ทำให้ต้องใช้ปริมาณสารละลาย NaOH และ Na_2SiO_3 ในปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อต้องการใช้เถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้นเพื่อลดค่าใช้จ่าย ส่งผลให้ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการใช้ปูนซีเมนต์ที่ต้องการปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 4 ถึง 7 ที่ปริมาณความชื้นบดอัดเหมาะสม (OWC)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด

Material	Emission factor (kg CO ₂ -e/kg)	References
Fly ash (kg)	0.007	McLellan et al. (2011)
Sodium hydroxide (kg)	1.915	Turner and Collins (2013)
Sodium silicate (kg)	1.514	Turner and Collins (2013)
Rice husk ash (kg)	0.007	
Cement (kg)	0.86	McLellan et al. (2011)



รูปที่ 4.11 ปริมาณ carbon Emission ในแต่ละอัตรา NaOH/Na₂SiO₃ = 50/50 , 80/20 และ 100/0 เทียบกับ RAP+Cement 4% (1,724 kPa) และ RAP+Cement 7% (2,413 kPa)

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในการปรับปรุงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง และศึกษาอิทธิพลของปริมาณ Liquid Alkaline activator (L) และอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยและเถ้าแกลบต่อการพัฒนา กำลังอัด และเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ประเด็นที่สำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 50/50 เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน FA/RHA ที่เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลาย Na₂SiO₃ ที่เพิ่มขึ้น
- 2) ค่าอัตราส่วน FA/RHA และค่าอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้คือ FA/RHA = 60/40 ที่ปริมาณสารละลาย NaOH/Na₂SiO₃ = 80/20 เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 kPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-25561 (ค่ายอมให้ 1,724 kPa)
- 3) อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ = 80/20 กับอัตราส่วน FA/RHA = 33.9/66.1 และ 55.7/44.3 ซึ่งเป็นค่าร้อยละการแทนที่ RHA ที่มากที่สุด (จากรูป 4.8) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง ตามลำดับมีต้นทุนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกอัตราส่วน จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นอัตราส่วนเพื่อปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
- 4) ทุกอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ปรับปรุงผิวทางมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล มีค่าการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ RAP+ Cement 4% (1,724 kPa) และ RAP+ Cement 7% (2,413 kPa) เนื่องจากการใช้เถ้าแกลบ (RHA) ในส่วนผสมร่วมกับการใช้เถ้าลอย (FA) ส่งผลให้ค่า OLC มีค่าสูงขึ้นทำให้ต้องใช้ NaOH/Na₂SiO₃ ในปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อต้องการใช้เถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้นเพื่อลดค่าใช้จ่าย ส่งผลให้ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่ม

มากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการใช้ปูนซีเมนต์ที่ต้องการปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 4 ถึง 7 ที่ปริมาณความชื้นบดอัดเหมาะสม (OWC)

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป

เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้จีโอพอลิเมอร์เส้นใยและเส้นใยเป็นสารตั้งต้นในการปรับปรุงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ผลการศึกษานำมาขยายผลเพื่อที่จะนำวัสดุที่เหลือใช้อื่น ๆ ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีปริมาณอลูมินาและซิลิกาสูงมาใช้ปรับปรุงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์แทนได้ เพื่อลดการใช้วัสดุจากธรรมชาติ และควรทดลอง RAP+Cement เพื่อหาปริมาณ % Cement ที่ทำให้ RAP+Cement ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 kPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-25561 (ค่ายอมให้ 1,724 kPa) เพื่อนำมาเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emission)

เอกสารอ้างอิง

- กรมทางหลวง ประเทศไทย. (2558). ทล-ม. 203/2556, มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์.
- กรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย. (2557). มทช. 244-2556, มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์.
- ACAA – American Coal Ash Association (2003). **Fly ash facts for highway engineers**. Aurora, USA.
- ASTM – **American Society for Testing and Materials**. (2005). Annual Book of ASTM Standards, C 618 – 05.
- ASTM - **American Society for Testing and Materials**. (2002). Annual Book of ASTM Standards, D 422 – 63.
- AASHTO. (2002). **Standard Specifications for Highway and Bridge**. In the 7th edition. Washington D.C., American Association of state Highway and Transportation Officials.
- ASTM - **American Society for Testing and Materials**. (2007) . Annual Book of ASTM Standards, D 1633 – 00.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali M. M. Y., and Bo, M. W. (2012). **Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications**. Geotechnical Testing Journal, Vol. 35, No. 5
- Arulrajah, A. , Piratheepan, J. , Disfani, M. , and Bo, M. (2013). **Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications**. J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652, 1077-1088.
- Arulrajah, A. , Piratheepan, J. , and Disfani, M. (2014). **Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation**. Journal of Materials in Civil Engineering, 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0000850, 349-357.
- Arulrajah, A. , Disfani, M. , Haghghi, H. , Mohammadinia, A. , and Horpibulsuk, S. (2015) . **Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends**. Construction and Building Materials, 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.048, 146-155.

- C. Meyer. (2009). **The greening of the concrete industry**. Cement & Concrete Composites Res. 31 601–605
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. (2009). **Comparative study on characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers**. Waste Management, vol. 29, pp.539-543.
- Costa, H. M., Visconte, L. L. Y., Nunes, R. C. R., and Furtado, C. R. G. (1999). **The effect of coupling agent and chemical treatment on rice husk ash – filled natural rubber composites**. Journal of Applied Polymer Science, 76(7), 1019-1027.
- Courard, L., Michel, F., and Delhez, P. (2010). **Use of Concrete Road Recycled Aggregates for Roller Compacted Concrete**. J. Constr. Building Mater., Vol. 24, pp. 390–395.
- Davidovits, J. (1991). **Geopolymers: inorganic polymeric new materials**. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (2011). **Geopolymer chemistry and applications**. Geopolymer Institute, 3rd edition, France.
- Davidovits, J. (2010). (Online) **World-wide Increase in Geopolymer Research**. Web site : <http://www.geopolymer.org/science/world-wide-increase-in-geopolymer-research/> [5 August, 2017].
- Davidovits, J. (1988). **Geopolymer chemistry and properties**. Geopolymer 88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France, 1, 25-48.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., and Van Deventer, J. S. J. (2005). **Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 269(1-3), 47-58.
- Gabr, A. and Cameron, D. (2012). **Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction**. J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000447, 754-764.
- Gomez-Soberon, J. M. V. (2002). **Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate : An Experimental Study**. Int. J. Cement Concrete Res., Vol. 32, pp.1301–1311.

- Malhotra, V. M. (1999). **Making concrete “Greener” with fly ash**. ACI Concrete International, 21(5), 61-66.
- Malhotra, V. M. (2002). **High-performance-volume fly ash concrete**. ACI Concrete International, 24(7), 1-5.
- Malhotra, V. M. and Ramezani-pour, A. A. (1994). **Fly Ash in Concrete**. Canada Center for Mineral and Energy Technology (CANMET), Canada.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., Corder, G.D. (2011). **Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement**. J. Clean Prod. 19 (9-10), 1080–1090
- Turner, L.K., Collins, F.G., 2013. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Constr. Build. Mater. 43, 125–130.
- Melbouci, B. (2009). **Compaction and shearing behavior study of recycled aggregates**. Constr. Build. Mater., 23(8), 2723–2730.
- Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M., Bo, M., and Darmawan, S. (2014). **Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications**. Journal of Materials in Civil Engineering, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001148, 04014186.
- Naiya, T. K., Bhattacharya, A. K., Mandal, S., and Das, S. K. (2009). **The Sorption of Lead(II) Ions on Rice Husk Ash**. Journal of Hazardous Materials, 163, 1254-1264.
- Palomo, A., Grutzeck, M., and Blance, M. T. (1999). **Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future**. Cement and Concrete Research, 8, 1323-1329.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Udomchai, A. (2016). **Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer**. Applied Clay Science, 127–128 (2016) 134–142.
- Poon, C. S. and Chan, D., (2006). **Paving Blocks Made with Recycled Concrete Aggregate and Crushed Clay Brick**. Constr. Building Mater., Vol. 20, pp. 569–577.
- Poon, C. S. and Chan, D. (2006). **Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushed Clay Brick as Unbound Road Sub-Base**. Constr. Building Mater., Vol. 20, pp. 578–585.

Sustainability Victoria. (2010). **Victorian recycling industries annual report 2008-2009**. ISSN 1836-9902, Melbourne, VIC, Australia.

Tam, V. W. Y. and Tam, C. M. (2007). **Crushed Aggregates Production from Centralized Combined and Individual Waste Sources in Hong Kong**. J. Constr. Building Mater., Vol. 21, pp. 879–886.



ประวัติผู้เขียน

นายกิตติพงษ์ บุญล้อม เกิดเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม 2531 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 296 หมู่ 12 ตำบลกุดชมภู อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน วิศวกรโยธา บริษัท เอทู เทคโนโลยี จำกัด สำเร็จการศึกษาประถมศึกษาโรงเรียนพระกุมารศึกษา อำเภอพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม มัธยมศึกษาโรงเรียนสุรวิทยาคาร อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ และปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2558 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา การติดต่อ E-mail : kittipong3414.stp@gmail.com

