การปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

นายพงษ์พัฒน์ วังโน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

การปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

_____

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

_____

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)
กรรมการ

_____

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พงษ์พัฒน์ วังโน : การปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย (CALCIUM CARBIDE RESIDUE-FLY ASH STABILIZED RECYCLED ASPHALT PAVEMENT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท วัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลได้มาจากการรื้อผิวทางที่เสื่อมสภาพของถนนภายในจังหวัดนครราชสีมา กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้จาก บริษัท เอ็มไทย อินดัสเทรียล จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร เถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของเหลวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างมี 2 ชนิด ได้แก่ น้ำและสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ผลการทดสอบพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการบดอัดให้ปริมาณของเหลวเหมาะสม (OLC) สูงกว่าความชื้นเหมาะสม (OWC) ที่ได้จากการบดอัดโดยใช้น้ำประมาณสามเท่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วงได้แก่ ช่วงเพิ่มกำลัง (Active Zone) ซึ่งกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์จนถึงค่าสูงสุดที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 12 และช่วงลดกำลัง (Deterioration Zone) ซึ่งกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น โดยที่การบดอัดโดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตให้กำลังอัดสูงกว่าการบดอัดโดยใช้น้ำ ผลทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า การเติมเถ้าลอยในช่วงเพิ่มกำลังไม่ช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ขณะที่การเติมเถ้าลอยในช่วงลดกำลังกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกันทั้งการบดอัดโดยใช้น้ำและสารลายโซเดียมซิลิเกต เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท (กำลังอัดไม่น้อยกว่า 2,413 และ 1,724 กิโลปาสคาล ตามลำดับ) พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) บดอัดโดยใช้น้ำมีค่าต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ของทั้งสองมาตรฐานทุกตัวอย่าง ขณะที่การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ระหว่างร้อยละ 7 ถึง 15 ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานของทั้งกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทโดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้เถ้าลอย

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

PONGPAT WANGNO : CALCIUM CARBIDE RESIDUE-FLY ASH STABILIZED RECYCLED ASPHALT PAVEMENT. ADVISOR : ASST. PROF. PREEYAPHORN KOSA, Ph.D.

This research presents the possibility using Calcium Carbide Residual (CCR) and Fly- Ash (FA) for improving the compressive strength of Recycled asphalt Pavement (RAP) to meet the standard requirements for base material specified by the Department of Highway (DOH) and Department of Rural Road (DRR), Thailand. RAP was obtained from the pavement recycling project in Nakhon Ratchasima Province. CCR from M Thai Industrial Co., Ltd., Samut Sakhon Province and FA from Mae Moh power plant in Lampang Province were used in this study. Two types of liquid were used for compacting samples including water and sodium silicate solution (Na_2SiO_3). Compaction test results indicate that the Optimum Liquid Content (OLC) of RAP with sodium silicate solution is 3 times higher than the Optimum Water Content (OWC) of RAP with water. The relationship between Unconfined Compressive Strength (UCS) and CCR content is classified into two zones; active and deterioration. In the active zone, the strength increases with increasing the CCR content and reaches the maximum UCS value at CCR = 12%. In the deterioration zone, the strength decreases with CCR content increases. UCS test result of both the samples compacted FA-CCR-RAP with water and sodium silicate solution show that the input FA in the active zone does not improve the UCS values. For the deterioration zone, the UCS value slightly increases with FA content increases. By comparing the measured 7-day UCS to the specified strength requirement for base material of the DOH and DRR, all the samples compacted FA-CCR-RAP with water do not meet the specified requirement for both standards. While 7-day UCS of the samples with sodium silicate solution can pass the both requirements for CCR content between 7 to 15% (without FA).

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2017 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานมหาบัณฑิตฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบคุณ กลุ่มบุคคล และ หน่วยงานต่างๆ ที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษา ช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินโครงงาน อาทิเช่น ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานมหาบัณฑิตซึ่งเป็นบุคคลสำคัญอย่างยิ่งที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือในด้านต่างๆจนโครงงานมหาบัณฑิตฉบับนี้สำเร็จด้วยดี ขอขอบคุณ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ คุณวิษณุกร สมิงทอง ที่คอยแนะนำให้คำปรึกษา ในการเขียนและตรวจทานโครงงานมหาบัณฑิตจนแล้วเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณ พนักงานผู้ดูแลห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงงานมหาบัณฑิต

พงษ์พัฒน์ วังโน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูปภาพ ..... ช
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 3
2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 บทนำ 4
2.2 มาตรฐานงานหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (Pavement in –Place recycle) 4
2.2.1 ขอบข่าย 4
2.2.2 วัสดุ 4
2.2.3 เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้าง 5
2.2.4 การออกแบบปรับปรุงชั้นทางเดิม 7
2.2.5 การเตรียมการก่อสร้าง 8
2.2.6 การตรวจสอบความชื้นของวัสดุชั้นทางเดิม 8
2.2.7 การก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม 8
2.2.8 การก่อสร้าง 9
2.2.9 การตรวจสอบชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วเสร็จ 13
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 14
2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 19
2.3.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 19
3 วิธีดำเนินการวิจัย 20

3.1 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง 20
3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ 20
3.3 การเตรียมก่อนตัวอย่างทดสอบ 21
3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว 21
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 21
4 ผลการศึกษา 23
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมหยาบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) 23
4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ 23
4.1.2 การกระจายขนาด 23
4.1.3 ปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมี 24
4.1.4 ขนาดและรูปร่าง 26
4.2 กำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) 27
4.3 ผลการคำนวณต้นทุน 32
5 บทสรุป 33
5.1 สรุปผลงานโครงงานวิจัย 33
เอกสารอ้างอิง 35
ประวัติผู้เขียน 38

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ มวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอย และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 25

4.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618 25

4.3 ปริมาณการใช้วัสดุและราคาต่อ1ตัน 32

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย	22
4.1	ร้อยละของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล(RAP) ที่ผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน (SieveAnalysis)	24
4.2	(a) ภาพวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และรูป (b) ภาพวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) รูป (c) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) (d) ภาพเถ้าลอย (Fly ash) ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า	26
4.3	ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น ของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล	27
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและปริมาณของเหลว (Na2SiO3) ของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล	28
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และก้อนตัวอย่าง ที่ผสมด้วยกาก แคลเซียมคาร์ไบด์	28
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังอัดและ% ของเถ้าลอย (FA)	29
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนตัวอย่าง ที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และโซเดียมซิลิเกต	30
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)	32

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประชากรมีอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเช่นเดียวกัน ความต้องการในสิ่งอำนวยความสะดวก สาธารณูปโภคทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นที่อยู่อาศัย การคมนาคม เป็นต้น ทำให้เกิดความต้องการในทุกๆด้าน และมีปัจจัยที่สำคัญคือ การคมนาคม ในปัจจุบันมีการก่อสร้างถนนต่างๆ และปรับปรุงถนนผิวทาง ตามความต้องการใช้ท้องถนนจากปริมาณรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร และเมื่อประชากรมากขึ้น การใช้ถนนเส้นทางการคมนาคมก็มากขึ้นเช่นกัน เมื่อมีการใช้งานที่มากขึ้น มักจะเกิดความเสียหาย เนื่องจากการรับน้ำหนักของยานพาหนะ การเสื่อมสภาพเองของวัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงของ ภูมิอากาศ เช่น การหลุดร่อน การเกิดร่องล้อ และรอยแตกแบบต่างๆ ถ้าไม่มีการซ่อมแซม บำรุงรักษา ถนนจะเกิดความเสียหายมากขึ้น ส่งผลกระทบด้านการสัญจรแก่ผู้ใช้ถนน อาจส่งผลเสียให้เกิดอุบัติเหตุและอาจสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินได้ ในกรณีที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพจะถูกรื้อและนำทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ ปัจจุบันผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีได้รับความนิยมนำกลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมสำหรับงานก่อสร้างทาง เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดของแต่ละหน่วยงานที่กำหนด มีความพยายามที่จะใช้ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ผสมกับวัสดุมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติสำหรับการใช้งานในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนน อย่างไรก็ตามบ่อยครั้งที่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมนั้นยังไม่ถึงข้อกำหนดของหน่วยงานที่ต้องการ (Arulrajah et al., 2011, Taha et al., 1999) Saride et al. (2014) ได้ศึกษาเถ้าลอย (Fly Ash)ในการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)โดยการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่แตกต่างกัน นักวิจัยจำนวนมากได้รายงานการใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)ได้เป็นที่น่าพอใจ (Hoyos et al., 2011, Taha et al., 2003 Taha et al., 2002, Puppala et al., 2011) อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสาเหตุของสภาวะโลกร้อน เนื่องจากมีการปลดปล่อยก๊าสคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นจำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศ Davidovits et al., (2013) ได้แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 0.55 ตัน และยังต้องการ การเผาไม้เชื่อเพลิงคาร์บอนซึ่งก่อให้เกิดให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ 0.4 ตัน ดังนั้นในการผลิตการปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งสิ้นประมาณ 1 ตัน ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นจะต้องใช้วัสดุทดแทน

ปูนซีเมนต์ ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้วัสดุที่ทดแทนการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย (Fly Ash) โดยที่เถ้าลอยมีมากเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็น วัตถุดิบในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่ง สามารถนามาใช้ ในงานวิศวกรรมโยธาได้

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเพื่อใช้งานเป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้างทาง โดยจะศึกษากำลังลังอัดของ ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ปริมาณเถ้าลอย และ ผลการศึกษาจะถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง เพื่อเป็นข้อมูลในการสนับสนุนให้มีการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกใหม่ในการใช้วัสดุดังกล่าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการกำลังรับแรงอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) และปริมาณความชื้น (น้ำ)

1.2.2 เพื่อศึกษาการกำลังรับแรงอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

1.2.3 เพื่อหาอัตราส่วนผสม วัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash)

1.3.2 บดอัดตัวอย่างมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) และหนาแน่นแห้งสูงสุด $\gamma_{d,max}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.3 บดอัดตัวอย่างมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) เพื่อหาค่าปริมาณของเหลวเหมาะสม (OLC)

1.3.4 บดอัดวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยใช้ปริมาณความชื้นเท่ากับปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) และปริมาณของเหลวเหมาะสม (OLC) ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ร้อยละ 0 3 5 7 10 15 20 25 30 40 และ 50 ของน้ำหนักรวมของตัวอย่าง แล้วทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน หลังจากนั้นถูกนำไปทดสอบกำลังรับแรงกด บันทึกผล วิเคราะห์ผล สรุป เพื่อหาปริมาณ (CCR) ที่จะใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป

1.3.5 นำวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เถ้าลอย (Fly Ash) ที่บดอัดที่ความชื้นกับปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) ตามข้อ 1.3.2 และปริมาณของเหลวเหมาะสมตามข้อ 1.3.3 โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่ได้จากข้อ 1.3.4 จำนวน 3 ค่า (เลือกในช่วง Active zone และ Deterioration zone) ใช้เถ้าลอย (Fly Ash) ให้มีอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 20 25 30 40 และ 50 ของน้ำหนักกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แล้วทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน หลังจากนั้นถูกนำไปทดสอบหากำลังรับแรงกด บันทึกผล วิเคราะห์ผล ต่อไป

1.3.6 เปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อกำหนดในการก่อสร้างทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เพื่อช่วยลดปริมาณวัสดุและต้นทุนในงานก่อสร้างได้

1.4.2 ทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) และสามารถวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้

บทที่ 2
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของผิวทางปรับปรุงกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) ด้วยวิธีการรับแรงอัดตามแนวแกน การซ่อมบำรุงถนนที่ชำรุด เทคนิคหนึ่งของกรมทางหลวงชนบทคือการนำวัสดุโครงสร้างของทางเดิมมาหมุนเวียนใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) การบูรณะทางหลวงชนบทเกิดความคุ้มค่าสูงสุด และมีอายุการใช้งานได้ยาวนาน การหา ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะการบ่ม และทดสอบกำลังรับแรงอัด เป็นการพัฒนาการบูรณะทางผิวทางแอสฟัลต์อีกทางหนึ่งที่จะท้าให้การดำเนินงานซ่อมผิวทางด้วยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ ที่มีประสิทธิภาพ

2.2 มาตรฐานงานหมุนเวียนชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (pavement in – place recycling) (มทช.242-2555)

2.2.1 ขอบข่าย

งานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ (pavement in - place recycling) หมายถึง การนำวัสดุชั้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนากลับไปใช้งานใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพทำในสายทางที่จะดำเนินการก่อสร้าง เพื่อให้มีคุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด

2.2.2 วัสดุ

- วัสดุชั้นทางเดิม หมายถึง วัสดุที่ได้จากการขุดรื้อขูดไสจากชั้นทางเดิมแล้วให้ร่วนถึงความลึกตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งอาจจะประกอบด้วยผิวลาดยาง หิน คลุก ลูกรัง แล้วแต่สภาพของสายทางที่จะดำเนินการก่อสร้าง ในกรณีวัสดุชั้นทางเดิมมีขนาดคละที่ไม่เหมาะสม หรือคุณสมบัติอื่น ไม่ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด ให้แก้ไขปรับปรุงหรือนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสม เพื่อให้ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด
- วัสดุผสมเพิ่ม จะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม และเข้ากันได้ดีกับวัสดุชั้นทางเดิมหรือวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นที่นำมาใช้งาน เพื่อทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมมีความแข็งแรง เป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด

วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละ และ/หรือ เพิ่มปริมาณ หมายถึง วัสดุจากแหล่งอื่นที่นำมาผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อปรับปรุงขนาดคละและ/หรือเพิ่มปริมาณ ให้ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด เช่น หิน ทราย และวัสดุมวลรวม (soil Aggregate) เป็นต้น

- วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ หมายถึง วัสดุที่นำมาผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งต้องเป็นชนิดที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดต่อไปนี้ หากเป็นชนิดอื่นต้องได้รับความเห็นชอบก่อนนำไปใช้งาน
  - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และต้องเป็นปูนซีเมนต์ใหม่บรรจุอยู่ในถุงหรืออยู่ในไซโล
  - ปูนขาว ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.241:ปูนขาวสำหรับงานก่อสร้าง
  - เถ้าลอย ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2135: เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต
  - แอสฟัลต์ ต้องเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุง และต้องเป็นชนิดเดียวกันตลอดงาน
  - วัสดุผสมเพิ่ม อาจนำมาออกแบบส่วนผสมรวมกันได้ แต่ต้องเหมาะสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุง และส่วนผสมต้องได้คุณภาพตามรูปแบบและข้อกำหนด ทั้งนี้ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบท เป็นแต่ละกรณี
- สารผสมเพิ่ม (Admixture) ต้องเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุง และผู้รับจ้างต้องเสนอเอกสารคุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม ให้กรมทางหลวงชนบทพิจารณาก่อนน้ำไปใช้งาน
- น้ำที่จะนำมาใช้ผสมหรือบ่มชั้นทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพ ต้องเป็นน้ำสะอาด ปราศจากสารที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชั้นทางที่ปรับปรุง และต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานก่อนน้ำมาใช้งาน

2.2.3 เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้าง

ชุดเครื่องจักร เครื่องมือที่จะนามาใช้ในการก่อสร้าง ต้องผ่านการตรวจสอบและขึ้นทะเบียนกับกรมทางหลวงชนบท ผู้รับจ้างจะต้องจัดชุดเครื่องจักร เครื่องมือไว้ให้พร้อมที่สถานที่ก่อสร้าง เพื่อรับการตรวจสอบหรือสอบเทียบ (calibrate) จากผู้ควบคุมงาน ตามวิธีการที่กรมทางหลวงชนบทกำหนด หากเครื่องจักร เครื่องมือใดไม่ผ่านการตรวจสอบหรือสอบเทียบ ผู้รับจ้างจะต้องแก้ไขหรือจัดหาเครื่องจักร เครื่องมือที่ขึ้นทะเบียนกับกรมทางหลวงชนบท และผ่านการตรวจสอบหรือสอบเทียบมาเปลี่ยนหรือเพิ่ม ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของผู้ควบคุมงาน และชุด

เครื่องจักร เครื่องมือต้องมีความเหมาะสมกับงานทั้งชนิด ขนาดและจำนวน มีขีดความสามารถพอที่จะดำเนินการก่อสร้างได้ถูกต้องตามรูปแบบและข้อกำหนดให้แล้วเสร็จในแต่ละวัน ในระหว่างการก่อสร้างผู้รับจ้างจะต้องบำรุงรักษาเครื่องจักร เครื่องมือให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ดีมีประสิทธิภาพตลอดเวลา ซึ่งเครื่องจักรที่จะต้องนำมาใช้งานมีดังนี้

- ชุดเครื่องจักรผสมวัสดุ อาจเป็นชนิดที่แยกการทำงานเฉพาะอย่าง เช่น เครื่องจักรขุดตัดผสม (reclaimer / stabilizer) เครื่องจักรขูดไส (milling machine) และ/หรือเป็นชนิดทำงานเสร็จในตัว เช่น เครื่องจักรขุดผสมพร้อมปูวัสดุ (cold recycler) หรือเครื่องจักรอื่นใดที่มีลักษณะการทำงานพิเศษเหมาะสมกับงาน เครื่องจักรขุดผสมจะต้องมีระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ สามารถขุดตัดหรือขูดไสชั้นทางเดิมได้ความลึกตามที่กำหนด และสามารถผสมวัสดุชั้นทางเดิมกับวัสดุใหม่ให้เข้ากันได้อย่างสม่ำเสมอ
- เครื่องจักรปูวัสดุ ต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีกำลังมากพอและควบคุมความเร็วในการปูได้อย่างสม่ำเสมอ สามารถปูวัสดุให้มีผิวเรียบและปูวัสดุในระดับลาดเอียงได้ตามรูปแบบที่กำหนด โดยมีอุปกรณ์ควบคุมระดับความลาดเอียงอัตโนมัติ
- เครื่องจักรบดทับ จะต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีชนิดและขนาด ดังนี้
  - เครื่องบดทับสั่นสะเทือนขนาดไม่น้อยกว่า 17.5 ตัน
  - รถบดล้อยางชนิดล้อเรียบขนาดไม่น้อยกว่า 8 ตัน

สามารถบดทับชั้นทางให้ได้ความแน่นตามรูปแบบและข้อกำหนด โดยมีจำนวนมากพอที่จะดำเนินการก่อสร้างไปอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ การกำหนดชนิดและน้ำหนักของเครื่องจักรบดทับ ให้พิจารณาจากการก่อสร้างแปลงทดสอบในสนามเป็นหลัก ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน

- ชุดเครื่องจักรประกอบการก่อสร้าง
- เครื่องจักรเกลี่ยปรับระดับ ต้องเป็นชนิดขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง มีขนาดและกำลังมากพอที่จะเกลี่ยปรับระดับวัสดุให้ได้ตามรูปแบบที่กำหนด
- รถบรรทุก ต้องเป็นชนิดและขนาดที่เหมาะสมกับงาน มีจำนวนมากพอกับปริมาณงาน เพื่อให้การก่อสร้างดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง
- เครื่องจักรอุปกรณ์เกี่ยวกับวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพหรือน้ำประกอบด้วยรถบรรทุกที่ติดตั้งถังหรือยุ้งบรรจุวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุง

คุณภาพแต่ละชนิด และ/หรือน้ำ หรืออาจเป็นรถบรรทุกที่ติดตั้งถังหรือยุ้งบรรจุแยกวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิดและน้ำรวมในรถบรรทุกคันเดียวกันก็ได้ โดยรถบรรทุกดังกล่าวจะต้องมีถังหรือยุ้งขนาดบรรจุเหมาะสมกับงาน อีกทั้งมีอุปกรณ์ควบคุมปริมาณการจ่ายวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิด และ/หรือ น้ำ ที่เที่ยงตรง สม่ำเสมอ ตามที่กำหนด

- ถังบรรจุแอสฟัลต์ ต้องเป็นถังชนิดที่ติดตั้งบนรถบรรทุก มีขนาดความจุมาพอที่จะป้อนแอสฟัลต์ได้อย่างต่อเนื่องขณะที่ก่อสร้าง ถังบรรจุต้องมีสภาพดี ไม่รั่วซึม และต้องมีอุปกรณ์ที่จำเป็นดังต่อไปนี้
- มีฉนวนกันความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของแอสฟัลต์
- มีช่องสำหรับน้ำแอสฟัลต์เข้า -ออก และมีวาล์วควบคุม
- มีอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณแอสฟัลต์ ที่วัดได้ละเอียดเหมาะสมกับงาน
- มีระบบให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ สามารถเพิ่มอุณหภูมิแอสฟัลต์ในอัตราที่เหมาะสมได้อย่างทั่วถึงตามที่กำหนด
- มีอุปกรณ์แสดงการวัดอุณหภูมิแอสฟัลต์ติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม หรือ ที่ระยะความสูง 1 ใน 3 จากก้นถังบรรจุ
- เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์อื่นใด นอกเหนือจากที่ได้กำหนดไว้ข้างต้นแล้ว ก่อนจะนำมาใช้งานต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน
- ผู้รับจ้างต้องจัดหา เครื่องมือ และอุปกรณ์การทดสอบที่ได้มาตรฐาน มีสภาพพร้อมใช้งานเพื่อใช้ในการทดสอบและตรวจสอบคุณภาพ ตามที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดจนกว่างานก่อสร้างจะแล้วเสร็จ

2.2.4 การออกแบบปรับปรุงชั้นทางเดิม

- การออกแบบทั่วไป หมายถึง ข้อแนะนำที่ให้ไว้เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาในการออกแบบ โดยมีหัวข้อแนะนำต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
- การปรับปรุงชั้นทางเดิมเป็นชั้นทางใหม่ สามารถนำวัสดุชั้นทางเดิมใด ๆ ที่เหมาะสมมารวมกันเพื่อปรับปรุงให้เป็นชั้นทางใหม่ก็ได้
- การปรับปรุงชั้นทางเดิมแบบในที่ ถ้าผิวทางแอสฟัลต์เดิมมีความหนามากเกินขีดความสามารถของเครื่องจักรขุดผสมที่จะดำเนินการได้ดี ให้ขูดผิวทางส่วนที่มีความหนาเกินออก
- การออกแบบส่วนผสม ก่อนเริ่มงานไม่น้อยกว่า 2 สัปดาห์ ผู้ควบคุมงานและผู้รับจ้างต้องร่วมกันเจาะเก็บตัวอย่างวัสดุชั้นทางเดิมที่จะปรับปรุงทุกระยะ 1

กิโลเมตร หรือเมื่อคุณสมบัติของวัสดุชั้นโครงสร้างทางเปลี่ยนแปลงไป โดยแยกออกเป็นชั้นๆ เช่น ชั้นผิวทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นรองพื้นทาง ส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสม หากในระหว่างก่อสร้างวัสดุชั้นทางเดิมเปลี่ยนแปลงไปจากที่นำมาออกแบบส่วนผสม ผู้รับจ้างจะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขหรือเก็บตัวอย่างวัสดุ ส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่ โดยผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

- การออกแบบส่วนผสม สามารถจะกำหนดข้อกำหนดพิเศษเพื่อให้เหมาะสมกับงานแต่ละโครงการได้ โดยพิจารณาจากสภาพการใช้งาน ราคาค่าก่อสร้าง วัสดุท้องถิ่น และสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ต้องเป็นไปตามหลักวิชาการ

2.2.5 การเตรียมการก่อสร้าง

ก่อนการก่อสร้างต้องกำจัดวัชพืชและวัสดุที่ไม่พึงประสงค์ ออกจากแนวพื้นที่ที่จะก่อสร้าง พร้อมทั้งปรับระดับผิวถนนเดิมให้เรียบสม่ำเสมอ และกำหนดแนวขุดตัดตามยาวไว้บนผิวชั้นทางเดิม ในกรณีที่มีความเสียหายหรือมีจุดอ่อนตัวของชั้นดินเดิมใต้ชั้นทางที่จะปรับปรุง ให้ขุดรื้อวัสดุแต่ละชั้นทางที่จะปรับปรุงออกน้ำไปกองแยกไว้ไม่ให้ปะปนกัน จากนั้นให้ขุดรื้อวัสดุชั้นทางที่เป็นปัญหาออก แล้วแทนที่ด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ต่ำกว่ามาตรฐานของชั้นนั้นๆ ตามที่กรมทางหลวงชนบทกำหนด บดทับให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด แล้วจึงนำวัสดุแต่ละชั้นทางที่กองแยกไว้กลับมาปูลงเป็นชั้นๆ พร้อมบดทับทีละชั้นให้ได้ความแน่นตามข้อกำหนด โดยความหนาของชั้นวัสดุที่บดทับแต่ละชั้นไม่มากกว่า 20 เซนติเมตร

2.2.6 การตรวจสอบความชื้นของวัสดุชั้นทางเดิม

ก่อนเริ่มการก่อสร้างไม่เกิน 1 สัปดาห์ ผู้รับจ้างร่วมกับผู้ควบคุมงานต้องเจาะเก็บตัวอย่างชั้นทางเดิมที่จะก่อสร้าง เพื่อตรวจสอบหาปริมาณความชื้นทุกระยะ 500 เมตร หรือทุกระยะที่ปริมาณความชื้นมีเปลี่ยนแปลง และหากวันที่ตรวจสอบหาปริมาณความชื้น มีระยะเวลาห่างจากวันที่เริ่มการก่อสร้างนานเกิน 1 สัปดาห์ หรือมีเหตุซึ่งอาจจะทาให้ปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงไป ให้ผู้รับจ้างเจาะเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบหาปริมาณความชื้นใหม่ ในกรณีที่วัสดุชั้นทางเดิมมีความชื้นสูงเกินไป ผู้รับจ้างจะต้องแก้ไขให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และวิธีการแก้ไขต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน

2.2.7 การก่อสร้างแปลงทดสอบในสนาม

ผู้รับจ้างต้องก่อสร้างแปลงทดสอบในสนามโดยมีความยาวไม่น้อยกว่า 100 เมตร มีความกว้างไม่น้อยกว่า 1 ช่องจราจร เพื่อใช้เป็นแบบอย่างในการก่อสร้าง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุ เครื่องจักร เครื่องมือ หรือผู้รับจ้างไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างให้ถูกต้องตาม

รูปแบบและข้อกำหนด ให้ผู้รับจ้างดำเนินการก่อสร้างแปลงทดสอบใหม่จนกว่าจะได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานก่อนใช้แปลงทดสอบนั้นเป็นแบบอย่างในการก่อสร้างต่อไป

2.2.8 การก่อสร้าง

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

- การดำเนินการก่อสร้างให้ใช้เครื่องจักร เครื่องมือในข้อ 3 ซึ่งได้ผ่านการตรวจสอบรับรองและตรวจปรับจากผู้ควบคุมงานแล้ว ขั้นตอนการก่อสร้างจะต้องสอดคล้องกับลักษณะวิธีการก่อสร้าง
- การเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละและ/หรือเพิ่มปริมาณ ท้าได้โดยการปูเกลี่ยลงบนถนนเดิมก่อนการขุดผสม ทั้งนี้เมื่อ ก่อสร้างแล้วเสร็จ ชั้นวัสดุที่ปรับปรุงแล้วต้องเรียบ มีความลาดเอียง มีความแน่น มีความหนา และมีคุณภาพสม่ำเสมอ ได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด
- การเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ เครื่องจักร เครื่องมือที่ใช้ต้องสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ และเหมาะสมตามลักษณะงาน ไม่ปูเกลี่ยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพชนิดที่เป็นผงในขณะที่มีลมแรงท้าให้วัสดุปลิวสูญหาย ซึ่งจะกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน ในกรณีที่วัสดุชั้นทางเดิมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่เคยน้าไปออกแบบส่วนผสม หรือมีสาเหตุอื่นที่อาจท้าให้อัตราส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไป ให้ผู้ควบคุมงานน้าวัสดุชั้นทางเดิมไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น วิธีการเติมวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิดท้าได้ ดังนี้
- การเติมปูนซีเมนต์ผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องเติมในอัตราส่วนที่กำหนดซึ่งปูนซีเมนต์ที่ใช้ควรเป็นเครื่องหมายการค้าเดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุจ้าเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ปูนซีเมนต์เครื่องหมายการค้าอื่น ผู้รับจ้างต้องส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่และเสนอให้ผู้ควบคุมงานพิจารณา ในกรณี

ที่ปูนซีเมนต์เก็บไว้นานหรือเก็บรักษาไว้ในที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจท้าให้ปูนซีเมนต์เสื่อมคุณภาพ ให้ผู้ควบคุมงานระงับการน้ามาใช้งาน หากประสงค์จะน้ามาใช้งานใหม่ ให้น้าปูนซีเมนต์ไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น

- การเติมปูนขาวผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ในกรณีที่แบบกำหนดให้ใช้ปูนขาวต้องเติมในอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งปูนขาวที่ใช้ควรเป็นเครื่องหมายการค้าเดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุจ้าเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ปูนขาวเครื่องหมายการค้าอื่น ผู้รับจ้างต้องเก็บตัวอย่างส่งให้กรมทางหลวงชนบทออกแบบส่วนผสมใหม่และเสนอผู้ควบคุมงานพิจารณา ในกรณีที่ปูนขาวเก็บไว้นานหรือเก็บรักษาไว้ในที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจท้าให้ปูนขาวเสื่อมคุณภาพ ให้ผู้ควบคุมงานระงับการน้ามาใช้งาน หากประสงค์จะน้ามาใช้งานใหม่ ให้น้าปูนขาวไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น
- การเติมเถ้าลอยผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ในกรณีที่แบบกำหนดให้ใช้เถ้าลอยต้องเติมในอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งเถ้าลอยที่ใช้ควรเป็นแหล่งเดียวกันตลอดงาน หากมีเหตุจ้าเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้เถ้าลอยจากแหล่งอื่น ผู้รับจ้างต้องออกแบบส่วนผสมใหม่และเสนอผู้ควบคุมงานเพื่อพิจารณา ในกรณีที่เถ้าลอยมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ให้ผู้ควบคุมงานระงับการนำมาใช้งาน หากประสงค์จะนำมาใช้งานใหม่ ให้น้าเถ้าลอยไปตรวจสอบคุณภาพและออกแบบส่วนผสมใหม่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ผู้รับจ้างเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น
- การเติมแอสฟัลต์ผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องเติมในขั้นตอนขุดตัด หรือขั้นตอนผสม โดยการสูบจ่ายจากรถบรรทุกแอสฟัลต์ ซึ่งต้องคงอุณหภูมิของแอสฟัลต์ไว้ที่ ± 5 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิของแอสฟัลต์ที่กำหนด เครื่องมือและอุปกรณ์การจ่ายแอสฟัลต์จะต้องสามารถปรับปริมาณแอสฟัลต์ให้สัมพันธ์กับการท้างานของเครื่องจักร หรือปริมาณวัสดุผสมได้โดยอัตโนมัติ ในอัตราที่กำหนด แอสฟัลต์ที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเฉพาะงาน และควรเป็นแหล่งผลิตและชนิดเดียวกันตลอดงาน ซึ่งผู้รับจ้างต้องระบุแหล่งผลิตและชนิดของแอสฟัลต์ที่น้ามาใช้งาน หากมีเหตุจำเป็นต้องเปลี่ยนแหล่งผลิตหรือชนิดแอสฟัลต์ ให้ผู้ควบคุมงานเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปออกแบบส่วนผสมใหม่ก่อนอนุมัติให้นำมาใช้งาน

- การเติมแอสฟัลต์อิมัลชันผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องตรวจสอบเวลาการแตกตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันในวัสดุที่ปรับปรุงแล้ว โดยเก็บตัวอย่างส่วนผสมทันทีหลังขั้นตอนการขุดตัดและผสม เพื่อนำไปตรวจสอบ ในกรณีที่แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัวก่อนการบดทับเสร็จสิ้น ให้หยุดการก่อสร้างไว้ก่อนเพื่อดำเนินการปรับแก้โดยในแปลงถัดไปอาจนาแอสฟัลต์อิมัลชันที่มีระยะเวลาการแตกตัวยาวนานกว่ามาใช้ในการก่อสร้างแทน หรือเร่งการบดทับให้แล้วเสร็จก่อนที่แอสฟัลต์อิมัลชันแตกตัว ส่วนแปลงที่เกิดความเสียหายแล้วให้ทำ การรื้อแก้ไขใหม่ให้ถูกต้อง ทั้งนี้ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน
- การเติมโฟมแอสฟัลต์ผสมกับชั้นทางที่ปรับปรุง ต้องตรวจสอบลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากหัวฉีดทดสอบ และตรวจสอบส่วนผสมวัสดุที่ปรับปรุงแล้วทันทีตลอดความกว้างของการปู หากปรากฏว่าวัสดุที่ปรับปรุงแล้วมีคุณภาพไม่เป็นไปตามข้อกำหนด จะต้องหยุดการก่อสร้างไว้ก่อน จนกว่าจะปรับแก้ได้ถูกต้องตามข้อกำหนด จึงอนุญาตให้ดาเนินการก่อสร้างต่อไปได้
- การเติมสารเคมี หากผู้ผลิตไม่กำหนดเป็นอย่างอื่น ให้ดำเนินการดังนี้
- การเติมสารเคมีชนิดที่เป็นผง ทำได้โดยการใช้เครื่องจักรปูเกลี่ยลงบนชั้นทางเดิมก่อนการขุดผสม ถ้าเครื่องจักรเข้าปูเกลี่ยไม่ได้ให้ใช้แรงคนแทน การปูเกลี่ยต้องทำสม่ำเสมอเต็มความกว้างของการขุดผสมแต่ละเที่ยว
- การเติมสารเคมีชนิดที่เป็นของเหลว ทำได้โดยการใช้เครื่องจักรผสมสารเคมีเข้ากับน้ำให้สม่ำเสมอ แล้วฉีดพ่นเข้ากับวัสดุชั้นทางเดิมในขั้นตอนการผสม ระบบการสูบจ่ายต้องเป็นแบบควบคุมโดยอัตโนมัติและต้องสัมพันธ์กับเครื่องจักรผสม
- ระหว่างการก่อสร้าง ต้องควบคุมความชื้นวัสดุให้ได้ตามที่กำหนด หากวัสดุส่วนใดมีความชื้นไม่ได้ตามที่กำหนด ผู้รับจ้างต้องแก้ไขให้ถูกต้อง ในกรณีที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันร่วมด้วย ปริมาณน้ำรวมทั้งหมดในระหว่างการบดทับ ได้แก่ ปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันรวมกับปริมาณความชื้นของวัสดุก่อนการผสมและปริมาณน้ำที่เพิ่มภายหลัง
- การก่อสร้างรอยต่อ ในการก่อสร้างปรับปรุงชั้นทางเดิมมี 2 แบบ คือ รอยต่อตามยาว และรอยต่อตามขวาง ซึ่งมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของโครงสร้างถนน รอยต่อที่ไม่ถูกต้องจะ ทำให้ชั้นทางไม่สม่ำเสมอเป็นจุดอ่อนทำให้ถนนเสียหายภายหลังได้ ในกรณีก่อสร้างชั้นทางมากกว่าหนึ่งชั้นทางควรก่อสร้างให้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รอยต่อในแต่ละชั้นเหลื่อมกัน รอยต่อตามยาวแตกต่างกับรอยต่อตามขวาง จึงต้องพิจารณาแต่ละแบบดังนี้

- รอยต่อตามยาว ต้องจัดแนวรอยต่อไม่ให้อยู่ในแนวรอยล้อรถ ก่อนก่อสร้างต้องท้าเครื่องหมายแนวขุดตัดแนวแรกให้ชัดเจน เพื่อให้อุปกรณ์ขุดตัดเดินตรงตามแนวขุดตัดที่ทำเครื่องหมายไว้ ความกว้างและการเหลื่อมทับของแนวขุดตัดตามยาว ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นทางที่ปรับปรุงแล้ว ขนาดวัสดุ ชนิดและประสิทธิภาพของเครื่องจักร ความกว้างและการเหลื่อมทับแนวขุดตัดตามยาวปกติอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ให้อยู่ในดุลยพินิจของผู้ควบคุมงาน รอยต่อตามขวาง เกิดขึ้นเมื่อเครื่องจักรขุดตัดเริ่มทำงานหรือหยุด หรือเมื่อชั้นทางที่ปรับปรุงแล้วนั้นเลยเกณฑ์ระยะเวลาดำเนินการก่อสร้างในสนามตามที่ระบุ ฉะนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดรอยต่อตามขวางมาก จึงควรทำการก่อสร้างอย่างต่อเนื่องไม่ควรหยุดการก่อสร้างโดยไม่จำเป็น เมื่อเครื่องจักรหยุดการขุดตัดในแต่ละครั้งให้ทำเครื่องหมายแนวที่เครื่องจักรหยุดบนชั้นทางตรงกับกึ่งกลางของอุปกรณ์ขุดตัด ซึ่งเป็นจุดที่เครื่องจักรหยุดจ่ายวัสดุผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ เมื่อเครื่องจักรขุดตัดจะท้างานต่อไป ให้ขุดตัดเหลื่อมทับรอยต่อเข้าไปในชั้นทางที่ปรับปรุงแล้วไม่น้อยกว่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ขุดตัด ทั้งนี้ต้องไม่น้อยกว่า 150 เซนติเมตร
- การบดทับให้ดำเนินการทันทีเมื่อเครื่องจักรปูเกลี่ยชั้นทางที่ปรับปรุงแล้ว โดยดำเนินการควบคู่กันไปจนกว่าจะได้ตามรูปแบบและข้อกำหนด ซึ่งการใช้ชุดเครื่องจักรบดทับ วิธีการและขั้นตอนการบดทับ ให้ดำเนินการตามที่กำหนดจากแปลงทดสอบเป็นหลัก การบดทับให้ดำเนินการให้เสร็จเรียบร้อยภายในเวลาที่กำหนด และต้องให้ได้ความแน่นตามที่กำหนดในคราวเดียว
- ระยะเวลาการดำเนินการผสมวัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพกับวัสดุชั้นทางเดิมจนถึงการบดทับเสร็จสิ้น ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพที่นำมาใช้ผสม ในกรณีที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพรวมตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ระยะเวลาดำเนินการให้กำหนดโดยระยะเวลาดำเนินการของวัสดุผสมเพิ่มปรับปรุงคุณภาพที่สั้นที่สุดเป็นเกณฑ์ ดังนี้
  - ปูนซีเมนต์ ไม่เกิน 2 ชั่วโมง
  - ปูนขาว เถ้าลอย ไม่เกิน 24 ชั่วโมง
  - แอสฟัลต์อิมัลชั่น ก่อนแอสฟัลต์อิมัลชั่นแตกตัว

- โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt) ไม่เกิน 7 วัน
- สารเคมีอื่น ๆ ให้ใช้ตามข้อแนะนำของผู้ผลิต

ในกรณีจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาดำเนินการก่อสร้างมากกว่าที่กำหนด ให้ผู้ควบคุมงานพิจารณาอนุญาตได้เป็นแต่ละกรณี เพราะชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพบางชนิด เช่น ปูนซีเมนต์ การบดทับเพิ่มในภายหลังจะทำให้ชั้นทางเสียหาย

- ในกรณีใช้ปูนซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพ และยังไม่ลาดยางชั้นไพร์มโค้ท (prime coat) ให้บ่มชั้นทางที่ปรับปรุงแล้วเพื่อควบคุมความชื้นไว้ โดยการพ่นน้ำให้ทั่วถึง เป็นระยะๆ สม่ำเสมอ เพื่อให้ผิวชั้นทางคงความเปียกชื้นไว้ได้ติดต่อกันอย่างน้อย 3 วัน นับจากวันที่บดทับแล้วเสร็จ ส่วนการใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพอื่น ให้บ่มตามกำหนดเวลาของผลการออกแบบส่วนผสมกำหนด

2.2.9 การตรวจสอบชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วเสร็จ

- การตรวจสอบด้านคุณภาพ
- การทดสอบหาค่าความแน่นการบดทับในสนาม ให้ดำเนินการตามวิธีการทดสอบที่ มทช. (ท) 501.4 : วิธีการทดสอบหาค่าความแน่นของวัสดุงานทางในสนาม โดยทำการทดสอบภายในเวลาที่เหมาะสมหลังจากการบดทับแล้วเสร็จ ซึ่งให้อยู่ในดุลยพินิจของผู้ควบคุมงาน โดยทำการทดสอบทุกระยะ 100 เมตร ต่อความกว้าง 1 ช่องของการขุดตัด ค่าความแน่นในสนามของชั้นทางที่ปรับปรุงแล้ว หากไม่ได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น ให้ใช้ข้อกำหนดดังต่อไปนี้
- กรณีปรับปรุงคุณภาพด้วย วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพประเภทปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือเถ้าลอย ค่าความแน่นในสนามต้องไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ Modified Proctor Density ตามวิธีการทดสอบที่ มทช. (ท) 501.2 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน
- กรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพที่มีแอสฟัลต์ร่วมด้วย ค่าความแน่นในสนามต้องไม่น้อยกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ Modified Proctor Density ตามวิธีการทดสอบที่ มทช. (ท) 501.2 : วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน
- การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ใช้ตรวจสอบชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพประเภทสารเคมี เช่น ปูนซีเมนต์ หรือวัสดุผสมเพิ่มรวมที่ไม่มีแอสฟัลต์ผสม โดยการนำวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

ในขณะดำเนินการก่อสร้างมาทำการบดอัด ตาม มทช. (ท) 501.2: วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 ช่วงความยาวของการขุดตัด บ่มก้อนตัวอย่างโดยใช้พลาสติกห่อเป็นเวลา 7 วัน แล้วเอาถุงพลาสติกออกนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นมาผึ่งให้แห้งด้วยอากาศจนให้มีสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง นำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compressive strength) ซึ่งต้องได้ไม่น้อยกว่าแบบกำหนด

- การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม ใช้ตรวจสอบเฉพาะชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพประเภทแอสฟัลต์ และ/หรือวัสดุผสมเพิ่มรวมที่มีแอสฟัลต์ร่วมด้วย โดยนำวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วในขณะดำเนินการก่อสร้างมาทำการบดอัดตามวิธีการทดสอบ มทช.(ท) 607 : มาตรฐานการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 ช่วงความยาวของการขุดตัด แล้วนาไปทดสอบกาลังรับแรงดึงตาม ASTM D : 4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test ซึ่งต้องได้ไม่น้อยกว่าแบบกำหนด
- การตรวจสอบด้านกายภาพชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว จะต้องมีแนวความกว้าง ความหนา ค่าระดับและความลาดเอียงเป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด
- ผิวของชั้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วต้องเรียบสม่ำเสมอ ไม่ปรากฏความเสียหายใดๆ เมื่อใช้ไม้บรรทัดขอบตรงยาว 3 เมตร วางทาบบนผิวทางในแนวตั้งฉากและขนานกับถนน ระดับผิวทางจะแตกต่างจากระดับของไม้บรรทัดได้ไม่เกิน 10 มิลลิเมตร

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุพอลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมพอลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ประมาณ 0.20 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50 น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ และพบว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีโครงสร้างแบบซีโอลิทิก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอพอลิเมอร์ ดังจะเห็นได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอพอลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกกะปาสคาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ จีโอพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอพอลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงและเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ในปริมาณต่ำ

Hardjite et al. (2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.095 และ 0.120 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอพอลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอพอลิเมอร์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถ้าถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอพอลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโนซิลิเกตพอลิเมอร์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์

สมิตร ส่งพิริยะกิจ (2548) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินและทรายเป็นวัตถุดิบ สารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเคต และน้ำ อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียส หลังจากทำการหล่อตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบกำลังอัดทำที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและกำลังอัดยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปตามอายุบ่ม ส่วนตัวอย่างที่

ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้น แต่กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และในที่สุดจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายปูนซีเมนต์ เมื่อผสมดินขาวเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารกระตุ้นสูงเกินกว่าค่าเหมาะสม การก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างดินขาวเผาต่อ $Ca(OH)_2$ ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

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

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอพอลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอพอลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Ohsawa et al. (1984) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอคลอลิค (HCl), กรดพิคลิก (Picric acid) และกรดไซลิคเซลิค (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิคลิก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดไซลิกเซลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของเพสต์จีโอพอลิเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหิน และพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้าถ่านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับด่างผิวของเถ้าถ่านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้าถ่านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอพอลิเมอร์และนำเข้าไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอพอลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นผนึกคล้ายกระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

Gordon (1984) กล่าวถึงการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified materials และ Boundmodified materials โดยที่ Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่มลงไปอย่างมากเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูง Kuhlman (1989) กล่าวไว้ว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีผิวจราจรทำจากยางมะตอยโดยการนำผิวจราจรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ในช่วงปี ค.ศ. 1942 ถึง 1958 ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งานทั้งผิวจราจรยืดหยุ่นที่ชำรุดเสียหายและผิวจราจรคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี Tabensky (1990) รายงานว่า Florida departmentof transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่าด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนนและ Orange country california ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งกับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่าง

แอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับวัสดุชั้นล่างเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow municipal airport และMohave country airport

Walton (1995) บันทึกไว้ว่าการนำวัสดุเก่ามาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold in-place recycling) เป็นที่ยอมรับกันว่าประหยัดมาก และได้เริ่มมีการใช้เป็นมาตรฐานในปี ค.ศ. 1970 ในรัฐ Oregon New Mexico Kansas และ Florida ต่อมาวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อิตาลี รัสเซีย แคนนาดา เยอรมัน ฝรั่งเศส และอังกฤษ โดยใช้กับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำถึงปานกลางในปี ค.ศ. 1980 ปรากฏว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในช่วง ดังกล่าวใช้ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และยังใช้ Emulsion เป็นสารผสมเพิ่ม A.A. Loundon & Partner consulting engineers (1995) กล่าวว่า การก่อสร้างด้วยวิธี Cold in-place recycling ต้องมีการสำรวจออกแบบตามเงื่อนไขและตามสภาพถนนที่จะทำการก่อสร้างรวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่จะใช้งาน เพื่อที่จะสามารถวางแผนงานให้ได้ผลที่ดีที่สุด การก่อสร้างจะไม่ทำในขณะเปียกและหลีกเลี่ยงการทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ใช้ควรหาจากการทดลองซึ่งถ้าใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพระหว่างการบดอัดความชื้นต้องไม่เกินร้อยละ 75 ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุที่ไม่ผสมเพิ่ม แต่ถ้าไม่ผสมซีเมนต์หรือไม่ผสมอะไรเลย ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดต้องไม่เกินปริมาณความชื้นเหมาะสมและต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากการบดอัดและแต่งรูปเรียบร้อยแล้ว การบ่มเพื่อรักษาความชื้นทันทีซึ่งอาจใช้ยางแอสฟัลต์หรือวัสดุอย่างอื่นที่เหมาะสมก็ได้

Taha et al. (2002) ได้ทำการทดสอบการบดอัดและกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP และพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะและหน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลงและกำลังอัดลดลงเมื่อเติมปริมาณ RAP มากขึ้น

กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้มาจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการเชื่อม กระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน จะนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) มาทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้เป็นก๊าซอะเซทิลีน และส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาคือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยอยู่ในรูปของเหลวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งนำ ไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมากและเป็นปัญหาทางสภาพแวดล้อมเพราะมีความเป็นด่างสูง ปริมาณก๊าซอะเซทิลีนที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแคลเซียมคาร์ไบด์ สิ่งที่สนใจในงานวิจัยนี้คือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผลิตก๊าซอะเซทิลีนและสะสมเพิ่มขึ้นทุกปี การเตรียมก๊าซอะเซทิลีนทำ ได้โดย นำ หินปูน ($CaCO_3$) เข้าเตาหลอมซึ่งผลที่ได้คือ Limes (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Payne, 1989)

$$CaCO_3 > CaO + CO_2 \quad \text{.....(2.1)}$$

หลังจากนั้น Limes (CaO) จะทำปฏิกิริยากับถ่านหินในขณะที่อยู่ในเตาหลอม แล้วให้แคลเซียมคาร์ไบด์ออกมาดังสมการที่ 2.2

$$CaO + 3C > CaC_2 + CO \quad \text{.....(2.2)}$$

จากนั้นให้แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ทาปฏิกิริยากับน้ำซึ่งจะให้ก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.3

$$CaC_2 + 2H_2O > C_2H_2 + Ca(OH)_2 \quad \text{.....(2.3)}$$

2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์จะอยู่ในรูปของเหลวเนื่องจากผสมกับน้ำ มีลักษณะเหนียวลื่นมีสีเทาอมขาวขุ่น ภายหลังจากได้ก๊าซอะเซทิลีนแล้ว กากเหล่านี้จะปล่อยลงสู่บ่อพักเพื่อตกตะกอนและแห้งเองตามธรรมชาติ เมื่อนากากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปตากแดดจนแห้งแล้วบดจนละเอียด พบว่ารูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมคล้ายปูนซีเมนต์ มีค่าความถ่วงจาเพาะประมาณ 2.3 (ปิติศานต์ กร้ามาตร, สุภิชาติ มาตย์ภูธร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิมล เงาพิสดาร, 2539)

2.3.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

จากการศึกษาของปิติศานต์และคณะ (2539) พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 62.09 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ที่มีอยู่ร้อยละ 63.94 มีค่า LOI ที่สูงมากประมาณร้อยละ 32 ค่าซิลิคอนไดออกไซด์ ร้อยละ 2.32 อลูมิเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1.57 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของธาตุอื่นอย่างละเล็กน้อย ซึ่ง องค์ประกอบเหล่านี้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ สุภิชาติ มาตย์ภูธร (2541) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีความเป็นด่างสูงคือมีค่า pH ประมาณ 12 เนื่องจากปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณที่สะสม เพิ่มขึ้นทุกวัน ตามปริมาณการผลิตก๊าซอะเซทิลีนแต่พื้นที่ทิ้งมีจา กัด ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นที่ จะนากากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ เพราะว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะนากาก แคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุประสาน

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

งานวิจัยนี้ศึกษาและอธิบายพฤติกรรมการรับแรงอัดวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) น้ำ (H_2O)โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ ผลการทดสอบทั้งหมดผลการทดสอบทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ปริมาณเถ้าลอย และปริมาณความชื้น ต่อกำลังอัด โดยเปรียบเทียบกับตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยแบ่งลำดับการดำเนินงานเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

3.1 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

3.1.1 วัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ได้มาจากการรื้อซ่อมแซมถนนของกรมทางหลวงจังหวัดนครราชสีมา

3.1.2 เถ้าลอย ที่ใช้ในการศึกษาได้จาก

3.1.3 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)

3.1.4 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

3.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรม ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่างและ RAP ดังนี้

3.2.1 การกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) ด้วยวิธี laser particle size analysis

3.2.3 หาปริมาณธาตุองค์ประกอบวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) โดยหลักการวิเคราะห์ X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

3.2.4 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash)

3.3 การเตรียมก่อนตัวอย่างทดสอบ

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างทำโดยแบบหล่อทำจากเหล็กทรงกระบอกผ่าซีกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 เซนติเมตรและมีความสูง 15 เซนติเมตร วัสดุตัวอย่างจะผสมตัวอย่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ร้อยละ 0 3 5 7 10 15 20 25 30 40 และ 50 ของน้ำหนักรวมของตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC)

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างทำโดยแบบหล่อทำจากเหล็กทรงกระบอกผ่าซีกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 เซนติเมตรและมีความสูง 15 เซนติเมตร วัสดุตัวอย่างจะผสมตัวอย่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ร้อยละ 0 3 5 7 10 15 20 25 30 40 และ 50 ของน้ำหนักรวมของตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่เหมะสม (OLC)

3.3.3 นำวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เถ้าลอย (Fly Ash) ที่บดอัดที่ความชื้นกับปริมาณน้ำเหมาะสม (OWC) ตามข้อ 1.3.2 และปริมาณของเหลวเหมาะสมตามข้อ 1.3.3 โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ที่ได้จากข้อ 1.3.4 จำนวน 3 ค่า (เลือกในช่วง Active zone และ Deterioration zone) ใช้เถ้าลอย (Fly Ash) ให้มีอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 20 25 30 40 และ 50 ของน้ำหนักกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แล้วทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน หลังจากนั้นถูกนำไปทดสอบหากำลังรับแรงกด บันทึกผล วิเคราะห์ผล ต่อไป

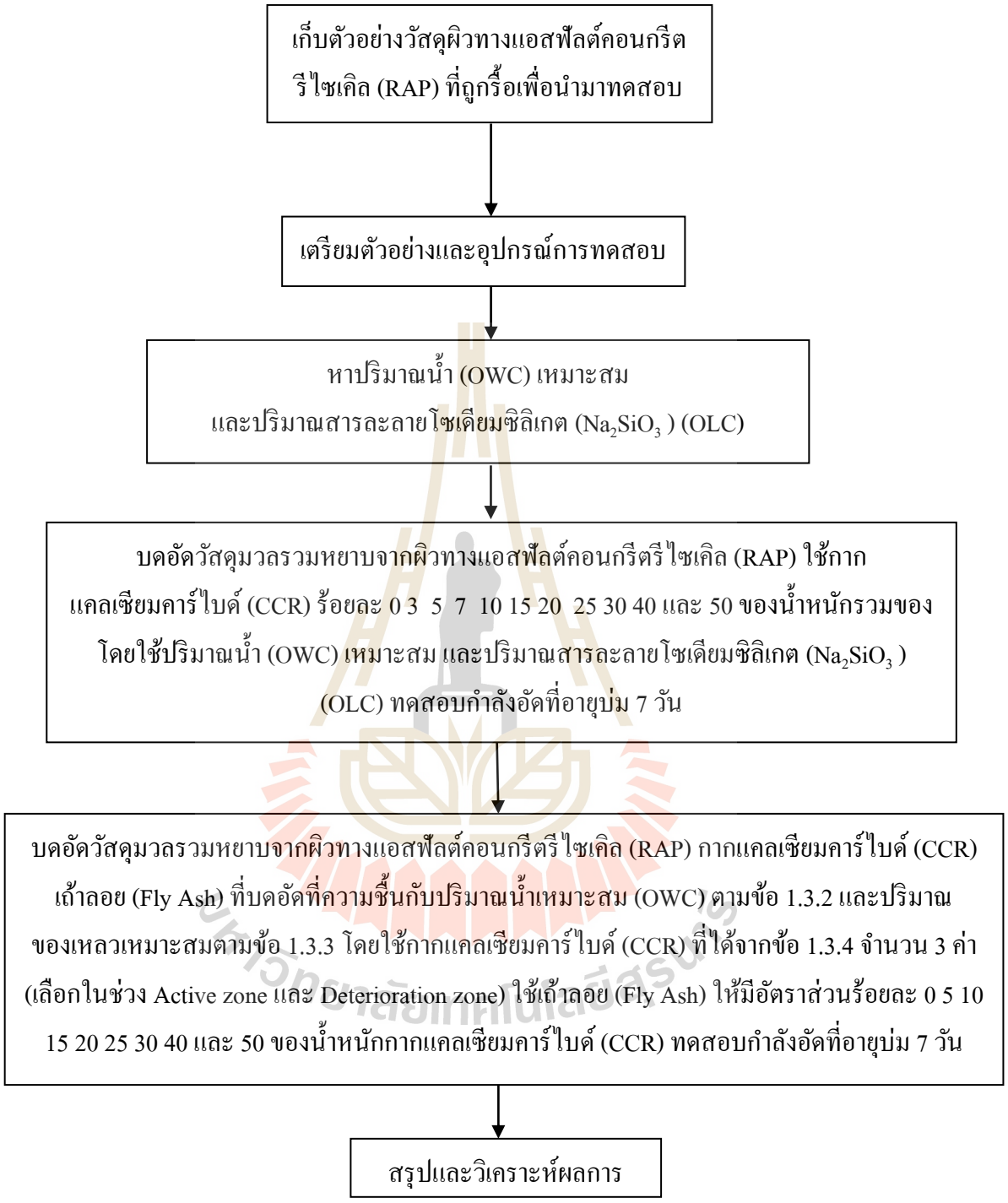
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เมื่อได้ตัวอย่างครบอายุบ่มแล้วจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ข้อมูลที่ต้องบันทึกในการทดสอบได้แก่ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ การเสียรูปของตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการตรวจวัดค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly Ash) จะนำมาวิเคราะห์เพื่อค่าความเหมาะสมของอัตราส่วนผสม และปริมาณความชื้น บ่มที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 7 วัน



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4
ผลการศึกษา

บทนี้นำเสนอผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัด (ปริมาณความชื้น ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ปริมาณเถ้าลอย (FA)) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ท้ายสุดจะวิเคราะห์ผลจากผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เหมาะสมของเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA)

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

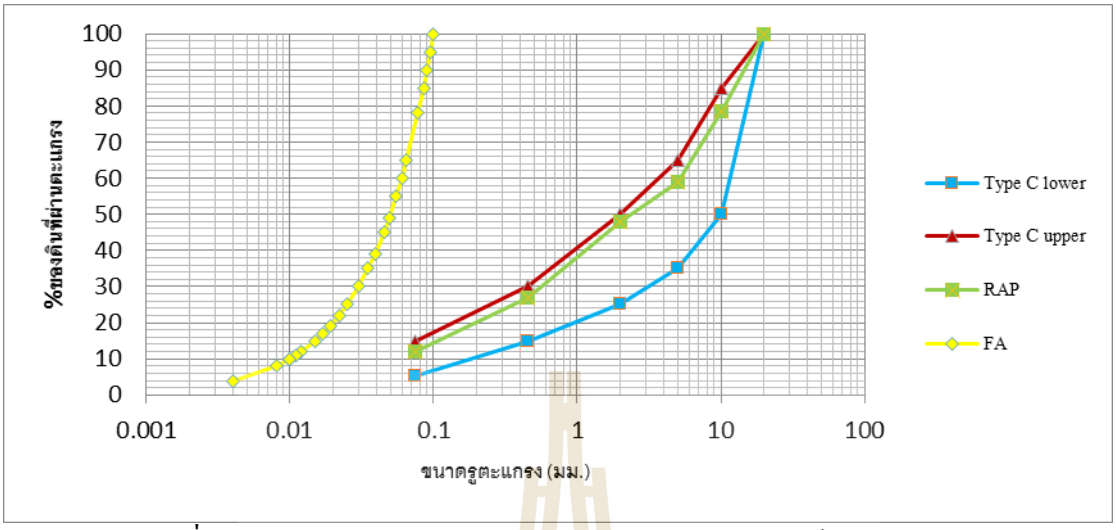
วัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ได้มาจากการรื้อซ่อมแซม ถนนจากกรมทางหลวงที่ 10 จังหวัดนครราชสีมา ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7

เถ้าลอย (FA) ที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.5

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) จาก บริษัท เอ็มไทยอินดัสเทรียล จำกัด จังหวัด สมุทรสาคร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.3

4.1.2 การกระจายขนาด

การทดสอบการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) วัสดุที่ได้ ถูกนำมาแยกผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน (Sieve Analysis) ขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 1” และถูกนำมาสุ่มผสมกันในสัดส่วนต่างๆ (Trial and error) โดยเปอร์เซ็นต์คงค้างตระแกรงเบอร์ 3/8” จำนวน 21.5 % คงค้างตระแกรงเบอร์ 4 จำนวน 19.5 % คงค้างตระแกรงเบอร์ 10 จำนวน 11 % คงค้างตระแกรงเบอร์ 40 จำนวน 21 % คงค้างตระแกรงเบอร์ 200 จำนวน 15 % และคงค้างในถาด จำนวน 12 % (เก็บไว้ในตะแกรงหมายเลข 200) ซึ่งเป็นไปตามขนาดคละของวัสดุตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล-ม. 203/2556 ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ร้อยละของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน (Sieve Analysis)

4.1.3 ปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมี

การทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมีวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly ash) โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีหลักที่ตรวจพบใน RAP มีค่าเท่ากับ 41.93%CaO และ 39.44 %SiO_2 CaO สูงใน RAP นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาของเถ้าลอย (FA) เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เหมาะสม

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษามีผลรวมของปริมาณ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.52 เถ้าลอยถูกจัดอยู่ในกลุ่ม F เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ สูงกว่า 50% และ CaO ต่ำกว่า 10% ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618 แสดงดังตารางที่ 4.2

องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) พบว่า พบว่ามี CaO สูงถึงร้อยละ 52.71 และมี LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 40.1 ความละเอียดของกาก แคลเซียมคาร์ไบด์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ทำให้มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีองค์ประกอบ $Ca(OH)_2$ เป็นส่วนใหญ่ทำให้ สามารถสลายตัวเป็น CaO และไอน้ำระเหยออกไป (Jaturapitakkul & Roongreung, 2003)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ มวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอย และ กากแคลเซียมคาร์ไบด์

Chemical composition (%)	RAP	Fly ash	CCR
SiO_2	39.446	42.862	3.51
Al_2O_3	9.640	13.759	2.42
Fe_2O_3	28.463	15.904	0.31
CaO	41.93	5.79	52.71
MgO	1.330	0.988	0.52
SO_3	3.625	2.474	0.22
Na_2O	0.564	0.284	0
K_2O	1.981	2.23	0
LOI	1.314	0.890	40.1

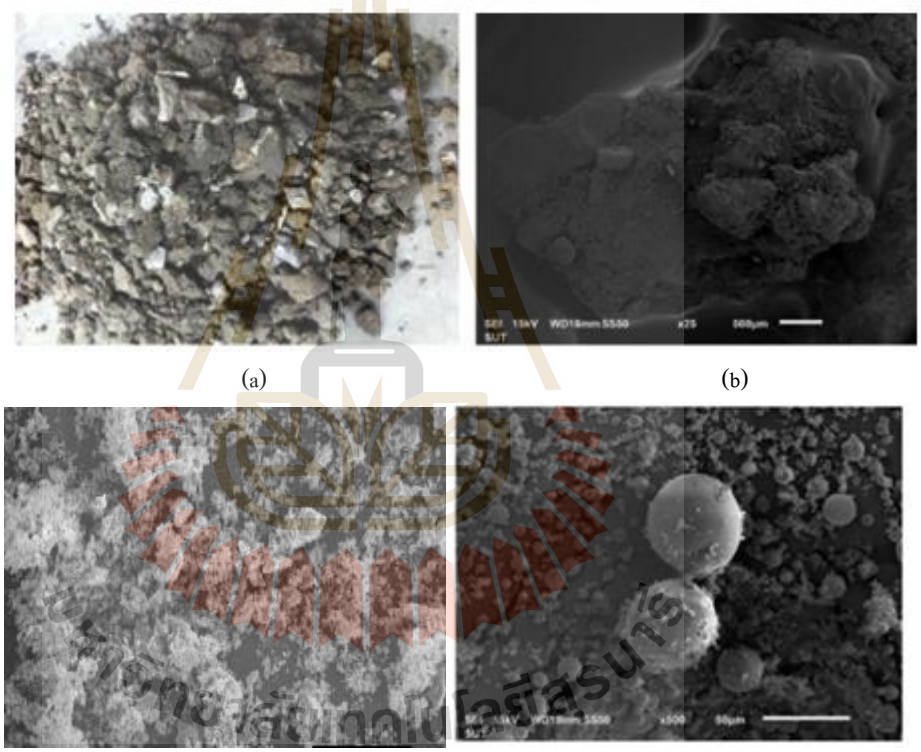
ตารางที่ 4.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618

องค์ประกอบทางเคมี	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO_3 + Al_2O_3 และ Fe_2O_3) Min%	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) Max%	5.0	5.0
ประมาณความชื้น Max%	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) Max%	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) Max%	1.5	1.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.1.4 ขนาดและรูปร่าง

การทดสอบหาลักษณะขนาดและรูปร่างของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly ash) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง Scanning Electron Microscopy (SEM) รูป 4.1.4a แสดงภาพ (RAP) ที่ได้ พบว่ารูปร่างและขนาด ไม่สม่ำเสมอ และรูป 4.1.4b 4.1.3c และ 4.1.4d แสดงให้เห็นสัณฐานวิทยาของอนุภาค วัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอขณะที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็น เหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ และเถ้าลอย (FA) มีรูปร่างทรงกลม



(a) (b)

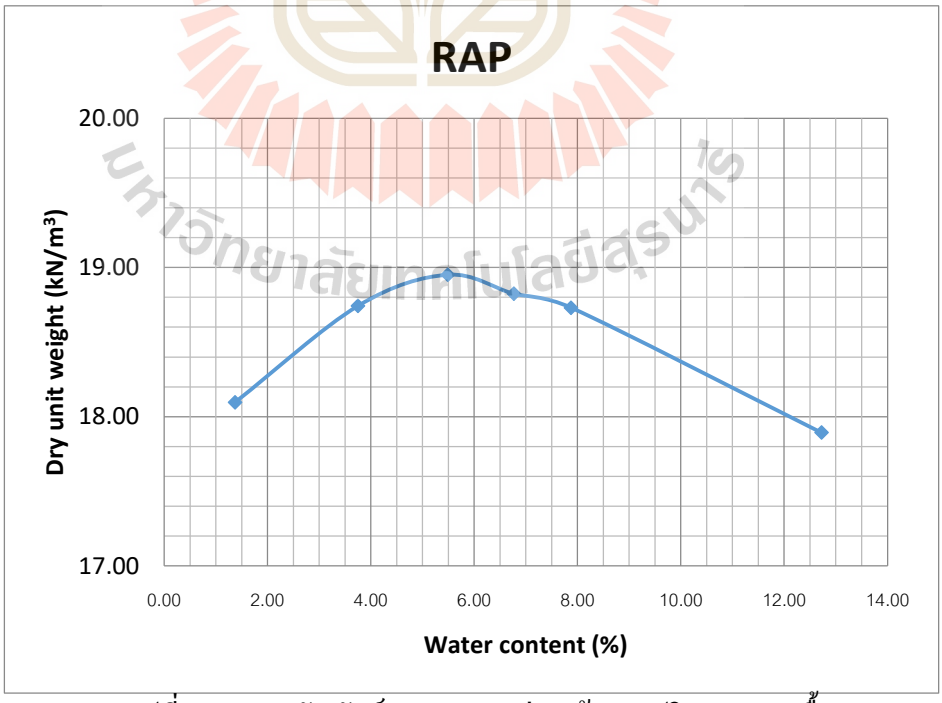
(c) (d)

รูปที่ 4.2 (a) แสดงภาพวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และรูป (b) ภาพวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) (c) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) (d) ภาพเถ้าลอย (Fly ash)ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า

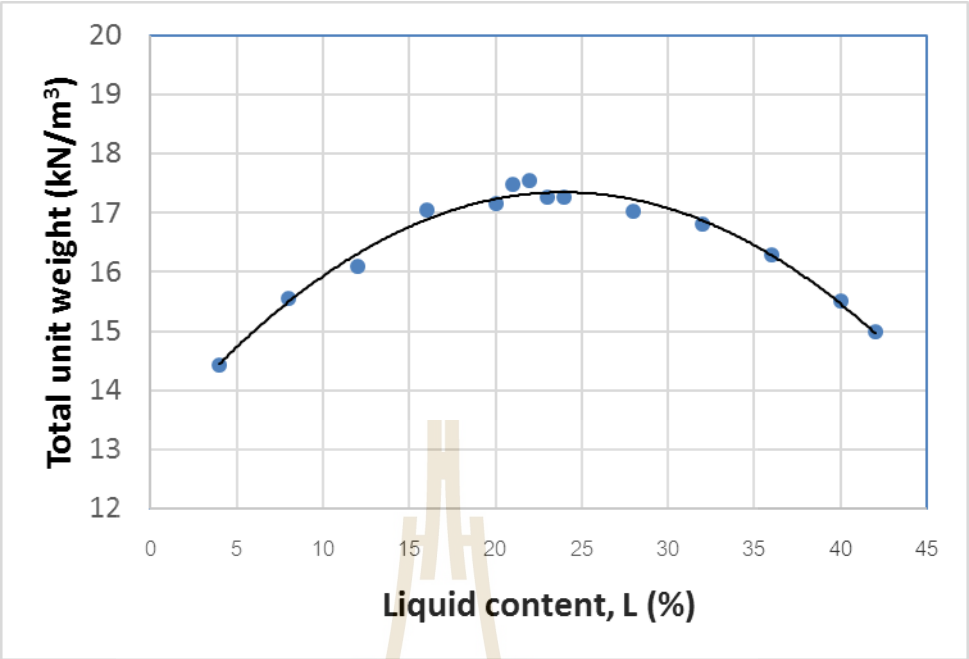
4.2 กำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด (ปริมาณของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แทนที่ในปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash)) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 kPa) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 kPa)

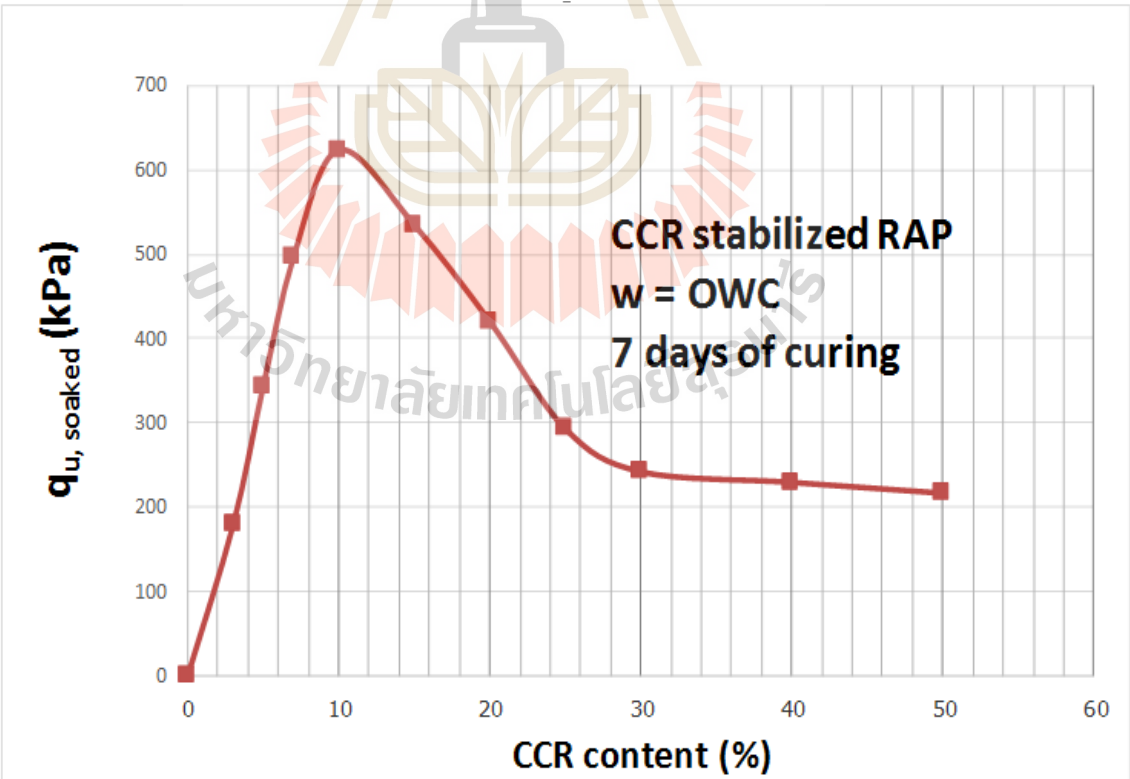
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและปริมาณของเหลว (Na_2SiO_3) ของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟการบดอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำโดยมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OWC) โดยมีค่า OWC เท่ากับร้อยละ 5.5 ความหนาแน่นสูงสุด 18.9 kN/m^3 ขณะที่กราฟการบดอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต Na_2SiO_3 เป็นของเหลวมีลักษณะเช่นเดียวกับใช้น้ำเป็นของเหลว แต่ความหนาแน่นรวมสูงสุดพบที่ค่าปริมาณของเหลวเหมาะสม (OLC) เท่ากับร้อยละ 22 ซึ่งมีค่ามากกว่าการใช้น้ำเป็นของเหลว และความหนาแน่นรวมสูงสุดเท่ากับ 17.80 kN/m^3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล

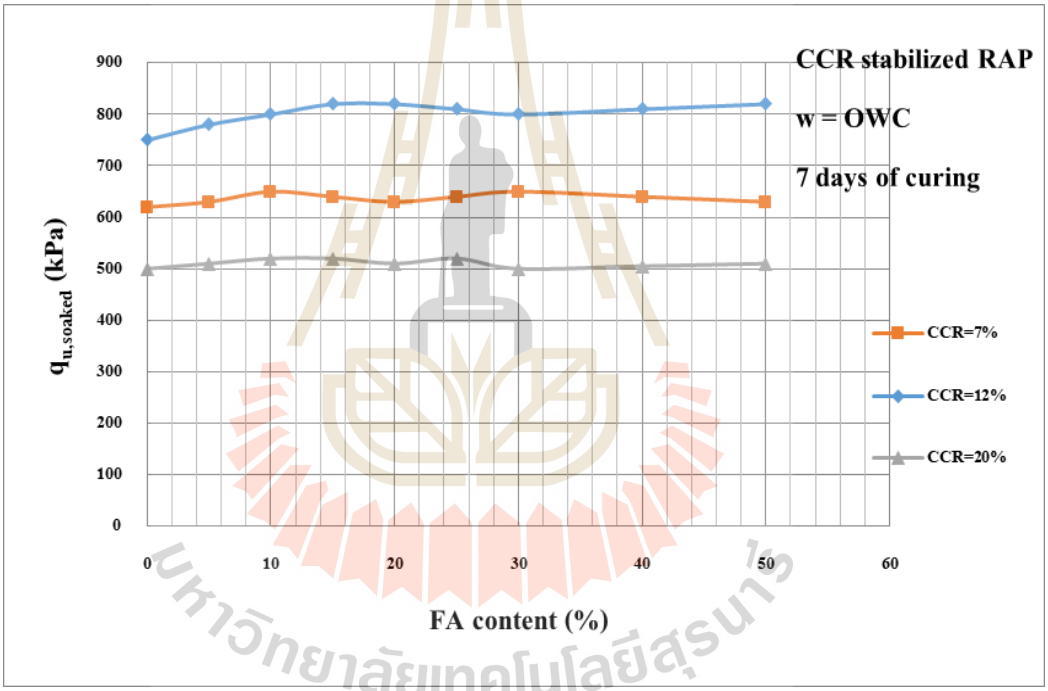


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมและปริมาณของเหลว (Na_2SiO_3) ของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และก้อนตัวอย่างที่ผสมด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์

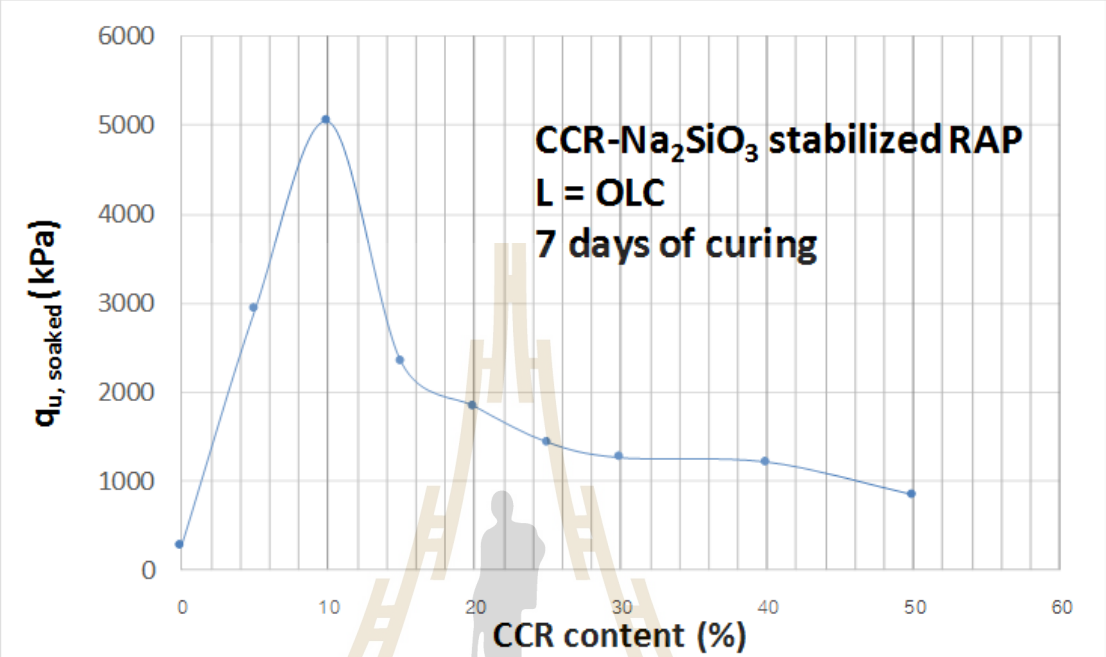
รูปที่ 4.5 แสดงค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม จะเห็นว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR content) จนถึงค่าสูงสุดที่ร้อยละ 10 หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ปรับปรุงดินเหนียวที่รายงานโดย Kampala และ Horpibulsuk (2013) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแบ่งปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้เป็นเป็น 2 โซน ค่ากำลังอัดในช่วงต้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เรียกว่าช่วง Active zone โดยมีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 0 ถึง 10 ช่วงท้ายกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเรียกว่าช่วง Deterioration zone



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังอัดและ% ของเถ้าลอย (FA)

จากผลทดสอบในรูปที่ 4.5 ผู้วิจัยได้เลือกปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เท่ากับร้อยละ 7 12 และ 20 มาทำการทดสอบโดยการเติมเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 ของน้ำหนักกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าการใช้เถ้าลอยร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในทั้ง 2 ช่วง (Active และ Deterioration zones) ส่งผลต่อกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันเพียงเล็กน้อย โดยที่กำลังอัดมีแนวโน้มคงที่เมื่อเถ้าลอยมีปริมาณเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่ากำลังอัดในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดที่ยอมให้สำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท (2,413 kPa และ 1,724 kPa ตามลำดับ) ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้กาก

แคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าลอยในการปรับปรุงมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทางได้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนตัวอย่างที่ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และโซเดียมซิลิเกต

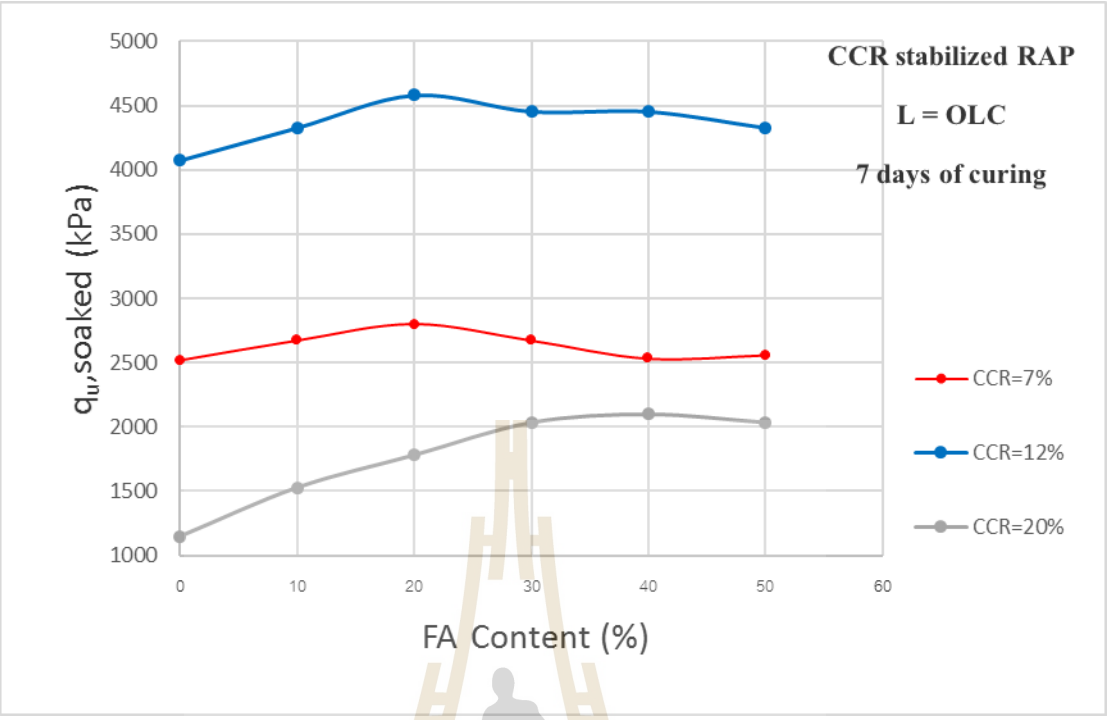
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OLC) เท่ากับร้อยละ 22 จะเห็นว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR content) จนถึงค่าสูงสุดที่ร้อยละ 10 หลังจากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัดที่ใช้น้ำเป็นส่วนผสม (รูปที่ 4.5) อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีค่าสูงกว่าการใช้น้ำในส่วนผสม โดยที่กำลังมีค่าสูงสุดถึง 5000 kPa (ในช่วง Active zone) สาเหตุที่กำลังอัดมีค่าสูงเมื่อใช้โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เนื่องจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ส่วนผสมหลักคือ $Ca(OH)_2$ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคกับซิลิกอน (Si) ที่มีอยู่ในโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ได้มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีค่าสูงกว่ากำลังอัดที่

ยอมให้สำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท (2,413 kPa และ 1,724 kPa ตามลำดับ)

จากผลทดสอบในรูปที่ 4.7 ผู้วิจัยได้เลือกปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับร้อยละ 7 12 และ 20 มาทำการทดสอบโดยการเติมเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0 ถึง 50 ของน้ำหนักกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ผลทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยเมื่อใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วง Deterioration zone (CCR content เท่ากับร้อยละ 12 และ 20) ขณะที่กำลังอัดมีแนวโน้มคงที่เมื่อใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในช่วง Active zone (CCR content เท่ากับร้อยละ 7) เนื่องจากในช่วง Active zone นี้ $Ca(OH)_2$ ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้ถูกทำปริกิริยากับวัสดุปอซโซลาน (เช่น ซิลิกา) ในมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และโซเดียมซิลิเกตจนหมด การเติมเถ้าลอยในช่วง Active zone นี้จึงไม่ช่วยให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น สำหรับการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วง Deterioration zone ซึ่งมีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์สูงกว่านั้นเกิดจากวัสดุปอซโซลาน (เช่น ซิลิกา) ในมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และโซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับกากแคลเซียมคาร์ไบด์จนหมดส่งผลให้มี $Ca(OH)_2$ ส่วนเกินจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานจากเถ้าลอยได้ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ปรับปรุงดินเหนียวที่รายงานโดย Kampala และคณะ (2014)

เปรียบเทียบผลทดสอบทั้งหมดกับมาตรฐานวัสดุพื้นทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท จะเห็นว่า การใช้โซเดียมซิลิเกตร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณที่เหมาะสม (CCR content ประมาณร้อยละ 5 ถึง 15) ในการปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการของทั้งสองมาตรฐานโดยไม่มีความจำเป็นต้องเติมเถ้าลอย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)

4.3 ผลการคำนวณต้นทุน

จากผลการทดลอง และจากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ที่การใช้อัตราส่วนผสม ของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่ปริมาณของเหลวเหมาะสม (OLC) ร้อยละ 22 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ร้อยละ 7 ที่มีกำลังรับแรงอัดที่มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กรมทางหลวง และกรมทางหลวงชนบทกำหนด จึงนำอัตราส่วนนี้มาคำนวณต้นทุน พบว่า วัสดุมีเพียงค่า โซเดียมซิลิเกตเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการทดสอบได้ใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสมซึ่งมีค่าถึงร้อยละ 22 ซึ่งโซเดียมซิลิเกตมีราคาค่อนข้างสูงทำให้ต้นทุนวัสดุมีค่าสูง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณการใช้วัสดุและราคาต่อ 1 ตัน

ลำดับที่	รายการวัสดุ	ปริมาณการใช้ (กิโลกรัม)	ราคา/กิโลกรัม (บาท)	รวมเป็นเงิน (บาท)	หมายเหตุ
1	RAP	710	0	0	เศษวัสดุผิวทางที่ถูกรื้อทิ้งโดยเปล่าประโยชน์
2	CCR	44.1	0	0	ของเสียจากอุตสาหกรรมการเชื่อม
4	Na_2SiO_3	220	20	4400	ร้านเคมีภัณฑ์
รวมเป็นเงิน				4400	

บทที่5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานโครงงานวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตก๊าซอเซทิลีน อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างสูง เถ้าลอย (FA) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า การศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าลอยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสคาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช. 244-25561 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสคาล) หาอัตราส่วนที่เหมาะสมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กับปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) สามารถแบ่งปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้เป็นเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ค่ากำลังอัดในช่วงต้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เรียกว่าช่วง Active zone โดยมีปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 0 ถึง 10 และในช่วงท้ายกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเรียกว่าช่วง Deterioration zone ผลของการเติมเถ้าลอยในการบดอัดที่ใช้น้ำเป็นส่วนผสมพบว่าค่ากำลังอัดมีค่าไม่ต่างกันมากนักทั้ง 2 ช่วง ส่วนผลของการเติมเถ้าลอยในการบดอัดที่ใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นส่วนผสมสามารถเพิ่มกำลังอัดได้ในการเติมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ช่วง Deterioration zone
2. การใช้โซเดียมซิลิเกตร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณที่เหมาะสม (CCR content ประมาณร้อยละ 5 ถึง 15) ในการปรับปรุงคุณภาพของมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทโดยไม่มีความจำเป็นต้องเติมเถ้าลอย
3. จากการศึกษาพบว่าวัสดุมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนตรีตรีไซเคิล กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าลอย โดยใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายที่อัตราส่วนร้อยละ 22 ปริมาณต้นทุนขึ้นอยู่กับราคาโซเดียมซิลิเกต เนื่องจากวัสดุมวลรวมหยาบแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นวัสดุเหลือทิ้ง จึงไม่มีค่าใช้จ่าย

ทุกอัตราส่วนใช้โซเดียมซิลิเกตในปริมาณที่เท่ากันทั้งหมด ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงอยู่แล้ว จึงไม่มีความจำเป็นที่จะนำเถ้าลอยมาผสมเพิ่ม

เอกสารอ้างอิง

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

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

คมกริช เวชสัสถ์, สุทธิรักษ์ บูชากุล, ปาริฉัตร ปั้นทอง และสุรเดช เหรัมพกุล. (2553). **การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรอง**. โรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.

สมิตร ส่งพิริยะกิจ. (2548). **อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ต้าจีโอพอลิเมอร์.** เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี. ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34

Bakharev T. (2004). **Durability of Geopolymer Material in Sodium and Magnesium Sulfate Solution**. Cement and Concrete Research 2004;35(6):1233-1246.

Buchwald A, Kaps Ch. (2002). **Property Controlling Influences on the Generation of Geopolymeric Binders Based on Clay**. Geopolymer. (2002). Melbournd, Australia.

Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. (2009). **Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers**. Waste Management 2009; 29(2):539-43.

Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. (2006). **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**, J. Therm. Anal. 37(1991) 1633-1656.

Davidovits J, Buzzi L, Rocher R, Gimeno D, Marini C, Tocco S. (1999). **Geopolymeric Cement Based on Low Cost Geologic Material**, Results from the European Research project GEOCIS-TEM. In: Davidovits etal. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere 99. 1999:83-96.

Guo X, Shi H, Dick WA. (2010). **Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer.** Cement and Concrete Composites 2010;32(2):142-7.

Gurtug Y, Sridharan A. (2002). **Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils**. Geotechnique 2002;52(10):761-3.

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, 2003; CMT 14-CMT 18.

Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. (2004). **Brief Review of Development of Geopolymer Concrete**. American Concrete Institute, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.

Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y. (2009). **Role of Fly Ash on Strength and Microstructure Development in Blended Cement Stabilized Silty Clay**. Soils and Found 2009;49(1):85-98.

Horpibulsuk S, Rachan R, Chinkulkijniwat A, Raksachon Y, Suddeepong A. (2010). **Analysis of Strength Development in Cement-Stabilized Silty Clay from Microstructural Considerations**. Constr and Build Mater 2010;24(10):2011-21.

Horpibulsuk S, Katkan W, A. Apichatvullop. (2008). **An Approach for Assessment of Compaction Curves of Fine-Grained Soils at Various Energies Using A one Point Test**. Soils and Found 2008;48(1):115-25.

Horpibulsuk S, Katkan W, Naramitkornburee A. (2009). **Modified Ohio's Curves: A Rapid Estimation of Compaction Curves for Coarse- and Fine-Grained Soils**. Geotechnical Testing Journal, ASTM 2009;32(1):64-75.

Jiminez AMF, Lachowski EE, Palomo A, Macphee DE. (2004). **Microstructural characterisation of alkali-activated PFA Matrices for Waste Immobilisation**. Cem Concr Compos 2004;26(8):1001-6.

Kampala, A., and Horpibulsuk, S. (2013). **Engineering properties of silty clay stabilized with calcium carbide residue.** J. Mater. Civ. Eng., 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000618, 632–644.

Kampala A, Horpibulsuk S, Prongmanee N, Chinkulkijniwat A. (2014). **Influence of Wet-Dry Cycles on Compressive Strength of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Stabilized Clay**. J Mater Civ Eng ASCE 2014; 26:633–43.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Miura N, Yamadera A, Hino T. (1999). **Consideration on Compression Properties of Marine Clay Based on The Pore Size Distribution Measurement**. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE 1999; 26(6):624III-47.

Mohapatra R, Rao JR. (2001). **Some Aspects of Characterisation, Utilisation and Environmental Effects of Fly Ash**. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 2001;76(1):9-26.

Nagaraj TS, A.J. Lutenegger, Pandian NS, M. Manoj. (2006). **Rapid Estimation Of Compaction Parameters For Field Control**. Geotechnical Testing Journal, ASTM. 2006;29(6):1-10.

Ohsawa S, Asaga K, Goto S, Daimon M. (1985). **Quantitative Determination of Fly Ash in the Hydrated Fly Ash – $Caso_4$. $2H_2O$ – Ca $(OH)_2$ System**. Cement and Concrete Research 1985;15(2): 357-366.

Prakash K, Sridharan A. (2004). **Free Swell Ratio and Clay Mineralogy of fine-Grained Soils.** Geotech Test 2004;27(2):220-5.

Rattanasak U, Chindaprasirt P. (2009). **Influence of NaOH Solution on The Synthesis of Fly Ash Geopolymer**. Miner Eng 2009;22(12):1073-8.

S, Palomo A. (2001). **Alkaline Activation of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature Activator Concentration and Solids Ratio**. Cement and Concrete Research. 2001;29(1-2):55-62.

Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, and Chindaprasirt P. (2011). **NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature.** Fuel 2011; 90(6): 2118-24.

Sukmak P, and Horpibulsuk S. (2012). **Strength Development in Geopolymer Brick**. Construction and Building Materials 2012 (Under review).

Van Jaarsveld J, Van Deventer J, Lorenzen L. (1998). **Factors Affecting the Immobilization of Metals in Geopolymerized Fly Ash**. Metall Mater Trans B 1998;29(1):283-91.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายพงษ์พัฒน์ วังโน เกิดวันที่ 25 พฤศจิกายน 2530 ตำบลศรีสุทโธ อำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี เริ่มการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านศรีสุทโธ ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนบ้านดุงวิทยา อำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อำเภอสว่างแดนดิน จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันประกอบอาชีพเป็นวิศวกรโครงการ ในตำแหน่ง วิศวกรก่อสร้างอาวุโส บริษัท เอส ซี เรียล เอสเตรท ดีเวลล็อปเม้นท์ กำกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี