กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็กหรือสแลก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์

นางสาวคภวรรณ วิรุฬบุตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็กหรือสแลก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

_____

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

_____

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)
กรรมการ

_____

(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)
กรรมการ

_____

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คภวรรณ วิรุฬบุตร : กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็กหรือสแลก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ (STRENGTH OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT STABILIZED BY FLY ASH, SLAG AND SILICA FUME GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านการใช้งานระยะหนึ่งย่อมเสื่อมสภาพตามกาลเวลา โดยผิวทางเหล่านี้จะถูกขุดไสทิ้งเพื่อก่อสร้างชั้นทางใหม่ทับลงไป แต่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่านี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ในงานวิศวกรรมใหม่ได้ เรียกว่า Reclaimed Asphalt Pavement หรือ RAP แต่มักจะปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดภาวะโลกร้อน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ผสมเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม ระยะเวลาในการบ่ม สัดส่วนของ RAP ต่อเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม คือ 90:10, RAP ต่อเถ้าลอยและตะกรันเหล็ก คือ 90:5:5, RAP ต่อเถ้าลอยและซิลิกาฟูม คือ 90:5:5 และRAP ต่อตะกรันเหล็กและซิลิกาฟูม คือ 90:5:5 และสัดส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 50:50 และอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่า RAP ผสมซิลิกาฟูมมีค่ากำลังอัดสูงกว่า RAP ผสมเถ้าลอย และตะกรันเหล็ก เมื่อนำ RAP ผสมซิลิกาฟูมไปผสมเถ้าลอย หรือตะกรันเหล็กค่ากำลังอัดที่ได้สูงกว่า RAP ผสมเถ้าลอย และตะกรันเหล็ก กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่าที่ยอมให้ 2,413 kPa) และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่าที่ยอมให้ 1,724 kPa) พบว่า ทุกอัตราส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบท เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูมต่อกำลังอัด ต้นทุนคุ้มค่ามากที่สุด ที่ปริมาณตะกรันเหล็ก (Slag) ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 7 วัน เท่ากับ 0.72 กิโลปาสคาลต่อบาท งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทางแบบยั่งยืน

สาขาวิชา <u>การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค</u> ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

KHAPHAWAN WIRUNBUT : STRENGTH OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT STABILIZED BY FLY ASH, SLAG AND SILICA FUME GEOPOLYMER. ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKITNIWAT, Ph.D.

Asphalt concrete pavement is generally removed and replaced a new surface when it is damaged. Although asphalt concrete surface can be basically recycled as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) by adding cements into it, global warming is being concerned because carbon dioxide is released to the atmosphere during cement production process. The purpose of this thesis aimed to study an appropriate aggregates for RAP mixing with fly ash (FA), slag (SL) and silica fume (SF) in six different ratios as follows; 1) RAP: FA was 90:10, 2) RAP: SL 90:10, 3) RAP: SF was 90:10, 4) RAP: FA: SL was 90:5:5, 5) RAP: FA: SF was 90:5:5 and 6) RAP: SL: SF was 90:5:5. These proportions were tested by using a mixture of sodium silicate and sodium hydroxide at 50:50 in three different curing times; 7 days, 14 days and 28 days.

The results revealed that the compressive strength capacity of the mixing of RAP: SF was higher than RAP: FA and RAP: SL. Besides the mixing of RAP: FA: SF and RAP: FA : SL was higher than RAP: FA and RAP: SL. These have shown that compressive strength of the RAP's aggregate material which were stabilized by geopolymer following the standard of rural road department on cement modified crushed rock base (at 2,413 kPa) and soil cement subbase (at 1,724 kPa) in all mixing ratios as aforementioned provided higher compressive strength value than the standard of department of highways and department of rural road. Most importantly, these materials were cost effectiveness when slag's ratio was 10 per cent and the curing time was at 7 days (0.72 Kilopascal per baht). This thesis also suggests the possibility of using RAP stabilized by geopolymer as a sustainable pavement structure.

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2017 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันติ์ หอพิบูลสุข หัวหน้าหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ให้แนวคิด ให้โอกาส ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการศึกษาในครั้งนี้ รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาตรวจทานเนื้อหาอย่างละเอียด อันเป็นความกรุณาและคุณประโยชน์ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณสำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

และสุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี ใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

คภวรรณ วิรุฬบุตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูปภาพ ..... ซ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 4
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 บทนำ 5
2.2 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า 5
2.3 เถ้าลอย 6
2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย 6
2.3.2 องค์ประกอบทางเคมี 7
2.3.3 คุณสมบัติทางกายภาพ 8
2.4 ตะกรันเหล็ก 9
2.4.1 กระบวนการผลิตตะกรันเหล็ก 9
2.4.2 องค์ประกอบทางเคมี 10
2.4.3 ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเหล็ก 10
2.4.4 การทำปฏิกิริยากับน้ำ 12
2.4.5 ประโยชน์ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด 12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 ซิลิกาฟูม 13
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมี 14
2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพ 14
2.5.3 การใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีต 15
2.6 จีโอโพลิเมอร์ 17
2.6.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ 18
2.6.2 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ 21
2.7 สารเร่งปฏิกิริยา 24
2.7.1 สารละลายโซเดียมซิลิเกต 24
2.7.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 24
2.8 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ 25
2.8.1 วัสดุ 25
2.8.2 เครื่องจักรและเครื่องมือ 27
2.8.3 กำหนดของส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ 30
2.8.4 วิธีการก่อสร้าง 31
2.9 มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ 35
2.9.1 ขอบข่าย 35
2.9.2 วัสดุ 36
2.9.3 เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้าง 37
2.9.4 การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ 39
2.9.5 การก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม 40
2.9.6 การก่อสร้าง 40
2.9.7 การตรวจสอบชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ 43
2.10 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก 44
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 46
3 วิธีดำเนินการศึกษา 50
3.1 การเก็บตัวอย่าง 50
3.2 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ 51

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 51
3.3.1 วิธีการทดสอบการหาขนาดเม็ดของวัสดุ 51
3.3.2 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดเหลว Liquid Limit (LL) 52
3.3.3 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index 53
3.3.4 วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน 54
3.3.5 วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ 54
3.3.6 วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน 54
3.3.7 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. 55
3.3.8 เตรียมสัดส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม 57
3.3.9 เตรียมสัดส่วนของสารเร่งปฏิกิริยา 57
3.3.10 การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ 57
3.4 การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว 58
3.5 ศึกษาต้นทุนของแต่ละสัดส่วน 59
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 60
4.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ 60
4.1.1 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า 60
4.1.2 เถ้าลอย 62
4.1.3 ตะกรันเหล็ก 63
4.1.4 ซิลิกาฟูม 64
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ 65
4.3 กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว 66
4.4 การเปรียบเทียบต้นทุน 68
5 สรุปและข้อเสนอแนะ 71
5.1 สรุปผลการวิจัย 71
5.2 ข้อเสนอแนะ 72
เอกสารอ้างอิง 73
ประวัติผู้เขียน 76

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C168 7

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา 11

2.3 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989 11

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม 14

2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม 15

2.6 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน 16

2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก ซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 17

2.8 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ 27

2.9 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก 45

3.1 สัดส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม 57

3.2 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ 58

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีตเก่า 60

4.2 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ใช้ในงานวิจัย 61

4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย 63

4.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก 63

4.5 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม 64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) จากหมวดการทางนครราชสีมาที่ แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 1 6

2.2 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟูมควบแน่น 15

2.3 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ 19

2.4 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชั่นของจีโอโพลิเมอร์ 20

2.5 ภาพขยายขนาดไมโครของลักษณะโครงสร้างของมอร์ต้าร์ เปรียบเทียบกับ Geopolymer Morter 20

2.6 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate 21

2.7 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Aluminate 21

2.8 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดพอลิเซียเลต 22

2.9 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอโพลิเมอไรเซชัน 23

2.10 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอไรเซชัน 23

3.1 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า 50

3.2 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ 51

3.3 การทดลองเพื่อหาขนาดเม็ดของวัสดุ 52

3.4 การทดลองหาค่าขีดจำกัดเหลว 53

3.5 การทดลองหาค่าขีดพลาสติก 53

3.6 การทดลองเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ 54

3.7 การทดลองหาค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ 54

3.8 การทดลองการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน 55

3.9 การทดลองเพื่อหาค่า C.B.R 56

4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า 62

4.2 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า 62

4.3 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) เถ้าลอย, (ข) ตะกรันเหล็ก, (ค) ซิลิกาฟูม 64

4.4 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม 65

4.5 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ 66

4.6 ค่ากำลังอัดของ RAP ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ 67
4.7 กราฟแสดงต้นทุนของ RAP ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์
ที่อัตราส่วน NaOH : Na2SiO3 (50 : 50) 69
4.8 ต้นทุนต่อกำลังอัดวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)
ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วนต่างๆ อายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน 70

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการคมนาคมขนส่งเป็นระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศทั้ง ทางน้ำ ทางอากาศ และทางบก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขนส่งทางบกมีความสะดวกและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย การขนส่งทางบกแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ การขนส่งทางราง และทางถนน ถนนที่ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ถนนผิวทางลาดยาง เนื่องด้วยเพราะต้นทุนในการก่อสร้างที่ต่ำกว่าผิวทางคอนกรีต โดยปกติแล้วผิวทางที่รองรับการจราจรมาระยะหนึ่งย่อมเกิดความเสียหายเกิดขึ้น เนื่องมาจากการรับน้ำหนักของยวดยานที่ใช้ถนน สภาวะอากาศ การเสื่อมสภาพของวัสดุเอง เช่น การเกิดรอยร่องล้อ รอยแตกลายจระเข้ รอยแตกตามขวาง และรอยแตกตามยาว เป็นต้น จึงมีความจำเป็นต้องซ่อมแซมหรือรื้อผิวทางเดิมออกเพื่อทำผิวจราจรใหม่ให้มีสภาพการใช้งานได้ปกติ โดยขั้นตอนการก่อสร้างจะต้องทำการขูดไส (Mill) ผิวทางเดิมจนถึงชั้นวัสดุพื้นทางเก่าออก ก่อนที่จะซ่อมแซมโดยแทนที่ชั้นพื้นทางด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด อีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมและใช้ในปัจจุบันคือ วิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) คือ การนำวัสดุจากชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้งาน โดยอาจจะเพิ่มเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและเพิ่มปริมาณ เช่น หิน ทราย Soil aggregate ฯลฯ และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ (Stabilising Agents) เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ และสารผสมเพิ่ม (Admixture) ฯลฯ (มทช. 242-2555) ซึ่งผิวทางที่ถูกรื้อถอนออกบางส่วนถูกนำกลับไปใช้ในการผลิตผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ แต่ส่วนที่เหลือจะนำไปกองไว้ในสถานที่เก็บขยะที่ไม่ได้ใช้งาน ซึ่งในแต่ละปีจะมีการซ่อมแซมหรือรื้อผิวทางเดิมออก นั้นหมายความว่าจะมีขยะผิวทางเก่าที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก อาวุธ โพธิ์อุดม (2553) ได้ศึกษาวัสดุผิวทางเดิมนำกลับมาใช้ใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะสูงขึ้น

ถึงแม้ว่าปูนซีเมนต์จะได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จำนวนมาก และส่งผลอย่างมากต่อปัญหาภาวะโลกร้อน ปูนซีเมนต์จึงจัดเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Meyer et al., 2009) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุทดแทนมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งได้แก่ วัสดุปอซโซลาน ที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มาประยุกต์ใช้

ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ต้าร์ให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาวิจัยค้นคว้าเพื่อที่จะหาวัสดุทดแทน ที่จะนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ให้มากที่สุด โดยมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหรือไม่แตกต่างไปจากเดิม และเนื่องจากวัสดุปอซโซลานต่างๆ นั้นไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานด้วยตัวมันเองจึงนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้แค่เพียงบางส่วนเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์

Davidovits (1991) ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่ง ที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ซึ่งมีองค์ประกอบของอลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลหรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัว แข็งตัว และให้กำลังอัดได้ วัสดุที่มีปริมาณอลูมินาและซิลิกามากและใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) เป็นต้น (Palomo et al., 1999) ซึ่งล้วนแต่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมทั้งสิ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement , RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ในปริมาณของเถ้าลอย (Fly Ash) ตะกรันเหล็กหรือสแลก (Slag) และซิลิกาฟูม (Silica Fume) เปรียบเทียบกำลังอัดด้วยวิธีการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) เทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล) ระยะเวลาในการบ่ม และผลการวิเคราะห์ด้านต้นทุน เพื่อเป็นข้อมูลและเป็นแนวทางเลือกใหม่ในการใช้วัสดุดังกล่าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ต่อวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) แต่ละสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 แหล่งวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) จากถนนสาย 2 (ถนนมิตรภาพ) หมวดการทางนครราชสีมา แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 1
- เถ้าลอย (Fly Ash, FA) จาก แหล่งผลิตโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง
- ตะกรันเหล็ก (Salg) จาก บริษัท สยามสตีลมิลล์ เซอร์วิสเซส จำกัด อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
- ซิลิกาฟูม (Silica Fume, SF) จาก บริษัท เอ็น.วี.เอ็น.ซัพพลาย จำกัด จังหวัดปทุมธานี

1.3.2 ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ทั้งคุณสมบัติทางด้านกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

1.3.3 อัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash, FA) ตะกรันเหล็ก (Slag) และซิลิกาฟูม (Silica Fume, SF) สัดส่วนผสมของวัสดุ มีดังนี้

a.) RAP + FA(10%) + Activator

b.) RAP + Slag(10%) + Activator

c.) RAP + SF(10%) + Activator

d.) RAP + FA(5%) + Slag(5%) + Activator

e.) RAP + FA(5%) + SF(5%) + Activator

f.) RAP + Slag(5%) + SF(5%) + Activator

ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activators) ระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 50 : 50

1.3.4 ศึกษากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ บดอัดด้วยวิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) โดยบ่มตัวอย่างที่ 7, 14 และ 28 วัน เทียบผลการศึกษากับมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล)

โรงวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.5 เปรียบเทียบต้นทุนของเถ้าลอย (Fly Ash, FA) ตะกรันเหล็ก (Slag) และซิลิกาฟูม (Silica Fume, SF) ต่อวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์

1.4.2 ทราบถึงต้นทุนของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ต่อวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) แต่ละสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้

1.4.3 ให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ไปเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่มีเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ สำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ทรัพยากรทางธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนนได้ลดน้อยลงไปมาก เช่น ดินทราย ดินลูกรัง และหินคลุก เป็นต้น บางพื้นที่ของประเทศวัสดุที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบทที่ใช้ในงานก่อสร้างถนนมีจำกัด พลังงานเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้น การขนส่งทางรถบรรทุกส่งผลกระทบทางการจราจรและสิ่งแวดล้อม สิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นผลให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจและงบประมาณของประเทศ ดังนั้นการก่อสร้างถนนใหม่และซ่อมแซมถนน โดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) ขั้นตอนการซ่อมแซมถนนเริ่มต้นด้วยการขูดไส (Mill) ผิวทางเดิม ซึ่งผิวทางเดิมนี้ส่วนหนึ่งนำกับไปใช้ผสมเป็นวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ แต่ส่วนที่เหลือกองไว้เป็นขยะไม่ได้ใช้ประโยชน์ จึงได้นำวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็กและซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ เพื่อให้การบูรณะทางหลวงเกิดความคุ้มค่าสูงสุด และมีอายุการใช้งานได้ยาวนาน การหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาในการบ่ม เป็นการพัฒนาการบูรณะวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) อีกทางหนึ่งที่จะทำให้การดำเนินงานซ่อมสร้างด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ให้มีประสิทธิภาพ และยังเป็นการประหยัดทรัพยากรทางธรรมชาติที่เหลืออยู่น้อย อีกทั้งยังลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

2.2 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

การหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ เป็นวิธีการซ่อมแซมถนนชำรุดที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันขั้นตอนการซ่อมแซมถนนจะเริ่มต้นด้วยการขูดไส (Mill) ผิวทางเดิมทิ้ง ซึ่งผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกรื้อถอนออกจากหน้างานบางส่วนถูกนำกลับไปใช้ในการผลิตผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ แต่ส่วนที่เหลือจะนำไปกองไว้ในสถานที่เก็บเป็นขยะไม่ได้ใช้งาน ในแต่ละปีมีการเพิ่มขึ้นของขยะผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจากการซ่อมแซมถนนมีปริมาณมาก ผิวทางแอสฟัลต์จากการซ่อมแซมถนนลาดยางดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในงานวิศวกรรมได้ โดยเรียกว่า Reclaimed Asphalt Pavement หรือ RAP

วัสดุ RAP ประกอบด้วยวัสดุมวลรวมและยางแอสฟัลต์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น เป็นมวลรวมเพื่อผสมกับยางแอสฟัลต์ใหม่ในกระบวนการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต หรืออาจนำกลับมาใช้เป็นชั้นพื้นทาง การนำ RAP มาใช้ในงานวิศวกรรมโดยตรงอาจประสบปัญหา

เนื่องจาก RAP บดอัดได้ไม่ดีและมีกำลังอัดต่ำแม้จะปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์แล้วก็ตาม เนื่องจากขนาดคละไม่ดีและยางแอสฟัลต์ที่มีอยู่ในส่วนผสม อย่างไรก็ตามข้อดีของ RAP คือ มีวัสดุคัดเลือกชั้นดี เช่น หินคลุก เป็นส่วนผสมหลัก ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) จากหมวดการทางนครราชสีมาที่ แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 1

2.3 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

เถ้าลอย เป็นเถ้าหรือวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเต้า (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกกันว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้

2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซด์ และบิทูมินัส มี ปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric oxide, Fe_2O_3) มากกวาร้อยล่ะ 70 และมีคุณสมบัติตามที่ระบุ

ในมาตรฐาน ASTM C618 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) ต่ำ

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็น ส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี A_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C168

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
SO_3 อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้อสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงสุด, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยมี SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณมากถึงร้อยละ 80 – 90 มี MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน และผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ SiO_2 และ Al_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อย

ละ 80-90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ SiO_2 และ Al_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.3.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

1. รูปร่างและลักษณะผิวของถ่านหิน

เมื่อถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นตัวลงหลังจากออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าลอยที่ได้ส่วน ใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว เถ้าลอยส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆ ที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนสูง เถ้าลอยขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า มีทรงกลม และผิวเรียบ

เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบดมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระ เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไม่พอ ถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วน ส่วนถ่านหินก้นเตาเกิดการปะทะกันของอนุภาคถ่านหินจึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

2. ขนาดความละเอียด

อนุภาคเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ย ประมาณ 15-30 ไมครอน เถ้าลอยแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของเถ้าถ่านหินนิยมคำนวณโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าลอยส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2500-5000 ซม^2/ก เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (Blaine) ความละเอียดของเถ้าลอยแม่เมาะจะอยู่ในช่วง 2500-3500 ซม^2/ก และเมื่อวัดโดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดการดูดซับของก๊าซความละเอียดของเถ้าลอยเมื่อวัดโดยวิธีนี้จะได้ค่าที่แตกต่างกนมาก เนื่องจากวิธีนี้วัดพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ก๊าซสามารถแทรกซึมได้ ทั้งผิวขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5000-89000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม โดยค่าเฉลี่ยจะประมาณ 35000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

3. ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ) ของเถ้าลอยสามารถวัดโดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ มาตรฐาน ASTM C188 เถ้าลอยมี ถ.พ ประมาณ 1.9-2.9 ซึ่งต่ำกว่า ถ.พ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถ.พ ของเถ้าลอยที่สูงส่วนใหญ่มาจากการที่ถ่านหินมีธาตุเหล็ก CaO ผสมอยู่มาก เถ้าลอยแม่เมาะใน ยุคปี 2527-28 จะมี ถ.พ สูงประมาณ 2.8-2.9 และมี Fe_2O_3 อยู่สูงถึงร้อยละ 19 และ CaO อยู่ร้อยละ 40 ถ.พ ของเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าต่ำประมาณ 2.0-2.2 นอกจากนี้ยังพบว่า ถ.พ ของเถ้า

ลอยที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด เถ้าลอยส่วนที่ละเอียดจะมีค่า ถ.พ สูงกว่าเถ้าลอยส่วนที่หยาบ เถ้าลอยแม่เมาะส่วนที่ละเอียดมี ถ.พ ประมาณ 2.44 และส่วนที่หยาบมี ถ.พ ประมาณ 1.88 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นรูโพรง และยังมีเถ้าลอยกลวงผสมอยู่มากกว่าเถ้าลอยละเอียด

2.4 ตะกรันเหล็ก (Slag)

ตะกรันเหล็ก คือ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตเหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุง ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดีสองประการคือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

2.4.1 กระบวนการผลิตตะกรันเหล็ก

ในกระบวนการถลุงเหล็ก โรงงานจะใส่สินแร่เหล็กเข้าในเตาถลุงรวมทั้งใส่สารที่เป็น ฟลักซ์ (flux) ซึ่งได้แก่ หินปูนและหินโดโลไมต์ เพื่อลดอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวลง เพื่อประหยัดพลังงาน การเผาจะใช้ถ่านโค้ก (ถ่านโค้ก คือถ่านหินที่เผาจนหมดควัน) เป็นเชื้อเพลิง หลังจากเผาจนอุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ 2 อย่างเกิดขึ้นในเตาเผาพร้อมกัน คือเหล็กที่หลอมจนเหลวซึ่งตกอยู่ก้นเตา และตะกรันเหลวซึ่งลอยอยู่เหนือเหล็กเหลว การทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วช่วยป้องกันการเกิดผลึกในตะกรันเตาถลุงเหล็กและทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดที่มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร จึงเรียกว่าเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก ในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ออกจากเตาเผาเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กอยู่ในรูปที่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ และไม่มีคุณสมบัติทางวัสดุประสาน (Michigan, 2000)

กระบวนทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้เป็นผลึก ทำได้โดยการฉีดน้ำที่มีความเร็วสูงไปกระทบกับตะกรันเตาถลุงเหล็กเหลวที่ยังร้อนอยู่ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กประมาณ 10 : 1 โดยมวล ซึ่งทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดและอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกสูงมาก ภายหลังที่ได้เม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจึงทำให้แห้งและบดให้ละเอียด โดยใช้วิธีการเดียวกับการบดเม็ดปูนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ในช่วงก่อนและระหว่างการบดเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจะนำแม่เหล็กมาดูดแร่เหล็กที่ยังติดมาหรือตกค้างอยู่ออกก่อน เพื่อนำแร่เหล็ก

กลับไปใช้ใหม่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะบดให้ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ เพราะการทำปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้นตามความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่เพิ่มขึ้น

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก ซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโดโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆ ที่ติดมา เช่น SO_3, Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนนาดาใน ค.ศ. 1988 แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 2.2 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มาก การที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

2.4.3 ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเหล็ก

ASTM C989 (ASTM Standards, 2001) ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 80, 100 และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (Slag Activity Index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูงจะมีค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูง โดยค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันหาได้จาก

$$\text{ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)} = [SP/P] \times 100$$

เมื่อ SP = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ร้อย

P = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

ข้อกำหนดที่ต้องการของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดของแต่ละชั้นคุณภาพที่แบ่งตาม ASTM C989 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 นอกจากค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันแล้ว มาตรฐาน ASTM ยังได้กำหนดคุณสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต้องมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (No. 325) ไม่เกินร้อยละ 20 ปริมณฑองอากาศในมอร์ต้าร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุประสานล้วนไม่เกินร้อยละ 12 ปริมาณของกำมะถันจากซัลไฟด์ (Sulfide Sulfur) ไม่เกินร้อยละ 2.5 และปริมาณของซัลเฟต (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 4.0

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา (Michigan, 2000)

องค์ประกอบทางเคมี	**ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)**
SiO_2	32 – 40
Al_2O_3	7 – 16
CaO	32 – 45
MgO	5 – 15
SO_3	0.7 – 2.2
Fe_2O_3	0.1 – 1.5
MnO	0.2 – 1.0

ตารางที่ 2.3 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989 (ASTM Standards, 2001)

อายุและชั้นคุณภาพ	**ค่าต่ำสุดของดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)**	
	ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบ 5 ตัวอย่างติดต่อกัน	**ผลทดสอบแต่ละตัวอย่าง**
ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันที่อายุ 7 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	-	-
- ชั้นคุณภาพ 100	75	70
- ชั้นคุณภาพ 120	95	90
ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันที่อายุ 28 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	75	70
- ชั้นคุณภาพ 100	95	90
- ชั้นคุณภาพ 120	115	110
ความละเอียดของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	20
ปริมาณฟองอากาศของมอร์ต้าร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน (ไม่เกินร้อยละ)	-	12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.4 การทำปฏิกิริยากับน้ำ

เมื่อผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำจะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือได้ C-S-H โดยในกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะได้ C-S-H มาจาก C_3S เป็นส่วนมาก ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะได้ C-S-H มาจาก C_2S เป็นส่วนใหญ่ และ C-S-H ที่ได้จากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความหนาแน่นสูงกว่ากรณีที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับการแตกตัวและการละลายของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ไม่เป็นผลึกเมื่อสัมผัสกับอิออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งได้มาจากกระบวนการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะทำปฏิกิริยาทำให้ได้สาร C-S-H ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต นอกจากนี้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดยังสามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้อีกด้วย โดยเฉพาะในกรณีของอัลคาไลไฮดรอกไซด์พบว่าไฮเดรตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ได้มีความแข็งแรงสูงกว่าไฮเดรตที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่

1. องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
2. ความเข้มข้นของด่างอัลคาไลในระหว่างทำปฏิกิริยา
3. ปริมาณที่ไม่เป็นผลึกขอตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
4. ความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดปละปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
5. อุณหภูมิในขณะที่ทำปฏิกิริยา

ปัจจัยเหล่านี้มีผลซึ่งกันและกัน จึงเกิดความยุ่งยากในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้น ASTM C989 จึงแนะว่าควรใช้ค่าดัชนีของตะกรันเป็นดัชนีชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดควรได้รับการทดสอบก่อนเพื่อความแน่ใจว่าได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพตามที่ต้องการ

2.4.5 ประโยชน์ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้ เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง และทำให้คอนกรีตทึบน้ำขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ยิ่งปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากจะยิ่งลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้มากขึ้น เพราะโครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มทึบน้ำมากกว่ากรณีของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 ซึ่งมี C_3A ถึงร้อยละ 12 ให้ผลการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (C_3A ไม่เกินร้อยละ 5) ซึ่งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเนื่องมาจากคอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำ การที่ $Ca(OH)_2$ และอัลคาไลทำปฏิกิริยากับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้เป็น C-S-H จึงเหลืออัลคาไลและ $Ca(OH)_2$ น้อยลงในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟต การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัว เนื่องจากปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกา แต่มักต้องใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 65 ของวัสดุประสานจึงจะสามารถลดปัญหานี้ได้ดี (Hooton, Emery, 1990)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการต้านทานสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดพบว่ามีความสามารถเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่การคืบและการหดตัวมีแนวโน้มว่าคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตธรรมดา ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีสีจางกว่าสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเมื่อหล่อเป็นคอนกรีตแล้วจึงอาจมีสีออกไปทางเขียวอ่อนได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของกำมะถันจากซัลไฟด์กับส่วนผสมอื่นๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Michigan, 2000)

เนื่องจากในปัจจุบันมีการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กในประเทศไทย ดังนั้นจึงขอให้รายละเอียดที่เกี่ยวกับตะกรันเตาถลุงเหล็กเพื่อเป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งในส่วนผสมของคอนกรีต ที่มา : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 12 เมษายน 2554 จากหนังสือ “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต” พิมพ์ครั้งที่ 6

2.5 ซิลิกาฟูม (Silica Fume)

ซิลิกาฟูม หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือซิลิกาฟูมควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัล (Silicon Metal) และ เฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ (Ferrosilicon Alloy) เป็นกระบวนการ Reduction จาก ควอร์ต (Quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอน โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคของซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดเล็กมากๆ ที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) มีรูปร่างกลม และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้

โดยทั่วไปซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่เล็กมาก เฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึง 100 เท่า และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 $ม^2/ก$ (โดยวิธี Nitrogen

Absorption) เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟูมที่เล็กมากๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงทำให้ซิลิกาฟูมเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟูมที่พบบ่อยเมื่อใช้ในงานคอนกรีต คือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความข้นเหลวเท่าเดิม สาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆของซิลิกาฟูมจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้า ซิลิกาฟูมที่ได้จากโรงงานโลหะ Silicon Metal and Ferrosilicon Alloy จะมีผลพลอยได้ของซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วนซิลิกาฟูมในโรงงาน Ferrosilicon จะมีผลพลอยได้ของซิลิกอนประมาณร้อยละ 50 และยู่ในรูปของผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟูมเหล่านี้ในคอนกรีตไม่ดีนักเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO_2 ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 ที่สูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม (วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 1 สิงหาคม 2550)

องค์ประกอบทางเคมี	**ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)**
SiO_2	92
Al_2O_3	0.7
CaO	0.5
MgO	0.2
SO_3	-
Fe_2O_3	1.2
ออกไซด์อื่นๆ	2.6
LOI.	-

2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทากายภาพของซิลิกาฟูมที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมาก สีค่อนข้างดำหรือเทาหรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟูมควบแน่น (Condensed Silica Fume) จะมี

ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟูมหลายๆ เม็ดเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 ตารางเซนต่อกรัม ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3400 ตารางเซนต่อกรัม ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหานี้จึงนิยมนำซิลิกาฟูมมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า ซิลิกาฟูมควบแน่น (Condensed Silica Fume) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม ดังตารางที่ 2.5

รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟูมควบแน่น
(ที่มา : วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 1 สิงหาคม 2550)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม

คุณสมบัติ	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบลน (ซม^2/ก)	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	2.2
สี	เทาดำ หรือ เทาอมขาว

2.5.3 การใช้ซิลิกาฟูมในคอนกรีต

ในประเทศไทย, อเมริกา และ ยุโรป จะใช้ซิลิกาฟูมในการผสมคอนกรีตโดยการผสมแยก กล่าวคือใส่ซิลิกาฟูมในการผสมคอนกรีต แต่ที่ประเทศแคนาดานอกจากการผสมแยกแล้ว

ยังมีการใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ โดยมีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ร้อยละ 8

เนื่องจากซิลิกาฟูม มีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งหรือใช้งานมากพอสมควรเพราะหากไม่ระวังให้ดีอาจปลิวไปตามลมได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟูมในรูปที่ผสมกับน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวข้น (Slurry Form) อย่างไรก็ตามโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายๆแห่งยังคงใช้ซิลิกาฟูมในรูปของผงหรือคอนเด็นซิลิกาฟูม เช่นเดิม

สำหรับอันตรายของการสูดซิลิการฟูมเข้าไปทางลมหายใจยังไม่มีรายงานที่เด่นชัดนัก แต่วัสดุที่ละเอียดขนาดนี้ไม่ว่าจะเป็นอะไรก็ตาม ล้วนเป็นวัสดุหรือสิ่งแปลกปลอมของร่างกายทั้งสิ้น จึงควรหลีกเลี่ยงให้ได้รับเข้าสู่ร่างกายให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อย ได้ นอกจากนี้ U.S. Occpational Safefy and Health Agency (OSHA) ได้ระบุไว้ว่าปริมาณฝุ่นในที่ซึ่งปฏิบัติงานไม่ควรสูงเกิน 15 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วน American Conference of Governmental Industrial Hygienists ให้ค่าที่ต่ำกว่าคือปริมาณของฝุ่นในที่ทำงานไม่ควรมีค่าเกิน 10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งถ้าปริมาณของฝุ่นที่เกิดในที่ทำงานมีค่าเกินนี้จะต้องใช้หน้ากากกันฝุ่นสวมป้องกันในขณะทำงาน การใช้คอนเด็นซิลิกาฟูมแทนซิลิกาฟูมจะสามารถลดปัญหานี้ได้เพราะคอนเด็นซิลิกา ฟูมจะมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และไม่ปลิวลมง่ายนัก

ในปัจจุบันพบว่าซิลิกาฟูมนิยมใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก ดังนั้นจึงขอให้รายละเอียดที่เกี่ยวกับซิลิกาฟูมเป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งในส่วนผสมของคอนกรีต

ที่มา : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 1 สิงหาคม 2550 ,โยธาสาร ฉบับเดือน ตุลาคม 2542

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม
SiO_2	20	48	37	92
Al_2O_3	5	26	11	0.7
Fe_2O_3	3	10	0.3	1.2
CaO	60	5	40	0.5
MgO	1.1	2	7	0.2

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม
SO_3	2.4	0.7	0.3	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.3	2.6
Lol.	2	3	-	-

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก ซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบลน (cm^2/g)	3,400	3,500	3,500	200,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้มหรือสีน้ำตาล	เทา	เทาอมขาวจนถึงเทาดำ

2.6 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymers) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอริกอนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลหรือสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้

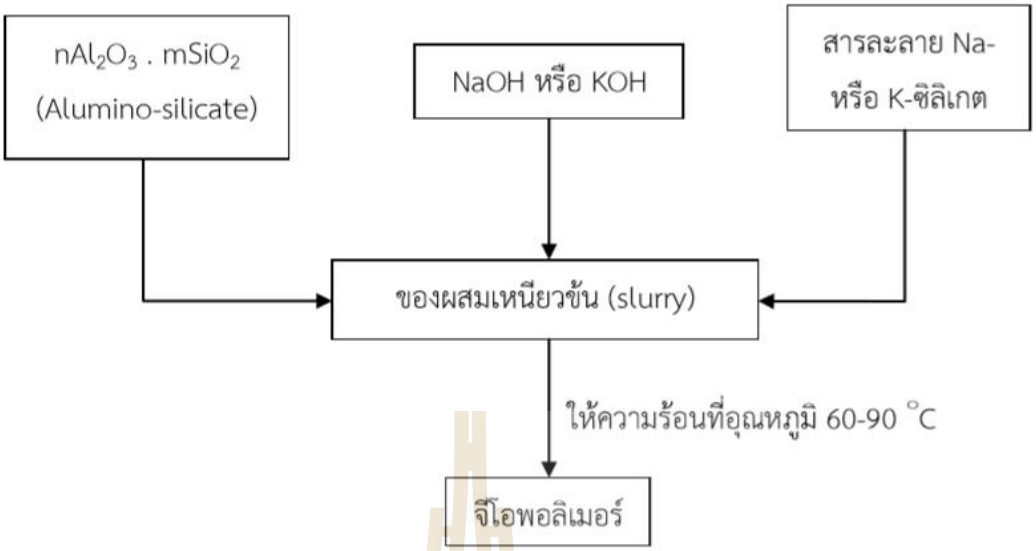
2.6.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์

ลักษณะโครงสร้างของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Geopolymer นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังรูปที่ 2.4 กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชั่นของปูนซิเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสหรือมอร์ต้าร์ที่แข็งตัวแล้ว ลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน ดังสมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.2

$C_2S, C_3S + H_2O$ --------> C-S-H + $Ca(OH)_2$ ----------(Portland Cement Hydration) ..... (2.1)

SiO_2 (Pozzolanic material) + $Ca(OH)_2$ --------> C-S-H ------(Pozzolanic Reaction) ..... (2.2)

โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิเกต (Si), อะลูมิเนต (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้น โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ควบคู่กันไปด้วย ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization)

(ที่มา : ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549)

โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ของสารตั้งต้น โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$Mn\,[-(Si-O_2)z-AlO_2-]n \cdot wH_2O \qquad .....(2.3)$$

โดย M คือ ธาตุอัลคาไลน์

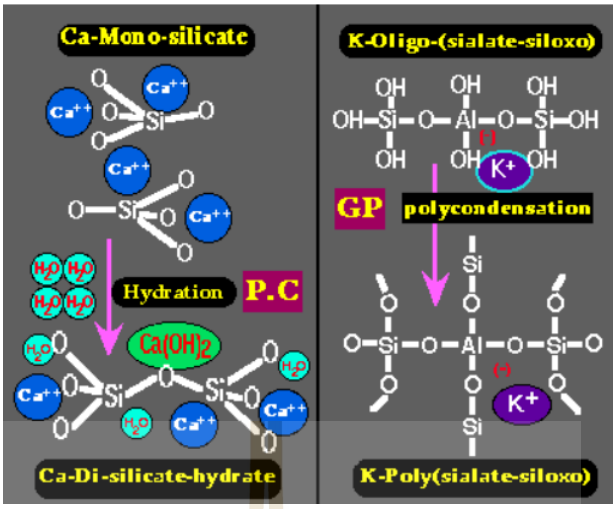
\- คือ การยึดเกาะพันธะ (bond)

Z คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

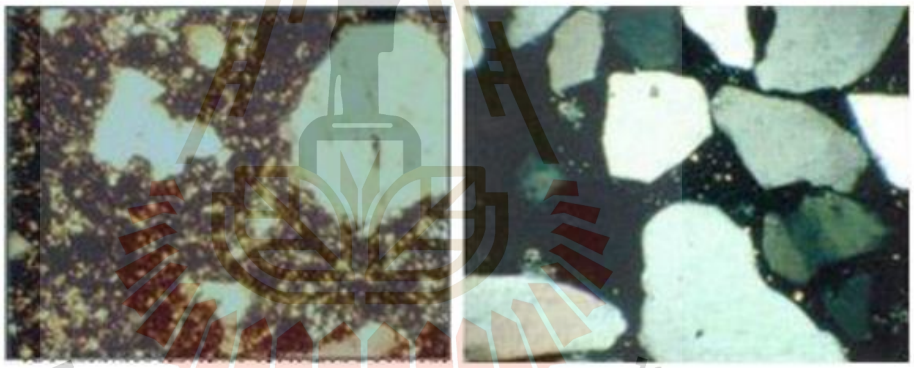
n คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ Degree of Polymerization

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชั่นของ จีโอโพลิเมอร์ (ที่มา : Jimenez, et al. (2004))



รูปที่ 2.5 ภาพขยายขนาดไมโครของลักษณะโครงสร้างของมอร์ต้าร์ เปรียบเทียบกับ Geopolymer Mortar (ที่มา : Jimenez, et al. (2004))

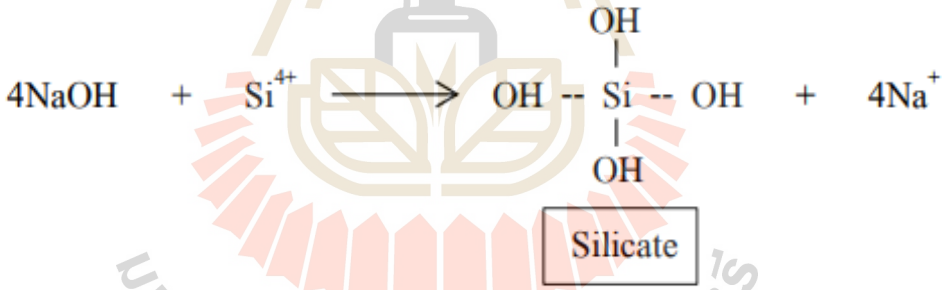
ซึ่งจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของ Portland Cement Mortar เปรียบเทียบกับ Geopolymer Mortar พบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของ Geopolymer Mortar จะมีลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า Portland Cement Mortar ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างจะร่วน (Granular) และไม่มีความแน่นในการอัดตัวกัน ที่มา : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 3 เมษายน 2551 วัสดุจีโอโพลิเมอร์ ดร. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, โยธาสาร, กันยายน-ตุลาคม 2549

2.6.2 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

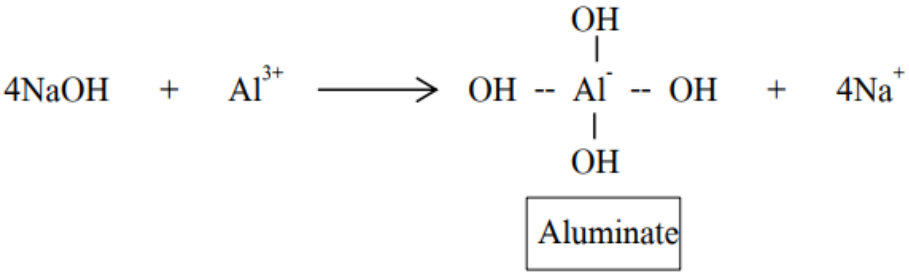
สารจีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) และสารกึ่งผลึก (Semi-crystalline) สารตั้งต้น ในการทำจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีซิลิกาและอลูมินาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าอุณหภูมิปกติ และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี โดยปฏิกิริยาของ จีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน (Fernandez-Jimenez et al., 2003) คือ

1. การชะละลาย (Dissolution)

เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ ออกมา โดยอะลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมามากเนื่องจากเป็นสารหลัก ได้เป็นหน่วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si และ Al ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล (Fernandez-Jimenez et al., 2003) สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 (Hench, 1998)



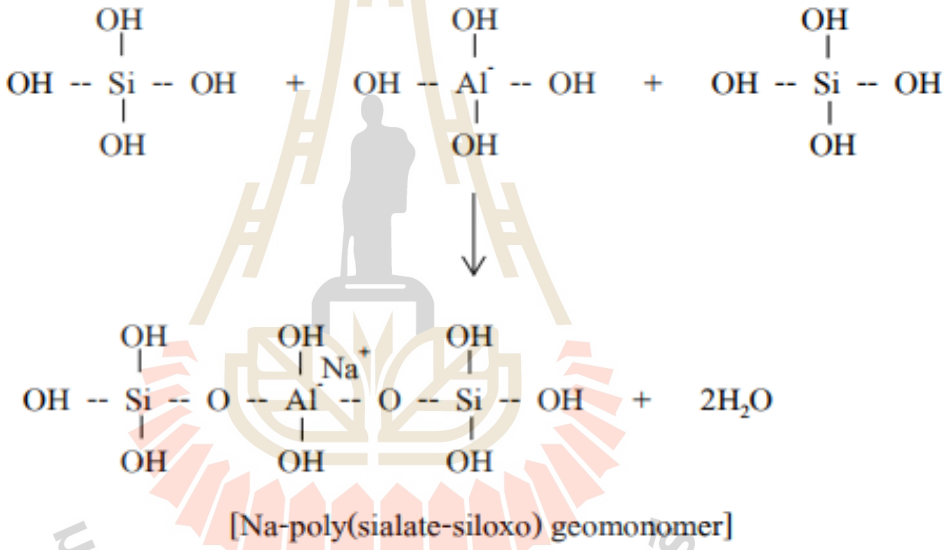
รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate (ที่มา : Hench, 1998)



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Aluminate (ที่มา : Hench, 1998)

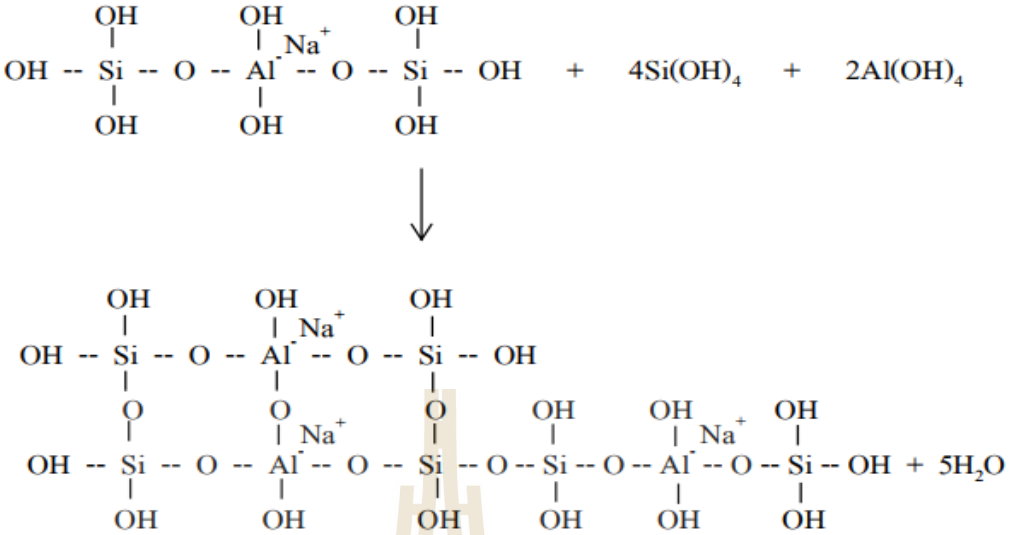
2. การทำปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ (Condensation-polymerization)

ในปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้น กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-stable) ที่มีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยพีรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ พอลิไซอะเลต (Polysialate, PS) พอลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate siloxo, PSS) และพอลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ จำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ (Hench, 1998) ดังรูปที่ 2.8

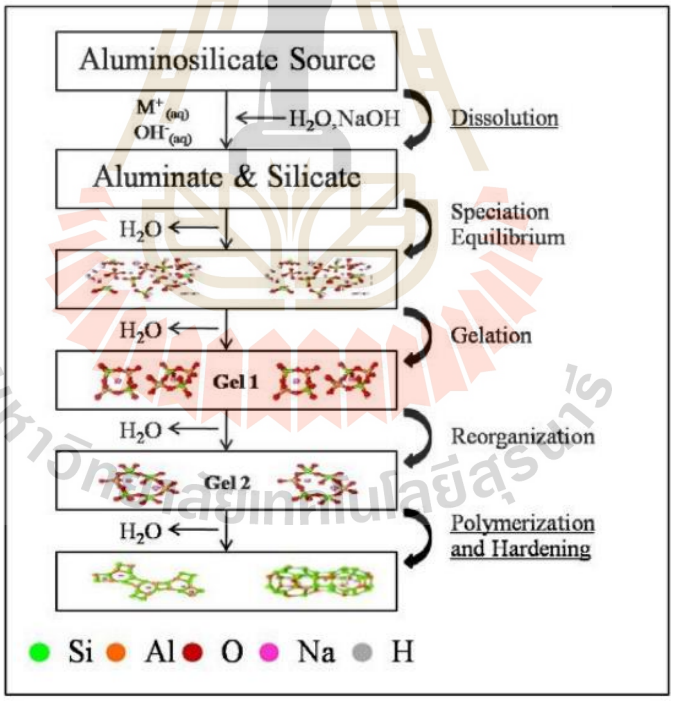


รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดพอลิเซียเลต (ที่มา : Hench, 1998)

จากนั้นจะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะของพอลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Hench, 1998) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอโพลิเมอไรเซชัน (ที่มา : Hench, 1998)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอไรเซชัน

(ที่มา : Geopolymer Institute, 2549)

อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและมอร์ต้าร์ในประเทศไทยนั้นยังไม่มีรายงานของการผลิตหรือใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากยังเป็นเทคโนโลยีที่ยังใหม่อยู่สำหรับคนไทยและยังอยู่ในช่วงพัฒนาเพื่อนำมาใช้งาน ซึ่งปัจจุบัน

นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยเริ่มให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีนี้มากขึ้น โดยมีงานวิจัยหลากหลายในประเทศไทยที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ มาทำจีโอโพลิเมอร์ เช่น เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน ฯลฯ ในอนาคตหากประเทศไทยมีกฎหมายเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่ควบคุมปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอาจเป็นวิธีหนึ่งที่จะทำให้เกิดการใช้ประโยชน์จากวัสดุจีโอโพลิเมอร์มากขึ้น และหากนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างต่างๆ อาจทำให้เราได้วัสดุประสานที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมดเลยทีเดียว และในอนาคตข้างหน้าคาดการณ์ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างต่างๆ

2.7 สารเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activator)

2.7.1 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีคุณสมบัติเป็นด่าง ไม่มีสี หรือสีเหลืองอ่อน หรือสีเขียว สีเทา โปร่งใสของเหลวหนืด ทำหน้าที่เป็นสารควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่า pH (Buffer) ที่ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการนำไปใช้ในผงซักฟอก การฟอกสีกระดาษ และเส้นใย และอุตสาหกรรมอื่นๆ

ที่มา : ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ

2.7.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือเรียกอีกอย่างว่า โซดาไฟ เป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น โดยทั่วไปแล้วอยู่ในรูปของสารละลาย ดูดความชื้นดีมาก เป็นด่างแก่ ละลายน้ำได้ดี ผลิตจากกระบวนการแยกสารทางไฟฟ้า (Electrolysis) ของน้ำเกลือ ถือเป็นสารเคมีที่มีความสำคัญมากในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันมีทั้งในสถานะของแข็ง และของเหลว บางครั้งเรียกกันว่า ผงมัน ส่วนในรูปสารละลายมักพบความเข้มข้น 50%

2.7.2.1 ลักษณะเฉพาะของโซดาไฟ

1. เป็นก้อนผลึกหรือผงสีขาว
2. ละลายน้ำได้
3. มวลอะตอมเท่ากับ 39.9971 กรัม/โมล
4. ความหนาแน่น 2.1 กรัม/ลูกบาศก์เมตร
5. จุดหลอมเหลวที่ 318 องศาเซลเซียส
6. จุดเดือดที่ 1390 องศาเซลเซียส
7. ความส ามารถในการละลายน้ำ 111 กรัม/100 มล. ที่ 20 องศาเซลเซียส

2.7.2.2 ประโยชน์ของโซดาไฟ โซดาไฟสามารถใช้ในรูปของโซดาไฟก้อน และโซดาไฟเหลว ในด้านต่างๆ

1. เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโซดาไฟเหลว
2. ใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตสบู่ ด้วยการทำปฏิกิริยากับไขมันเปลี่ยนเป็นสบู่
3. ใช้สำหรับขจัดคราบสกปรก และสิ่งอุดตันในท่อระบายน้ำ ด้วยก้อนหรือละลายน้ำเทราดบริเวณที่มีการอุดตันของท่อ
4. ใช้สำหรับปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำให้เป็นด่าง โดยเฉพาะในระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำ
5. ใช้สำหรับการตกตะกอนของแร่ธาตุหรือโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
6. ใช้ฟื้นสภาพของเรซินของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ
7. ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมไหม โดยเฉพาะขั้นตอนการลอกกาวไหมที่ต้องต้มละลายกาวไหมด้วยโซดาไฟ สำหรับการฟอกไหมในระดับครัวเรือน ชาวบ้านเรียกโซดาไฟว่า ผงมัน ซึ่งหาซื้อได้ตามร้านขายเคมีฟอกไหม

ที่มา : http://www.siamchemi.com

2.8 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modifird Crushed Rock Base)

งานนี้ประกอบด้วยการก่อนสร้างพื้นทางที่ใช้หินคลุกผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดี่ยวหรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการปู เกลี่ยแต่ง แล้วบดทับให้ถูกต้องตามแนว ระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดง ไว้ในแบบ

2.8.1 วัสดุ

2.8.1.1 หินคลุก

ต้องเป็นวัสดุหินโม่มวลรวม (Crushed Rock SoilAggreate Type)ที่มีเนื้อแข้งเหนียว สะอาด ไม่ผุ และปราศจากวัสดุอื่นเจือปน จากแหล่งที่ได้รับเห็นชอบจากกรมทางหลวง แล้ววัสดุจำพวก Shale ห้ามนำมาใช้

ในกรณีไม่ได้ระบุคุณสมบัติของหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ต้องมีคุณสมบัติต่อไปนี้

1. มีค่าความสึกหรอเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 202 “วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอ Coarse Aggreate Abrasion โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่เกินร้อยละ 40
2. มีค่าของส่วนที่ได้คงทน (Loss) ของมวลรวมหยาบ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 213 “วิธีการทดลองหาความคงทน (Soundness) ของมวลรวม “โดยใช้โซเดียมซัลเฟส จำนวน 5 รอบไม่เกินร้อยละ 9
3. ส่วนละเอียด (Fine Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ (Coarse Aggreate) การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นใดเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน
4. มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205 ‘’ วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านจะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.8
5. ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
6. มีค่า Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 102 “วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน ไม่เกินร้อยละ 25
7. มีค่า Plasticity lndexเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 103 “วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity lndex (PI) ของดิน ไม่เกินร้อยละ 6
8. มีค่า CBR เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 109 “วิธีการทดลองหาค่า CBR’’ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ความแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.8 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์

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

2.8.1.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติถูกต้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์” ปูนซีเมนต์ที่ใช้อาจบรรจุอยู่ในไซโลหรือเป็นแบบบรรจุลุงก็ได้ ถ้าเป็นแบบบรรจุถุง ผู้รับจ้างจะต้องจัดทำโรงเก็บปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้ปูนซีเมนต์ชื้น

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ตลอดงานตามสัญญาต้องเป็นตราและประเภทเดียวกัน เว้นแต่จะได้รับความเห็นชอบจากนายช่างควบคุมงานเป็นอย่างอื่น

ห้ามนำปูนซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อนปนอยู่มาใช้งาน เว้นแต่จะได้มีการออกแบบส่วนผสมใหม่ และได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานแล้ว

2.8.1.3 น้ำ

น้ำที่จะนำมาใช้ผสมหรือบ่มชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ จะต้องสะอาดปราศจากสารต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรียวัตถุ หรือสารอื่น ใด ที่จะเป็นอันตรายแก่ชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ทั้งนี้จะต้องได้รับเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อนน้ำมาใช้งาน

2.8.2 เครื่องจักรและเครื่องมือ

ก่อนเริ่มงาน ผู้รับจ้างจะต้องเตรียมเครื่องจักรและเครื่องมือต่างๆ ที่จำเป็นจะต้องใช้ในการดำเนินงานทางด้านวัสดุและการก่อสร้างไว้ให้พร้อมที่หน้างาน ทั้งนี้ต้องเป็นแบบ ขนาดและอยู่ในสภาพที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่นายช่างผู้ควบคุมงานเห็นสมควร

ถ้าเครื่องจักรและเครื่องมือชิ้นใดทำงานได้ไม่เต็มที่ หรือทำงานไม่ได้ผลตามวัตถุประสงค์ ผู้รับจ้างจะต้องทำการแก้ไขหรือจัดหาเครื่องจักรและเครื่องมืออื่นใดมาใช้แทนหรือเพิ่มเติม ทั้งนี้ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

2.8.2.1 โรงผสมแบบติดตั้งกับที่ (Central Mixing Plant)

1. ลักษณะทั่วไปของโรงผสมแบบติดตั้งกับที่ วัสดุต่างๆ ของส่วนผสมหินคลุกซีเมนต์ให้จัดอัตราส่วนเป็นน้ำหนักทั้งหมด โดยวัสดุหินคลุกปูนซีเมนต์และน้ำ จะผสมรวมกันในโรงผสม การชั่งวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการผสมหินคลุกซีเมนต์จะต้องดำเนินการตามที่นายช่างผู้ควบคุมงานเห็นควร ปริมาณของวัสดุที่ใส่เข้าไปในเครื่องผสมจะต้องไม่มากเกินไปจนทำให้หินคลุกซีเมนต์ผสมไม่เข้ากัน และถ้าหากพบว่าหินคลุกซีเมนต์ผสมไม่เข้ากัน ผู้รับจ้างจะต้องลดอัตราการใส่วัสดุเข้าไปในเครื่องผสมลงตามสัดส่วนของวัสดุแต่ละอย่าง

ผู้รับจ้างอาจจะเลือกใช้โรงผสมแบบชุด (Batch Mixer) หรือแบบผสมต่อเนื่อง (Continuous Mixer) ก็ได้ โดยเครื่องจักรที่ใช้งานต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อน

โรงผสมแบบชุดหรือแบบผสมต่อเนื่องต้องมีเครื่องป้อนวัสดุ และมาตรวัดปริมาณวัสดุที่ผ่านเข้าไปในเครื่องผสมตามปริมาณที่ได้กำหนดไว้จากการออกแบบ

โรงผสมหินคลุกซีเมนต์อาจจะดัดแปลงมาจากโรงผสมซีเมนต์คอนกรีตหรือโรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก็ได้ แต่จ้องอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้อย่างเหมาะสมโดยได้รับเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อนนำมาใช้งาน

2. โรงผสมหินคลุกซีเมนต์แบบชุดโรงผสมแบบชุดจะประกอบด้วยเครื่องผสมที่มีตัวผสมที่เหมาะสม ทำหน้าที่คลุกเคล้าหินคลุกซีเมนต์ให้เข้ากันดี

โรงผสมแบบชุดจะต้องมีเครื่องจับเวลาของการผสม ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ผู้ควบคุมสามารถจะมองเห็นได้อย่างชัดเจน เครื่องจับเวลาจะต้องสามารถอ่านเวลาละเอียดถึง 2 วินาที นอกจากนี้โรงผสมจะต้องติดตั้งเครื่องนับจำนวนชุดที่ผสมแล้วเสร็จติดอยู่กับโม่ด้วย

เวลาของการผสมให้เริ่มนับเมื่อวัสดุทุกอย่างถูกใส่ลงในห้องผสม จนถึงเวลาเมื่อหินคลุกซีเมนต์ถูกปล่อยจากห้องผสม การผสมจะต้องดำเนินต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งหินคลุกซีเมนต์มีลักษณะคลุกเคล้าเข้ากันดีอย่าดี โดยสังเกตจากสีและลักษณะของส่วนผสมที่ควรจะกลมกลืนกันดี โดยปรกติเวลาของการผสมไม่ควรน้อยกว่า 30 วินาที

เครื่องชั่งที่ใช้ชั่งปูนซีเมนต์ในแต่ละชุดจะต้องอ่านได้ละเอียดกว่าเครื่องชั่งที่ใช้ชั่งหินคลุก

3. โรงผสมหินคลุกซีเมนต์แบบผสมต่อเนื่อง โรงผสมแบบผสมต่อเนื่องจะจัดสัดส่วนของหินคลุกและปูนซีเมนต์ โดยส่งจากยุ้งผ่านสายพานหรือเครื่องป้อนอื่นใดผ่านเข้าไปยังโรงผสมอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของหินคลุก ปูนซีเมนต์ และน้ำ ถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

ระบบการป้อนหินคลุกเข้าสู่โรงผสมอาจจะเป็นระบบทางกลหรือทางไปฟ้าก็ได้ แต่ควรเป็นระบบเดียวกันกับระบบการป้อนปูนซีเมนต์

ในการผสมหินคลุกซีเมนต์แบบผสมต่อเนื่อง ผู้รับจ้างจะต้องเครียมเครื่องชั่งสำหรับชั่งหามวลของหินคลุก ปูนซีเมนต์และน้ำ เพื่อตรวจสอบส่วนผสมให้ถูกต้อง

4. เครื่องชั่งที่ใช้ในการหามวลของหินคลุก ปูนซีเมนต์ และน้ำ ต้องเป็นแบบคานมีความละเอียดผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักที่ชั่ง

กรณีควบคุมปริมาณน้ำโดยใช้ปริมาตร เครื่องควบคุมปริมาณน้ำจะต้องมีความละเอียดผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักที่ชั่ง

ผู้รับจ้างจะต้องจัดหาตุ้มน้ำหนักมาตรฐานขนาด 25 กิโลกรัม อย่างน้อย 10 ตุ้ม ไว้ที่หน้างาน เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องชั่ง

ห้ามใช้เครื่องชั่งซึ่งเป็นแบบที่ใช้สปริง

การคิดน้ำหนักปูนซีเมนต์อาจจะใช้วิธีชั่งโดยตรง หรือจากการนับจำนวนถุงบรรจุมาตรฐานก็ได้ โดยทั่วไปปูนซีเมนต์บรรจุในถุงมาตรฐานจะหนัก 50 กิโลกรัม ถ้าใช้วิธีชั่งก็จะมีเครื่องชั่งและถังสำหรับชั่งปูนซีเมนต์ต่างหาก พร้อมทั้งรางและเครื่องมืออื่นๆเพื่อใช้สำหรับปล่อยให้ปูนซีเมนต์ออกจากถังชั่งไปสู่ห้องผสม การดำเนินงานในเรื่องนี้จะต้องใช้วิธีการที่เหมาะสมและได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงาน

2.8.2.2 เครื่องจักรผสมแบบเคลื่อนที่ (Travelling Mixing Machine)

เครื่องจักรผสมแบบเคลื่อนที่ ต้องเป็นแบบที่ใบมีดผสมแบบแกนหมุน (Mechanical Rotor) ซึ่งผสมได้ตลอดความลึก สำหรับผสมหินคลุก ปูนซีเมนต์และน้ำติดตั้งอยู่ และต้องมีเครื่องจักรหรืออุปกรณ์จ่ายปูนซีเมนต์ หรือ น้ำ ที่สามารถควบคุมอัตราการจ่ายได้อย่างสม่ำเสมอตามปริมาณที่กำหนดหรือเป็นเครื่องจักรผสมอื่นใด ที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงแล้วว่าสามารถควบคุมกานผสมหินคลุกปูนซีเมนต์และน้ำให้มีลักษณะคลุกเข้ากันได้อย่างสม่ำเสมอ ห้ามใช้รถเกลี่ยเป็นเครื่องจักรผสมหินคลุกกับปูนซีเมนต์โดยตรง

2.8.2.3 เครื่องจักรบดอัด

เครื่องจักรบดอัดทุกชนิดจะต้องแบบขัยเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง โดยมีขนาด ชนิด น้ำหนัก และจำนวนเหมาะสมของการก่อสร้าง ชั้นทาง ชนิดวัสดุ ฯลฯ และสามารถอำนวยความสะดวกให้การก่อสร้างเดินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ติดขัดหรือหยุดชะงัก การกำหนดรายละเอียดเรื่องเครื่องจักรจักรบดอัดทับให้พิจารณาจากการก่อสร้างแปลงทดสอบในสนามหลัก โดยต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุม

2.8.3 กำหนดของส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์

2.8.3.1 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และน้ำ ที่ใช้ผสมกับหินคลุกนั้น นายช่างผู้ควบคุมงานจะเป็นผู้กำหนดให้หน้างาน และอาจจะสั่งเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับการทดลองหากำลังรับแรงอัดแท่งตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ ทั้งในห้องทดลองและจากการทำพื้นทางทดลองในสนาม

2.8.3.2 ในการออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมกับหินคลุกและน้ำ ให้ถือเอาค่ากำลังรับแรงอัดแท่ง ตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.105 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน “โดยอนุโลม ซึ่งแท่งตัวอย่างทดสอบจะถูกบดอัดในแบบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง มีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

2.8.3.3 ปริมาณน้ำที่ในการเตรียมแท่งตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ เพื่อการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามวิธีการทดลองในข้อ 2.8.3.2 ให้ใช้ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการทดลองการบดอัดหินคลุกตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ปริมาณน้ำปริมาณนี้ใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการบดทับในสนามขณะทำงานการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

หมายเหตุ : หากต้องการหาปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ที่แท้จริงของส่วนผสมแล้วให้หาจากการทดลองบดอัดหินคลุกผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนของปูนซีเมนต์จากส่วนผสมตามข้อ 2.2.3.2 แล้วดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.- ท.108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” อย่างไรก็ดี ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ซี่ได้จากการบดอัดหินคลุกผสมซีเมนต์ จะให้ค่าที่ไม่แตกต่างไปจากปริมาณน้ำที่ Optimum

Moisture Content ซึ่งได้จากการบดอัดหินคลุกตามข้อ 2.2.3.3 โดยวิธีการทดลองแบบเดียวกันมากนัก

2.8.3.4 วัสดุต่างๆของส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ได้แก่ หินคลุก ปูนซีเมนต์ และน้ำให้จัดอัตราส่วนเป็นน้ำหนักทั้งหมด ปริมาณปูนซีเมนต์ใช้ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 และไม่เกินร้อยละ 2 โดยมวลของหินคลุก หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น

2.8.3.5 หินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้จากการทำพื้นทางทดลองในสนามจะต้องมีคุณสมบัติสอดคล้องตามข้อกำหนดต่างๆดังต่อไปนี้

1. การผสมทดลองทั้งในห้องทดลองและทำพื้นทางทดลองในสนามจะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จก่อนเริ่มงานก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 30 วัน
2. ส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ จะต้องมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 2413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ
3. การทดลองกำลังรับแรงอัดให้ดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล-ท.105 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน “ ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง
4. จำนวนแท่งตัวอย่างทดสอบจากการผสมทดลองมนห้องทดลองและจากการทำพื้นทางทดลองในสนามแต่ละอย่างไม่น้อยกว่า 27 ตัวอย่าง

2.8.4 วิธีการก่อสร้าง

2.8.4.1 การทำพื้นทางทดลองในสนาม

อัตราส่วนของปูนซีเมนต์และน้ำที่จะใช้ผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ระหว่างการทดลองก่อสร้างพื้นทางทดลองในสนามแปลงแรก ให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ได้จากการออกแบบตามข้อ 2.2.3.2 และใช้ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ตามข้อ 2.2.3.3 เป็นส่วนผสมที่จะก่อสร้างแปลงทดลองแปลงแรก ซึ่งควรจะมีความยาวประมาณ 200-500 เมตร ให้ดำเนินการเตรียมแท่งตัวอย่างทดสอบหากำลังรับแรงอัดตามข้อ 2.2.3.5 ทันทีที่เริ่มงาน การเตรียมแท่งตัวอย่างให้เตรียมในสนาม โดยเก็บตัวอย่างตัวแทนขณะทำการปูส่วนผสมพื้นทางหินคลุกผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ซีเมนต์ เพื่อที่จะได้แท่งตัวอย่างทดสอบที่มีคุณภาพคล้ายส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ในสนามมากที่สุด ห้ามทำการผสมคลุกเคล้าตัวอย่างใหม่ทั้งก่อนและขณะทำการบดทับอัดตัวอย่าง

2.8.4.2 การก่อสร้าง

เมื่อผลการตรวจสอบคุณภาพของพื้นทางทดสอบแปลงแรกเป็นไปตามข้อกำหนดตามข้อ 4.3 แล้ว สำหรับแปลงก่อสร้างต่อๆ ไปให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ตามที่ได้ออกแบบไว้

ปริมาณน้ำที่ใช้ในระหว่างการผสมหินคลุกซีเมนต์ ให้ใช้ที่ Optimum Moisture Content โดยประมาณ

กรณีใช้โรงผสมแบบติดตั้งกับที่ ภายหลังจากผสมหินคลุกผสมซีเมนต์เข้ากันดีแล้วให้ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสม เช่น รถบรรทุกกระบะยกหินคลุกผสมซีเมนต์จากโรงผสมไปปูลงบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นทางอื่นใดที่เตรียมไว้แล้ว โดยปูลงไปในที่ที่ได้จัดเตรียมไว้ ทำการบดทับให้แน่นโดยใช้เครื่องมือบดทับที่เหมาะสมระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งเสร็จการบดทับไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง

กรณีใช้เครื่องจักรผสมแบบเครื่องที่ ภายหลังจากที่ส่วนผสมหินคลุกปูนซีเมนต์ละน้ำคลุกเคล้าเข้ากันอย่างสม่ำเสมอ ให้เกลี่ยแต่งแล้วทำการบดทับให้แน่น ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งเสร็จการบดทับไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง

ภายหลังการบดทับให้ทำการแต่งระดับชั้นสุดท้าง (Final Grading) ทันที

ควรทำการพ่นน้ำเลี้ยงผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ติต่อกันในช่วง 3 วันแรกภายหลังการบดทับ เพื่อให้กำลังรับแรงอัดของหินคลุกผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้นและยังช่วยลดรอยแตกผิวอันเนื่องมาจากการสูญเสียความชื้นหลังการบดทับด้วย

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นแหล่งวัสดุ เครื่องจักร เครื่องมือ หรือสิ่งอื่นใดที่มีผลทำให้คุณภาพของหินคลุกผสมซีเมนต์เปลี่ยนไป จะต้องทำการตรวจสอบอัตราส่วนผสมใหม่ทุกครั้งเพื่อปรับส่วนผสมให้คุณภาพถูกต้องอยู่เสมอ

การบดทับและปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการก่อสร้าง ก็มีผลอันอาจทำให้ต้องมีการปรับปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงด้วย

2.8.4.3 การควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง

การก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้ความหนาหลังการบดทับแต่ละชั้นไม่เกิน 150 มิลลิเมตร

เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ซึ่งแบบที่กำหนดไว้หนาไม่เกิน 150 มิลลิเมตร จนได้ความยาวพอเหมาในแต่ละวันแล้ว ให้ดำเนินการทดสอบความแน่นของการบด

ทับตามข้อ 1. และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามข้อ 2. หากผลทดลองเป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในขั้นต่อไปได้

ในกรณีที่แบบพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์กำหนดไว้หนา 200 มิลลิเมตร ให้ผู้รับจ้างก่อสร้างพื้นทางเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยที่เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางชั้นแรก จนได้ความยาวพอเหมาะที่จะก่อสร้างพื้นทางในชั้นถัดไปแล้ว ให้ดำเนินการทดสอบความแน่นของการบดทับตามข้อ 1. และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามข้อ 2. หากผลทดลองเป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างทางหินคลุกผสมซีเมนต์ในขั้นต่อไปได้

ก่อนการปูพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เรียบเป็นมันให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อนแล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้น

ผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไปแล้ว ควรมีความชุ่มชื้นพอควรในขณะที่ทำการปูพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ในชั้นถัดไป เพื่อช่วยให้ชั้นหินคลุกผสมซีเมนต์กะยึดกันดี ผิวหน้าที่หยาบของพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไปแล้วที่มีความชื้นพอเหมาะ จะช่วยให้เกิดการยึดเกาะที่ดีกับชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่กำลังจะก่อสร้างทับลงไป

ผู้รับจ้างอาจก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ให้มีความหนาแต่ละชั้นเกินกว่า 150 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิเมตร ก็ได้ ทั้งนี้ต้องแสดงรายการเครื่องจักรและเครื่องมือที่เหมาะสม แสดงวิธีการปฏิบัติงาน และต้องก่อสร้างแปลงทดลองยาวประมาณ 200-500 เมตร ให้ตรวจสอบคุณภาพก่อนเพื่อขอรับการพิจารณาอนุญาตจากกรมทางหลวง หากพบว่าระหว่างการก่อสร้างมีปัญหาเกี่ยวกับความแน่น หรือกำลังรับแรงอัดของพื้นที่ทางหินคลุกผสมซีเมนต์ส่วนบนและส่วนล่างไม่ได้ตามข้อกำหนดนายช่างผู้ควบคุมงานอาจพิจารณาระงับการก่อสร้างทางหินคลุกผสมซีเมนต์ชั้นละมากกว่า 150 มิลลิเมตร

1. การทดสอบความควบแน่นของการบดทับ

งานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์จะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของความควบแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ในห้องทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

การทดสอบความแน่นของการบดทับ ควรดำเนินการทดสอบในวันที่ทำการบดทับเสร็จตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 603 “วิธีการทดลองหาค่าความควบแน่นของวัสดุใน

สนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อความกว้าง 1 ช่องจราจร หรือประมาณพื้นที่ 500 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุมตัวอย่าง หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น

2. การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ให้เตรียมแท่งตัวอย่างทดสอบโดยการเก็บตัวอย่างตัวแทน 3 ตัวอย่าง ในช่วงงานก่อสร้างแต่ละช่วง ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ของหินคลุกผสมซีเมนต์หนาไม่เกิน 150 มิลลิเมตร พื้นที่ไม่เกิน 1,500 ตารางเมตร และให้ถือว่าตัวอย่างตัวแทน 3 ตัวอย่างนี้ เป็น 1 การทดสอบ

ภายหลังการบดอัดตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ให้ดันตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ออกจากแบบและบ่มไว้ในถุงพลาสติก เพื่อป้องกันมิให้ตัวอย่างสูญเสียความชื้นเป็นระยะเวลานาน 7 วัน เมื่อครบ 7 วัน ให้นำตัวอย่างทดสอบแต่ละชุด (3 ตัวอย่าง) ออกจากถุงพลาสติก แช่น้ำไว้นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดตามวิธีที่ ทล.-ท. 105 “วิธีการทดลองหา Unconfined Compressive Strength ของดิน” โดยอนุโลม

ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของหินคลุกผสมซีเมนต์ในช่วงงานก่อสร้างแต่ละช่วงจะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบ ทั้งนี้อนุญาตให้มีแท่งตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในแบบไม่เกิน 1 ก้อน แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ของค่าที่กำหนด

3. การทดสอบซ้ำ

ในกรณีที่ค่าความแน่นของการบดทับตามข้อ 1. หรือค่ากำลังรับแรงอัดตามข้อ 2. ต่ำกว่าที่กำหนด ผู้รับจ้างอาจขอให้เจาะเก็บตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ช่วงที่เป็นปัญหาเพื่อนำตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดใหม่ โดยดำเนินการในลักษณะเดียวกับข้อ 3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบที่เจาะจากสนามจำนวน 3 ก้อน ที่อายุไม่เกิน 28 วัน จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัดที่กำหนดไว้ในแบบ จึงจะถือว่าหินคลุกผสมซีเมนต์ในช่วงนั้นใช้ได้ ทั้งนี้อนุญาตให้มีแท่งตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัดที่กำหนดได้ไม่เกิน 1 ก้อน แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าที่กำหนด

ถ้าผลการทดสอบไม่ได้ตามที่กำหนดนี้ถือว่าหินคลุกผสมซีเมนต์ใช้ไม่ได้ ผู้รับจ้างจะต้องรื้อเอาหินคลุกผสมซีเมนต์ในช่วงนี้ออกทิ้งไป และให้ทำการก่อสร้างหินคลุกผสมซีเมนต์ให้ได้มาตรฐานตามข้อกำหนด

ผู้รับจ้างจะต้องเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการทดสอบซ้ำ และค่าใช้จ่ายในการรื้อเอาหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ใช้ไม่ได้ตามข้อกำหนดนี้ออกทิ้งไปทั้งสิ้น

2.8.4.4 การบ่มและการเปิดการจราจร

ในกรณีที่ผู้รับจ้างยังไม่ลาดแอสฟัลต์ชั้น Prime Coat หลังก่อสร้างเสร็จ ให้บ่มหินคลุกผสมซีเมนต์ทุกชั้น โดยพ่นน้ำลงไปบนผิวหน้าของหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ก่อสร้างเสร็จแล้วให้ผิวหน้าชุ่มชื้นตลอกเวลาติดต่ออันนานอย่างน้อยที่สุด 3 วัน นับจากวันที่บดทับเสร็จ ในช่วงเวลาของการบ่มอนุญาตให้เปิดการจราจรได้ตามปกติ

2.8.4.5 การลาดแอสฟัลต์ Prime Coat

1. ให้ผู้รับจ้างทำการลาดแอสฟัลต์ Prime Coat ภายหลังจากที่ได้ทำการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เสร็จในเวลาอันสมควร
2. เนื่องจากพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เป็นพื้นทางที่มีผิวหน้าแน่นมาก ในการลาดแอสฟัลต์ชั้น Prime Coat ให้ปฏิบัติตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 402 “การลาดแอสฟัลต์ Prime Coat” ในอัตราการลาด 0.6 – 1.0 ลิตรต่อตารางเมตร

กรณีใช้ Cut-back Asphalt ชนิด MC-70 หากพบว่า แอสฟัลต์ Prime Coat ไม่ซึมลงไปในชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ดีเท่าที่ควร ให้ผู้รับจ้างพิจารณาใช้แอสฟัลต์ MC-30 ทดแทนแอสฟัลต์ MC-70 แต่ถ้าผู้รับจ้างไม่สามรถจะหาซื้อแอสฟัลต์ MC-30 ได้ ผู้รับจ้างอาจพิจารณาใช้แอสฟัลต์ MC-70 ผสมกับน้ำมันก๊าดในปริมาณที่เหมาะสมลาดลงไปบนพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เป็นชั้น Prime Coat

กรณีใช้ แอสฟัลต์อิมัลชัน ต้องเป็นแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดพิเศษ ที่มีความสามารถในการซึมลงไปในชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ได้เทียบเท่าหรือมากกว่า Cut-back Asphalt โดยจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

2.8.4.6 เครื่องมือเจาะเก็บตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์

ผู้รับจ้างจะต้องจัดเตรียมเครื่องมือเจาะเก็บตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ประจำไว้ที่หน้างาน โดยเครื่องมือดังกล่าวจะต้องมีสภาพที่สามารถจะใช้งานได้ตลอดเวลา และมีความสามารถในการเจาะ เก็บก้อนตัวอย่างได้ตลอดความลึกที่ทำการก่อสร้าง

ที่มา : มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203/2556 กรมทางหลวง ประเทศไทย, 2558

2.9 มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)

2.9.1 ขอบข่าย

งานพื้นทางดินซีเมนต์ (soil cement base) หมายถึง การนำดินมาผสมกับปูนซีเมนต์ด้วยโรงผสม เพื่อนำไปก่อสร้างเป็นชั้นพื้นทาง โดยให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด

2.9.2 วัสดุ

2.9.2.1 ดินที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ ต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ได้ระบุไว้ในแบบหรือในรายละเอียดต่อท้ายสัญญา ซึ่งต้องเป็นวัสดุที่ปราศจากหน้าดิน วัชพืช หรืออินทรีย์วัตถุอื่น ๆ และไม่มีสารอื่นที่อาจเป็นอันตรายต่อคุณภาพของดินซีเมนต์เจือปน ห้ามใช้วัสดุจำพวก Shale ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของดินไว้เป็นอย่างอื่น ดินที่จะใช้ทำดินซีเมนต์จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีขนาดคละที่ดี เมื่อทดสอบตาม มทช. (ท) 501.8 : วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (sieve analysis) มีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ไม่เกินร้อยละ 70 และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 25
2. มีค่า liquid limit เมื่อทดสอบตาม มทช. (ท) 501.5 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลวไม่เกินร้อยละ 35
3. มีค่า plasticity index เมื่อทดสอบตาม มทช. (ท) 501.6 : วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก ไม่เกินร้อยละ 11
4. มีค่าความสึกหรอ เมื่อทดสอบตาม มทช. (ท) 501.9 : วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (coarse aggregate) โดยใช้ los angeles abrasion ไม่เกินร้อยละ 60
5. ในกรณีที่ค่า liquid limit หรือค่า plasticity index เกินกว่าค่าที่กำหนด จะต้องใช้ปูนขาวผสมเพื่อลดค่าดังกล่าวให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด แต่ทั้งนี้ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของดิน

2.9.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยต้องเป็นปูนซีเมนต์ใหม่บรรจุอยู่ในถุงหรืออยู่ในไซโล ห้ามใช้ปูนซีเมนต์ที่เสื่อมคุณภาพ โดยสังเกตได้จากการแข็งตัวจับกันเป็นก้อน

2.9.2.3 ปูนขาว ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.241: ปูนขาวสำหรับงานก่อสร้าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.9.2.4 น้ำ ที่จะนำมาใช้ผสมหรือบ่มชั้นพื้นทางดินซีเมนต์จะต้องเป็นน้ำสะอาด ปราศจากสารที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินซีเมนต์ และต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานก่อนนำมาใช้งาน

2.9.3 เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้าง

ก่อนเริ่มงานผู้รับจ้างจะต้องเตรียมเครื่องจักร เครื่องมือที่ดีมีประสิทธิภาพ ที่จำเป็นจะต้องใช้ในการดำเนินงานทางด้านวัสดุ และการก่อสร้างไว้ให้พร้อมที่สถานที่ก่อสร้าง ทั้งนี้ต้องมีความเหมาะสมกับงาน ทั้งชนิด ขนาด และจำนวน ตามที่ผู้ควบคุมงานเห็นสมควร และมีขีดความสามารถพอที่จะดำเนินการก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง ตามรูปแบบและข้อกำหนดให้แล้วเสร็จในแต่ละวัน ถ้าเครื่องจักรเครื่องมือชิ้นใดทำงานได้ไม่เต็มที่ หรือทำงานไม่ได้ผลตามวัตถุประสงค์ ผู้รับจ้างต้องทำการแก้ไข หรือจัดหาเครื่องจักรเครื่องมืออื่นใดมาใช้แทนหรือเพิ่มเติม ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของผู้ควบคุมงาน โดยเครื่องจักรที่จะนำมาใช้งานมีดังนี้

2.9.3.1 โรงผสมดินซีเมนต์

โรงผสมดินซีเมนต์มี 2 แบบ คือ โรงผสมแบบชุด (batch mixer) และโรงผสมแบบผสมต่อเนื่อง (continuous mixer) ซึ่งโรงผสมทั้งสองแบบจะมีเครื่องป้อนวัสดุและมาตรวัดปริมาณวัสดุที่ผ่านเข้าไปในเครื่องผสมตามปริมาณที่ได้กำหนดไว้จากการออกแบบ โดยโรงผสมดินซีเมนต์ต้องอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดีมีประสิทธิภาพ และผู้รับจ้างมีสิทธิที่จะเลือกใช้โรงผสมแบบชุดหรือแบบผสมต่อเนื่อง โดยต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานก่อนนำมาใช้งาน

1. โรงผสมดินซีเมนต์แบบชุด (batch mixer) ประกอบด้วยเครื่องผสมที่มีตัวผสมที่เหมาะสมทำหน้าที่คลุกเคล้าดินกับซีเมนต์ให้เข้ากัน มีเครื่องจับเวลาของการผสมติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ผู้ควบคุมงานสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน สามารถอ่านเวลาได้ละเอียดถึง 2 วินาที นอกจากนี้โรงผสมต้องติดตั้งเครื่องนับจำนวนชุดที่ผสมแล้วเสร็จไว้ที่โม่ การผสมจะต้องดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งดินกับซีเมนต์คลุกเคล้าเข้ากัน โดยสังเกตได้จากสีและลักษณะของส่วนผสมจะกลมกลืนกันดี เวลาของการผสมให้เริ่มนับเมื่อวัสดุทุกอย่างถูกใส่ลงในห้องผสมจนถึงเวลาเมื่อดินซีเมนต์ถูกปล่อยออกจากห้องผสม ปกติเวลาของการผสมไม่ควรจะน้อยกว่า 30 วินาที
2. โรงผสมดินซีเมนต์แบบผสมต่อเนื่อง (continuous mixer) โรงผสมแบบนี้จะจัดสัดส่วนของดิน ปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยส่งจากยุ้งผ่าน

สายพานหรือเครื่องป้อนอื่นใดเข้าไปยังโรงผสมอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของดิน ปูนซีเมนต์ น้ำ และปูนขาว จะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งระบบการป้อนดินเข้าสู่โรงผสมอาจจะเป็นระบบทางกลหรือทางไฟฟ้าก็ได้ แต่ควรเป็นระบบเดียวกันกับระบบการป้อนปูนซีเมนต์ ในการผสมดินซีเมนต์แบบผสมต่อเนื่อง ผู้รับจ้างจะต้องเตรียมเครื่องชั่งสำหรับชั่งหาน้ำหนักของดิน ปูนซีเมนต์ น้ำ และปูนขาว เพื่อตรวจสอบส่วนผสมให้ถูกต้อง

2.9.3.2 เครื่องชั่ง

เครื่องชั่งที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักดิน ปูนซีเมนต์ น้ำ และปูนขาว จะต้องเป็นแบบคาน มีความละเอียดผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักที่ชั่ง โดยเครื่องชั่งที่ใช้ชั่งปูนซีเมนต์ในแต่ละชุดจะต้องอ่านได้ละเอียดกว่าเครื่องชั่งที่ใช้ชั่งดิน ห้ามใช้เครื่องชั่งซึ่งเป็นแบบที่ใช้สปริง กรณีควบคุมปริมาณน้ำโดยปริมาตร เครื่องมือควบคุมปริมาณน้ำจะต้องมีความละเอียดผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.5 ของปริมาตรที่ตวง และผู้รับจ้างจะต้องจัดหาตุ้มน้ำหนักมาตรฐานขนาด 25 กิโลกรัม อย่างน้อย 10 ตุ้มไว้ที่หน้างาน เพื่อใช้ตรวจสอบหาความถูกต้องของเครื่องชั่ง

2.9.3.3 เครื่องจักรบดทับ

จะต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีชนิดและขนาด ดังนี้

1. รถบดสั่นสะเทือน (vibrating roller) ขนาดไม่น้อยกว่า 100 แรงม้า หรือรถบดชนิด 2 ล้อ หรือ 3 ล้อ ขนาดไม่น้อยกว่า 8 ตัน
2. รถบดล้อยางชนิดล้อเรียบขนาดไม่น้อยกว่า 8 ตัน สามารถบดทับชั้นทางให้ได้ความแน่นตามรูปแบบและข้อกำหนด โดยมีจำนวนมากพอที่จะดำเนินการก่อสร้างไปอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ การกำหนดชนิดและน้ำหนักของเครื่องจักรบดทับ ให้พิจารณาจากการก่อสร้างแปลงทดสอบในสนามเป็นหลัก ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน

2.9.3.4 ชุดเครื่องจักรประกอบการก่อสร้าง

1. เครื่องจักรเกลี่ยปรับระดับ (motor grader) ต้องเป็นชนิดขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีขนาดไม่น้อยกว่า 115 แรงม้า สามารถเกลี่ยปรับระดับวัสดุให้ได้ตามรูปแบบที่กำหนด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. รถบรรทุกเททำย (dump truck) ต้องเป็นชนิดและขนาดที่เหมาะสมกับงาน มีจำนวนมากพอกับปริมาณงาน เพื่อให้การก่อสร้างดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง
3. รถบรรทุกน้ำ ขนาดความจุไม่น้อยกว่า 5000 ลิตร มีอุปกรณ์ควบคุมปริมาณการจ่ายน้ำที่เที่ยงตรง สม่ำเสมอ ได้ตามที่กำหนด
4. เครื่องมือเจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ เป็นระบบเครื่องยนต์หรือระบบไฟฟ้า ซึ่งมีหัวเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร และมีกำลังมากพอที่จะเจาะเก็บตัวอย่างได้ดีมีประสิทธิภาพ
5. เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์อื่นใด นอกเหนือจากที่ได้กำหนดไว้ข้างต้นแล้ว ก่อนจะนำมาใช้งานต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน

2.9.3.5 ผู้รับจ้างต้องจัดหาเครื่องมือ และอุปกรณ์การทดสอบที่ได้มาตรฐาน

มีสภาพพร้อมใช้งาน เพื่อใช้ในการทดสอบและตรวจสอบคุณภาพ ตามที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดจนกว่างานก่อสร้างจะแล้วเสร็จ

2.9.4 การออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

2.9.4.1 ก่อนเริ่มงานไม่น้อยกว่า 2 สัปดาห์ ผู้ควบคุมงานและผู้รับจ้างต้องร่วมกันเก็บตัวอย่างวัสดุที่จะนำมาใช้ทำดินซีเมนต์ ส่งให้กรมทางหลวงชนบทเพื่อออกแบบส่วนผสม และหากในระหว่างการก่อสร้างวัสดุเปลี่ยนแปลงไปจากที่นำมาออกแบบส่วนผสม ผู้รับจ้างจะต้องเก็บตัวอย่างวัสดุส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่ โดยผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

2.9.4.2 การออกแบบส่วนผสมของดินซีเมนต์ ทำได้โดยการผสมดินกับซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ จำนวนอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่าง นำมาบดอัดตาม มทช. (ท) 501.2 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน นำตัวอย่างดินซีเมนต์ออกจากแบบ (mold) แล้วบ่มโดยใช้พลาสติกห่อเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดให้เอาพลาสติกออกแล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง นำขึ้นจากน้ำปล่อยให้แห้งด้วยอากาศจนมีสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง นำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (unconfined compressive strength) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์กับกำลังรับแรงอัด แล้วเลือกปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำให้แท่งตัวอย่างดินซีเมนต์รับกำลังรับแรงอัดได้เท่ากับ 17.50 กิโลกรัม

ต่อตารางเซนติเมตร หรือตามที่แบบกำหนด และเลือกปริมาณปูนซีเมนต์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 115 ของค่ากำลังรับแรงอัดที่ 17.50 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตรหรือตามที่แบบกำหนด เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม

2.9.5 การก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม

ผู้รับจ้างต้องก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม มีความยาวไม่น้อยกว่า 200 เมตร โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดร้อยละ 115 ของค่ากำลังรับแรงอัดที่ 17.50 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตรหรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ ตามข้อ 2.3.4.2 ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุ เครื่องจักร เครื่องมือ หรือผู้รับจ้างไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างให้ถูกต้องตามรูปแบบและข้อกำหนด ให้ผู้รับจ้างดำเนินการก่อสร้างแปลงทดสอบใหม่จนกว่าจะได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด โดยต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานก่อนใช้แปลงทดสอบนั้นเป็นแบบอย่างในการก่อสร้างต่อไป

2.9.6 การก่อสร้าง

การก่อสร้างจะต้องมีการวางแผนที่ดี และต้องคำนึงถึงสภาพอากาศที่เหมาะสม เช่น ไม่มีฝนตก อุณหภูมิของอากาศ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อการผสมวัสดุ การบดทับ และการบ่มในระหว่างก่อสร้างช่วงนั้นๆ ผู้รับจ้างต้องดำเนินการไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดชะงัก และควบคุมการจราจรเพื่อไม่ให้ชั้นทางที่กำลังก่อสร้างเสียหาย โดยติดตั้งป้ายจราจรพร้อมอุปกรณ์ควบคุมการจราจรอื่น ๆ รวมทั้งสัญญาณไฟกลางคืนตามที่กรมทางหลวงชนบทกำหนด พร้อมทั้งจัดการจราจรให้ผ่านพื้นที่ก่อสร้างได้ตลอดเวลา และปลอดภัย การก่อสร้างให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

2.9.6.1 การก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ ห้ามผสมดินกับปูนซีเมนต์โดยการฉีกถุงโรยผสมในสายทาง และห้ามนำเครื่องจักรขุดตัดผสมงาน recycling มาขุดตัดผสมดินกับปูนซีเมนต์ในสายทาง การก่อสร้างให้ใช้เครื่องจักร เครื่องมือในข้อ 3 ซึ่งได้ผ่านการตรวจสอบรับรองและตรวจปรับจากผู้ควบคุมงานแล้วเท่านั้น และขั้นตอนการก่อสร้างจะต้องสอดคล้องกับลักษณะวิธีการก่อสร้าง

2.9.6.2 การเติมปูนซีเมนต์ สำหรับแปลงก่อสร้างถัดจากแปลงทดสอบในสนามต้องเติมในปริมาณที่กำหนด ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ใช้ควรเป็นเครื่องหมายการค้าเดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ปูนซีเมนต์เครื่องหมายการค้าอื่น ผู้รับจ้างต้องเก็บตัวอย่างส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่ และเสนอให้ผู้ควบคุมงานพิจารณา ในกรณีที่ปูนซีเมนต์เก็บ

ไว้นานหรือเก็บรักษาไว้ในที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจทำให้ปูนซีเมนต์เสื่อมคุณภาพ ให้ผู้ควบคุมงานระงับการนำมาใช้งาน หากประสงค์จะนำมาใช้งานใหม่ ให้นำ ปูนซีเมนต์ไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

2.9.6.3 การเติมปูนขาวผสมกับดิน ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้ปูนขาว ต้องเติมในปริมาณที่กำหนด ซึ่งปูนขาวที่ใช้ควรเป็นเครื่องหมายการค้าเดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ปูนขาวเครื่องหมายการค้าอื่น ผู้รับจ้างต้องเก็บตัวอย่างส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่ และเสนอผู้ควบคุมงานพิจารณา ในกรณีที่ปูนขาวเก็บไว้นานหรือเก็บรักษาไว้ในที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจทำให้ปูนขาวเสื่อมคุณภาพ ให้ผู้ควบคุมงานระงับการนำมาใช้งาน หากประสงค์จะนำมาใช้งานใหม่ ให้นำปูนขาวไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

2.9.6.4 การเติมน้ำ ทำได้โดยการฉีดพ่นเข้าไปผสมดินซีเมนต์ในเครื่องผสม โดยใช้ปริมาณน้ำที่ optimum moisture content โดยประมาณ ระบบการสูบจ่ายต้องเป็นแบบควบคุมโดยอัตโนมัติและต้องสัมพันธ์กับเครื่องผสม โดยระหว่างการก่อสร้างต้องควบคุมความชื้นวัสดุให้ได้ตามที่กำหนด หากวัสดุส่วนใดมีความชื้นไม่ได้ตามที่กำหนด ผู้รับจ้างต้องแก้ไขให้ถูกต้อง

2.9.6.5 ผสมดินกับซีเมนต์โดยใช้โรงผสม เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วใช้รถบรรทุกเทท้ายบรรทุกดินซีเมนต์จากโรงผสมไปปูลงบนชั้นรองพื้นทางที่ผ่านการทดสอบความแน่นของการบดทับ ซึ่งมีความลาดและระดับได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด ทำการบดทับโดยใช้เครื่องจักรบดทับ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนบดทับแล้วเสร็จไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง และภายหลังการบดทับให้ทำการแต่งระดับขั้นสุดท้าย (fine grading) ด้วยเครื่องจักรเกลี่ยปรับระดับทันที

2.9.6.6 ฉีดพ่นน้ำเลี้ยงผิวหน้าพื้นทางดินซีเมนต์ในขณะบดทับให้ชื้นอยู่ตลอดเวลา โดยควบคุมปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์ให้อยู่ที่ optimum moisture content โดยประมาณ เพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับดินสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของพื้นทางซีเมนต์เพิ่มขึ้น และยังช่วยลดรอยแตกของผิวหน้าพื้นทางดินซีเมนต์อันเนื่องมาจากการสูญเสีย

ความชื้น ควรทำการพ่นน้ำเลี้ยงผิวหน้าพื้นทางดินซีเมนต์ติดต่อกันในช่วง 3 วันแรกหลังการบดทับ

2.9.6.7 การก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ ให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้มีความหนาหลังจากบดทับแต่ละชั้นไม่เกิน 15 เซนติเมตร แล้วทำการทดสอบความแน่นการบดทับในสนามตามข้อ 1) และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามข้อ 2) หากผลทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนด ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในชั้นต่อไปได้

2.9.6.8 ในกรณีที่แบบกำหนดให้พื้นทางดินซีเมนต์หนา 20 เซนติเมตร ให้ผู้รับจ้างก่อสร้างพื้นทางเป็น 2 ชั้น โดยให้มีความหนาหลังการบดทับชั้นละประมาณ 10 เซนติเมตร แล้วทำการทดสอบความแน่นการบดทับในสนามตามข้อ 1) และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามข้อ 2) หากผลทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนด ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในชั้นต่อไปได้

2.9.6.9 ในกรณีก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์มากกว่า 1 ชั้น ให้ฉีดพ่นน้ำลงบนผิวหน้าพื้นทางดินซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของพื้นทางดินซีเมนต์เรียบเป็นมัน ให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวให้เป็นริ้วรอยก่อนแล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้นเพื่อช่วยให้เกาะยึดกันได้ดี

2.9.6.10 ผู้รับจ้างอาจก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ให้มีความหนาแต่ละชั้นมากกว่า 15 เซนติเมตร แต่ไม่เกิน 20 เซนติเมตร ทั้งนี้ต้องแสดงรายการเครื่องจักรเครื่องมือที่เหมาะสม แสดงวิธีการปฏิบัติงาน และต้องก่อสร้างแปลงทดสอบในสนามยาวไม่น้อยกว่า 200 เมตร ให้ตรวจสอบคุณภาพก่อน เพื่อขอรับการพิจารณาอนุญาตจากกรมทางหลวงชนบท หากพบว่าระหว่างการก่อสร้างมีปัญหาเกี่ยวกับความแน่นหรือกำลังรับแรงอัดของพื้นทางดินซีเมนต์ไม่ได้ตามข้อกำหนด ผู้ควบคุมงานอาจพิจารณาระงับการก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์ ที่มีความหนามากกว่าชั้นละ 15 เซนติเมตร

2.9.6.11 การบ่มและการเปิดการจราจร ในกรณีที่ผู้รับจ้างยังไม่ลาดแอสฟัลต์ชั้นไพร์มโค้ท (prime coat) หลังก่อสร้างเสร็จ ให้บ่มดินซีเมนต์ทุกชั้นโดยพ่นน้ำลงไปบนผิวหน้าของพื้นทางดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างเสร็จแล้วให้ชุ่มชื้นตลอดเวลา ติดต่อกันอย่างน้อยที่สุด 3 วัน นับจากวันที่บดทับเสร็จ ในช่วงเวลาของการบ่มอนุญาตให้เปิดการจราจรได้ตามปกติ

2.9.6.12 ให้ผู้รับจ้างทำการลาดแอสฟัลต์ชั้นไพร์มโค้ท (prime coat) ภายหลังจากก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์แล้วเสร็จในเวลาอันสมควร เนื่องจากพื้นทางดินซีเมนต์มีผิวหน้าแน่นมาก ให้ลาดแอสฟัลต์ชั้น ไพร์มโค้ทโดยใช้ cut – back asphalt ชนิด MC – 70 หากพบว่าแอสฟัลต์ไม่ซึมลงไปในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ดีเท่าที่ควร ให้ผู้รับจ้างพิจารณาใช้แอสฟัลต์ MC – 30 ลาดแทน ตาม มทช. 225 : มาตรฐานงานไพร์มโค้ท ในอัตราการลาด 0.8 – 1.4 ลิตรต่อตารางเมตร

2.9.6.13 การก่อสร้างชั้นผิวทาง ให้ผู้รับจ้างก่อสร้างได้ภายหลังจากก่อสร้างพื้นทางดินซีเมนต์แล้วเสร็จเป็นระยะเวลานานไม่น้อยกว่า 15 วัน

2.9.7 การตรวจสอบชั้นพื้นทางดินซีเมนต์

2.9.7.1 การตรวจสอบด้านคุณภาพ

1. การทดสอบหาค่าความแน่นการบดทับในสนาม ควรทดสอบในวันที่ทำการบดทับแล้วเสร็จ โดยให้ดำเนินการตาม มทช. (ท) 501.4 : วิธีการทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อความกว้าง 1 ช่องจราจร หรือประมาณพื้นที่ 500 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุมตัวอย่าง หรือตามที่แบบกำหนด โดยค่าความแน่นการบดทับในสนามต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความแน่นตาม มทช. (ท) 501.2 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน หรือตามที่แบบกำหนด
2. การทดสอบกำลังรับแรงอัด ให้เก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ในขณะทำการก่อสร้างแต่ละช่วง จำนวน 3 ตัวอย่าง ในกรณีก่อสร้างดินซีเมนต์หนา 15 เซนติเมตร ให้เก็บตัวอย่างให้ครอบคลุมพื้นที่ก่อสร้างไม่เกิน 1,500 ตารางเมตร และให้ถือว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ 3 ตัวอย่างนี้เป็น 1 ชุดทดสอบ นำมาบดอัดตาม มทช. (ท) 501.2 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน นำตัวอย่างดินซีเมนต์ออกจากแบบ (mold) แล้วบ่มโดยใช้พลาสติกห่อเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดให้เอาพลาสติกออกแล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง นำขึ้นจากน้ำปล่อยให้แห้งด้วยอากาศจนมีสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง นำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (unconfined compressive strength) ซึ่งต้องได้ไม่น้อยกว่าที่แบบกำหนด ทั้งนี้อนุญาตให้มีแท่งตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าที่

แบบกำหนดได้ไม่เกิน 1 ตัวอย่าง แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ตามที่แบบกำหนด ในกรณีที่ค่ากำลังรับแรงอัดแท่งตัวอย่างแต่ละชุดทดสอบต่ำกว่าที่แบบกำหนด ผู้รับจ้างอาจขอให้เจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ในช่วงนั้นมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดใหม่ โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่เจาะจากสนามจำนวน 3 ตัวอย่าง ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัดที่แบบกำหนด จึงจะถือว่าการก่อสร้างดินซีเมนต์ในช่วงนั้นใช้ได้ ทั้งนี้อนุญาตให้มีแท่งตัวอย่างที่กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัดที่แบบกำหนดได้ไม่เกิน 1 ตัวอย่าง แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของกำลังรับแรงอัดที่แบบกำหนด ถ้าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างไม่ได้ตามที่กำหนด ให้ถือว่าการก่อสร้างดินซีเมนต์ในช่วงนั้นใช้ไม่ได้ ผู้รับจ้างจะต้องรื้อออกทิ้งไป และทำการก่อสร้างใหม่ให้ได้มาตรฐานตามข้อกำหนด โดยผู้รับจ้างจะต้องเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

ที่มา : มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ มาตรฐานที่ มทช. 244-2556 กรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย, 2557

2.10 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก

พื้นทางประกอบไปด้วย วัสดุหินโม่มวลรวม ซึ่งมีขนาดคละกันอย่างสม่ำเสมอ จากใหญ่ไปหาเล็ก เป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่ผุและปราศจากวัสดุอื่นเจือปน โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้น ไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการเกลี่ยแต่งและบดทับให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ

ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของชั้นวัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำพื้นทางหินคลุกจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีค่าการสึกหรอ เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.9-2545 “วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Coarse Aggregates) โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion)” ไม่เกินร้อยละ 40

2. มีค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Loss) เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.12-2545 “วิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม” โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ แล้วไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดสอบทุกครั้งที่นำไปใช้
3. ส่วนละเอียด (Fin Aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ (Coarse Aggregate) หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบทก่อน ทั้งนี้เมื่อผสมกันแล้วต้องมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท
4. มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.8-2545 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis) โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.9 (มทช.203-2557)
5. ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
6. มีค่า Liquid Limit เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.5-2545 “วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว (Liquid Limit, L.L.)” ไม่เกินร้อยละ 25
7. มีค่า Plasticity Index เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.6-2545 “วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.)” ไม่เกินร้อยละ 6

ตารางที่ 2.9 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก (มทช.203-2557)

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก.	ชนิด ข.	ชนิด ค.
50 (2 นิ้ว)	100	100	-
25.0 (1 นิ้ว)	-	75 – 95	100
9.5 (3/8 นิ้ว)	30 – 65	40 – 75	50 – 85
4.75 (เบอร์ 4)	25 – 55	30 – 60	35 – 65
2.00 (เบอร์ 10)	15 – 40	20 – 45	25 – 50
0.425 (เบอร์ 40)	8 – 20	15 – 30	15 – 30
0.075 (เบอร์ 200)	2 – 8	5 – 20	5 – 15

8. มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.3-2545 “วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.)”ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางแบบเซอร์เฟสทรีตเมนต์ที่ความแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.2-2545 “วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)”

ที่มา : มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก มทช. 203-2545 กรมทางหลวงชนบท, 2539

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hoy และ Horpibulsuk (2016) ได้ศึกษาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ RAP ที่ผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเถ้าลอยและสารปรับคุณสมบัติ NaOH และ Na_2SiO_3 ที่อัตราส่วนต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนากำลังอัดต่อไป อีกส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนาค่ากำลังอัดไปเรื่อยๆ จนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

อิทธิกร ภูมิพันธ์และคณะ (2559) ในการศึกษานี้ได้มีการนำ RAP มาผสมกับเถ้าลอย แคลเซียมคาร์ไบด์ และตะกรันเหล็ก และได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า RAP สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทาง / วัสดุรองพื้นทางเมื่อใช้ตะกรันเหล็ก 10% S มาผสมกับ RAP

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

Kuhlman (1989) กล่าวไว้ว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีผิวจราจรทำจากยางมะตอย โดยการนำผิวจราจรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ ในช่วงปี 1942-1958 ต่อมาในปี 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมา วิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งาน ทั้งผิวจราจรยืดหยุ่นที่ชำรุดเสียหาย และผิวจราจรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี

Tabensky (1990) กล่าวว่า การนำวัสดุเก่ามาใช้งานอีกครั้ง (Recycling) ไม่ใช่เรื่องใหม่ แต่มีรายงานว่า Florida Department of Transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่าด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนน และ Orange County California ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุง

คุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง กับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5-7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับวัสดุชั้นล่าง เพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow Municipal Airport และ Mohave County Airport.

อาทิตย์ อินทรา (2556) ได้ทำการศึกษาหินคลุก (CR) ผสมกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด กำลังอัด และความคงทนของวัสดุผสม ระหว่าง CR และ RAP ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ RAP ด้วยพลังงานการ บดอัดที่ให้กับวัสดุผสมที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากยางใน RAP มีคุณสมบัติการดูดซับพลังงานการบดอัดสูงกว่าหินคลุก ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ และปริมาณ CR แสดงได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรง รอบเปียกสลับแห้งทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุผสม และส่งผลให้กำลังอัดของวัสดุผสมลดลง กำลังอัด ที่รอบเปียกสลับแห้งค่าหนึ่ง ที่การบดอัดสภาวะหนึ่ง (ด้านแห้ง ด้านเปียก และปริมาณความชื้นเหมาะสม) สามารถประมาณได้จากกำลังอัดในสภาวะเปียกเริ่มต้น (ก่อนการทดสอบเปียกสลับแห้ง) ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมระหว่าง CR และ RAP สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานทางได้ โดยร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของ Portland Cement Association สำหรับทุกอัตราส่วนผสม CR : RAP และปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่าร้อยละ 3

วราวุธ เล็กวิเชียร (2537) ได้ศึกษาการนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้งานใหม่ (RAP) ปรับสภาพโดยใส่สานผสมเพิ่ม (Rejuvenator) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะทางกายภาพ ที่ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า มีคุณสมบัติเปลี่ยนกลับเหมือน เช่นข้อกำหนดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ จากการทดลอง ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.88 โดยน้ำหนักของวัสดุ มวลรวม เมื่อนำวัสดุใหม่และสารปรับสภาพมาผสม และทดสอบด้วยวิธีการ มาร์แชลล์แล้วพบว่า ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 4.90 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุผิวทางได้ และได้คุณสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงทุกประการ จากการวิจัยนี้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าสามารถนำไปใช้ในการบูรณะซ่อมแซมถนนในประเทศไทยได้

นิรชร นกแก้ว และคณะ (2559) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ต่างกัน โดยใช้วัสดุมวลรวมหินปูนจำนวน 1 แหล่ง ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาด ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 ของมวลรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เท่ากับร้อย

ละ 5 ของมวลรวม โดยใช้วิธีมาร์แชลล์และเกณฑ์ชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ RAP ไม่คัดแยกขนาด มีค่าความหนาแน่น 2.397 ถึง 2.402 กรัมต่อมิลลิลิตร ช่องว่าง อากาศร้อยละ 3.9 ถึง 4.0 ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมร้อยละ 14.6 ถึง 14.7 ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ร้อยละ 73.3 ถึง 72.8 เสถียรภาพ 2,310 ถึง 2,260 ปอนด์ และค่าการไหล 12 ถึง 15 นอกจากนี้พบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวมทำให้ได้คุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตาม ข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมเฉพาะงาน Asphalt Hot-Mix Recycling

อาวุธ โพธิ์อุดม (2553) ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ผลทดสอบ Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetrometer Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) และหาคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยทำการเก็บตัวอย่างผิวทางเดิมจาก ถนนสาย 2034 ตอนหน้าพระลาน-บ้านครัว จังหวัดสระบุรี โดยแบ่งตัวอย่างผิวทางเดิมออกเป็น 2 ส่วนคือ วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ประกอบด้วยตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับหินเกล็ดอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร วัสดุโครงสร้างทาง เดิม 2 ประกอบด้วยตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับ หินคลุกอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร โดยปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของมวลรวมแห้ง ใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงสุด (1.0*OMC) และปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุ ตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงสุด (1.25*OMC) พลังงานบดอัด 277.50 ตัน/ลูกบาศก์เมตร ท่อนเหล็กกลมตันกด Unsoaked CBR ขนาด พื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว อายุ 2 และ 3 วัน จากผลงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาค่าความสัมพันธ์ ระหว่าง Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetrometer Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) สามารถใช้เป็นแนวทางกำหนดค่า field CBR ใน สภาพจริงของชั้นทางงานถนนเพื่อใช้ในงานตรวจ สอบวิเคราะห์และนำมาใช้สำหรับการควบคุมงาน และการออกแบบงานถนน

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

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลแผ่ (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลแผ่แปรผันตามอัตราส่วน Na_2OSiO_2 : NaOH กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกกะปาสคาล อัตราส่วน Na_2OSiO_2 : NaOH ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความข้นเหลวดีขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำ ลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Arulrajah et.al. (2016) ได้ศึกษาการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาผสมกับเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับวัสดุแบบเดิม จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าการอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ผสมกับตะกรันเหล็ก 5 % เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุรีไซเคิล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเหมาะสมของกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทาง ตัวอย่างวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) เก็บจากสาย 2 (ถนนมิตรภาพ) หมวดการทางนครราชสีมา แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 1 ซึ่งอยู่ในเขตพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ขั้นตอนการดำเนินการประกอบด้วย

3.1 การเก็บตัวอย่าง

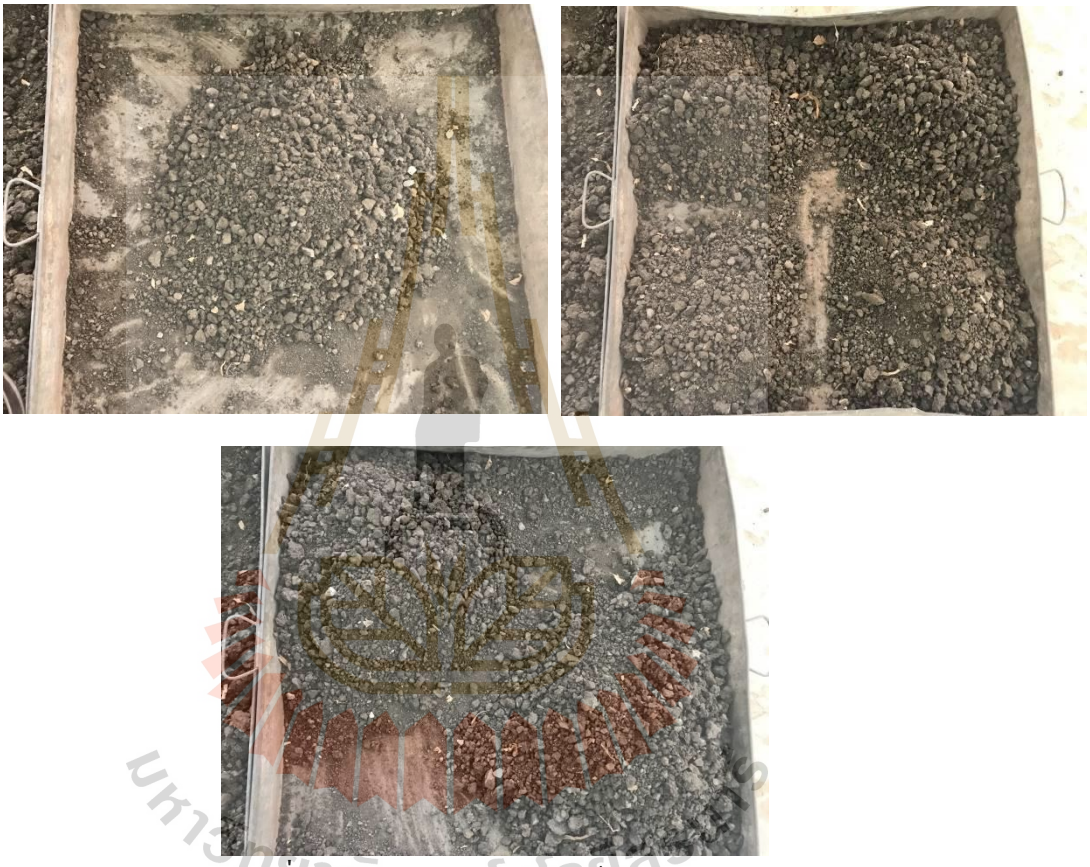
ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) จากกองวัสดุที่เก็บเป็นขยะไม่ใช้แล้ว (รูปที่ 3.1)

รูปที่ 3.1 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ผู้วิจัยนำตัวอย่างวัสดุที่เตรียมไว้มาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วกองเป็นรูปกรวยคว่ำ จากนั้นเกลี่ยให้แบนลงและปรับเป็นรูปสีเหลี่ยม แล้วทำการแบ่งวัสดุออกเป็นสี่ส่วน เอาส่วนหนึ่งมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด ¾ และนำส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

3.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้ตามข้อ 3.2 มาทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นทางด้านวิศวกรรมปฐพี ดังนี้

3.3.1 วิธีการทดสอบการหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.8-2545 (รูปที่ 3.3)

รูปที่ 3.3 การทดลองเพื่อหาขนาดเม็ดของวัสดุ

3.3.2 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดเหลว Liquid Limit (LL) ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.5-2545 (รูปที่ 3.4)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.4 การทดลองหาค่าขีดจำกัดเหลว

3.3.3 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.6-2545 (รูปที่ 3.5)

รูปที่ 3.5 การทดลองหาค่าขีดพลาสติก

3.3.4 วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specfic Gravity of Soil) ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง มทช.(ท) 101.4-2545 (รูปที่ 3.6)

รูปที่ 3.6 การทดลองเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ

3.3.5 วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion Test) ตามมาตรฐานวิธีกาทดลอง มทช.(ท) 501.9-2545 (รูปที่ 3.7)

รูปที่ 3.7 การทดลองหาค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

3.3.6 วิธีการทดสอบความแน่น (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.2-2545 (รูปที่ 3.8)

รูปที่ 3.8 การทดลองการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3.3.7 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. (C.B.R.) ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 501.3-2545 (รูปที่ 3.9)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.9 การทดลองเพื่อหาค่า C.B.R.

3.3.8 เตรียมสัดส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม

วัสดุ	จีโอโพลิเมอร์	สารเร่งปฏิกิริยา ($NaOH$: Na_2SiO_3)
RAP	เถ้าลอย (10%)	50 : 50
RAP	ตะกรันเหล็ก (10%)	50 : 50
RAP	ซิลิกาฟูม (10%)	50 : 50
RAP	เถ้าลอย (5%) + ตะกรันเหล็ก (5%)	50 : 50
RAP	เถ้าลอย (5%) + ซิลิกาฟูม (5%)	50 : 50
RAP	ตะกรันเหล็ก (5%) + ซิลิกาฟูม (5%)	50 : 50

3.3.9 เตรียมสัดส่วนของสารเร่งปฏิกิริยา (Alkaline Activators) ผู้วิจัยได้ใช้สารเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาครั้งนี้ คือ สารโซเดียมซิลิเกต เกรด C-53 จากบริษัท วิโรฒวิทยาภัณฑ์ จำกัด นครราชสีมา ประกอบด้วย Na_2O 15.50%, SiO_2 32.7%, และ H_2O 51.75% โดยน้ำหนัก และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความบริสุทธิ์ 98%) จากบริษัท วิโรฒวิทยาภัณฑ์ จำกัด นครราชสีมา ผสมกับน้ำกลั่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้สารละลาย สารเร่งปฏิกิริยา (Liquid Alkaline Activators) เตรียมจากการผสมโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีสัดส่วนดังนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) คือ 50 : 50 ผสมกับวัสดุตั้งต้น (วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) กับเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม) ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ได้จากการบดอัด ในแต่ละสัดส่วน

3.3.10 การเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ (Crushed rock-FA-Geopolymer) โดยผสมวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) และเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม ตามสัดส่วนที่กำหนดให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา ($NaOH$: Na_2SiO_3 = 50 : 50) ผสมกับวัสดุตั้งต้น (Binder) โดยใช้เวลาผสม ประมาณ 5-10 นาที กับแต่ละสัดส่วน จากนั้นบดอัดตามวิธีการทดลองความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor compaction) มทช.(ท) 501.2-2545 ในการเก็บตัวอย่าง

หลังจากบดอัดแล้วจะห่อด้วยพลาสติกใส เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27-30 ° C) ที่มีอายุ บ่ม 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะทำการเก็บตัวอย่างจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง เพื่อความถูกต้องแม่นยำ

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบ		อายุการบ่ม(จำนวนตัวอย่าง)		
	วัสดุ	NaOH : Na_2SiO_3	7 วัน	14 วัน	28 วัน
1	FA 10%	50 : 50	3	3	3
2	Slag 10%	50 : 50	3	3	3
3	SF 10%	50 : 50	3	3	3
4	FA 5% + SF 5%	50 : 50	3	3	3
5	FA 5 % + Slag 5%	50 : 50	3	3	3
6	Slag 5 % + SF 5 %	50 : 50	3	3	3

หมายเหตุ : FA : เถ้าลอย
Slag : ตะกรันเหล็ก
SF : ซิลิกาฟูม
NaOH : สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
Na_2SiO_3 : สารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.4 การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

ตัวอย่างที่ถูกบ่มในถุงพลาสติกเมื่อครบอายุการบ่มที่จะทดสอบแล้ว แกะพลาสติกออกจากก้อนตัวอย่างนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างขึ้นจากน้ำปล่อยให้แห้งด้วยอากาศจนมีสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ก่อนถูกนำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด วิธีการทดลองหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ มทช.(ท) 303-2545 โดยค่ากำลังอัดที่ควบคุมจะต้องไม่น้อยกว่าตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล)

3.5 ศึกษาต้นทุนของแต่ละสัดส่วน

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาจาก โรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ราคา 480 บาทต่อตัน

ตะกรันเหล็กที่ใช้ในการศึกษาจาก บริษัท สยามสตีลมิลล์ เซอร์วิสเซส จำกัด อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ราคา 180 บาทต่อตัน

ซิลิกาฟูมที่ใช้ในกาศึกษาจาก บริษัท เอ็น.วี.เอ็น. ซัพพลาย จำกัด จังหวัดปทุมธานี ใช้ซิลิกาฟูม Undensified แบบละเอียด ราคา 12000 บาทต่อตัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษา หน่วยน้ำหนักกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ทดสอบโดยวิธีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) และเปรียบเทียบต้นทุนของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม ต่อกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อดังนี้

4.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุ

4.1.1 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เก็บมาจากหมวดการทางนครราชสีมา แขวงทางหลวงนครราชสีมาที่ 1 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแสดงในตารางที่ 4.1 และขนาดคละของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

Content	RAP	Standard for base course
Specific gravity	2.519	
Liquid limit	Non Liquid	≤ 25
Plastic limit	Non Plastic	≤ 6
Plastic index	Non Plastic	≤ 6
Maximum dry unit weight	2.025	≥ 1.440
Optimum moisture content	10.34	
CBR at 95% of dry density	21.00*	≥ 80
LA abrasion	31.56	≤ 40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

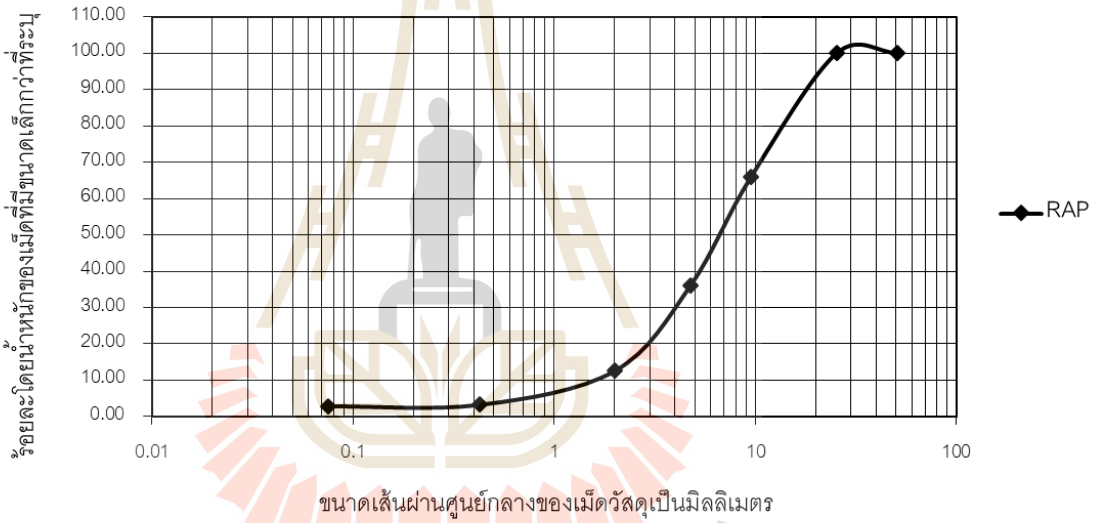
ตารางที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ใช้ในงานวิจัย

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	C	วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)
2”	-	100
1”	100	100
3/8”	50-85	65.93
เบอร์ 4	35-65	36.03
เบอร์ 10	25-50	12.52
เบอร์ 40	15-30	3.22
เบอร์ 200	5-15	2.79

ความถ่วงจำเพาะมีค่า 2.519 ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากวัสดุมีส่วนผสมของยางทำให้ดูดซึมน้ำได้ยาก จึงไม่สามารถทำการทดสอบได้ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท (กำหนดค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และดัชนีพลาสติก (Plastic index) ไม่เกิน 25 และ 6 ตามลำดับ) ความสึกหรอก (Percent of wear) มีค่าร้อยละ 31.56 (ค่ามาตรฐานไม่เกิน 40%) *ซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 21.00 ซึ่งมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุก กำหนดค่า ซี.บี.อาร์ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับทางแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่ง อาจทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุ หรือความแข็งแรงของวัสดุลดน้อยลงจึงทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ขนาดคละของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าจัดอยู่ใน Class C ซึ่งมาตรฐานหินคลุกที่ใช้ในกรมทางหลวงชนบทมีอยู่ 3 class คือ Class A, Class B และ Class C วัสดุที่นำมาใช้จึงถือว่าเป็นวัสดุที่จัดอยู่ในเกรดที่ไม่ดี

ลักษณะทางกายภาพและสัดส่วนคละของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)



รูปที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

4.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

เถ้าลอยที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นแหล่งเถ้าลอยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย เถ้าลอยจากแหล่งนี้ได้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์อย่างกว้างขวาง องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของเถ้าลอย ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี X – ray fluorescence (XRF) แสดงไว้ ดังตารางที่ 4.3 ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 25.327, Al_2O_3 ร้อยละ 8.463, Fe_2O_3 19.415 และ CaO ร้อยละ 35.702 ผลรวมของ (SiO_2+ Al_2O_3+Fe_2O_3) เท่ากับ 53.205 จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C (Type C) หรือเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium FA)

และปริมาณ SO_3 = 5.034 (ข้อกำหนดไม่เกินร้อยละ 5)* จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Fly Ash)

Chemical Compositions (%wt)	**Fly Ash (FA)**
Silicon Dioxide (SiO_2)	25.327
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	8.463
Iron Oxide (Fe_2O_3)	19.415
Calcium Oxide (CaO)	35.702
Magnesium Oxide (MgO)	0.615
Potassium Oxide (K_2O)	2.354
Sodium Oxide (Na_2O)	0.157
Sulfur Trioxide (SO_3)	5.034

4.1.3 ตะกรันเหล็ก (Slag)

ตะกรันเหล็กที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จากบริษัท สยามสตีลมิลล์ เซอร์วิสเซส จำกัด อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ที่ได้ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของตะกรันเหล็ก ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี X – ray fluorescence (XRF) แสดงไว้ ดังตารางที่ 4.4 ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 10.428, Al_2O_3 ร้อยละ 2.157, CaO ร้อยละ 45.016 และ SO_3 ร้อยละ 0.985 ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (No.325) ร้อยละ 0.316 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก

Chemical Compositions (%wt)	**Slag**
Silicon Dioxide (SiO_2)	10.428
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	2.157
Calcium Oxide (CaO)	45.016
Magnesium Oxide (MgO)	1.231
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.985
Iron Oxide (Fe_2O_3)	32.388
Manganese Oxide (MnO)	4.679

4.1.4 ซิลิกาฟูม (Silica Fume)

ซิลิกาฟูมที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้สั่งซื้อจาก บริษัท เอ็น.วี.เอ็น.ซัพพลาย จำกัด จังหวัดปทุมธานี ได้ประกอบธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตและจำหน่ายเคมีสำหรับงานก่อสร้างและกาวอุตสาหกรรม เลขทะเบียน 0135555017803 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของซิลิกาฟูม ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี X – ray fluorescence (XRF) แสดงไว้ ดังตารางที่ 4.5 ประกอบด้วย SiO_2 ร้อยละ 94.044, Al_2O_3 ร้อยละ 0.073, Fe_2O_3 ร้อยละ 0.050, CaO ร้อยละ 1.087, MgO ร้อยละ 0.133 และ SO_3 ร้อยละ 1.046 องค์ประกอบหลักของซิลิกาฟูมคือ SiO_2 มักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป พร้อมที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์รอง จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

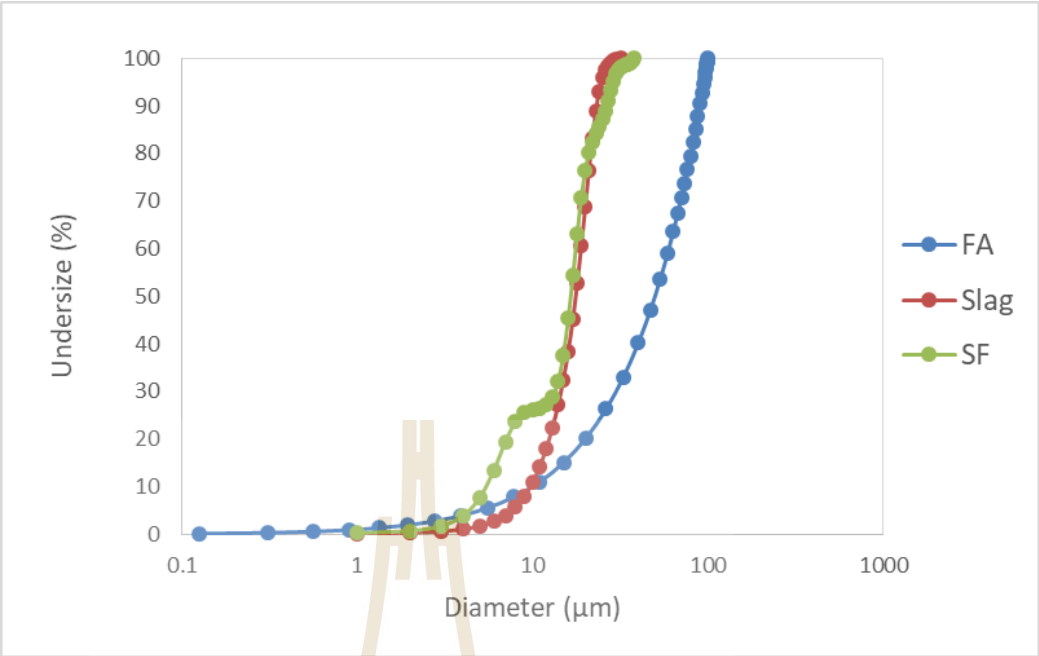
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูม

Chemical Compositions (%wt)	**Silica Fume (SF)**
Silicon Dioxide (SiO_2)	94.044
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	0.073
Iron Oxide (Fe_2O_3)	0.050
Calcium Oxide (CaO)	1.087
Magnesium Oxide (MgO)	0.133
Sulfur Trioxide (SO_3)	1.046

ลักษณะทางกายภาพและสัดส่วนคละของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม ที่นำมาใช้แสดงใน รูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

(ก) เถ้าลอย (ข) ตะกรันเหล็ก (ค) ซิลิกาฟูม

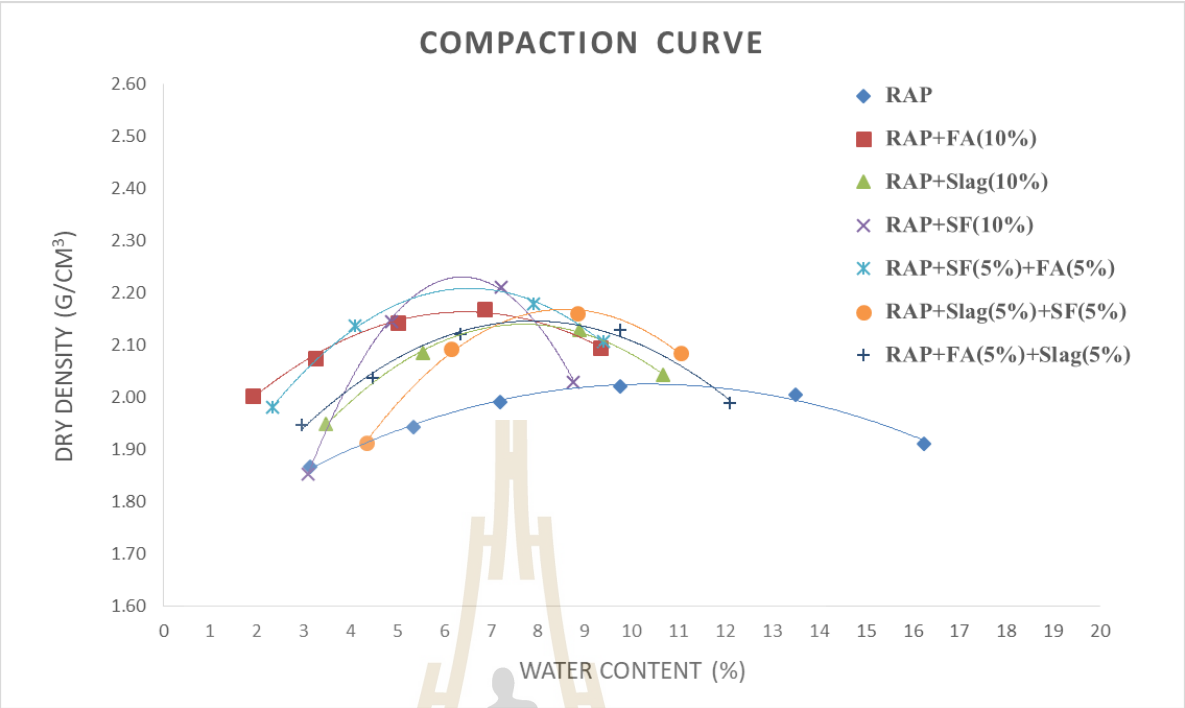
รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) เถ้าลอย, (ข) ตะกรันเหล็ก, (ค) ซิลิกาฟูม



รูปที่ 4.4 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม

4.2 ผลการทดสอบการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ การทดสอบการบดอัดดำเนินการเพื่อหาความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, $\rho_{d\,max}$) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) โดยนำมาผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในสัดส่วนที่เหมาะสม (ตัวเร่งปฏิกิริยาคือสัดส่วนผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต ความเข้มข้น 10 โมลาร์) รูปที่ 4.5 แสดงกราฟบดอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน สำหรับสัดส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1 (บทที่ 3)

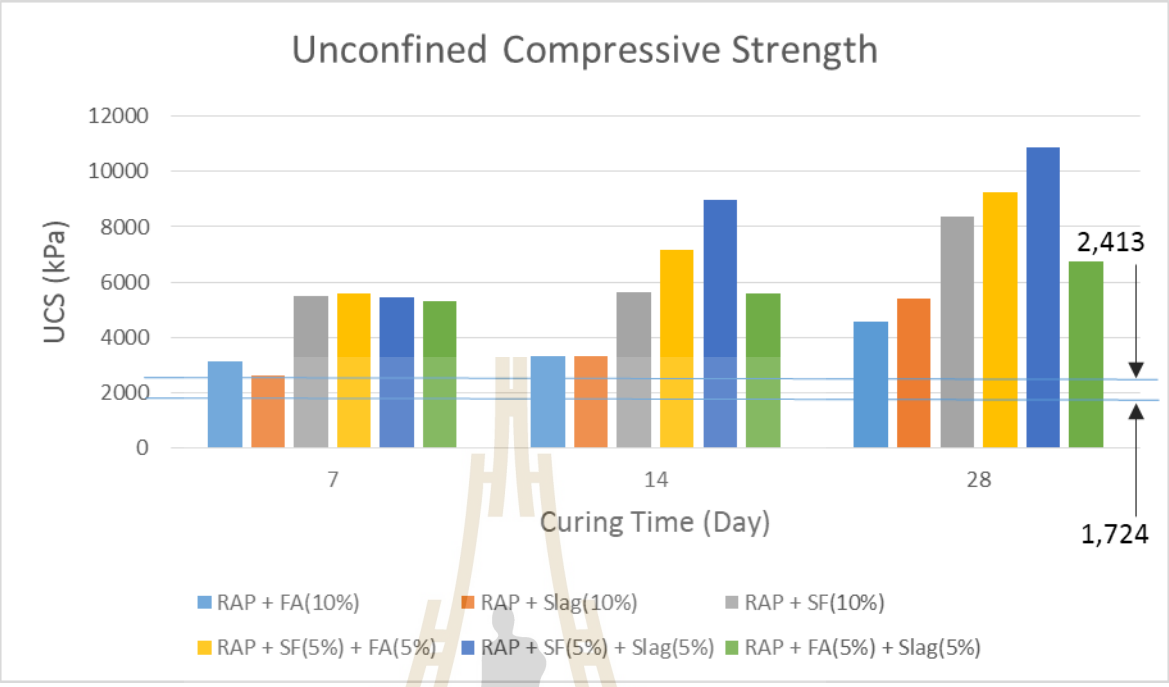


รูปที่ 4.5 กราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟการบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, $\rho_{d\,max}$) มีค่า 2.025, 2.165, 2.141, 2.228, 2.208, 2.166, และ 2.149 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) มีค่าเท่ากับร้อยละ 10.34, 6.46, 7.71, 6.37, 6.53, 8.56, และ 7.93 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ซิลิกาฟูมที่ 10 % มีความหนาแน่นแห้งมากที่สุดเมื่อเทียบกับเถ้าลอย และตะกรันเหล็ก ที่ 10 % และเมื่อนำซิลิกาฟูมที่ 5 % ผสมกับเถ้าลอย หรือตะกรันเหล็ก ที่ 5 % พบว่า ตัวที่ผสมซิลิกาฟูมจะมีค่าความหนาแน่นแห้งมากที่สุดเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ 5 % ผสมกับตะกรันเหล็กที่ 5% ส่วนผลที่มีต่อค่า OMC พบว่า การใช้อัตราส่วนเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม ผสมกับวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) มีค่าใกล้เคียงกัน

4.3 กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแบบแกนเดียว ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 303-2545 ที่อัตราส่วนผสม ((RAP+FA(10%), RAP+Slag(10%), RAP+SF(10%), RAP+SF(5%)+FA(5%), RAP+SF(5%)+ Slag(5%), RAP+FA(5%)+SF(5%)) ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ($NaOH : Na_2SiO_3 = 50 : 50$) อายุบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.6 ค่ากำลังอัดของ RAP ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ผสมเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ที่มีการพัฒนากำลังขึ้นตามอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน จากผลการทดลองที่อายุบ่ม 7 วัน ที่สัดส่วน (RAP+FA(10%), RAP+Slag(10%), RAP+SF(10%), RAP+SF(5%)+FA(5%), RAP+SF(5%)+Slag(5%), RAP+FA(5%)+SF(5%)) มีค่า 3,139.506, 2,638.241, 5,487.541, 5,566.688, 5,434.776, 5,302.864 kPa ที่อายุบ่ม 14 วัน มีค่า 3,324.183, 3,297.801, 5,645.835, 7,149.632, 8,970.019, 5,593.070 kPa และที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 4,590.539, 5,408.394, 8,389.606, 9,233.843, 10,882.743, 6,740.705 kPa ตามลำดับ พบว่า RAP ผสมซิลิกาฟูมมีค่ากำลังอัดสูงกว่า RAP ผสมเถ้าลอย และตะกรันเหล็ก เมื่อนำ RAP ผสมซิลิกาฟูมไปผสมเถ้าลอย หรือตะกรันเหล็กค่ากำลังอัดที่ได้สูงกว่า RAP ผสมเถ้าลอย และตะกรันเหล็ก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าที่ทำการทดลองมีค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง ที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244/2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล) ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

4.4 การเปรียบเทียบต้นทุน

การเปรียบเทียบต้นทุนของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ต่อกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP)

4.1 วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) วัสดุเหลือใช้ หมวดฯ นครราชสีมาที่ 1

4.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ราคา 480 บาทต่อตัน จาก แหล่งผลิตโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

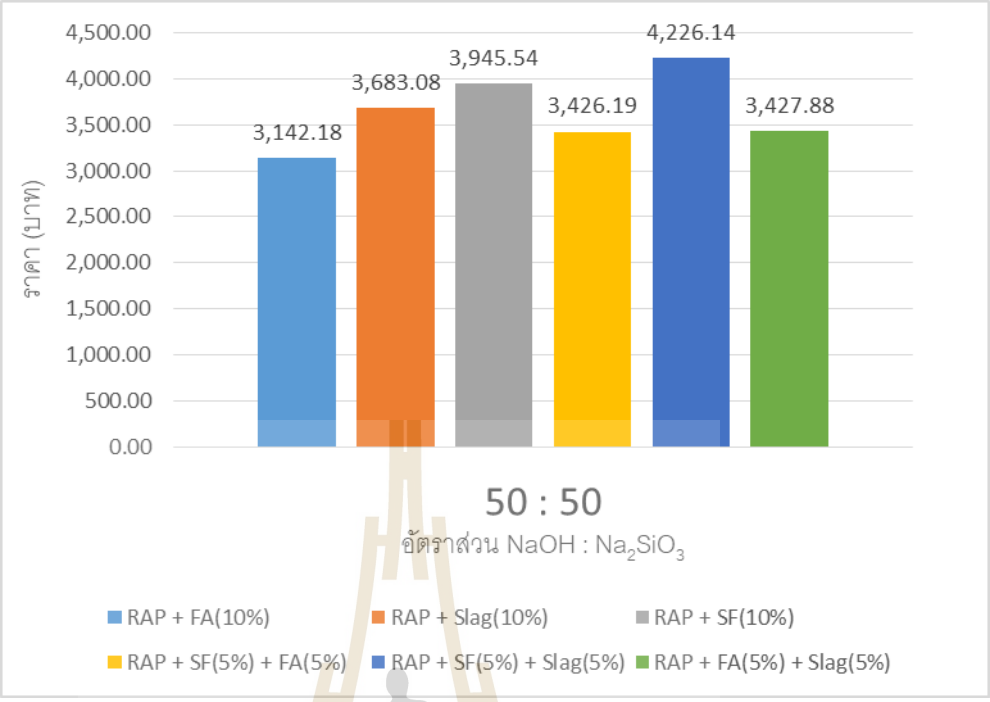
4.3 ตะกรันเหล็ก (Slag) ราคา 180 บาทต่อตัน บริษัท สยามสตีลมิลล์ เซอร์วิสเซส จำกัด จังหวัดชลบุรี

4.4 ซิลิกาฟูม (Silica Fume, SF) ราคา 12000 บาทต่อตัน บริษัท เอ็น.วี.เอ็น. ซัพพลาย จำกัด จังหวัดปทุมธานี

4.5 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ราคา 50 บาทต่อกิโลกรัม บริษัท วิโรฒวิทยาภัณฑ์ จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ใช้ผสมน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ต้นทุนจะลดลงเป็น 20 บาทต่อกิโลกรัม

4.6 สารโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ราคา 67.16 บาทต่อกิโลกรัม บริษัท วิโรฒวิทยาภัณฑ์ จำกัด จังหวัดนครราชสีมา

จากรูปที่ 4.7 แสดงต้นทุนวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ที่ส่วนผสมต่างๆ โดยคิดราคาจากปริมาณวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ 1,000 กิโลกรัม พบว่า อัตราส่วนที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 (ค่าที่ยอมให้ 2,413 kPa) และมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่าที่ยอมให้ 1,724 kPa) ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ที่อัตราส่วน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 50:50 สำหรับปริมาณเถ้าลอย (FA) เท่ากับร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) เท่ากับ 3,142.18 บาท



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงต้นทุนของ RAP ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์
ที่อัตราส่วน NaOH : Na_2SiO_3 50 : 50

การวิเคราะห์ต้นทุนต่อผลตอบแทน (Cost – Benefit Analysis) เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการเลือกใช้งานวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ รูปที่ 4.8 แสดงต้นทุนต่อกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ที่ส่วนผสมต่างๆ พบว่า

อัตราส่วนสารกระตุ้น NaOH : Na_2SiO_3 ที่อายุการบ่ม 7 วัน ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่ามากที่สุด ที่ปริมาณตะกรันเหล็ก (Slag) ร้อยละ 10

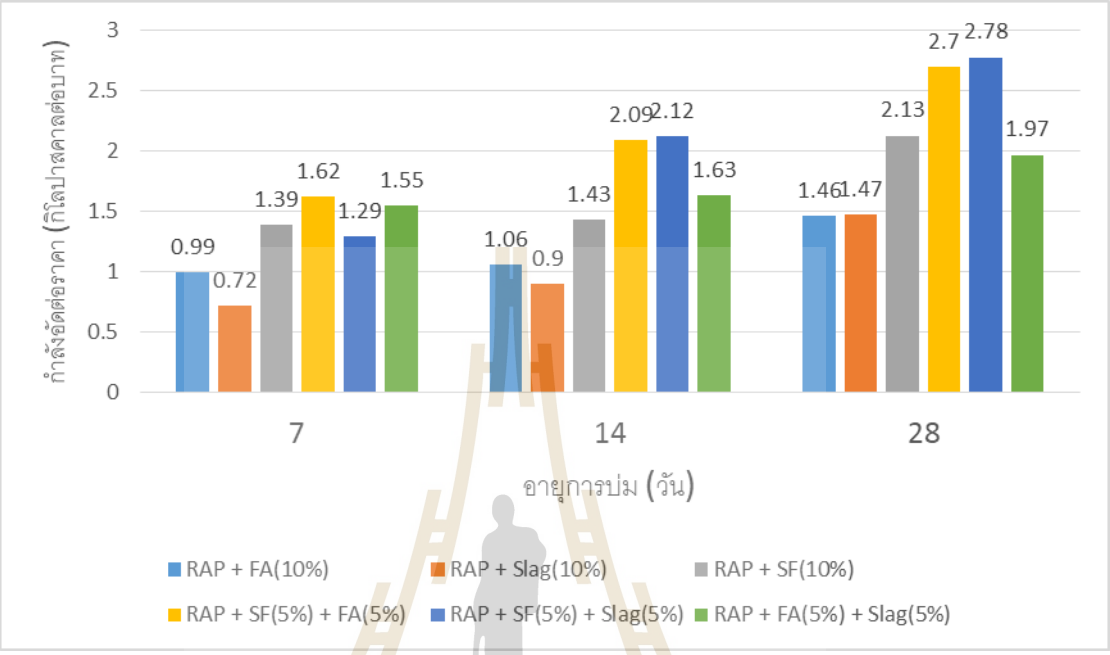
อัตราส่วนสารกระตุ้น NaOH : Na_2SiO_3 ที่อายุการบ่ม 14 วัน ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่ามากที่สุด ที่ปริมาณตะกรันเหล็ก (Slag) ร้อยละ 10

อัตราส่วนสารกระตุ้น NaOH : Na_2SiO_3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่ามากที่สุด ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash, FA) ร้อยละ 10

ต้นทุนต่อกำลังอัดคุ้มค่ามากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณตะกรันเหล็ก (Slag) ร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

โดยกำลังอัดต่อต้นทุนที่คุ้มค่ามากที่สุดของอัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง ที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐาน

งานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล) เท่ากับ 0.72 กิโลปาสคาลต่อบาท ที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณตะกรันเหล็ก (Slag) ร้อยละ 10



รูปที่ 4.8 ต้นทุนต่อกำลังอัดวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วนต่างๆ อายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงงานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาหน่วยน้ำหนักกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย (FA) ตะกรันเหล็ก (Slag) และซิลิกาฟูม (SF) จีโอโพลิเมอร์ โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล) ท้ายสุดจะเปรียบเทียบราคาของเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ต่อกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) เพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทางในงานก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต โดยประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน RAP+FA(10%), RAP+Slag(10%), RAP+SF(10%), RAP+SF(5%)+FA(5%), RAP+SF(5%)+Slag (5%) และ RAP+FA(5%)+Slag(5%) ที่ผสมด้วยสัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH : Na_2SiO_3 = 50 : 50 จากการทดลอง ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ทุกสัดส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 1,724 กิโลปาสคาล เป็นกำลังอัดสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรต่ำ (Light traffic) ที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดไว้ และ 2,413 กิโลปาสคาล ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดต่ำสุดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพหินคลุกซีเมนต์ สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรสูง (High traffic)

5.1.2 กำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม จีโอโพลิเมอร์ ที่ผ่านมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล) และกำลังอัดต่อต้นทุนคุ้มค่ามากที่สุด ปริมาณตะกรันเหล็ก (Slag) ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 7 วัน เท่ากับ 0.72 กิโลปาสคาลต่อบาท

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาหน่วยน้ำหนักกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และซิลิกาฟูม เพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างชั้นพื้นทาง เทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบท ผลการศึกษาสามารถนำมาขยายผล เพื่อที่จะนำวัสดุเหลือใช้อื่นๆ ในพื้นที่ต่างๆ ของประเทศ ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีปริมาณอลูมินา และซิลิกา มาใช้ปรับปรุงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (RAP) แทนได้ เช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย เป็นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวงชนบท. (2539). **มาตรฐานงานทาง Standard for highway construction** เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 1. กระทรวงคมนาคม.

กรมทางหลวงชนบท. (2543). **มาตรฐานวิธีการทดลอง Standard test methods** เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 1. กระทรวงคมนาคม.

ทล-ม. 203/2556 . (2558). **มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ กรมทางหลวง ประเทศไทย**, 2558.

ประจิต จิรัปปภา. (2523). **การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยจาการเผาลิกไนต์แม่เมาะโรงไฟฟ้า.**

ปูนซีเมนต์ไทย. (2527). **ปูนซีเมนต์ไทย บริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัดมหาชน.**

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร. (2528). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะ.**

มทช. 244-2556 . (2557). **มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ กรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย**,

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย วารสารคอนกรีต. (2550). ซิลิกาฟูม โยธาสาร ฉบับที่ 1 สิงหาคม 2550 ฉบับเดือน ตุลาคม 2542.

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. (2554). **ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และ คอนกรีตวารสารคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 6. ฉบับที่ 12 เมษายน 2554.

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. (2551). **วัสดุจีโอโพลิเมอร์.** วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 3 เมษายน 2551.

นิรชร นกแก้ว และคณะ. (2559). **สมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน.** วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 เลขหน้า 28-37.

วราวุธ เล็กวิเชียร. (2537). **การนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้งานใหม่ โดยใช้สารปรับสภาพในประเทศไทย.** กรุงเทพมหานคร ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย.

อาวุธ โพธิ์อุดม. (2553). **การศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer**. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีที่ 23 ฉบับที่ 74 เลขหน้า 87-96.

อาทิตย์ อินทรา. (2556). **อิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อกำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์.** วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 เลขหน้า 10-17.

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2549). **โยธาสาร.** กันยายน-ตุลาคม 2549.

Arulrajah et.al. (2016). **Stabilization of recycled demolition aggregates by geopolymers comprising calcium carbide residue, fly ash and slag precursors.** Construction and Building Materials, V. 114, 864-873.

American Concrete Institute. (2000). **ACI 116R-90: Cement and Concrete Terminology**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan, 2000.

American Concrete Institute. (2000). **ACI 233 R-95: Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete**, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan, 2000.

American Society for Testing and Materials, (2001). **ASTM C989-99 : Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars**, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 518-522.

C. Meyer. (2009). **The greening of the concrete industry**. Cement & Concrete Composites Res. 31 601–605.

Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. **Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer.** Cement and Concrete Composites 2006;29(3):224-229.

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

Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Dr. Hardjito and B. V. Rangan, Curtin University of Technology From Ancient Concrete to Geopolymer, Geopolymer Institute. (2005)

Geopolymer. (1999). International Conference and Publisher in the Proceeding of Geopolymer 99. http://www.Geopolymer.org, [13 December 2017].

Kuhlman, R.H. (1989). Soil-Cement from Recycled Pavement. **Concrete International Design and Construction.** 11(5): 35-38.

Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan, BV.(2003). **The effect of mixture composition and curing temperature on the compressive strength of fly ash-based**

geopolymer concrete. The Ninth East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, Indonesia, CMT 14-CMT 18.

Hench, L. (1998). **SOL-GEL SILICA.** Properties, Processing and Technology Transfer. Noyes Publication.

Hooton, R.D., and Emery, J.J. (1990). **Sulfate Resistance of a Canadian Slag**. ACI Materials Journal, 1990, V. 87, 547-555.

Menglim H, Horpibulsuk S, and Arulrajah A. (2016). **Strength development of Recycled Asphalt Pavement–Fly ash geopolymer as a road construction material.** Construction and Building Materials, V. 117, 209-219

Itthikorn Phummiphan et al. (2016). **Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer**, Road Materials and Pavement Design.

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.

30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs, Prof. Dr. Joseph Davidovits, Geopolymer Institute. (2002)

Tabensky, W. (1990). Road Recycling in US. **Shirr of Buln Buln Memo.** 83: 66-73. 65

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวคภวรรณ วิรุฬบุตร เกิดเมื่อวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2535 ที่อำเภอเมือง จังหวัดยโสธร จบการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลยโสธร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ ร้อยเอ็ด และสำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนยโสธรพิทยาคม และเข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2557 ปัจจุบันธุรกิจครอบครัวรับเหมาบรรทุกหิน ทราย เกี่ยวกับงานถนน จึงทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านบริหารงานก่อสร้าง เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้ให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2559 ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีความเข้าใจทางด้านการนำวัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้ว เช่น วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี