ความคงทนของมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

นางสาวสาวิตรี พานนพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

ความคงทนของมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ปรียาพร โกษา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

_____

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)
กรรมการ

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาวิตรี พานนพ : ความคงทนของมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (DURABILITY OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT AGGREGATE STABILIZED WITH FLY ASH –RICE HUSK ASH BASED GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาความคงทนของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้จากส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly Ash, FA) จากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ที่ได้จากโรงสีข้าวในกระบวนการเผาแกลบร่วมกับสารเชื่อมประสาน (Liquid Alkaline Activator, L) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) การศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 100/0 80/20 และ 50/50 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อด้วยเถ้าแกลบ FA/RHA เท่ากับ 100/0 60/40 และ 40/60 ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน การเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สำหรับการทดสอบเปียกสลับแห้งกระทำตามมาตรฐาน ASTM D559M-15 จำนวนรอบของสภาวะเปียกสลับแห้งที่ใช้ศึกษาเท่ากับ 0 1 3 และ 6 รอบ ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มขึ้นของวงรอบเปียกสลับแห้งส่งผลให้ตัวอย่างมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นและกำลังมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่สภาวะเปียกสลับแห้งเท่ากับ 6 รอบกับกำลังอัดตามมาตรฐานที่แนะนำโดย American Concrete Institute (ACI) พบว่า ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของ $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 80/20 และ 50/50 และอัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 100/0 และ 60/40 มีค่ากำลังอัดสูงกว่า 2,068 กิโลปาสคาล ขณะที่ทุกตัวอย่างทดสอบมีค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่เกินร้อยละ 14 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมให้ตาม ACI ผลทดสอบที่ได้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบ สามารถใช้ปรับปรุงความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลได้

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

SAWITREE PANNOP : DURABILITY OF RECYCLED ASPHALT PAVEMENT AGGREGATE STABILIZED WITH FLY ASH –RICE HUSK ASH BASED GEOPOLYMER. ADVISOR : ASST. PROF. PREEYAPHORN KOSA, Ph.D.

Durability against wetting and drying cycles of Fly Ash-Rice Husk Ash (FA-RHA) based geopolymer stabilized Recycled Asphalt Pavement (RAP) was investigated in this study. RAP was obtained from pavement recycling project in Nakhon Ratchasima Province, Thailand. Geopolymer was a mixture of FA from coal-burning power plants, RHA from rice mill, which was obtained in the process of burning rice husk, and a liquid alkaline activator (L), which is a mixture of sodium hydroxide solution (NaOH) and sodium silicate solution (Na_2SiO_3). FA/RHA ratios were 100/0 80/20, 60/40, 50/50 and 40/60, while the NaOH/Na_2SiO_3 ratios were 50/50 80/20 and 100/0. The method of wet-dry (w-d) test as per ASTM 599M-15 was adopted for sample preparations. The unconfined compression tests were undertaken on samples after 0, 1, 3, and 6 w-d cycles were considered in this study. The results show that the w-d cycles led to a weight loss of and strength reduction geopolymer stabilized RAP. The 6 w-d cycles strength of RAP with NaOH/Na_2SiO_3 ratio of 80/20 and FA/RHA ratios of 100/0 and 60/40 were higher than the strength recommended by the American Concrete Institute (ACI) (> 2,068 kPa). While the weight loss of all the tested samples met the specified requirement by the ACI (<14%). This research confirms that FA-RHA based geopolymer can improve the w-d durability of RAP.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2017 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานมหาบัณฑิตฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบคุณ กลุ่มบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษาช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินโครงงาน อาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานมหาบัณฑิตซึ่งเป็นบุคคล สำคัญอย่างยิ่งที่ค่อยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือในด้านต่างๆจนโครงงานมหาบัณฑิตฉบับนี้สำเร็จ ด้วยดี

อาจารย์ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงงานมหาบัณฑิตที่คอยแนะนำให้คำปรึกษา ในการเขียนและตรวจทานโครงงานมหาบัณฑิตจนโครงงานมหาบัณฑิตเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่พนักงานผู้ดูแลห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงงานมหาบัณฑิต

ท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงงานมหาบัณฑิตเล่มนี้ผู้จัดทำขอมอบแด่ นายทวี พานนพ ผู้เป็นบิดา นางสมพาด พานนพ ผู้เป็นมารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาและบุคคลต่างๆ ที่อาจกล่าวถึงไม่หมด ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้แก่ผู้จัดทำ จนกระทั่งโครงงานมหาบัณฑิตฉบับนี้สำเร็จ

สาวิตรี พานนพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูปภาพ ..... ช
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 บทนำ 4
2.2 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) 4
2.3 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบจีโอพอลิเมอร์ 6
2.3.1 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) 6
2.3.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA) 9
2.3.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ask, RHA) 10
2.3.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 11
2.3.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต 11
2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม 12
2.4.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Particle Size Distribution) 12
2.4.2 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific gravity และ Water absorption) 13
2.4.3 การหาค่า California Bearing Ratio (CBR) และค่าการบวมตัว (Swelling ratio) 13
2.4.4 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion 14

2.4.5 การทดสอบการบดอัด (Compaction test) 15
2.4.6 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test) 17
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
3 วิธีดำเนินการวิจัย 21
3.1 บทนำ 21
3.2 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ 23
3.2.1 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล 23
3.2.2 เถ้าลอย 23
3.2.3 เถ้าแกลบ 23
3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ (Basic engineering properties) 25
3.4 การบดอัดวัสดุ (Compaction) 25
3.5 การทดสอบความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้ง (Durability Against Wetting–Drying) 25
3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) 26
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 27
4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น 27
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด 28
4.3 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก 32
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของวัสดุตั้งต้น 34
5 สรุปผลการศึกษา 36
5.1 สรุปผลงานโครงงานวิจัย 36
เอกสารอ้างอิง 37
ประวัติผู้เขียน 39

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย 10

2.2 ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าแกลบ 11

2.3 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว 12

2.4 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่างๆ 14

2.5 การเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor 16

3.1 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ 21

3.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ 24

4.1 ค่ากำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) 28

4.2 ค่ากำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 60/40) 29

4.3 ค่ากำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 40/60) 31

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน 4

2.2 polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework 5

2.3 การนำแอสฟัลต์คอนกรีตมาใช้ใหม่ 6

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และร้อยละของความชื้น (Water content) ของการบดอัดแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor 16

3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย 22

3.2 ตัวอย่างเถ้าลอยและเถ้าแกรบร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 23

3.3 การกระจายขนาดคละของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอยและเถ้าแกลบ 24

3.4 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนด้วยสภาวะอิทธิพลเปียกสลับแห้ง 26

4.1 ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม 27

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง 29

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 60/40) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง 30

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 40/60) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง 31

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง 32

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 60/40) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง 33

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 40/60) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง 33

4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของต้นทุนวัสดุตั้งต้นและร้อยละการใช้เถ้าแกลบ 35

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน ถนน มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคม มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดความเสียหายและมีการซ่อมแซม โดยทั่วไปแล้วการซ่อมแซมถนนหรือการรื้อเพื่อทำผิวทางใหม่จะทำการรื้อผิวทางเก่าที่หมดอายุหรือชำรุดจนถึงชั้นวัสดุชั้นพื้นทางเก่าออกก่อนที่จะซ่อมแซมโดยแทนที่ชั้นพื้นทางด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด อีกวิธีหนึ่งซึ่งนิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การนำวัสดุผิวทางเก่านำกลับมาใช้ใหม่บางส่วนโดยทำการบดอัดผสมกับชั้นพื้นทางเดิมเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่และอาจปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลัง วิธีการนี้เรียกว่า “การนำวัสดุผิวทางกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling)” โดยนำผิวทางที่ถูกรื้อถอนออกบางส่วนกลับไปใช้ในการผลิตผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ แต่ส่วนที่เหลือจะนำไปกองไว้ในสถานที่เก็บเป็นขยะที่ไม่ได้ใช้งาน ในแต่ละปีมีการซ่อมผิวทางโดยการรื้อออกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะส่งผลให้มีขยะผิวทางเก่าที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก

จากปัญหาดังกล่าว ทำให้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานทำถนนแล้วเสื่อมสภาพ โดยนำวัสดุมวลรวมหยาบจากชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมารีไซเคิล (RAP) แล้วกลับมาใช้ในชั้นพื้นทางโดยผ่านกระบวนการผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุทางวิศวกรรม การพัฒนาวัสดุดังกล่าวจึงเป็นการลดต้นทุนในการก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางและยังพัฒนาคุณสมบัติบางประการของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตให้ดีขึ้น สามารถเพิ่มระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนาน และทำให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ จัดเป็น Green material ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยกาซคาร์บอนไดออกไซด์ และก่อให้เกิด Greenhouse effect ทั้งนี้จีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงในการเตรียมตัวอย่าง อีกทั้งปลดปล่อย CO_2 ต่ำ และทำให้ถนนชั้นพื้นทางสามารถกำลังแรงอัดได้มากขึ้น ช่วยป้องกันการวิบัติเนื่องจากการอัดตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีขึ้น ทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนาปรับปรุงนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

จนถึงปัจจุบัน งานวิจัยด้านการเพิ่มกำลังของ RAP ด้วยสารเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบที่เป็นที่ยอมรับมีอยู่อย่างแพร่หลาย แต่โดยทั่วไปแล้วประเทศไทยนั้นอยู่ในแถบร้อน มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศทั้งในช่วงฤดูฝน และฤดูแล้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาความคงทนของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบ (RHA) ต่อ เถ้าลอย (FA) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยการทดสอบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง W-D ซึ่งเป็นการจำลองสภาพอากาศสถานการณ์วิกฤตที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายของวัสดุพื้นทางทั้งหมด 6 cycles ซึ่งจะเป็นที่ยอมรับ ผลการศึกษาจะถูกเปรียบเทียบกับข้อกำหนดในการก่อสร้างทางของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน หรือ American Concrete Institute (ACI 230.1R-90) เพื่อเป็นข้อมูลในการสนับสนุนให้มีการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกใหม่ของวัสดุที่จะนำมาทำชั้นพื้นทางซึ่งมีความสำคัญต่อด้านวิศวกรรม และด้านสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความคงทนของวัสดุจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วย เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) จีโอพอลิเมอร์ ที่ผ่านการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่อายุบ่ม 28 วัน เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA)

1.3.2 การทดสอบความคงทนของตัวอย่าง RAP ที่อัตราส่วนของ FA/RHA เท่ากับ 100/0 60/40 และ 40/60 และอัตราส่วนปริมาณสารเชื่อมประสาน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 100/0 80/20 และ 50/50 ที่ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content , OLC) จากการทำ Compaction Test ด้วยวิธี Modified Proctor Test ของแต่ละอัตราส่วนผสม เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุการบ่มที่ 28 วัน ได้มีการใช้วิธีทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้ง W-D ตามมาตรฐาน ASTM 599M-15 สำหรับการเตรียมตัวอย่าง นำตัวอย่างแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 3 ชั่วโมง กระบวนการนี้เรียกว่าวงจร 1 cycles หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักและทดสอบกำลังอัดด้วยวิธี Unconfined Compressive Strength โดยได้ศึกษาในตัวอย่างหลังจากรอบ 0 1 3 และ 6 cycles

1.3.3 เปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อกำหนดในการก่อสร้างทางของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน หรือ American Concrete Institute (ACI 230.1R-90)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) เพื่อช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือใช้ และลดต้นทุนในงานก่อสร้างได้

1.4.2 ทราบถึงความคงทนของแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) จีโอพอลิเมอร์ โดยทำการทดสอบความคงทนด้วยสภาวะเปียกสลับแห้ง (W-D) สูงสุดที่ 6 cycles

1.4.3 สร้างกราฟจำลองและใช้ทำนายความคงคนของวัสดุ RAP ที่เกิดจากอิทธิพลสภาวะเปียกสลับแห้ง (การเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศ) เพื่อประกอบการตัดสินใจก่อนการนำไปใช้ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษาและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ทฤษฎีการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมาและเกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้

2.2 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบ อสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอพอลิเมอริกอนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นานในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอพอลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอพอลิเมอร์ว่า จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นโดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดไฮเดรชั่นของปูนซิเมนต์อย่างสิ้นเชิง

ลักษณะโครงสร้างของ Hydration ของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Geopolymer นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชั่นของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีตซิเมนต์เพสหรือมอร์ต้าร์ที่แข็งตัวแล้ว

C_2S, $C_3S + H_2O$ ------> C-S-H + $Ca(OH)_2$ ------(Portland Cement Hydration)

SiO_2 (Pozzolanic material) + $Ca(OH)_2$ ------> C-S-H ------(Pozzolanic Reaction)

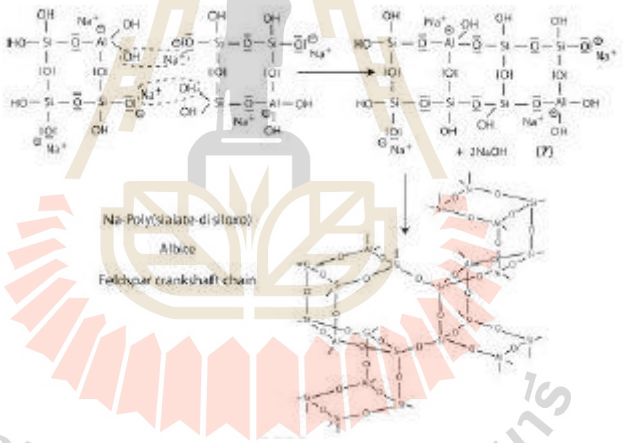
รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับซิเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซิเมนต์เพสมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น

จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิเกต (Si) อะลูมิเนียม (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้นซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไป

$$n(Si_2O_5,Al_2O_2)+2nSiO_2+4nH_2O+NaOH \text{ or } KOH\text{----->}Na+\ K+\ +n(OH)_3\text{-Si -O -Al -O-Si-}(OH)_3$$

(Si-Al materials) $(OH)_2$(Na-poly(sialate-disiloxopolymer)) (2-3)



รูปที่ 2.2 polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าถ่านหินมีส่วนประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก หากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์จะสามารถทำให้เกิดสารประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีต สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกันและเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาก็จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในกระบวนการและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ปกติสารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จึงทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายมากกว่า

2.3 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบจีโอพอลิเมอร์

2.3.1 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

Pavement Recycling คือ การนำวัสดุจากชั้นทางเดิม มาทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนจะระบุว่าจะใช้ในชั้นทางชั้นไหนหรือนำไปใช้กับถนนเดิมหรือถนนอื่นๆขึ้นอยู่วิศวกรผู้ออกแบบได้พิจารณากำหนด โดยพิจารณาการวิเคราะห์ความเสียหาย การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างทางใหม่ในถนนเดิม รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุสามารถทำการปรับปรุงแล้วเหมาะสมที่จะเป็นชั้นทางได้อย่างเหมาะสมแล้วคิดว่าควรมีขบวนวิธีการทำงานอย่างไร ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพวัสดุมีทั้งปรับปรุงในที่ (In-Place) หรือปรับปรุงที่โรงงานผสม (In Plant)

รูปที่ 2.3 การนำแอสฟัลต์คอนกรีตมาใช้ใหม่
ที่มา http://www.dohjournal.com

ทำไมต้องใช้วิธีการทำ Pavement Recycling

ก่อนอื่นต้องยอมรับว่าทรัพยากรธรรมชาติมีจำนวนจำกัด และการนำวัสดุธรรมชาติเอามาใช้งานก็จะทำลายสิ่งแวดล้อม และเราได้นำวัสดุมาใช้ในงานทางเป็นวัสดุชั้นโครงสร้างชั้น

ทาง ทั้ง ดิน หิน กรวด ทราย ซึ่งถือได้ว่าถนนลาดยางเดิมมีวัสดุสร้างทางอยู่เป็นปริมาณมาก ถึงแม้จากการใช้งานมาระยะหนึ่งก็ต้องมีการดูแลรักษาซ่อมบำรุง บูรณะปรับปรุง และก่อสร้างใหม่ เนื่องจากโครงสร้างชั้นทางมีความแข็งแรงลดลง ทั้งนี้คุณสมบัติวัสดุชั้นทางก็ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพกลับมาใช้งานใหม่ แต่ต้องพิจารณาในด้านวิชาการและข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างชั้นทางว่าควรใช้เป็นชั้นทางใดได้

ในการพัฒนาด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนแนว “3R” เป็นปรัชญาหนึ่งที่ใช้ในพัฒนา คือ ลด (Reduce) นำมาใช้ใหม่ (Reuse) และการปรับปรุงเพื่อนำมาใช้ใหม่ (Recycling) ในงานก่อสร้างบูรณะปรับปรุงถนนลาดยางเดิม ได้นำแนวคิดปรัชญามาร่วมใช้กับองค์วิชาความรู้ด้านวิศวกรรมงานทางและ วิศวกรรมสาขาอื่น ๆ โดยมีการผลิตเครื่องจักรซึ่งมีหลายรูปแบบมาใช้งานปรับปรุงวัสดุชั้นทางเดิม เพื่อนำมาใช้ใหม่

การพิจารณานำวิธีการทำ Pavement Recycling มาใช้ในงานถนนลาดยางเดิมก่อนการพิจารณาว่าทำการบูรณะปรับปรุง/ก่อสร้างใหม่ถนนลาดยางเดิมโดยวิธี Pavement Recycling สิ่งสำคัญยิ่งที่ต้องถือปฏิบัติละเว้นไม่ได้ คือ การทำ Site Investigation ต้องทำการสำรวจประเมินถนนเดิมนั้นถึงสภาพความเสียหาย ความลึกของความเสียหายที่ต้องแก้ไขความหนาและชนิดวัสดุของแต่ละชั้นทาง รวมถึงประเมินความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทางและปริมาณน้ำหนักจราจรที่มาใช้ บริการต่อไป เพื่อทำการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบและกำหนดรูปแบบการทำ Pavement Recycling ซึ่งอาจแบ่งกิจกรรมงานได้ 3 ลักษณะกิจกรรม คือ

1. Resurface คือ ความเสียหายจะเกิดเฉพาะชั้นผิวทาง ความลึกของความเสียหายประมาณ 5 – 10 เซนติเมตร การทำ Recycling จะเรียกว่า Partial Depth Recycling วัสดุชั้นทางเดิมจะเป็นผิวทางลาดยางเดิมที่เรียกว่า RAP (Reclaim Asphalt Pavement) เมื่อปรับปรุงแล้วจะนำกลับมาใช้ชั้นผิวทางหรือชั้นรองผิวทางหรือชั้นพื้น ทางขึ้นอยู่กับวิเคราะห์ออกแบบความแข็งแรงโครงสร้างชั้นทาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับมาตรฐานการบริการจราจรของถนนนั้น ๆ สำหรับทางด่วนหรือทางที่ต้องการใช้ความเร็วสูงวัสดุ RAP มักนำออกไป แล้วใช้วัสดุผสมใหม่หมดมาในชั้นผิวทาง (Wearing Course) เพราะต้องการแรงต้านความฝืดของผิวทาง (Skid Resistance) สำหรับการปรับปรุง RAP นั้น จะปรับปรุงในที่หรือปรับปรุงที่โรงงานผสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการคุณภาพในระดับไหน ถ้าปรับปรุงที่โรงงานผสมได้ความสม่ำเสมอของคุณภาพก็จะดีกว่า เนื่องจากขั้น ตอนการทำงานและการควบคุมงานได้แยกส่วนให้เห็นได้ชัดเจน

กว่าการผสมในที่ ฉะนั้นหากใช้เป็นชั้นบนของโครงสร้างทางแล้วควรอย่างยิ่งใช้ปรับปรุงที่โรง งานผสมจะดีกว่า

2. Rehabilitation คือ ความเสียหายจะเกิดทั้งชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง ความลึกของความเสีย หายประมาณ 10 – 30 เซนติเมตรการทำ Recycling จะเรียกว่า Full Depth Recycling วัสดุชั้นทางเดิมจะมีทั้ง RAP และ RAM (Reclaim Aggregate Material) คือ ทั้งชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางตามลำดับ ส่วนใหญ่ Recycling แล้วจะใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่สำหรับการพิจารณาว่าจะปรับปรุงในที่หรือปรับ ปรุงที่โรงผสมให้พิจารณาถึงสภาพความลึกของความเสียหายและความสามารถการทำงาน ของเครื่องจักรและสิ่งแก้ไขจุดอ่อนที่มีมากน้อยเพียงใดที่เกิดใต้ชั้นพื้นทางด้วย (ชั้นรองพื้นทาง) สำหรับเลือกใช้การปรับปรุงในที่ อาจมีข้อพิจารณาเพิ่มเติมคือการขุดไสชั้นผิวทางบางส่วนออกก่อน เพื่อให้เครื่องจักรปรับปรุงชั้นพื้นทางได้เต็มที่ความสามารถของเครื่องจักร ได้ และสามารถปรับปรุงได้ตามความลึกของความเสียหาย สำหรับการทำชั้นผิวทางใหม่ ต้องพิจารณาว่าควรใช้ความหนาเท่าไรจึงเหมาะสมทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ น้ำหนักจราจร และอาจใช้วัสดุ RAP บางส่วนมาทำ Hot – Mix Recycling ก็ได้ขึ้นอยู่กับมาตรฐานชั้นทาง

3. Reconstruction คือ ความเสียหายเกิดขึ้นตลอดทั้งโครงสร้างชั้นทาง คือ ผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทาง ความลึกความเสียหายมากกว่า 30 เซนติเมตรจนถึง 60 เซนติเมตร (โดยประมาณ) การทำ Recycling จะเรียกว่า Deep Recycling ซึ่งจะต้องมีทั้งปรับปรุงในที่และปรับปรุงที่โรงงานผสม โดยวัสดุชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางต้องนำมาปรับปรุงที่โรงงานผสม ส่วนวัสดุชั้นรองพื้นทางปรับปรุงในที่ (เครื่องจักรที่ใช้ผู้ผลิตเรียกว่า Soil Stabilizer ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ถึงความ 30 – 40 ซม. แต่สำหรับใช้ในงานพื้นทางเครื่องจักรจะมีความปราณีตในการทำงานกว่าแต่ความ หนาที่ปรับปรุงจะน้อยกว่าได้ความหนาที่เหมาะสม 20 เซนติเมตร ซึ่งผู้ผลิตจะเรียกว่า Recycler) สำหรับการทำชั้นผิวทางใหม่นั้น ก็พิจารณาเช่นเดียวกันกับข้อ 2 งาน Rehabilitation

หมายเหตุ ทั้ง 3 กิจกรรมที่กล่าวข้างต้น อยู่สมมติฐานว่าโครงสร้างชั้นทาง มีชั้นผิวทางลาดยางหนาไม่เกิน 10 ซม. ชั้นพื้นทาง 20 ซม. และชั้นรองพื้นทาง 20 – 30 ซม. (อาจรวมบางส่วนของวัสดุคัดเลือก ก เข้าไปด้วย) ซึ่งถ้าสมมติฐานเปลี่ยนไปแนวคิดก็ต้องปรับเปลี่ยน ที่

กล่าวมานั้นเพื่อให้เป็นตัวอย่างที่ท่านผู้อ่านจะได้ประมวลความรู้มา พิจารณาแก้โจทย์ปัญหาในแต่ละสายทางต่อไป

2.3.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

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

เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นของแข็งเป็นสารแขวนลอยอยู่ในก๊าซไอเสีย โดยปกติแล้วมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5 μm ถึง 100 μm ซึ่งปรากฏอยู่ในสองรูปแบบ ได้แก่ สัณฐาน ซึ่งมีลักษณะ โค้งมน และเรียบเนียน และผลึก ซึ่งมีลักษณะคม แหลม และอันตราย ส่วนมากประกอบด้วย SiO_3 Al_2O_3 และ Fe_2O_3

ในปี 2009 Chindaprasirt et al. ได้ศึกษาพบว่ามีโรงไฟฟ้าในประเทศไทยผลิตเถ้าลอยได้ถึง 4,000 ล้านตันต่อปี แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพียง 1,800 ล้านตันต่อปีเท่านั้น ที่เหลือกลายเป็นขยะทั้งสิ้น สำหรับทั่วโลกมีการประมาณปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตได้จากถ่านหินต่อปี มากกว่า 390,000 ล้านตัน ในปี 1998 โดยประเทศที่เป็นผู้ผลิตหลักคือ จีนและอินเดีย และมีเพียงร้อยละ 14 เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในขณะส่วนที่เหลือถูกกองทิ้งไว้ทั่วไป (Malhotra, 1999) ภายในปี 2010 ปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตได้ทั่วโลกประมาณ 780,000 ล้านตันต่อปี (Malhotra, 2002) เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่ถูกกองทิ้งไว้ตามพื้นที่ต่างๆ เริ่มส่งผลกระทบต่อภาวะสิ่งแวดล้อมโดยรอบพื้นที่นั้นๆ ดังนั้นการนำเถ้าลอยกลับมาใช้ใหม่จึงจำเป็นอย่างยิ่ง จากข้อมูลของ American Coal Ash Association (ACAA) ในปี 2003 การใช้ประโยชน์ของเถ้าลอย เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตมีประโยชน์อย่างสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังช่วยพัฒนาความแข็งแกร่งของคอนกรีต ลดการใช้พลังงาน ลดการผลิตก๊าซเรือนกระจก และลดปริมาณเถ้าลอยที่สะสมอยู่ และช่วยประหยัดทรัพยากรและวัสดุธรรมชาติชนิดอื่นด้วย

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยมาจากชนิดของถ่านหิน การเผาไหม้ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous coal) มีแคลเซียมและธาตุเหล็กน้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหิน บิทูมินัส (Bituminous coal) คุณลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีขึ้นอยู่กับวิธีการเผาไหม้ แหล่งถ่านหินและรูปร่างอนุภาค องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแต่ละชนิดที่มีหลากหลายแสดงให้เห็นว่ามีถ่านหินหลายชนิดที่ถูกใช้ในโรงไฟฟ้าทั่วโลก (Malhotra and

Ramezanianpour 1994) จากมาตรฐาน ASTM C618 (2005) จำแนกเถ้าลอยออกได้ 3 กลุ่มดังนี้ Class N Class F และ Class C ข้อแตกต่างหลัก ๆ ของทั้ง 3 กลุ่มคือ ปริมาณแคลเซียม (Calcium) ซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และ เหล็ก (Iron) ในเถ้าลอย คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยได้รับอิทธิผลอย่างมากจากองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน 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_2O_3) + iron oxide (Fe_2O_3), **min**, %	70	70	50
Sulfur trioxide (SO_3), **max**, %	4	5	5
Moisture content, **max**, %	3	3	3
Loss on ignition, **max**, %	10	6	6

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

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

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

2.3.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ask, RHA)

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

จากการศึกษา RHA market study ในปี 2003 ข้าวมีปริมาณคิดเป็น 1% ของพื้นผิวดินของโลกและเป็นแหล่งทรัพยากรอาหารหลักสำหรับประชากรพันล้านคนในปัจจุบัน ทั่วโลกมีการ

ประเมินผลผลิตข้าวมีปริมาณมากถึง 600 ล้านตันต่อปี ดังนั้นแกลบก็ถูกผลิตเป็นจำนวนมากตามไปด้วย ประมาณร้อยละ 20 ของเม็ดข้าวเป็นแกลบและปริมาณการผลิตคือ 120 ล้านตันต่อปี สำหรับกระบวนการทำให้แกลบกลายเป็นเถ้าแกลบ (RHA) ทำให้เกิดเถ้าแกลบคิดเป็นร้อยละ 20 ของแกลบทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าแกลบ

SiO_2 (Amorphous)	SiO_2 (Crystalline)	K_2O	C	Total
>90	<1.5	<2.3	<6	99.8 %Wt.

เถ้าแกลบมีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบา โดยพื้นที่ผิวสัมผัสภายนอกมากและเต็มไปด้วยซิลิกาโดยปกติแล้วจะมีซิลิกาอยู่ประมาณร้อยละ 90 – 95 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบซึ่งจัดทำโดย Agrilectric Research Company ในปัจจุบันวิธีการที่เป็นที่นิยมในการกำจัดเถ้าแกลบคือนำไปกองทิ้งไว้ในพื้นที่เก็บขยะซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมรวมไปถึงมลพิษทางอากาศและปัญหาการปล่อยพื้นที่ให้ร้าง (Costa et al., 1999) เนื่องจากปริมาณของเถ้าแกลบที่ถูกผลิตขึ้นทุกๆปี ดังนั้นวิธีการหรือกระบวนการกำจัดเถ้าแกลบที่มีประสิทธิภาพควรได้รับการพัฒนาอย่างเร่งด่วน

2.3.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขออกเช่นอุตสาหกรรมทำสบู่อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตันโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก

2.3.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำจัดเป็นด่างลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อนโซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิคอนไดออกไซด์ ($Na_2O:SiO_2$) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($Na_2O:SiO_2$)	1:1.97 - 1:2.17	1:2.34 - 1:2.58	1:3.18 – 1:3.59
เหล็ก ร้อยละไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

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

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

2.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

2.4.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Particle Size Distribution)

การหาขนาดเม็ดวัสดุเป็นการทดสอบหนึ่งในหลายๆการทดสอบที่ต้องรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์ขนาดวัสดุโดยใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ (Sieve Analysis) โดยจะได้ผลออกมาเป็นเส้นการกระจายขนาดของตัวอย่างวัสดุ คำนวณได้จากน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ โดยเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปจนมีขนาดเล็กสุด คือตะแกรงขนาดเบอร์ 200 สำหรับขนาดตะแกรงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ผู้ทำการทดสอบได้อ้างอิง

ตามมาตรฐาน ASTM D422-63 การคำนวณร้อยละผ่านตะแกรง (Percent Finer) ดังต่อไปนี้

1. ร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรง $= \frac{\text{น้ำหนักดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}}$ X100 ..... 2.1

2. ร้อยละการค้างสะสม = ผลบวกสะสมของร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรงที่หยาบกว่า
3. ร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (% *Finer*) = *100* ร้อยละค้างสะสม

2.4.2 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific gravity และ Water absorption)

ความถ่วงจำเพาะของวัตถุใดๆ คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของเนื้อวัตถุนั้นต่อน้ำหนักน้ำที่อุณหภูมิ 4°C ที่มีปริมาตรเท่าวัตถุนั้น ความถ่วงจำเพาะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานสำคัญอีกค่าหนึ่ง ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาตรช่องว่าง (Void Volume) ความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ความพรุน (Porosity) และอื่น ๆ ได้ ทั้งยังจะทำให้คาดได้ว่ามวลดินนั้นๆ ประกอบด้วยธาตุสารอะไรเป็นองค์ประกอบ

ตามมาตรฐาน AASHTO T85-70 การคำนวณความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำได้ดังนี้

1. Bulk Specific Gravity = $\frac{A}{B - C}$ 2.2

2. Water Absorption = . $\frac{B - A}{A}$ x 100 ..... 2.3

เมื่อ A = มวลของวัสดุอบแห้งในอากาศ มีหน่วยเป็นกรัม

B = มวลของวัสดุที่อิ่มตัวด้วยน้ำและมีผิวแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม

C = มวลของวัสดุในน้ำ มีหน่วยเป็นกรัม

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

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

$$CRB = \frac{\text{Test Unit Load}}{\text{Standard Unit Load}} \times 100 \qquad \text{.....(2.4)}$$

ค่า standard unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว บนหินคลุกมาตรฐานบดอัดแน่นขนาดต่างๆ กันหลายขนาดมีค่ามาตรฐานดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่างๆ

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

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

สำหรับค่าการบวมตัววัดจากขั้นตอนการอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างโดยวัดการเปลี่ยนแปลงของความสูงในแนวดิ่งของตัวอย่างโดยคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าการบวมตัว} = \frac{\text{ผลต่างระหว่างการอ่าน Dial gauge ครั้งแตกและครั้งสุดท้าย}}{\text{ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง}} \times 100 \quad \text{.....(2.5)}$$

2.4.4 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion

มวลรวมหยาบขนาดเล็กปกติใช้เป็นส่วนผสมหลักในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยอาจคละขนาดตามความ เหมาะสมเช่นประกอบด้วยมวลรวมหยาบที่มีขนาดค่อนข้างโต และใกล้เคียงกัน (Coarse grade) มวลรวมหยาบที่มี ขนาดโตไม่แตกต่างกันมากนักเป็นส่วนใหญ่ (Open grade) มวลรวมหยาบและละเอียดคละกัน (Dense grade) หรือ มวลรวมละเอียดเป็นส่วนใหญ่ (Fine grade) เมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ แอสฟัลต์เหลว (Cutback) แอสฟัลต์ผสมน้ำ (Emulsified asphalt) หรือน้ำมันดินที่ได้จากการกลั่นถ่านหิน (Tar) ใช้ราดผิวทางเพื่อต้านการสึกหรอ (Wearing surface) เนื่องจากน้ำหนัก หรือการเคลื่อนที่ของล้อรถ ซึ่งจะทำให้ผิวสัมผัสขัดสีกระแทก หรือถูกบดย่อย มวลรวมหยาบที่ดี ควรมีคุณสมบัติทั้งความแข็งแกร่ง (Hardness) ความทนทาน (Soundness) ซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลักได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม น้ำหนัก หรือแรงและเวลาการทดสอบโดยใช้ Los Angeles Abrasion Machine จึงเป็นการจำลอง เพื่อหาความแข็งแกร่ง

หรือทนทานของมวลรวมภายใต้ปัจจัยดังกล่าว ความแข็งแกร่ง หรือทนทาน อาจพิจารณา หรือคำนวณจากร้อยละของมวลที่สูญเสียไป (Lose Angles Abrasion Value, LAV) ได้ดังนี้

$$LAV = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100 \qquad \text{.....(2.6)}$$

โดยที่ W_i = น้ำหนักของมวลรวมหยาบก่อนทดสอบ

W_f = น้ำหนักของมวลรวมหยาบหลังทดสอบ

ผลต่างระหว่าง W_i และ W_f คือฝุ่นละเอียดที่เกิดจากการขัดสีหรือกระแทกและผ่านตะแกรง เบอร์ 12 (1.7 มิลลิเมตร)

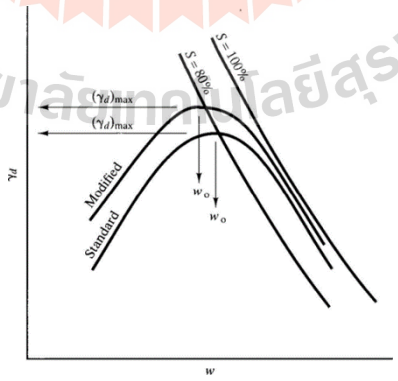
2.4.5 การทดสอบการบดอัด (Compaction test)

วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้าน้ำมีอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้าทีน้ำอยู่น้อยเกินไป 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 วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test)

ตารางที่ 2.5 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	ø4"x 4.6"	5.5	3	12	25	12,400
Proctor	ø6"x 5.0"	5.5	3	12	56	12,400
Modified	ø4"x 4.6"	10	5	18	25	56,000
Proctor	ø6"x 5.0"	10	5	18	56	56,000

ในการทำการบดอัดในห้องทดลองซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาผึ่งให้แห้ง แล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาตรที่พอเหมาะแล้วเริ่มทำการบดอัดในแบบที่ใช้บดอัด 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 2.4 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 2.4 จะสามารถสังเกตลักษณะพิเศษสองประการ คือ ค่า γ_d ของ Modified Proctor จะสูงกว่า γ_d ของ Standard Proctor และค่าร้อยละความชื้นที่จุด γ_d สูงสุด ซึ่งเรียกว่าความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) ก็จะลดลงด้วย ขณะที่ γ_d เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะพิเศษนี้เป็นคุณสมบัติของดินโดยทั่วไปเมื่อได้รับการบดอัด

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

$$\text{ร้อยละความชื้นในดิน(w)} = \frac{\text{มวลของดินเปียก} - \text{มวลของดินแห้ง}}{\text{มวลของดินแห้ง}} \times 100 \qquad \text{.....(2.7)}$$

$$\text{ความหนาแน่นเปียก } (\gamma_t) = \frac{\text{มวลดินเปียก (A)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (V)}} \qquad \text{.....(2.8)}$$

$$\text{ความหนาแน่งแห้ง}(\gamma_d) = \frac{\rho_t}{1+\frac{\text{ร้อยละความชื้นในดิน (w)}}{100}} \qquad \text{.....(2.9)}$$

2.4.6 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test)

การทดสอบกำลังอัดของวัสดุเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้รับแรงอัดว่าจะสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากน้อยเพียงใดและเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุนั้นด้วย เพื่อที่จะได้นำวัสดุนั้นไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม สำหรับการคำนวณกำลังอัดคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D1633 (2007) ได้ดังนี้

$$\text{ค่ากำลังอัด (Compressive strength)} = \frac{\text{แรงกดสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}} \qquad \text{.....(2.10)}$$

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิชิต คำภาหล้า (2555) ได้ศึกษา อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยด้วยวิธีแห้งสลับเปียก พบว่าอายุการใช้งานของดินเหนียวผสมกาก

แคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยจะมีค่าต่ำสอดคล้องกับที่ ACI (1990) และ U.S. Army Corps of Engineers (2004) แนะนำว่ากำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของการแห้งสลับเปียกการเพิ่มเถ้าลอยเพื่อช่วยให้ความหนาแน่นและการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ในดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปริมาณที่เหมาะสมของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 7 และร้อยละ 20 ตามลำดับ ปริมาณเถ้าลอยที่มากเกินจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด

เฉลิมชัย และ วรชัย (2552) ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์ (Soil cement) หรืออิฐ บล็อกประสาน (Interlocking Block) โดยวิธีการทดสอบแบบแห้งสลับเปียก (Wet and Dry Condition) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์โดยมีน้ำเป็นตัวกัดกร่อน ซึ่งใช้เกณฑ์พิจารณาจาก 3 ปัจจัย คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก และลักษณะทางกายภาพของอิฐดินซีเมนต์ จากการทดสอบการเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์ภายใต้การทดสอบแบบแห้งสลับเปียก พบว่าการสึกกร่อนของอิฐดินซีเมนต์โดยใช้น้ำเป็นตัวกัดกร่อนเกิดกระบวนการกัดกร่อนที่แปรผันตรงกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่จะเกิดในลักษณะที่ค่อย ๆ ลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไปและต้องใช้ระยะเวลานาน ผลการทดสอบทางด้านน้ำหนัก (Weight Loss) น้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ลดลงแปรผันตรงกับระยะเวลา เกิดการเสื่อมสภาพทางด้านน้ำหนักแบบช้า ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (Percent Weight loss) คือ 4.8% จากผลการทดลองของตัวอย่างทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง จำนวนทั้งสิ้น 46 รอบการทดลอง เป็นระยะเวลาในการทดสอบทั้งรวมสิ้น 90 วัน ผลการทดสอบทางด้านกำลังของวัสดุ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ลดลงเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดการทดลอง เท่ากับ 7.71 ksc คิดเทียบเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละลดลงเท่ากับ ร้อยละ 7.0 เทียบจากค่ากำลังรับแรงอัดก่อนเริ่มทำการทดสอบ และได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของทั้ง3 ชุดการทดลองภายหลังการทดสอบ เท่ากับ 80.29 ksc ผลทางด้านการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอิฐดินซีเมนต์ มีดังนี้ เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณผิวและเนื้อของอิฐดินซีเมนต์ภายหลังการทดสอบแล้วเสร็จมีจำนวนอิฐบล็อกที่เกิดรอยร้าวประมาณ ร้อยละ 20 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด เกิดการสึกกร่อนของอิฐบล็อกประสานบริเวณรอบรูเสียบเหล็กเสริมรอยบาก และดอกของอิฐบล็อก สีของอิฐบล็อกประสานมีสีซีดลง 31

วิษณุกร สมิงทอง (2556) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของตะกอน ดินประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดสอบสรุปว่า สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มกำลัง อัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อก ไม่รับน้ำหนัก (25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) กำลังอัดของตะกอนดินประปา-

เถ้าลอยจีโอพอลิ เมอร์ที่ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (70 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร) คืออัตราส่วน Na2SiO3/NaOH เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 ที่ อุณหภูมิ85°C ระยะเวลาบ่มไม่น้อยกว่า 3 วัน กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้ง แปรผันตามกำลังอัดในสภาวะแช่น้ำเริ่มต้น การทดสอบความ คงทนต้านสภาวะเปียกสลับแห้งใช้เวลานานมากงานวิจัยนี้จึงได้สร้างสมการท นายกำลังอัดที่รอบ เปียกสลับแห้งต่างๆ ซึ่ง เป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในฟังก์ชั่นล็อกการิทึม ดังนั้น กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งค่าหนึ่ง สามารถประมาณได้เมื่อทราบเพียงกำลังอัดในสภาวะแช่เริ่มต้น การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง ในช่วง 6 รอบแรก เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเกินกว่า 6 รอบ การสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยลง และเกือบจะคงที่สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัดของ ดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ร้อยละการดูดซึมน้ำของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 85°C มีค่าต่ำกว่าร้อยละ14.3 ซึ่งเป็นค่ายอมให้สำหรับคอนกรีตบล็อก การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงและนานเกินไป (สูงกว่า 95°C และนานเกิน 72 ชั่วโมง) ก่อให้เกิดการ หดตัวและรอยแตกระดับไมโครเมตรเนื่องจากการสูญเสียของเหลวในตัวอย่างอย่างฉับพลัน ส่งผล ให้ร้อยละของการดูดซึมน้ำมีเกินกว่าข้อกำหนด

ธีรพฤทธิ์ พลตื้อ (2559) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน FA/RHA ที่เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 ที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบที่อายุบ่ม 7 วันมาเปรียบเทียบกับค่ายอมให้ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2,413 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 และ 1,724 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางกลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 อัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงมีดังนี้ 1) ที่ค่าส่วนผสม $NaOH/Na_2SiO_3$ = 50/50 อัตราส่วน FA/RHA = 40/60 50/50 60/40 80/20 100/0 2) ที่ค่าส่วนผสม $NaOH/Na_2SiO_3$ = 60/40 อัตราส่วน FA/RHA = 40/60 50/50 60/40 80/20 100/0 3) ที่ค่าส่วนผสม $NaOH/Na_2SiO_3$ = 80/20 อัตราส่วน FA/RHA = 60/40, 80/20, 100/0 และ 4) ที่ค่าส่วนผสม $NaOH/Na_2SiO_3$ = 100/0 อัตราส่วน FA/RHA = 100/0 และอัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทเพิ่มเติมมีดังนี้ 1) ที่ค่าส่วนผสม $NaOH/Na_2SiO_3$ = 80/20 อัตราส่วน FA/RHA = 50/50 2) ที่ค่าส่วนผสม $NaOH/Na_2SiO_3$ = 100/0 อัตราส่วน FA/RHA = 80/20 และค่าอัตราส่วน FA/RHA และค่าอัตราส่วน

$NaOH/Na_2SiO_3$ ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้คือ FA/RHA = 40/60 ที่ปริมาณสารละลาย $NaOH/Na_2SiO_3$ = 60/40 เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท และราคาของเถ้าลอยมีราคาสูงกว่าเถ้าแกลบมากทำให้ลดต้นทุนของวัสดุไปได้ร้อยละ 45 และเนื่องจากราคาของสารละลาย Na_2SiO_3 ก็มีราคาสูงกว่าสารละลาย NaOH เมื่อคิดในปริมาตรที่เท่ากัน

กิตติพงศ์ บุญล้อม (2560) ได้ศึกษาการปรับปรุงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง พบว่าอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นยกเว้นที่อัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 50/50 เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน FA/RHA ที่เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 ที่เพิ่มขึ้น และ ค่าอัตราส่วน FA/RHA และค่าอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้คือ FA/RHA = 60/40 ที่ปริมาณสารละลาย $NaOH/Na_2SiO_3$ = 80/20 เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 kPa)และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-25561 (ค่ายอมให้ 1,724 kPa)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

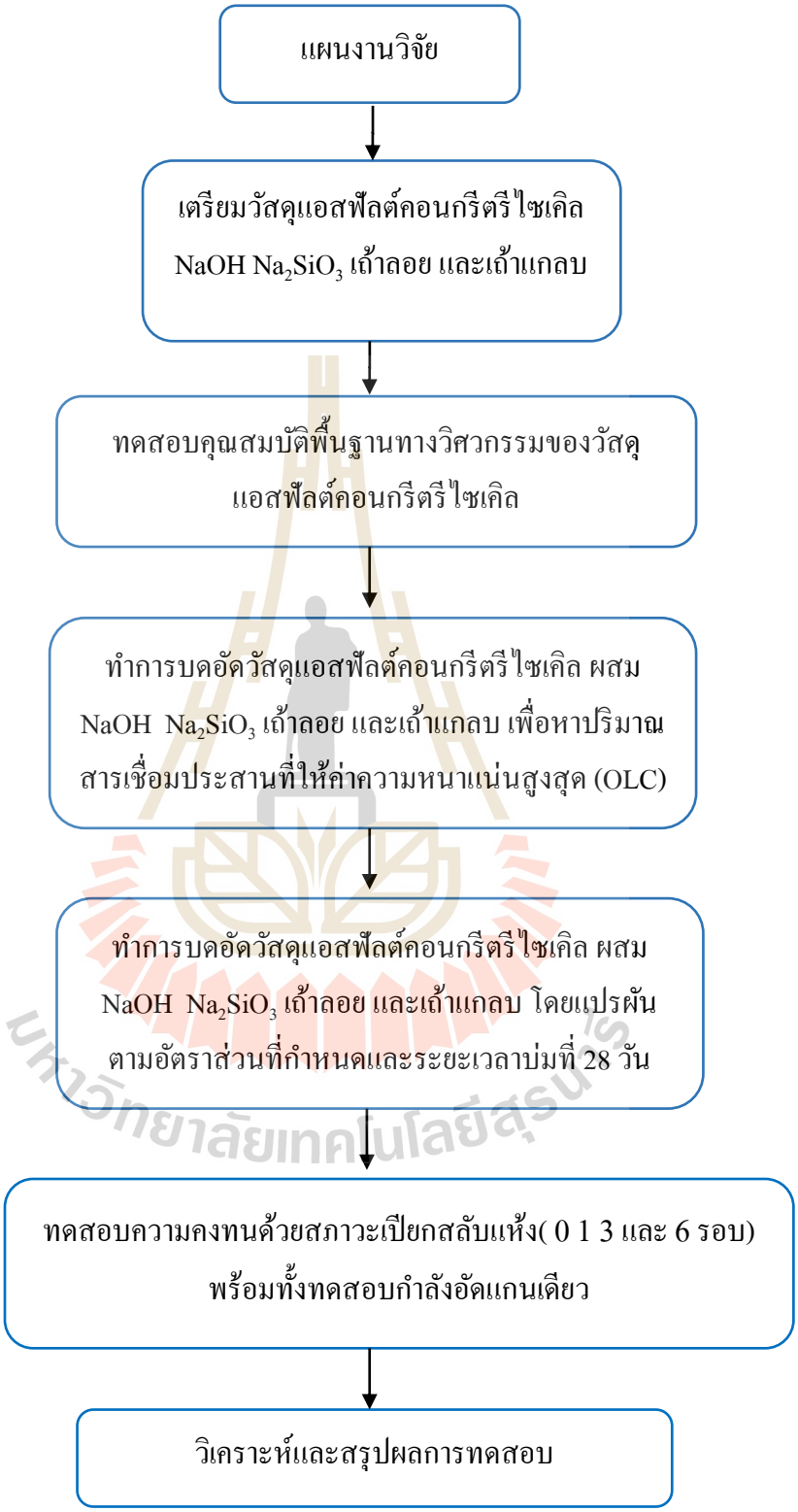
บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาความคงทนของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) จีโอพอลิเมอร์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)ได้จากการย่อยชั้นพื้นทางเดิมจากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุงานทาง บริเวณหลังอาคารเครื่องมือ 5 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วัสดุตัวอย่างจะถูกนำมาปรับปรุงการกระจายขนาดของเม็ดดินให้ได้มาตรฐานของชั้นพื้นทาง และผสมกับวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ (ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุตั้งต้น) แล้วทำการบดอัด โดยแปรผันตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยและเถ้าแกลบ อัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ ระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างบดอัดจะถูกนำไปบ่มจนได้อายุ 28 วัน และทดสอบความคงทนด้วยสภาวะเปียกสลับแห้งที่ 0 1 3 และ 6 รอบ โดยแต่ละรอบก็มีการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวด้วย ผลทดสอบความคงทนด้วยสภาวะเปียกสลับแห้งที่อายุบ่ม 28 วัน ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ American Concrete Institute (ACI 230.1R-90 State-of-the-Art Report on Soil Cement) เป็นสถาบันควบคุมมาตรฐานโครงสร้างและคุณภาพคอนกรีตที่ใช้สำหรับชั้นพื้นทาง รายละเอียดจำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ

ตัวแปร	จำนวน	คำอธิบาย
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
ระยะเวลาบ่ม	1	28 วัน (ที่อุณหภูมิห้อง)
ปริมาณความชื้น	1	ปริมาณของเหลวที่เหมาะสม (OLC)
ปริมาณของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ	1	(FA+RHA)/RAP = 30/70
อัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสาน	3	$NaOH/Na_2SiO_3$: 100/0 80/20 และ 50/50
อัตราส่วนเถ้าลอยและเถ้าแกลบ	3	FA/RHA : 100/0 60/40 และ 40/60
รอบการทดสอบ	4	สภาวะเปียกสลับแห้ง : 0 1 3 และ 6 รอบ
จำนวนตัวอย่าง	3	ของแต่ละส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.2 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ

3.2.1 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล

วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มาจากการย่อยแอสฟัลต์คอนกรีตจากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุงานทาง ซึ่งอยู่บริเวณหลังอาคารเครื่องมือ 5 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แล้วนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีตบริเวณหลังเมืองจราจรจำลองภายในเทคโนธานี วัสดุที่ได้ถูกนำมาแยกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 3/8 ขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 3/8 และเบอร์ 10 และขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 10 ต่อมาวัสดุทั้งสามขนาดถูกนำมาสุ่มผสมกันในสัดส่วนต่าง ๆ (Trial and error) จนได้ขนาดคละของวัสดุตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล-ม. 203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 3.2

3.2.2 เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยมาจากบริษัท ซีแพ็ค จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตคอนกรีตในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานและสาธารณูปโภคภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เถ้าลอยนี้นำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ อำเภอแม่เหมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยซึ่งเถ้าลอยมีคุณสมบัติทางเคมีตามตารางที่ 3.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย (Specific gravity) เท่ากับ 2.53 การกระจายขนาดคละของเถ้าลอย แสดงดังรูปที่ 3.3

3.2.3 เถ้าแกลบ

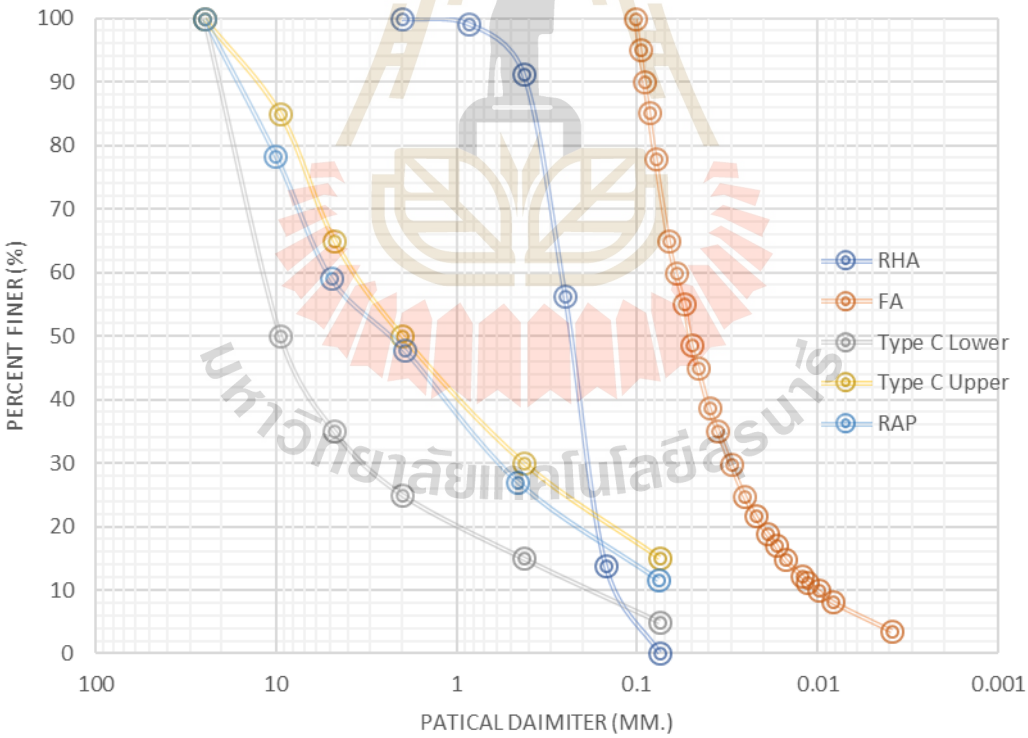
เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากโรงสีข้าววิจิตรธัญญา ต.นกออก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา เถ้าแกลบดังกล่าวถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อแยกส่วนหยาบออก ซึ่งส่วนมากเป็นแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเถ้าแกลบมีคุณสมบัติทางเคมีตามตารางที่ 3.2 ค่าความถ่วงจเพาะของเถ้าแกลบ (Specific gravity) เท่ากับ 2.10 การกระจายขนาดคละของเถ้าแกลบแสดงดังรูปที่ 3.3

เถ้าลอย เถ้าแกลบ

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเถ้าลอยและเถ้าแกลบร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

Chemical compositions (%wt.)	**FA**	**RHA**	**RAP**
Silicon Dioxide (SiO_2)	38.53	90.08	39.45
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	20.49	0.78	9.64
Iron Oxide (Fe_2O_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_2O)	1.76	1.35	1.98
Sodium Oxide (Na_2O)	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 3.3 การกระจายขนาดคละของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอยและเถ้าแกลบ

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ (Basic engineering properties)

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

3.3.1 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 และ C535

3.3.2 การหาค่า CBR (California bearing ratio) และค่าการบวมตัว (Swelling ratio) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T193

3.3.3 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดหยาบ (Specific gravity and Water absorption-Coarse aggregate) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T85

3.3.4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดละเอียด (Specific gravity and Water absorption-Fine aggregate) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T84

3.3.5 การหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นในการบดอัดสูงสุด (Optimum moisture content and Maximum density) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T180

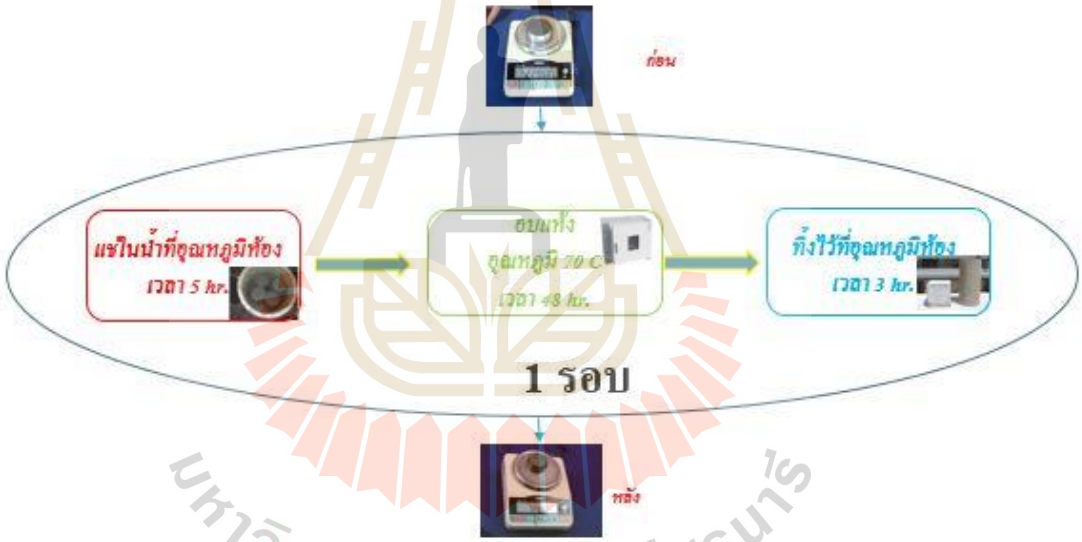
3.4 การบดอัดวัสดุ (Compaction)

การบดอัดวัสดุทำในแบบมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว โดยแบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ด้วยค้อนการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน AASTHO T180 ผลการบดอัดจะได้ค่าร้อยละปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content) ที่มีความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) เมื่อทำการบดอัดเสร็จ ตัวอย่างจะถูกดันออกจากแบบหล่อโดยใช้แท่นดันตัวอย่าง และตัวอย่างที่ถูกดันออกจากแบบหล่อจะถูกนำไปห่อด้วยพลาสติกเพื่อความคุมความชื้น และบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน

3.5 การทดสอบความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้ง (Durability Against Wetting–Drying)

เมื่อได้ก้อนตัวอย่างที่ครบอายุบ่มตามต้องการแล้ว ตัวอย่างจะนำมาทดสอบความคงทนตามมาตรฐาน ASTM D 559M – 15 การทดสอบความคงทนดำเนินการกับตัวอย่างที่มีอายุบ่ม 28 วัน โดยมีขั้นตอนการทดสอบ โดยสรุปดังนี้

- แช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทิ้งตัวอย่างไว้ให้ผิวนอกแห้ง
- นำตัวอย่างเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้น ทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ถือว่าเป็นหนึ่งรอบ)
- ทำการทดสอบดังอธิบายข้างต้น จนได้จำนวนรอบทดสอบที่ต้องการ (1 3 และ 6 รอบ)
- เมื่อได้จำนวนรอบทดสอบที่ต้องการ แช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ ก่อนทดสอบสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนด้วยสภาวะอิทธิพลเปียกสลับแห้ง

3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)

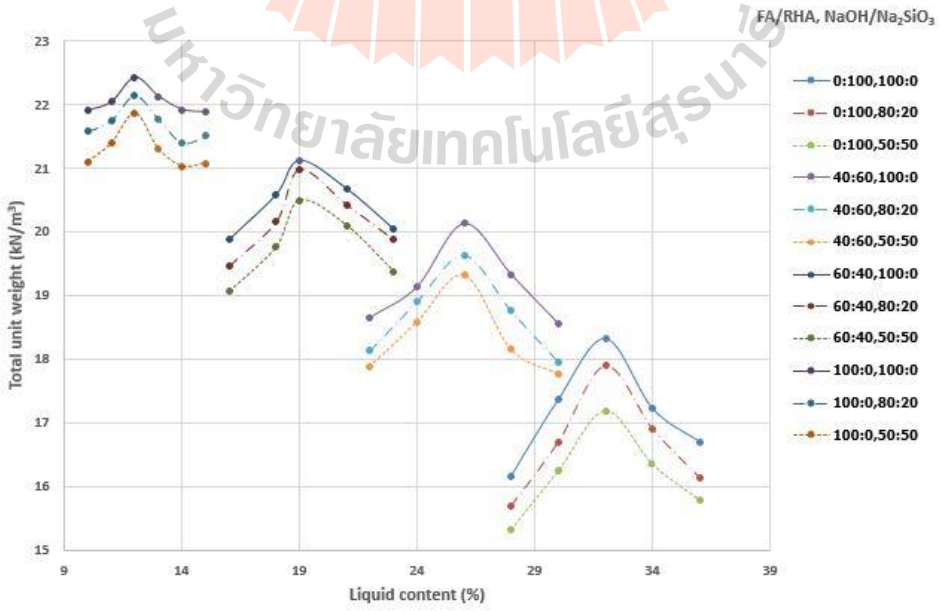
เมื่อตัวอย่างผ่านการทดสอบความคงทนด้วยสภาวะเปียกสลับแห้ง ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Compressive test ตามมาตรฐาน ASTM D 1633 เพื่อหาค่าแรงกดอัดสูงสุดและนำไปคำนวณค่ากำลังอัดสูงสุดต่อไป

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

จากการทดสอบความคงทนของวัสดุจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล(RAP)ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) ผ่านการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่อายุบ่ม 28 วัน เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยนำผลการศึกษากำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนผสมมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกัน หรือ American Concrete Institute (ACI) เพื่อทราบถึงอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุด

4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น

รูปที่ 4.1 แสดงผลทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Energy) ตามมาตรฐานAASTHO T180 ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าร้อยละปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content , OLC) สำหรับนำไปเตรียมตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน FA/RHA เท่ากัน ค่าของ OLC จะใกล้เคียงกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ ไม่ทำให้ค่า OLC เปลี่ยนแปลง และเมื่ออัตราส่วน FA/RHA ลดลง ค่า OLC มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเถ้าแกลบต่ำกว่าเถ้าลอย



รูปที่ 4.1 ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม

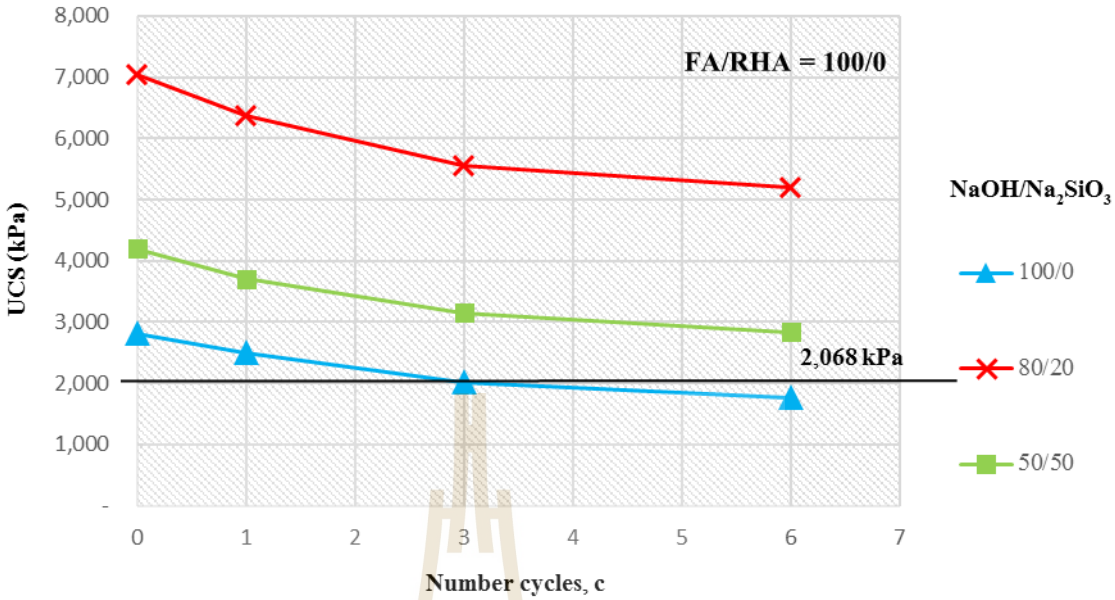
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด

การทดสอบความคงทนตามวิธีการทดลองของ ASTM D559M-15 เมื่อสิ้นสุดการเตรียมตัวอย่างเปียกสลับแห้งในแต่ละรอบ นำไปทดสอบหากำลังอัดและค่าสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนผสม ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0)

ลำดับที่	อัตราส่วน		กำลังอัดเฉลี่ย (kPa) ที่อายุ (รอบ)				ค่า OLC ที่ใช้
	FA/RHA	$NaOH/Na_2SiO_3$	0	1	3	6	
1	100/0	100/0	2,812.27	2,503.91	2,022.86	1,763.84	12
2	100/0	80/20	7,043.02	6,364.62	5,550.54	5,192.84	12
3	100/0	50/50	4,193.74	3,700.36	3,145.31	2,836.94	12

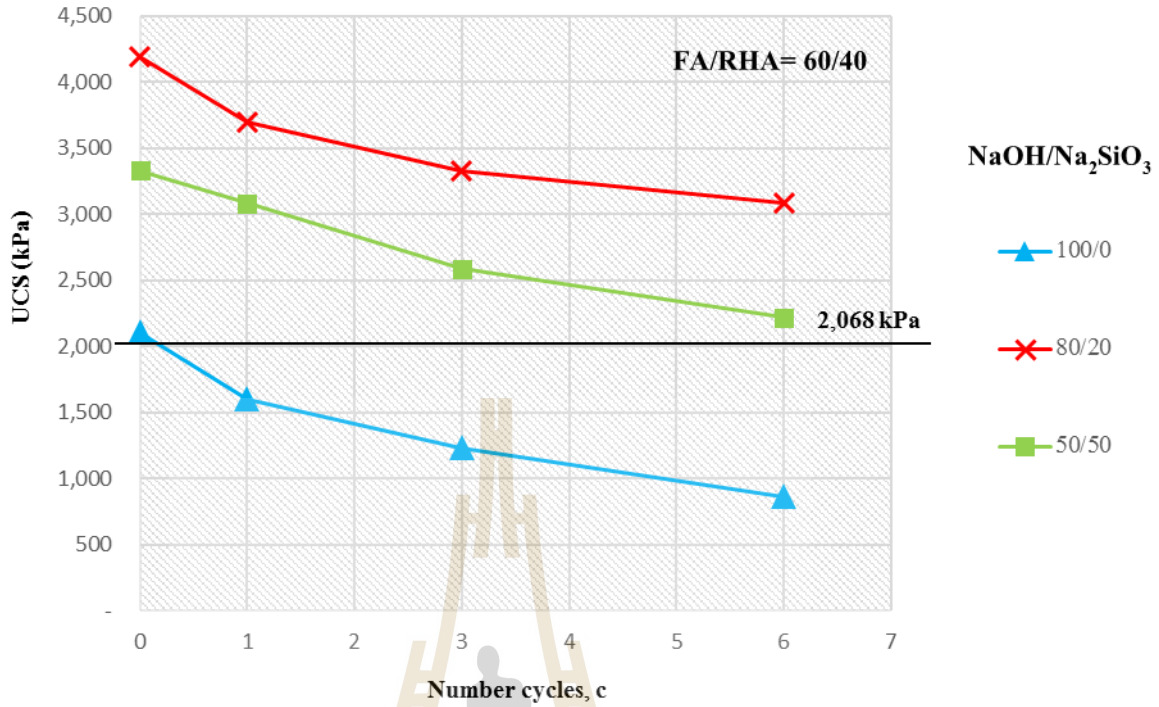
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA= 60/40)

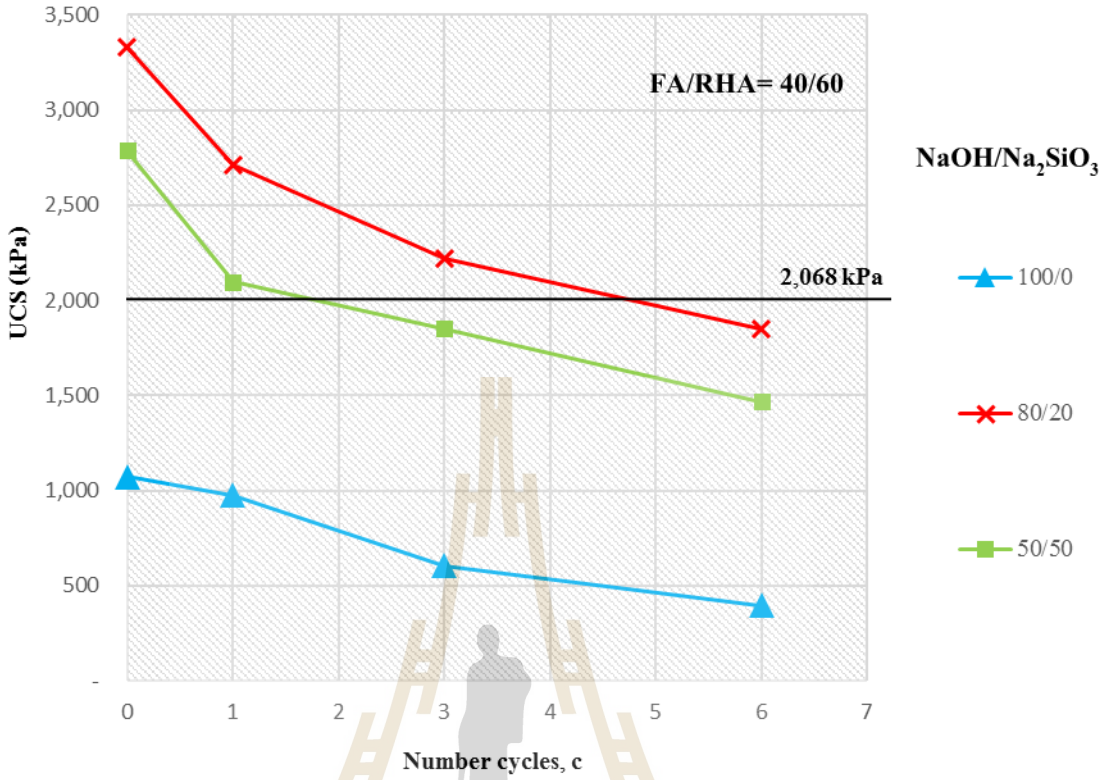
ลำดับที่	อัตราส่วน		กำลังอัดเฉลี่ย(kPa) ที่อายุ(รอบ)				ค่า OLC ที่ใช้
	FA/RHA	$NaOH/Na_2SiO_3$	0	1	3	6	
1	60/40	100/0	2,109.21	1,603.49	1,233.45	863.42	19
2	60/40	80/20	4,193.74	3,700.36	3,330.32	3,083.63	19
3	60/40	50/50	3,330.32	3,083.63	2,590.25	2,220.22	19



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 60/40) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

ตารางที่ 4.3 ค่ากำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA= 40/60)

ลำดับที่	อัตราส่วน		กำลังอัดเฉลี่ย(kPa) ที่อายุ(รอบ)				ค่า OLC ที่ใช้
	FA/RHA	$NaOH/Na_2SiO_3$	0	1	3	6	
1	40/60	100/0	1,073.10	974.43	604.39	394.71	26
2	40/60	80/20	3,330.32	2,713.60	2,220.22	1,850.18	26
3	40/60	50/50	2,787.60	2,096.87	1,850.18	1,467.81	26

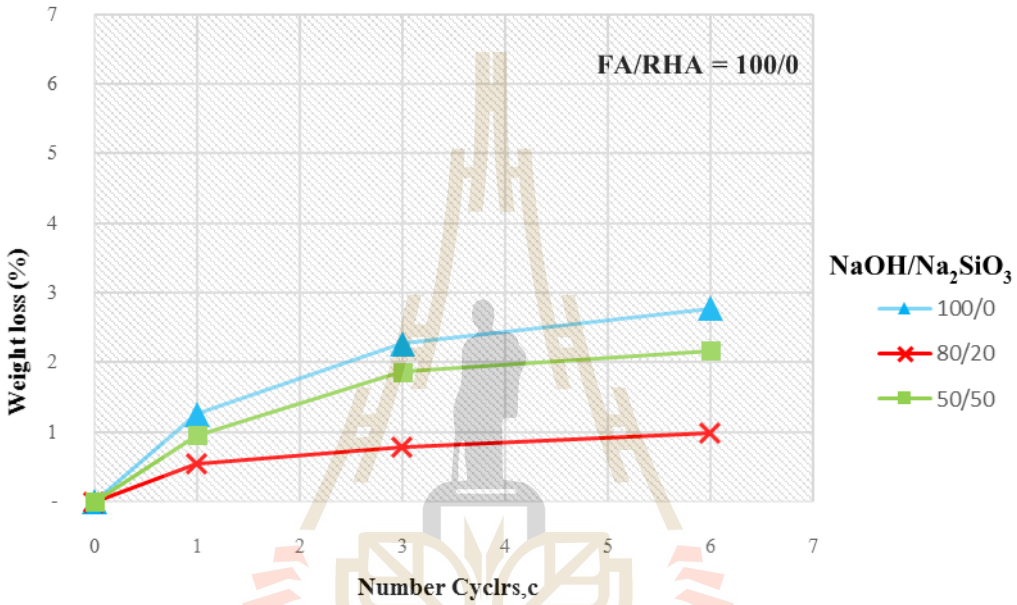


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 40/60) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

จากรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับจำนวนรอบสภาวะเปียกสลับแห้งของวัสดุจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) จีโอพอลิเมอร์ ที่ปริมาณของเหลวที่เหมาะสม ที่อัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 100/0 60/40 และ 40/60 ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 100/0 80/20 และ 50/50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่จำนวนรอบและอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากัน กำลังอัดมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน FA/RHA ลดลง เนื่องจากมีปริมาณเถ้าแกลบ (RHA) มากขึ้น เป็นผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าเนื่องจากเถ้าแกลบ (RHA) มีอนุภาคใหญ่ทำให้มีพื้นที่ผิวเพื่อทำปฏิกิริยาน้อย เมื่อจำนวนรอบการทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้นกำลังอัดมีค่าลดลงในทุกอัตราส่วนผสม และที่จำนวนรอบการทดสอบค่าเดียวกันอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 80/20 ให้กำลังอัดสูงสุดในทุกอัตราส่วน FA/RHA

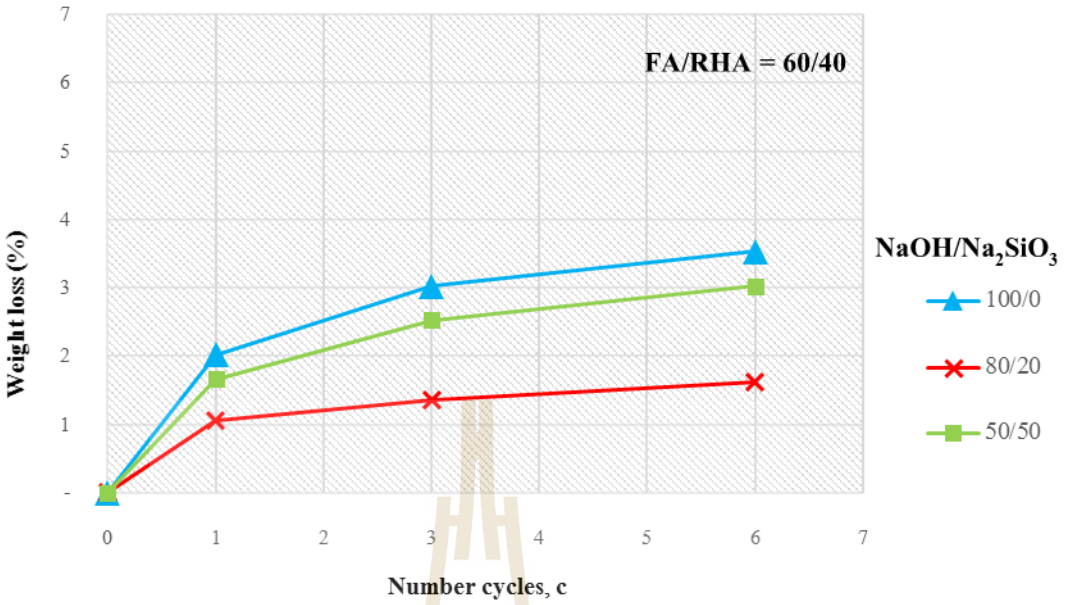
กำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) จีโอพอลิเมอร์ ที่สภาวะเปียกสลับแห้งเท่ากับ 6 รอบ มีเพียงอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 80/20 และ 50/50 ผสมเถ้าลอย (FA) /เถ้าแกลบ (RHA) เท่ากับ 100/0 และ 60/40 เท่านั้นที่มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน ACI 230.1R-90 (2,068 kPa)

4.3 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก

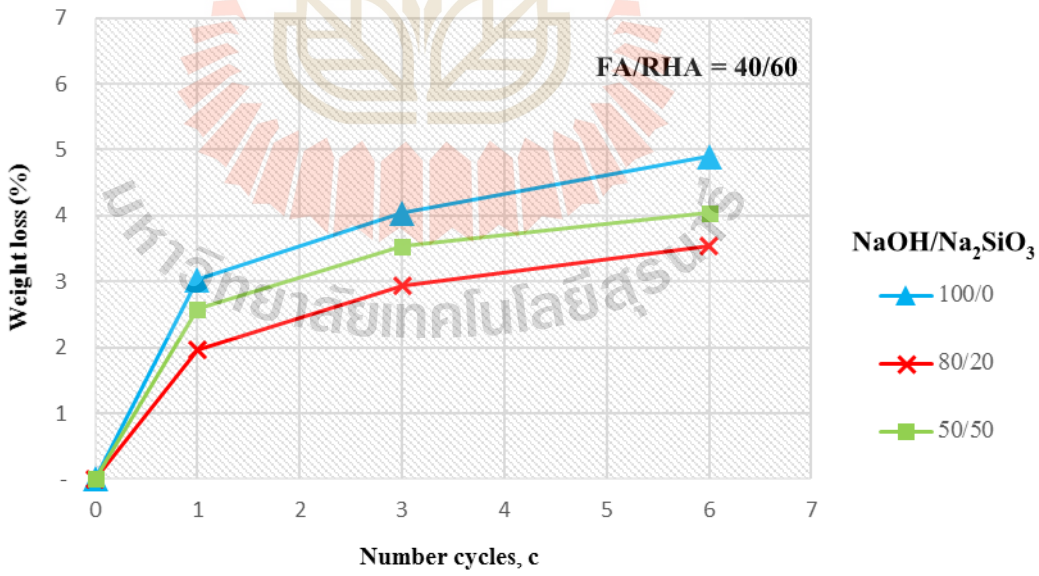


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย (FA/RHA = 100/0) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 60/40) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง



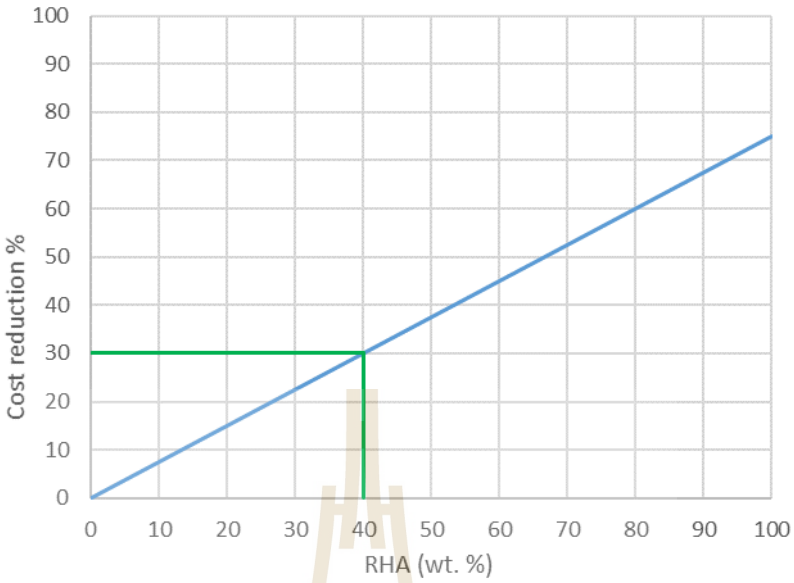
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ผสมเถ้าลอย/เถ้าแกลบ (FA/RHA = 40/60) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) ที่ปริมาณของเหลวที่เหมาะสม ที่อัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 100/0 60/40 และ 40/60 ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 100/0 80/20 และ 50/50 ที่อายุการบ่ม 28 วันการสูญเสียน้ำหนักแปรผันตามจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง กล่าวคือ เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น จะทำให้การสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังตามรูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 โดยอัตราส่วนที่ใช้ $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 100/0 จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดต่ำที่สุดเช่นกัน ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่เกินค่าที่ยอมให้ (ไม่เกินร้อยละ 14) ซึ่งกำหนดโดย Portland Cement Association (PCA)

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของวัสดุตั้งต้น

เนื่องจากความแตกต่างของต้นทุนวัสดุที่ใช้ประกอบการปรับปรุงวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลด้วยจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าลอยในท้องตลาดจะมีต้นทุนมากกว่าเถ้าแกลบมาก โดยเถ้าลอยมีราคาประมาณ 1,000 บาทต่อตัน และเถ้าแกลบมีราคาประมาณ 250 บาทต่อตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 25 ของราคาเถ้าลอย (อ้างอิงจาก กรมควบคุมมลพิษ http://www.pcd.go.th) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ราคา 8.0 บาท/กิโลกรัม และ สารโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ราคา 20 บาท/กิโลกรัม (อ้างอิงจาก บริษัทเคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด) พบว่า สารโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีราคาที่แพงมากดังนั้นจึงนำอัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ ที่ใช้ Na_2SiO_3 น้อยที่สุดแต่ให้ค่ากำลังอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ACI มาพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบเฉพาะอัตราส่วนที่เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของต้นทุนวัสดุตั้งต้นและร้อยละการใช้เถ้าแกลบ

จากการทดสอบความคงทนพบว่าสามารถใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอยได้ถึงร้อยละ 40 ในสารละลาย $NaOH/Na_2SiO_3$ = 80/20 ซึ่งเป็นปริมาณที่ให้กำลังสูงกว่ามาตราฐานและใช้ Na_2SiO_3 น้อยที่สุด และเนื่องจากราคาของเถ้าแกลบที่ถูกกว่าเถ้าลอยทำให้อัตราการลดลงของต้นทุนวัสดุที่ใช้มีค่าเท่ากับร้อยละ 75 ของการใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอย (ดังแสดงในรูปที่ 4.8) ดังนั้นเมื่อใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 40 ทำให้ร้อยละการลดลงของต้นทุนวัสดุสารตั้งต้นจะมีค่าเท่ากับ 30 ในการปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นส่วนผสม เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลงานโครงงานวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของวัสดุจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) ผ่านการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่อายุบ่ม 28 วัน โดยการหาอัตราส่วนผสมของเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) ที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2,068 kPa (ACI 230.1R-90) เมื่อผ่านการทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้งทั้งหมด 6 รอบ สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. กำลังอัดของวัสดุจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) มีค่าลดลงตามจำนวนรอบการทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือค่ากำลังอัดจะแปรผกผันกับจำนวนรอบสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยก้อนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของ $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 80/20 ผสม FA/RHA ในอัตราส่วนเท่ากับ 100/0 ให้กำลังอัดสูงสุดทุกจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง
2. กำลังอัดของวัสดุจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) ที่สภาวะเปียกสลับแห้งเท่ากับ 6 รอบ มีเพียงตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของ $NaOH/Na_2SiO_3$ เท่ากับ 80/20 และ 50/50 ผสมกับ FA/RHA อัตราส่วนเท่ากับ 100/0 และ 60/40 เท่านั้นที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ACI 230.1R-90 (2,068 kPa) อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้มุงเน้นที่จะใช้เถ้าแกลบ (RHA)มาแทนที่เถ้าลอย(FA)ในบางส่วน เพื่อลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ $NaOH/Na_2SiO_3$ อัตราส่วนเท่ากับ 80/20 ผสมกับ FA/RHA อัตราส่วนเท่ากับ 60/40 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้างต้น
3. การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัดสำหรับทุกอัตราส่วน อย่างไรก็ตาม ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่เกินค่าที่ยอมให้ (ไม่เกินร้อยละ 14) ซึ่งกำหนดโดย Portland Cement Association (PCA)

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวงชนบท. (2556). **มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)** ,มาตรฐานที่ มทช. 244 – 2556.

กิตติพงศ์ บุญล้อม. (2560). **กำลังอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง.** โครงงานมหาบัณฑิต สาขาบริหารงาก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เฉลิมชัย มาสีแก้วและวรชัย โอวิทยากุล. (2552). **การเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์ ภายใต้การทดสอบแบบแห้งสลับเปียก**. สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ธีรพฤทธิ์ พลตื้อ. (2559). **กำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิษณุกร สมิงทอง. (2556). **อิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกาลังอัด ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สมเกียรติ ชูประทีป. (2557). **ความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งของบล็อกดินลูกรังที่ใช้เปลือกหอยเชอรี่บดและปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน.** โครงงานมหาบัณฑิต สาขาบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ศักรินทร์ เหลืองกำจร. (2551). **วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Material).** *วารสารคอนกรีต.*

อภิชิต คำภาหล้า. (2555). **อิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมกาก แคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยด้วยวิธีแห้งสลับเปียก.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ASTM - **American Society for Testing and Materials**. (2015). Annual Book of ASTM Standards, D 559M – 15.

ACI - American Concrete Institute.ACI 230.1R-90, State-of-the art report on soil cement, Detroit, 1990.

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.

Davidovits, J. (2011). **Geopolymer chemistry and applications**. Geopolymer Institute, 3rd edition, France.

Davidovits, J. (2010). (Online) **World-wide Increase in Geopolymer Research.** http: / / www. geopolymer. org/ science/ world-wide-increase-in-geopolymer-research/ [8 July 2017]

Davidovits, J. (1988). **Geopolymer chemistry and properties**. Geopolymer 88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiegne, France, 1, 25-48.

Davidovits, J. (1991). **Geopolymers: inorganic polymeric new materials**. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633-1656.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสาวิตรี พานนพ เกิดวันที่ 29 เมษายน 2535 ที่อำเภอเมืองหนองบัวลำภู จังหวัดหนองบัวลำภู การศึกษาเริ่มเรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนอนุบาลหนองบัวลำภู ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนหนองบัวพิทยาคาร จังหวัดหนองบัวลำภู และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันประกอบอาชีพวิศวกรสำนักงาน ที่บริษัท ศุภาลัย จำกัด (มหาชน)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี