

กำลังอัดของวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผลิตปรับปรุงด้วย
กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย จีโอฟอลิเมอร์



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

กำลังอัดของวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไชเคิลปรับปรุงด้วย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย จีโอฟอลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สิริภพ ล้อมแพน : กำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วย
กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ (THE STRENGTH OF RECYCLED
ASPHALT PAVEMENT (RAP)-FLY ASH (FA)- CALCIUM CARBIDE RESIDUE
(CCR) GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วย
กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย และจีโอโพลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง โปแทสเซียมไฮดรอก
ไซด์ (KOH) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารกระตุ้นของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ ตัวอย่างถูก
บดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม และนำมาทดสอบกำลัง
อัดที่อายุบ่ม 7 วัน ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
(KOH) ต่อโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่อัตราส่วนเท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 และ 60:40 กำลัง
อัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ยกเว้นที่อัตราส่วน KOH: Na_2SiO_3 เท่ากับ 50:50 กำลังอัดยังมีค่า
เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอย เท่ากับร้อยละ 10 แต่เมื่อปริมาณเถ้าลอย เท่ากับร้อยละ 20 และ 30 กำลัง
อัดมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเถ้าลอย เท่ากัน พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน
KOH: Na_2SiO_3 ลดลง ยกเว้นปริมาณเถ้าลอย เท่ากับร้อยละ 30 ที่อัตราส่วน KOH: Na_2SiO_3 เท่ากับ
50:50 มีค่าลดลง สำหรับวัสดุผิวทางหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุง
ด้วย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) จีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตาม
อัตราส่วนปริมาณ CCR/FA งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล
(RAP) ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ สามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
สำหรับงานก่อสร้างทางได้

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SIRAPOP LOMPAN : THE STRENGTH OF RECYCLED ASPHALT
PAVEMENT (RAP)-FLY ASH (FA)- CALCIUM CARBIDE RESIDUE (CCR)
GEOPOLYMER. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This study investigates the strength of Recycled Asphalt Pavement (RAP)-Fly ASH (FA)-Calcium Carbide Residue (CCR) geopolymer as a road construction material. A mixture of potassium hydroxide (KOH) and sodium silicate solution (Na_2SiO_3) is used as a liquid alkaline activator (L). The samples for Unconfined Compressive Strength (UCS) test were compacted under modified proctor energy at the optimum liquid content (OLC): And tested at 7 days of curing. The test results show that the UCS of RAP-FA geopolymer increases as FA increases at KOH: Na_2SiO_3 = 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 and 60:40. However, at KOH: Na_2SiO_3 = 50:50, UCS increases up to FA = 10% then decreases as FA decreases. For a particular FA, UCS increases as the KOH: Na_2SiO_3 ratio decreases except for FA = 30% mthat UCS decreases at KOH: Na_2SiO_3 = 50:50. For RAP-FA-CCR geopolymer, UCS increases as the CCR/FA ratio increases. The results also show that both RAP-FA geopolymer and RAP-FA-CCR geopolymer can be used as a base course material as its UCS values meet the specified strength requirements.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้โอกาส ให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำ แนะนำ ในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ดร.อภิชาติ สุกดีพงษ์ ผู้ช่วยอาจารย์ที่ปรึกษา กรุณาให้การแนะนำ ให้ คำ ปรึกษา และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและ แนะนำ การทำ วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำ วิจัย รวมถึงบุคลากรประจำ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคำ ปรึกษาและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับเครื่องมือการทดสอบและสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

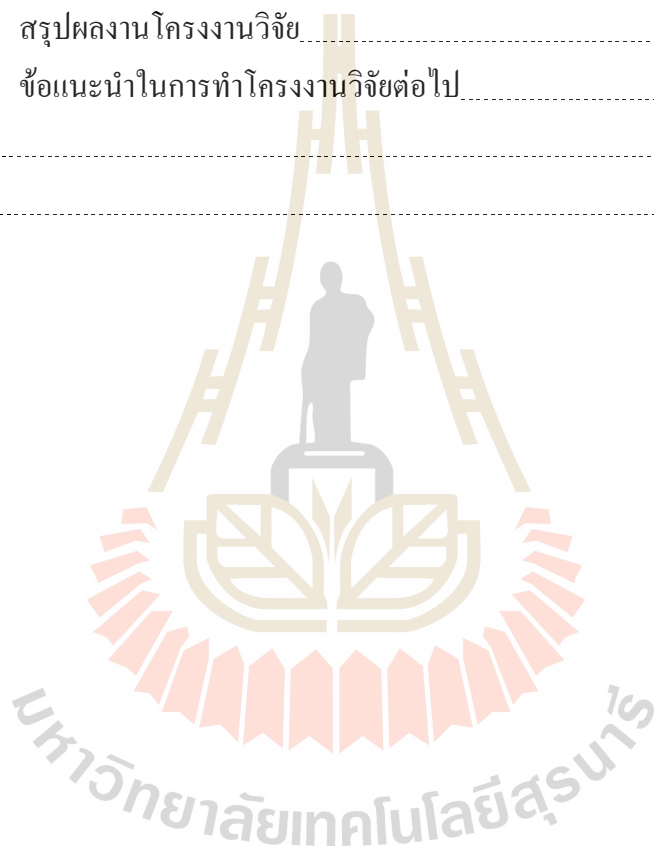
สิริภพ ล้อมแพน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คุณสมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์.....	4
2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์.....	5
2.3 เถ้าลอย.....	7
2.4 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์.....	10
2.5 มาตรฐานวิธีการทดลอง.....	20
2.6 การทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 บทนำ.....	35
3.2 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง.....	35
3.3 ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ.....	35
3.4 การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ.....	36
3.5 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	37
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	37
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล.....	39

4.1	บทนำ.....	39
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต รีไซเคิล (RAP) และเถ้าลอย (Fly Ash).....	39
4.3	กำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต รีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์.....	43
4.4	การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	49
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1	สรุปผลงานโครงการวิจัย.....	51
5.2	ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป.....	52
	เอกสารอ้างอิง.....	53
	ประวัติผู้เขียน.....	55



สารบัญตาราง

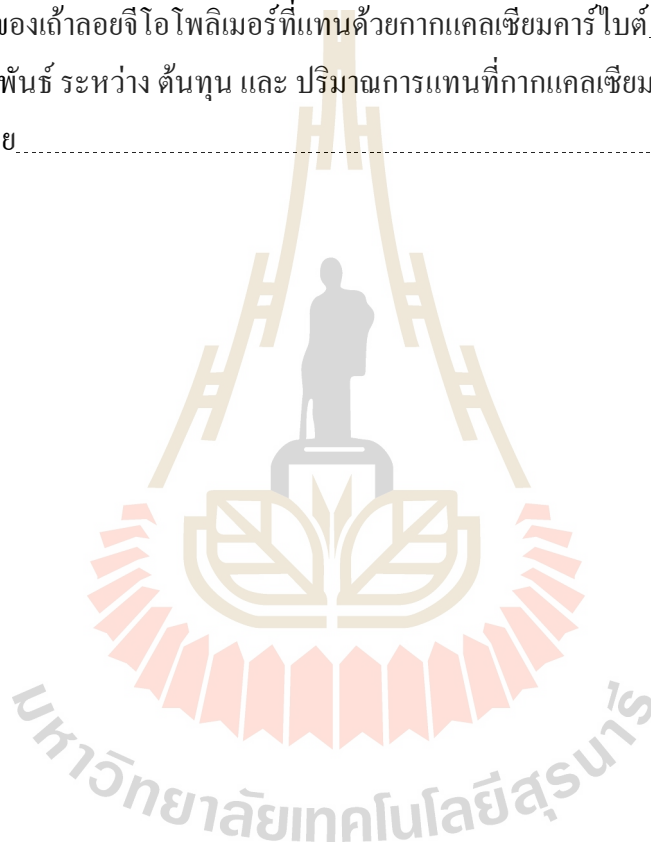
ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	9
2.2 ขนาดผลของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์.....	11
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และวัสดุผสมรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP).....	41
4.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	41



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของกากเคลเซียมคาร์ไบด์.....	6
2.2 Polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework.....	7
2.3 ข้อมูลการทดสอบการบดอัด (A) กราฟทดสอบการบดอัด RAP 100% และ RAP ผสม Fly Ash ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (B) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่RAP+10%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่าง ๆ (C) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่RAP+20%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่าง ๆ (D) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่RAP+30%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่าง ๆ.....	33
2.4 กำลังรับแรงอัดของ RAP+FA ที่อัตราส่วนต่างๆ ระยะบ่ม 7 วันและ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง.....	34
3.1 แผนดำเนินงานตลอดการวิจัย.....	38
4.1 ร้อยละของวัสดุมวลรวมหายาจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน (Sieve Analysis).....	40
4.2 (a) ภาพวัสดุมวลรวมหายาจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และ (b) ภาพวัสดุมวลรวมหายาจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) (c) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) (d) ภาพเถ้าลอย (Fly ash) ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง Scanning Electron Microscopy (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	42
4.3 กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุมวลรวมหายาจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 0 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP).....	44
4.4 กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุมวลรวมหายาจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP).....	45
4.5 กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุมวลรวมหายาจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP).....	45

4.6	กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีตไร้เซล (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้เซล (RAP).....	46
4.7	กราฟแสดงกำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้เซล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่เปรียบเทียบค่าตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุก ผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล).....	47
4.8	กำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่แทนด้วยกากเคลเซียมคาร์ไบด์.....	48
4.9	ความสัมพันธ์ ระหว่าง ต้นทุน และ ปริมาณการแทนที่กากเคลเซียมคาร์ไบด์ ในเถ้าลอย.....	50



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการก่อสร้างถนนต่างๆ โดยก่อสร้างขึ้นมาใหม่ และปรับปรุงถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ตามความต้องการใช้ท้องถนนจากปริมาณรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปิดใช้งานไประยะหนึ่ง มักจะเกิดความเสียหาย เนื่องจากการรับน้ำหนักของยานพาหนะ การเสื่อมสภาพเองของวัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงของ ภูมิอากาศ เช่น การหลุ่ร่อน การเกิดร่องล้อ และรอยแตกแบบต่างๆ ถ้าไม่มีการซ่อมแซม บำรุงรักษา ถนนจะเกิดความเสียหายมากขึ้น ส่งผลกระทบด้านการสัญจรแก่ผู้ใช้ถนน และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่มากขึ้น ในกรณีที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพจะถูกรื้อและนำทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ ปัจจุบันผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลได้รับความนิยมนำกลับมาใช้เป็นวัสดุผสมรวมสำหรับงานก่อสร้างทางเนื่องจากมีราคาที่ถูกลงกว่าวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดของแต่ละหน่วยงานที่กำหนด มีความพยายามที่จะใช้ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ผสมกับวัสดุผสมรวมที่ได้จากธรรมชาติสำหรับการใช้งานในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนน บ่อยครั้งที่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมนั้นยังไม่ถึงข้อกำหนดของหน่วยงานที่ต้องการ จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานทำถนนแล้วเสื่อมสภาพ โดยนำวัสดุผสมรวมหายาจากชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมารีไซเคิลแล้วกลับมาใช้ในชั้นพื้นทางโดยผ่านกระบวนการผสมวัสดุจีโอพอลิเมอร์ปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุทางวิศวกรรม การพัฒนาวัสดุดังกล่าวจึงการลดต้นทุน ค่าใช้จ่าย การก่อสร้างถนนชั้นพื้นทางและยังพัฒนาคุณสมบัติบางประการของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตให้ดีขึ้น สามารถเพิ่มระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนาน และทำให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น

วัสดุจีโอพอลิเมอร์ จัดเป็น Green material ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก่อให้เกิด (Greenhouse effect) จีโอพอลิเมอร์ ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงในการเตรียมตัวอย่าง อีกทั้งปลดปล่อย CO₂ ต่ำ และทำให้ถนนชั้นพื้นทางสามารถกักเก็บแรงอัดได้มากขึ้น ช่วยป้องกันการวิบัติเนื่องจากอัดตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีขึ้น ทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนาปรับปรุงนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น สารทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูงที่ใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งได้แก่ สารละลาย NaOH Na₂SiO₃ และ KOH Davidovits (2011) ได้รายงานว่าค่า

กำลังของจีโอพอลิเมอร์ ที่ใช้ KOH จะให้กำลังอัดและเป็นมิตรต่อผู้ใช้งานมากกว่า NaOH กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้มาจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน โดยแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) มาทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้เป็นก๊าซอะเซทิลีน และส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยาคือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมากและเป็นปัญหาทางสภาพแวดล้อมเพราะมีความเป็นด่างสูง (ได้มีผลงานวิจัยของธนกร (2014) ศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของเถ้าหนักจีโอพอลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์) เพื่อช่วยลดปริมาณวัสดุและต้นทุนในงานก่อสร้าง

ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) และในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ต่อ เถ้าลอย (Fly Ash) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท เพื่อเป็นข้อมูลในการสนับสนุนให้มีการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกใหม่ในการใช้วัสดุดังกล่าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการกำลังรับแรงอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) และในพจน์ของอัตราส่วนระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ต่อ เถ้าลอย (FA) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน
- 1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามฐานกรมทางและกรมทางหลวงชนบท
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เถ้าลอย (FA) วัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA)

- 1.3.2 ศึกษากำลังที่อายุบ่ม 7 วันของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไฮดริค (RAP) ปรับปรุงด้วย เถ้าลอย (FA) วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วนผสมของสารกระตุ้นระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) เท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 และอัตราส่วนผสมเถ้าลอย (FA) ร้อยละ 0 10 20 30 ของน้ำหนักวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไฮดริค (RAP) บดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม (OLC)
- 1.3.3 ศึกษากำลังที่อายุบ่ม 7 วันของวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไฮดริค (RAP) ปรับปรุงด้วย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เถ้าลอย (FA) วัสดุจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วนผสมของสารกระตุ้นระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) เท่ากับ 80:20 และ 60:40 ตามลำดับ ใช้ อัตราส่วนผสมเถ้าลอย (FA) ร้อยละ 10 และ 30 ของน้ำหนักวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไฮดริค (RAP) และการแทนที่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ใน เถ้าลอย (FA) ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักเถ้าลอย (FA) บดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสม(OLC)
- 1.3.4 เปรียบเทียบผลการศึกษากับข้อกำหนดของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท เพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุมวลรวมหายาจากแอสฟัลต์คอนกรีตไฮดริค (RAP) ปรับปรุง ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เถ้าลอย (FA) วัสดุจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุ ชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท
- 1.4.2 ทราบถึงกำลังรับแรงอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตไฮดริค (RAP) ในพจน์ของ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) และในพจน์ของอัตราส่วนระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ต่อ เถ้าลอย (FA) ที่อายุบ่ม 7 วัน
- 1.4.3 ทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีตไฮดริค (RAP) ปรับปรุงด้วยในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) และในพจน์ของอัตราส่วนระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ต่อ เถ้าลอย (FA) เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามฐานกรมทาง กรมทางหลวงชนบทและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้

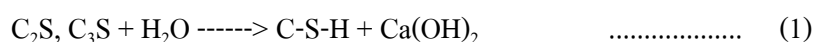
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์

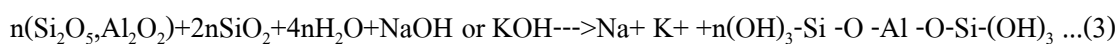
จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอพอลิเมอร์อนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอพอลิเมอร์ดังนี้ จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ และถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัด

ลักษณะโครงสร้างของไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอพอลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) ดังสมการที่ (1) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังสมการที่ (2) ปฏิกิริยานี้เองจะเพิ่มผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จีโอพอลิเมอร์เกิดจากวัตถุดิบที่มีซิลิเกต (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้องค์ประกอบหลักเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีและเกิดเป็น

Polymer chain ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สมการที่ (3) แสดงสมการทางเคมีของปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)



2.2 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้มาจากระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการเชื่อม กระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน จะนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) มาทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้เป็นก๊าซอะเซทิลีน และส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยา คือ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยอยู่ในรูปของเหลวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมากและเป็นปัญหาทางสภาพแวดล้อมเพราะมีความเป็นด่างสูง ปริมาณก๊าซอะเซทิลีนที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแคลเซียมคาร์ไบด์ สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้คือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผลิตก๊าซอะเซทิลีนและสะสมเพิ่มขึ้นทุกปี นำมาปรับปรุงให้มีคุณค่าทางวัสดุมากขึ้น การเตรียมก๊าซอะเซทิลีนทำได้โดย นำหินปูน (CaCO_3) เข้าเตาหลอมซึ่งผลที่ได้คือ Limes (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Payne, 1989)



หลังจากนั้น Limes (CaO) จะทำปฏิกิริยากับถ่านหินในขณะที่อยู่ในเตาหลอม แล้วให้แคลเซียมคาร์ไบด์ออกมาดังสมการที่ (5)



จากนั้นให้แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งจะให้ก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (6)



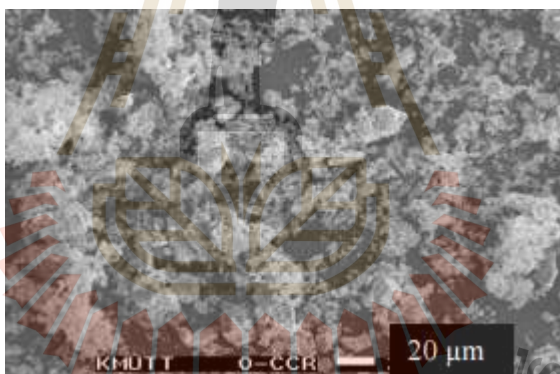
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์จะอยู่ในรูปของเหลวเนื่องจากผสมกับน้ำ มีลักษณะเหนียว ลื่นมีสีเทาอมขาวขุ่น ภายหลังจากได้ก๊าซอะเซทิลีนแล้ว กากเหล่านี้อาจจะปล่อยลงสู่บ่อพัก เพื่อตกตะกอนและแห้งเองตามธรรมชาติ เมื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไปตากแดดจนแห้งแล้วบดจน

ละเอียด พบว่ารูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมคล้ายปูนซีเมนต์ มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.3 (ปีติสานต์ และคณะ, 2539)

2.2.2 คุณสมบัติทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

จากการศึกษาของปีติสานต์และคณะ (2539) พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 62.09 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ที่มีอยู่ร้อยละ 63.94 มีค่า LOI ที่สูงมากประมาณร้อยละ 32 ค่าซิลิกอนไดออกไซด์ ร้อยละ 2.32 อลูมิเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1.57 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของธาตุอื่นอย่างละเล็กน้อย ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ สุภิชาติ มาตย์ภูธร (2541) กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีความเป็นด่างสูงคือมีค่า pH ประมาณ 12 เนื่องจากปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณที่สะสมเพิ่มขึ้นทุกวัน ตามปริมาณการผลิตก๊าซอะเซทิลีนแต่พื้นที่ทิ้งมีจำกัด ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้ประโยชน์ เพราะว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์มาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุประสาน



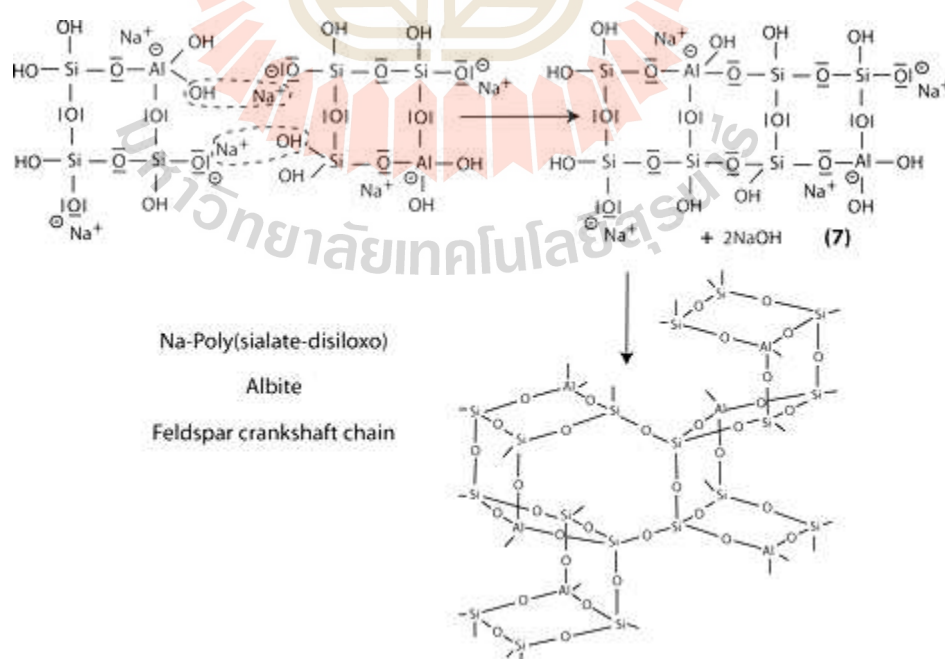
รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์

โดยที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มาจากโรงงานโดยตรงมีความชื้นอยู่มาก ลักษณะเหมือนดินเหนียวสีเทาเข้มสามารถปั้นเป็นก้อนได้ เมื่อนำไปตากแดดให้แห้งได้เป็นสีเทาอ่อน ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถพิจารณาได้จากปริมาณของอนุภาคที่ ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ที่ทดสอบด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 ซึ่งพบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณอนุภาคค้างบน ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 22 ความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ทำให้ มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของวัสดุด้วยกล้อง SEM ดังภาพถ่ายขยายอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ พบว่า กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากโรงงานโดยตรงมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็น เหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ ความถ่วงจำเพาะของกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ

2.32 ซึ่งใกล้เคียงกับความถ่วงจำเพาะของ แก้วถ่านหิน สำหรับสมบัติทางเคมีของกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ พบว่ามี CaO สูงถึงร้อยละ 52.71 และมี LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 40.1 เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการ ทดสอบ LOI มีค่าสูงประมาณ 950 องศาเซลเซียส และกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ มีองค์ประกอบ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เป็นส่วนใหญ่ทำให้ สามารถสลายตัวเป็น CaO และไอน้ำระเหยออกไป (Jaturapitakkul & Roongreung, 2003)

2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหินซึ่งมีส่วนประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลจะเกิดสารประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้ เช่นเดียวกับคอนกรีต สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกัน และเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกันก็จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในกระบวนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ สารจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาก (ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) จึงทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย



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

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ได้จากการเผาถ่านหินใน โรงงานหรือโรงไฟฟ้าถ่านหิน มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ใน สภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำ ภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงของเถ้าลอยจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอย แต่จากการศึกษาของ สมชัย กกกา แหง (2540) พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของ เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ เป็นได้ทั้ง Class F และ Class C ดังนั้นการจำแนกประเภทของเถ้าลอยโดย อาศัยหลักเกณฑ์ดังกล่าว อาจเกิดข้อโต้แย้งได้ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับ ประเทศไทยขึ้น

คุณสมบัติพื้นฐานและทางเคมีของเถ้าลอย

1) ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

American Society for Testing and Material (1995) การวิเคราะห์ส่วนประกอบ ทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของ แร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในช่วงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผาอุณหภูมิที่ใช้เผามาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมี ปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละ

ของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่เกิน 5 เพราะ ซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็ก	F	C
ออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3) (min%)	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) (max%)	5	5
ปริมาณความชื้น (max%)	3	3
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) (max%)	6	6
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) (max%)	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้ว เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียม ออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-Aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

2) ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical Composition)

เมื่อด่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวลงของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกันไปสำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Noncrystalline (Glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเมื่อต้องการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมี

องค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าได้ลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซท์ (สมชัย กกกา
แหง, 2540)

3) ปฏิกริยาทางเคมีของเถ้าลอย

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) จะได้
สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต
($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลานใน เถ้า
ลอยได้แก่ซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลือ
จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ได้สารไดแคลเซียม ซิลิ
เกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลิตผล
เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็น
ส่วนผสมจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลายเมื่อใส่เถ้า
ลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน

2.4 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

งานนี้ประกอบด้วยการก่อสร้างพื้นทางที่ใช้หินคลุกผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ โดยจะ
ก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้และได้รับการ
ตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการปู กลั้วแต่ง แล้วบดทับให้ถูกต้องตามแนว ระดับ ความลาด ขนาด
ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดง ไว้ในแบบ

2.4.1 วัสดุ

2.4.1.1 หินคลุก ต้องเป็นวัสดุหินไม่มวลรวม (Crushed Rock Soil Aggregate Type)
ที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่ฝุ่น และปราศจากวัสดุอื่นเจือปน จากแหล่งที่
ได้รับเห็นชอบจากกรมทางหลวงแล้ววัสดุจำพวก Shale ห้ามนำมาใช้

ในกรณีไม่ได้ระบุคุณสมบัติของหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำหินคลุกผสม
ปูนซีเมนต์ต้องมีคุณสมบัติต่อไปนี้

2.4.1.1.1 มีค่าความสึกหรอเมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล-ท.202
“วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอ Coarse Aggregate Abrasion”
ไม่เกินร้อยละ 40

2.4.1.1.2 มีค่าของส่วนที่ได้คงทน (Loss) ของมวลหยาบ เมื่อทดสอบตาม
วิธีการทดลองที่ ทล-ท. 213 “วิธีการทดลองหาความคงทน
(Soundness) ของมวลรวม “โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ
ไม่เกินร้อยละ 9

- 2.4.1.1.3 ส่วนละเอียด (Fine Aggreate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับส่วนหยาบ(Coarse Aggreate) การใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นใดเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน
- 2.4.1.1.4 มีขนาดกะทัดดี และเมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล-ท. 205 “วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านจะแกรงแบบล้าง” ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.1
- 2.4.1.1.5 ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม ของส่วนละเอียดที่ผ่านจะแกรงขนาด 0.45 มิลลิเมตร(เบอร์ 40)
- 2.4.1.1.6 มีค่า Liquid Limit เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล-ท. 102 “วิธีการทดสอบหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน ไม่เกินร้อยละ 25
- 2.4.1.1.7 มีค่า Plasticity Index เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล-ท. 103 “วิธีการทดสอบหาค่า Plastic Limit (PL) และ Plasticity Index (PI) ของดิน ไม่เกินร้อยละ 6
- 2.4.1.1.8 มีค่า CBR เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล-ท. 109 “วิธีการทดสอบหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ความแน่นแห้งของการบดอัดร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทดสอบที่ ทล-ท. 108 “วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

ตารางที่ 2.2 ขนาดกะทัดของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์

ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล		
	B	C	D
50.0 (2 นิ้ว)	100	-	-
25.0 (1 นิ้ว)	75-95	100	100
9.50 (3/8 นิ้ว)	40-75	50-85	60-100
4.75 (เบอร์ 4)	30-60	35-65	50-85
2.00 (เบอร์ 10)	25-45	25-50	40-70
0.425 (เบอร์ 40)	15-30	15-30	25-45
0.075 (เบอร์ 200)	5-20	5-15	5-20

2.4.1.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติถูกต้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์” ปูนซีเมนต์ที่ใช้อาจบรรจุอยู่ในไซโลหรือเป็นแบบบรรจุถุงก็ได้ ถ้าเป็นแบบบรรจุถุงก็ได้ ถ้าเป็นแบบบรรจุถุง ผู้รับจ้างจะต้องจัดทำ โรงเก็บปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้ปูนซีเมนต์ขึ้น

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ตลอดงานตามสัญญาต้องเป็นตราและประเภทเดียวกัน เว้นแต่จะได้รับความเห็นชอบจากนายช่างควบคุมงานเป็นอย่างอื่น

ห้ามนำปูนซีเมนต์ที่จับตัวเป็นก้อนปนอยู่มาใช้งาน เว้นแต่จะได้มีการออกแบบส่วนผสมใหม่ และได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานแล้ว

2.4.1.3 น้ำ

น้ำที่จะนำมาใช้ผสมหรือบ่มชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ จะต้องสะอาดปราศจากสารต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรีย์วัตถุ หรือสารอื่นใด ที่จะเป็นอันตรายแก่ชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ทั้งนี้จะต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อนนำมาใช้งาน

2.4.2 เครื่องจักรและเครื่องมือ

ก่อนเริ่มงาน ผู้รับจ้างจะต้องเตรียมเครื่องจักรและเครื่องมือต่างๆ ที่จำเป็นจะต้องใช้ในการดำเนินงานทางด้านวัสดุและการก่อสร้างไว้ให้พร้อมที่หน้างาน ทั้งนี้ต้องเป็นแบบ ขนาด และอยู่ในสภาพที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่นายช่างผู้ควบคุมงานเห็นสมควร

ถ้าเครื่องจักรและเครื่องมือชิ้นใดทำงานได้ไม่เต็มที่ หรือทำงานไม่ได้ผลตามวัตถุประสงค์ ผู้รับจ้างจะต้องทำการแก้ไขหรือจัดหาเครื่องจักรและเครื่องมืออื่นใดมาใช้แทนหรือเพิ่มเติม ทั้งนี้ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

2.4.2.1 โรงผสมแบบติดตั้งกับที่ (Central Mixing Plant)

2.4.2.1.1 ลักษณะทั่วไป

ลักษณะทั่วไปของโรงผสมแบบติดตั้งกับที่ วัสดุต่างๆ ของส่วนผสมหินคลุกซีเมนต์ให้จัดอัตราส่วนเป็นน้ำหนักทั้งหมด โดยวัสดุหินคลุก ปูนซีเมนต์และน้ำจะผสมรวมกันในโรงผสม การชั่งวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการผสมหินคลุกซีเมนต์จะต้องดำเนินการตามที่นายช่างผู้ควบคุมงานเห็นควร

ปริมาณของวัสดุที่ใส่เข้าไปในเครื่องผสมจะต้องไม่มากเกินไปจนทำให้หินคลุกซีเมนต์ผสมไม่เข้ากัน และถ้าหากพบว่าหินคลุกซีเมนต์ผสมไม่เข้ากัน ผู้รับจ้างจะต้องลดอัตราการใส่วัสดุเข้าไปในเครื่องผสมลงตามสัดส่วนของวัสดุแต่ละอย่าง

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

โรงผสมแบบชุดหรือแบบผสมต่อเนื่องต้องมีเครื่องป้อนวัสดุและมาตรวัดปริมาณวัสดุที่ผ่านเข้าไปในเครื่องผสมตามปริมาณที่ได้กำหนดไว้จากการออกแบบ

โรงผสมหินคลุกซีเมนต์อาจจะดัดแปลงมาจากโรงผสมซีเมนต์คอนกรีต หรือโรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก็ได้ แต่ต้องอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้เหมาะสมโดยได้รับเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อนนำมาใช้งาน

2.4.2.1.2 โรงผสมหินคลุกซีเมนต์แบบชุด

โรงผสมแบบชุดจะประกอบด้วยเครื่องผสมที่มีตัวผสมที่เหมาะสม ทำหน้าที่คลุกเคล้าหินคลุกซีเมนต์ให้เข้ากันดี

โรงผสมแบบชุดจะต้องมีเครื่องจับเวลาของการผสม ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ผู้ควบคุมสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน เครื่องจับเวลาจะต้องสามารถอ่านเวลาละเอียดถึง 2 วินาที นอกจากนี้โรงผสมจะต้องติดตั้งเครื่องนับจำนวนชุดที่ผสมแล้วเสร็จติดอยู่กับมิเตอร์

เวลาของการผสมให้เริ่มนับเมื่อวัสดุทุกอย่างถูกใส่ลงในห้องผสม จนถึงเวลาเมื่อหินคลุกซีเมนต์ถูกปล่อยจากห้องผสม การผสมจะต้องดำเนินต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งหินคลุกซีเมนต์มีลักษณะคลุกเคล้าเข้ากันดี โดยสังเกตจากสีและลักษณะของส่วนผสมที่ควรจะมีลักษณะกลืนกันดี โดยปกติเวลาของการผสมไม่ควรน้อยกว่า 30 วินาที

2.4.2.1.3 โรงผสมหินคลุกซีเมนต์แบบผสมต่อเนื่อง

โรงผสมแบบผสมต่อเนื่องจะจัดสัดส่วนของหินคลุกและปูนซีเมนต์ โดยส่งจากขึงผ่านสายพานหรือเครื่องป้อนอื่นใดผ่านเข้าไปยังโรงผสมอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของหินคลุก ปูนซีเมนต์ และน้ำ ถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

ระบบการป้อนหินคลุกเข้าสู่โรงผสมอาจจะเป็นระบบทางกลหรือทางไปฟ้าก็ได้ แต่ควรเป็นระบบเดียวกันกับระบบการป้อนปูนซีเมนต์

ในการผสมหินคลุกซีเมนต์แบบผสมต่อเนื่อง ผู้รับจ้างจะต้องเตรียมเครื่องชั่งสำหรับชั่งหามวลของหินคลุก ปูนซีเมนต์และน้ำ เพื่อตรวจสอบส่วนผสมให้ถูกต้อง

2.4.2.1.4 เครื่องชั่ง

เครื่องชั่งที่ใช้ในการหามวลของหินคลุก ปูนซีเมนต์ และน้ำ ต้องเป็นแบบคานมีความละเอียดผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักที่ชั่ง

กรณีควบคุมปริมาณน้ำโดยใช้ปริมาตร เครื่องควบคุมปริมาณน้ำจะต้องมีความละเอียดผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักที่ชั่ง

ผู้รับจ้างจะต้องจัดหาค้อนน้ำหนักมาตรฐานขนาด 25 กิโลกรัม อย่างน้อย 10 ค้อน ไว้ที่หน้างาน เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องชั่ง

ห้ามใช้เครื่องชั่งซึ่งเป็นแบบที่ใช้สปริง

การคือน้ำหนักปูนซีเมนต์อาจจะใช้วิธีชั่งโดยตรง หรือจากการนับจำนวนถุงบรรจุมาตรฐานก็ได้ โดยทั่วไปปูนซีเมนต์บรรจุในถุงมาตรฐานจะหนัก 50 กิโลกรัม ถ้าใช้วิธีชั่งก็จะมีเครื่องชั่งและถังสำหรับชั่งปูนซีเมนต์ต่างหาก พร้อมทั้งรางและเครื่องมืออื่นๆเพื่อใช้สำหรับปล่อยให้ปูนซีเมนต์ออกจากถังชั่งไปสู่ห้องผสม การดำเนินงานในเรื่องนี้จะต้องใช้วิธีการที่เหมาะสมและได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงาน

2.4.2.2 เครื่องจักรผสมแบบเคลื่อนที่ (Travelling Mixing Machine)

เครื่องจักรผสมแบบเคลื่อนที่ ต้องเป็นแบบที่ใบมีดผสมแบบแกนหมุน (Mechanical Rotor)

ซึ่งผสมได้ตลอดความลึก สำหรับผสมหินคลุก ปูนซีเมนต์และน้ำติดตั้งอยู่ และต้องมีเครื่องจักรหรืออุปกรณ์จ่ายปูนซีเมนต์ หรือน้ำ ที่สามารถควบคุมอัตราการจ่ายได้อย่างสม่ำเสมอตามปริมาณที่กำหนดหรือเป็นเครื่องจักรผสมอื่นใด ที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงแล้วว่าสามารถควบคุมการผสมหินคลุกปูนซีเมนต์และน้ำให้มีลักษณะคลุกเข้ากันได้อย่างสม่ำเสมอ ห้ามใช้รถเกลี่ยเป็นเครื่องจักรผสมหินคลุกกับปูนซีเมนต์โดยตรง

2.4.3 กำหนดของส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์

2.4.3.1 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และน้ำ ที่ใช้ผสมกับหินคลุกนั้น นายช่างผู้ควบคุมงานจะเป็นผู้กำหนดให้หน้างาน และอาจจะเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับการทดลองหาค่ารับแรงอัดแท่งตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ ทั้งในห้องทดลองและจากการทำพื้นที่ทางทดลองในสนาม

2.4.3.2 ในการออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมกับหินคลุกและน้ำ ให้ถือเอาค่ากำลังรับแรงอัดแท่ง ตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.105 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน “ โดยอนุโลม ซึ่งแท่งตัวอย่างทดสอบจะถูกบดอัดในแบบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน “ ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้น

เปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง มีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

- 2.4.3.3 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมแท่งตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ เพื่อการทดสอบ กำลังรับแรงอัดตามวิธีการทดลองในข้อ 2.4.3.2 ให้ใช้ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการทดลองการบดอัดหินคลุกตาม วิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ปริมาณน้ำปริมาณนี้ใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการบดทับใน สนาบขณะทางการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

หมายเหตุ หากต้องการหาปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ที่แท้จริงของส่วนผสมแล้วให้หาจากการทดลองบดอัดหินคลุกผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์จากส่วนผสมตามข้อ 3.2 แล้วดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.- ท. 108 “วิธีการ ทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ที่ได้จากการบดอัดหินคลุกผสมซีเมนต์ จะให้ค่าที่ไม่แตกต่างไปจากปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ซึ่งได้จากการบดอัดหินคลุกตามข้อ 2.4.3.3 โดยวิธีการทดลองแบบเดียวกันมาก น้ก

- 2.4.3.4 วัสดุต่างๆของส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ได้แก่ หินคลุก ปูนซีเมนต์ และ น้ำให้จัดอัตราส่วนเป็นน้ำหนักทั้งหมด ปริมาณปูนซีเมนต์ใช้ต้องไม่น้อย กว่าร้อยละ 1 และไม่เกินร้อยละ 2 โดยมวลของหินคลุก หรือตามที่กำหนด ไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น

- 2.4.3.5 หินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้จากการทำพื้นทางทดลองในสนามจะต้องมี คุณสมบัติสอดคล้องตามข้อกำหนดต่างๆดังต่อไปนี้

1. การผสมทดลองทั้งในห้องทดลองและทำพื้นทางทดลองในสนาม จะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จก่อนเริ่มงานก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสม ซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 30 วัน
2. ส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ จะต้องมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 2,413 กิโลพาสคัล (350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) หรือตามที่กำหนดไว้ใน แบบ
3. การทดลองกำลังรับแรงอัดให้ดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 105 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Stength ของดิน วิธีการทดลองที่ ทล.-ท.108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูง

กว่ามาตรฐาน “ ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง

4. จำนวนแท่งตัวอย่างทดสอบจากการผสมทดลองในห้องทดลองและจากการทำพื้นที่ทางทดลองในสนามแต่ละอย่างไม่น้อยกว่า 27 ตัวอย่าง

2.4.4 วิธีการก่อสร้าง

2.4.4.1 การทำพื้นที่ทางทดลองในสนาม

อัตราส่วนของปูนซีเมนต์และน้ำที่จะใช้ผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ระหว่างการทดลองก่อสร้างพื้นที่ทางทดลองในสนามแปลงแรก ให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ได้จากการออกแบบตามข้อ 3.2 และใช้ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content ตามข้อ 2.4.3.3 เป็นส่วนผสมที่จะก่อสร้างแปลงทดลองแปลงแรก ซึ่งควรจะมีขนาดยาวประมาณ 200-500 เมตร ให้ดำเนินการเตรียมแท่งตัวอย่างทดสอบหากำลังรับแรงอัดตามข้อ 2.4.3.5 ทันทีที่เริ่มงาน การเตรียมแท่งตัวอย่างให้เตรียมในสนาม โดยเก็บตัวอย่างตัวแทนขณะทำการปูส่วนผสมพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เพื่อที่จะได้แท่งตัวอย่างทดสอบที่มีคุณภาพคล้ายส่วนผสมหินคลุกผสมซีเมนต์ในสนามมากที่สุด ห้ามทำการผสมคลุกเคล้าตัวอย่างใหม่ทั้งก่อนและขณะทำการบดทับอัดตัวอย่าง

2.4.4.2 การก่อสร้าง

เมื่อผลการตรวจสอบคุณภาพของพื้นที่ทางทดสอบแปลงแรกเป็นไปตามข้อกำหนดตามข้อ 2.4.4.3 แล้ว สำหรับแปลงก่อสร้างต่อไป ให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ตามที่ได้ออกแบบไว้

ปริมาณน้ำที่ใช้ในระหว่างการผสมหินคลุกซีเมนต์ ให้ใช้ที่ Optimum Moisture Content โดยประมาณ

กรณีใช้โรงผสมแบบติดตั้งกับที่ ภายหลังจากผสมหินคลุกผสมซีเมนต์เข้ากันดีแล้ว ให้ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสม เช่น รถบรรทุกกระบะยกหินคลุกผสมซีเมนต์จากโรงผสมไปปูลงบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นทางอื่นใดที่เตรียมไว้แล้ว โดยปูลงไปในพื้นที่ที่ได้จัดเตรียมไว้ ทำการบดทับให้แน่นโดยใช้เครื่องมือบดทับที่เหมาะสมระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งเสร็จการบดทับไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง

กรณีใช้เครื่องจักรผสมแบบเคลื่อนที่ ภายหลังจากที่ส่วนผสมหินคลุกปูนซีเมนต์และน้ำคลุกเคล้าเข้ากันอย่างสม่ำเสมอ ให้เกลี่ยแต่งแล้วทำการบดทับให้แน่น ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งเสร็จการบดทับไม่ควรเกิน 2 ชั่วโมง

ภายหลังการบดทับให้ทำการแต่งระดับชั้นสุดท้าย (Final Grading) ทันที

ควรทำการพ่นน้ำเลี้ยงผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ติดต่อกันในช่วง 3 วันแรกภายหลังการบดทับ เพื่อให้กำลังรับแรงอัดของหินคลุกผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้นและยังช่วยลดรอยแตกผิวอันเนื่องมาจากการสูญเสียความชื้นหลังการบดทับด้วย

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นแหล่งวัสดุ เครื่องจักร เครื่องมือ หรือสิ่งอื่นใดที่มีผลทำให้คุณภาพของหินคลุกผสมซีเมนต์เปลี่ยนไป จะต้องทำการตรวจสอบอัตราส่วนผสมใหม่ทุกครั้งเพื่อปรับส่วนผสมให้คุณภาพถูกต้องอยู่เสมอ

การบดทับและปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการก่อสร้าง ก็มีผลอันอาจทำให้ต้องมีการปรับปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงด้วย

2.4.4.3 การควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง

การก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ให้ก่อสร้างเป็นชั้นๆ โดยให้ความหนาหลังการบดทับแต่ละชั้นไม่เกิน 150 มิลลิเมตร

เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ซึ่งแบบที่กำหนดไว้หนาไม่เกิน 150 มิลลิเมตร จนได้ความยาวพอเหมาะในแต่ละวันแล้ว ให้ดำเนินการทดสอบความแน่นของการบดทับตามข้อ 2.4.4.3.1 และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามข้อ 2.4.4.3.2 หากผลทดลองเป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในชั้นต่อไปได้

ในกรณีที่แบบพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์กำหนดไว้หนา 200 มิลลิเมตร ให้ผู้รับจ้างก่อสร้างพื้นทางเป็น 2 ชั้น หนาชั้นละประมาณ 100 มิลลิเมตร โดยที่เมื่อได้ก่อสร้างพื้นทางชั้นแรก จนได้ความยาวพอเหมาะที่จะก่อสร้างพื้นทางในชั้นถัดไปแล้ว ให้ดำเนินการทดสอบความแน่นของการบดทับตามข้อ 2.4.4.3.1 และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามข้อ 2.4.4.3.2 หากผลทดลองเป็นไปตามข้อกำหนดก็ให้ดำเนินการก่อสร้างทางหินคลุกผสมซีเมนต์ในชั้นต่อไปได้

ก่อนการปูพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ชั้นถัดไป ให้ทำการพ่นน้ำให้ผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วชุ่มชื้น ถ้าผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เรียบเป็นมันให้ผู้รับจ้างทำการครูดผิวหน้าของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เป็นริ้วรอยก่อนแล้วค่อยพ่นน้ำให้ชุ่มชื้น

ผิวหน้าของพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไปแล้ว ควรมีความชุ่มชื้นพอควรในขณะที่ทำการปูพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ในชั้นถัดไป เพื่อช่วยให้ชั้นหินคลุกผสมซีเมนต์กะยิดกันดี ผิวหน้าที่หยาบของพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้ก่อสร้างไปแล้วที่มีความชื้นพอเหมาะ จะช่วยให้เกิดการยิดเกาะที่ดีกับชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่กำลังจะก่อสร้างทับลงไป

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

2.4.4.3.1 การทดสอบความแน่นของการบดทับ งานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์จะต้องทำการบดทับให้ได้ความแน่นแห้งสม่ำเสมอตลอดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบของความแน่นแห้งสูงสุด ที่ได้จากการทดลองตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ในห้องทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน”

การทดสอบความแน่นของการบดทับ ควรดำเนินการทดสอบในวันทำการบดทับเสร็จตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 603 “วิธีการทดลองหาค่าความแน่นของวัสดุในสนามโดยใช้ทราย” ทุกระยะประมาณ 100 เมตร ต่อความกว้าง 1 ช่องจราจร หรือประมาณพื้นที่ 500 ตารางเมตร ต่อ 1 หลุมตัวอย่าง หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น

2.4.4.3.2 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

2.4.4.3.3 การทดสอบซ้ำ ในกรณีที่ค่าความแน่นของการบดทับตามข้อ

2.4.4.3.1 หรือค่ากำลังรับแรงอัดตามข้อ 2.4.4.4.2 ต่ำกว่าที่

กำหนด ผู้รับจ้างอาจขอให้เจาะเก็บตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ช่วงที่เป็นปัญหา เพื่อนำตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดใหม่ โดยดำเนินการในลักษณะเดียวกับข้อ 2.4.4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบที่เจาะจากสนามจำนวน 3 ก้อน ที่อายุไม่เกิน 28 วัน จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัดที่กำหนดไว้ในแบบ จึงจะถือว่าหินคลุกผสมซีเมนต์ในช่วงนั้นใช้ได้ ทั้งนี้อนุญาตให้มีแท่งตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัดที่กำหนดได้ไม่เกิน 1 ก้อน แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าที่กำหนด

ถ้าผลการทดสอบไม่ได้ตามที่กำหนดนี้ถือว่าหินคลุกผสมซีเมนต์ใช้ไม่ได้ ผู้รับจ้างจะต้องรื้อเอาหินคลุกผสมซีเมนต์ในช่วงนี้ออกทิ้งไป และให้ทำการก่อสร้างหินคลุกผสมซีเมนต์ให้ได้มาตรฐานตามข้อกำหนด

ผู้รับจ้างจะต้องเป็นผู้ออกค่าใช้จ่ายในการทดสอบซ้ำ และค่าใช้จ่ายในการรื้อเอาหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ใช้ไม่ได้ตามข้อกำหนดนี้ออกทิ้งไปทั้งสิ้น

2.4.4.4 การบ่มและการเปิดการจราจร

ในกรณีที่ผู้รับจ้างยังไม่ลาดแอสฟัลต์ชั้น Prime Coat หลังก่อสร้างเสร็จ ให้บ่มหินคลุกผสมซีเมนต์ทุกชั้น โดยพ่นน้ำลงไปบนผิวหน้าของหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ก่อสร้างเสร็จแล้วให้ผิวหน้าชุ่มชื้นตลอดเวลาติดต่อกันนานอย่างน้อยที่สุด 3 วัน นับจากวันที่บดทับเสร็จ ในช่วงเวลาของการบ่มอนุญาตให้เปิดการจราจรได้ตามปกติ

2.4.4.5 การลาดแอสฟัลต์ Prime Coat

2.4.4.5.1 ให้ผู้รับจ้างทำการลาดแอสฟัลต์ Prime Coat ภายหลังจากที่ได้ทำการก่อสร้างพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เสร็จในเวลาอันสมควร

2.4.4.5.2 เนื่องจากพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เป็นพื้นทางที่มีผิวหน้าแน่นมาก ในการลาดแอสฟัลต์ชั้น Prime Coat ให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน

ที่ ทล.-ม. 402 “การลาดแอสฟัลต์ Prime Coat” ในอัตราการลาด
0.6 – 1.0 ลิตรต่อตารางเมตร

กรณีใช้ Cut-back Asphalt ชนิด MC-70 หากพบว่า แอสฟัลต์ Prime Coat ไม่ซึมลงไปบนชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ดีเท่าที่ควร ให้ผู้รับจ้างพิจารณาใช้ แอสฟัลต์ MC-30 แทนแอสฟัลต์ MC-70 แต่ถ้าผู้รับจ้างไม่สามารถจะหาซื้อแอสฟัลต์ MC-30 ได้ ผู้รับจ้างอาจพิจารณาใช้แอสฟัลต์ MC-70 ผสมกับน้ำมันก๊าดในปริมาณที่เหมาะสมลาดลงไปบนพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์เป็นชั้น Prime Coat

กรณีใช้ แอสฟัลต์อิมัลชัน ต้องเป็นแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดพิเศษ ที่มีความสามารถในการซึมลงไปบนชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ได้เทียบเท่าหรือมากกว่า Cut-back Asphalt โดยจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงก่อน

2.4.4.6 เครื่องมือเจาะเก็บตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์

ผู้รับจ้างจะต้องจัดเตรียมเครื่องมือเจาะเก็บตัวอย่างหินคลุกผสมซีเมนต์ ประจำไว้ที่หน้างาน โดยเครื่องมือดังกล่าวจะต้องมีสภาพที่สามารถจะใช้งานได้ตลอดเวลา และมีความสามารถในการเจาะ เก็บก่อนตัวอย่างได้ตลอดความลึกที่ทำการก่อสร้าง

2.5 มาตรฐานวิธีการทดลอง

2.5.1 วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน การทดลอง Compaction Test วิธีการนี้เป็นการทดลองโดยวิธี Dynamic Compaction เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความแน่นของดินกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดทับ เมื่อทำการบดทับ นำแบบ (Model) ตามขนาดข้างล่างนี้ด้วยค้อนหนัก 4.537 กิโลกรัม (10.0 ปอนด์) ระยะปล่อย ค้อนตก 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว)

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

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

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

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

วิธีการทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้อาศัยวิธีการและปรับปรุงจากการทดลองของเครื่องมือทดลอง ประกอบด้วย

แบบ (Mold) ทำด้วยโลหะแข็งและเหนียว ลักษณะทรงกระบอกกลวง มี 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) และจะต้องมีปลอก (Collar) ขนาดเดียวกัน สูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และจะต้องมีปลอกขนาดเดียวกันสูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีฐานทึบหรือเจาะรูพรุนในการทดลองต้องใช้เหล็กโลหะรอง (Spacer Disc) ตามข้อ 2.5.1 รองด้านล่าง เพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) หรืออาจใช้แบบสูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) โดยไม่ต้องใช้แท่งโลหะรอง แต่ต้องมีฐานทึบหรือแบบขนาดสูงอื่นใด ซึ่งเมื่อใช้แท่งโลหะรองแล้วได้ความสูงของตัวอย่างในแบบเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว)

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

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

เครื่องดันตัวอย่าง (Sample Extruder) เป็นเครื่องดันดินออกจากแบบภายหลังเมื่อทดลองเสร็จแล้ว จะมีหรือไม่มีก็ได้ ประกอบด้วยตัว jack ทำหน้าที่เป็นตัวดันและโครงเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวจับแบบในกรณีที่ไม่มีการใช้ส่วหรือเครื่องมืออย่างอื่นและตัวอย่างออกจากแบบตาชั่งแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 16 กิโลกรัม ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัม สำหรับตาชั่งตัวอย่างทดลอง และตาชั่งแบบ Scale หรือแบบ Balance มีขีดความสามารถชั่งได้ 1,000 กรัม ชั่งได้รายละเอียดถึง 0.01 กรัม สำหรับหาปริมาณน้ำในดิน

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

เครื่องผสมเป็นเครื่องมือจำเป็นอย่างอื่นต่าง ๆ ที่ใช้ผสมตัวอย่างกับน้ำ ได้แก่ ถาด ช้อน พลั่ว เกรียง ก้อนยาง ถ้วยตวง วัดปริมาตรน้ำ หรือจะใช้เครื่องผสมแบบ Mechanical Mixer ก็ได้ กระป๋อง ออบดินสำหรับใส่ตัวอย่างดินเพื่ออบหาปริมาณน้ำในดิน การเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ ดินหรือหินคลุก หรือ Soil – Aggregate หรือวัสดุอื่นใดที่ต้องการทดลองให้ดำเนินการ ถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนใหญ่ที่สุด (Maximum size) มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้งและทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือแบ่งตัวอย่าง เมื่อแห้งพอเหมาะแล้ว (มีน้ำประมาณร้อยละ 2 – 3) นำมาร่อนผ่านตะแกรงเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ทำการชั่งหามวลของวัสดุแต่ละ 8 ขนาดที่เตรียมไว้ก็จะทราบมวลของตัวอย่างแต่ละขนาดว่ามีอยู่ขนาดเท่าใด ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ให้ทิ้งไปแทนที่ของตัวอย่างด้วยตัวอย่างที่มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ด้วยมวลที่เท่ากับตัวอย่าง เช่น มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร อยู่ 2,650 กรัม ก็ให้ใช้ตัวอย่างขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นอีก 2,650 กรัม ที่เหลือจะเป็นขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร ตามที่มีจริง ดังนี้ตัวอย่างทั้งหมดที่มวล 9,000 กรัม มีขนาดใหญ่กว่า 19.0 มิลลิเมตร 2,650 กรัม มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 4,850 กรัม มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร 1,500 กรัม จากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วจะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้ คือ มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร 4,850 กรัม มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร 1,500 กรัม จากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วจะได้มวลของตัวอย่างที่เตรียมไว้ คือ มีขนาดระหว่าง 19.0 มิลลิเมตร ถึงขนาด 4.75 มิลลิเมตร เป็นจำนวน $2,650 + 4,850$ เท่ากับ 7,500 กรัม และมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เท่ากับ 1,500 กรัม คลุกตัวอย่างที่ได้ให้เข้ากันถ้าขนาดของตัวอย่างก้อนที่ใหญ่ที่สุดมีขนาดเล็กกว่า 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)ให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้ง (มีน้ำประมาณร้อยละ 2 – 3) และทำ Quartering หรือใช้เครื่องมือ แบ่งตัวอย่างแล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากันถ้าต้องการทดลองตามวิธี ค. หรือ ง. ดังกล่าวในขอบเขตให้นำตัวอย่างมาทำให้แห้งโดยวิธีตากแห้งแล้วใช้ก้อนยางทุบให้ก้อนหลุดจากกันและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) แล้วคลุกตัวอย่างให้เข้ากัน

การทดลอง Compaction Test จะใช้แบบ (Mold) ขนาดใดก็ได้แล้วแต่ความต้องการตามวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวในขอบเขตและดำเนินการทดลอง ดังนี้

2.5.1.1 นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากันได้ดี

2.5.1.2 เติมน้ำปริมาณหนึ่ง โดยปกติมักเริ่มต้นที่ประมาณร้อยละ 4 ต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ให้ความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content)

- 2.5.1.3 คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้วหรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี
- 2.5.1.4 แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อยโดยประมาณให้ดินแต่ละชั้นเมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 4 ของ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว)
- 2.5.1.5 ทำการบดทับโดยค้อน ดังนี้ ตามวิธี ก. และ ค. จำนวน 25 ครั้ง และ ตามวิธี ข. และ ง. จำนวน 56 ครั้ง 9
- 2.5.1.6 ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้น ๆ จำนวน 5 ชั้น มีความสูงประมาณ 127 มิลลิเมตร (5 นิ้ว) (สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร)
- 2.5.1.7 ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบร้อยเท่าระดับของตอนบนของแบบ (เหลือความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร) กรณีมีหลุมบนหน้าให้เติมดินตัวอย่างแล้วใช้ค้อนยางทุบให้น้ำไปซึ่งจะได้มวลของดินตัวอย่าง และมวลของแบบหักมวลของแบบออกก็จะได้มวลของดินตัวอย่างเปียก (A)
- 2.5.1.8 ในขณะที่เดียวกับที่ทำการบดทับตัวอย่างในแบบให้นำดินใส่กระป๋องอบดินเพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดินด้วย มวลของดินที่นำไปหาปริมาณน้ำในดิน ขนาดก้อน ใหญ่สุด 19.0 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 300 กรัม และขนาดก้อนใหญ่สุด 4.75 มิลลิเมตร ใช้ประมาณ 100 กรัม
- 2.5.1.9 คำนวณหาค่าความเปียก P_t (Wet Density) และความแน่นแห้ง ρ_d (Dry Density) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน w (Moisture Content)
- 2.5.1.10 ดำเนินการโดยเพิ่มน้ำขึ้นอีกครั้งละ 2 % จนกว่าจะได้ความแน่นลดลงจึงหยุดการทดลอง หรืออาจลดน้ำที่ผสมในกรณีเมื่อเพิ่มน้ำแล้วได้ความแน่นลดลงเพื่อให้เขียน Curve ได้
- 2.5.1.11 เขียน Curve ระหว่างความแน่นแห้ง ρ_d และปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ w ก็จะทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุด $\text{Max. } \rho_d$ (Maximum Dry Density) และปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นสูงสุด OMC. (Optimum Moisture Content)

การคำนวณ

1. คำนวณหาปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

$$W = ((M_2 - M_1) / M_2) \times 100 \quad \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

M_1 = มวลของดินเปียก มีหน่วยเป็นกรัม

M_2 = มวลของดินอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม 10

2. คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\rho_t = V/A \quad \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อ ρ_t = ความแน่นเปียก มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

A = มวลของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็นกรัม

V = ปริมาตรของแบบหรือปริมาตรของดินเปียกที่บดทับในแบบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

3. คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = (\rho_t / (1 + (w/100))) \quad \dots\dots\dots (9)$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร

w = ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ

ในการทำ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐานให้รายงานดังนี้

1. ค่าความหนาแน่นสูงสุด มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิเมตร (แบบสูงกว่ามาตรฐาน)

2. ค่าปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นสูงสุด เป็นร้อยละ

ตัวอย่างความแน่นแห้งสูงสุด (แบบสูงกว่ามาตรฐาน) เท่ากับ 2.231 กรัมต่อ มิลลิเมตร (ใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง) ปริมาณน้ำในดินที่ทำให้ความแน่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 9.8 (ใช้ ทศนิยม 1 ตำแหน่ง)

2.5.2 วิธีการทดลองหาค่ากำลังอัดแกนเดียว Unconfined Compressive Strength ค่ากำลัง

อัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกจะรับได้ ถ้าในกรณีที่ ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุด เมื่อความเครียด (Strain) ในแนวดิ่งเกิน ร้อยละ 20 ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อ หน่วยพื้นที่ความเครียดร้อยละ 20 นั้นเป็นค่ากำลังอัด แกนเดียว (UCS) การทดลองนี้ได้ปรับปรุง จาก AASHTO T 208 – 70 อธิบายถึงการ

หาค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) ของดินในสภาพไม่ถูกรบกวน (Undisturbed) และ Remolded อัตราการเพิ่มแรงอัดในระหว่างการทดลองจะควบคุมโดยความเครียด (Strain) หรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) ก็ได้ เครื่องมือทดลองประกอบด้วย 11 เครื่องกวด เป็นเครื่องใช้กดแท่งตัวอย่าง มีหลายแบบ เช่น Deadweight หรือ Hydraulic เป็นแรงกดหรืออาจใช้เครื่องมือกดชนิดอื่น ๆ ที่สามารถควบคุมอัตราเร็วของแรงกด และมีกำลังกด เพียงพอสำหรับดินที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) น้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) ต้องใช้เครื่องกวดที่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร (0.001 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) และสำหรับดินที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) มากกว่า 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) เครื่องกวด ต้องอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0.005 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร) เครื่องดันตัวอย่างดิน ใช้ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากท่อบาง (Thin Wall Tube)

Dial Gauge ใช้วัดได้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร หรือ 0.001 นิ้ว สามารถอ่านระยะทางเคลื่อนที่ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ของความยาวแท่งตัวอย่างที่จะใช้ ทดลอง Caliper ใช้วัดขนาดของแท่งตัวอย่างโดยวัดได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร หรือ 0.01 นิ้ว

จับเวลา

เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส

เครื่องชั่งชนิดอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม ใช้สำหรับตัวอย่างที่มีมวลน้อยกว่า 100 กรัม ให้ใช้เครื่องชั่งชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

เครื่องมือเบ็ดเตล็ด เครื่องมืออื่น ๆ ที่ต้องใช้ คือ เครื่องมือตัดและตกแต่ง ตัวอย่างเครื่องทำ ตัวอย่าง Remolded และกระป๋องอบดิน

วิธีการทดลองหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ทำได้ ดังนี้

2.5.2.1 การเตรียมตัวอย่างขนาดแท่งตัวอย่าง แท่งตัวอย่างควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 33 มิลลิเมตร (1.3 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุในตัวอย่างต้องไม่เกิน 1 ใน 10 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างและสำหรับแท่งตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 71 มิลลิเมตร (2.8 นิ้ว) ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของเม็ดวัสดุต้องไม่เกิน 1 ใน 6 มี เม็ดวัสดุที่ใหญ่กว่าที่กำหนดไว้ก็ให้หมายเหตุไว้ในแบบฟอร์มอัตราส่วนความสูงต่อเส้น

ผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างให้ได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตรถึง 0.01 นิ้ว โดยใช้ Vernier Caliper หรือเครื่องมือชนิดอื่นที่เหมาะสม

2.5.2.2 ตัวอย่าง Undisturbed เตรียมตัวอย่าง Undisturbed จากแท่งตัวอย่าง Undisturbed ขนาดใหญ่หรือดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโดยใช้ท่อบางแท่ง ตัวอย่างที่ได้จากท่อบางอาจจะทดลองได้เลยโดยไม่ต้องตกแต่งแต่ต้องตัดปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างให้เรียบและมีสัดส่วนดังที่ได้ระบุมาแล้วในการเตรียมตัวอย่างจะต้อง ระวังอย่างให้มีการเปลี่ยนรูปร่างและขนาด หน้าตัดเกิดขึ้นในระหว่างการดันตัวอย่างดินออกจากท่อบาง ถ้าหากเห็นว่าจะเกิดการอัดตัวอย่างดินหรือจะทำให้ ตัวอย่างดินถูกรบกวนก็ให้ตัดแบ่งท่อ บางตามความยาวออกเป็นส่วน ๆ การเตรียมตัวอย่างถ้าหากเป็นไปได้ก็ควรเตรียมในห้องที่ควบคุมความชื้นเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แท่งตัวอย่างทดลองจะต้องมีหน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่งตัวอย่างในการตัดและแต่งปลายทั้งสองข้างของแท่งตัวอย่างถ้าหากมีเม็ดวัสดุที่ทำให้ ผิวหน้าไม่เรียบก็ให้ปิดผิวหน้าด้วยปูนปลาสเตอร์ โดยให้ความหนาแน่น ที่สุดหรือใช้ Hydrostone หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกันให้แข็งหามวลของแท่งตัวอย่างก่อนและหลังการทดลองหาปริมาณ น้ำในดินของแท่งตัวอย่าง โดยใช้ตัวอย่างทั้งแท่งหรือส่วนที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่าง

2.5.2.3 ตัวอย่าง Remolded นำตัวอย่างดิน Undisturbed เดิมมาทำดังนี้อย่างทั่วถึงในการทำต้องระวังอย่าให้มีฟองอากาศเข้าไปปนในดิน หลังจากนั้นก็อัดดินลงใน Mold ที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมและมีขนาดตามที่ระบุไว้ เมื่อได้อัดดินใน Mold จนเต็มแล้วให้แต่งปลายแท่งตัวอย่างจนเรียบได้หน้าตัดตั้งฉากกับแกนตามยาวของแท่งตัวอย่างแล้วดัน แท่งตัวอย่างมี Void Ratio และปริมาณน้ำในดินใกล้เคียงกับตัวอย่าง Undisturbed เดิมการทดลองโดยวิธีควบคุมความเครียด (Strain) วางแท่งตัวอย่างไว้ตรงกลางแผ่นกลมอันล่างของเครื่องกดแล้วเลื่อนจนแผ่นกลมนบนของเครื่องกดแตะกับผิวบน ของแท่งตัวอย่าง หมุนหน้าปัดของ Dial Gauge ที่ใช้อ่านระยะทางของ การกดให้เข็มชี้ที่ศูนย์กลางกดแท่งตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคิดเป็นความเครียดใน แนวตั้ง 0.5 – 2 เปอร์เซ็นต์ ต่อนาที จนแรงกดและระยะยุบตัวของแท่งตัวอย่างทุก ๆ 30 วินาที ในการใช้อัตราเร็วของความเครียดค่าใดจะต้อง ประมาณว่า

ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้แรงกดจนถึงแรงกดสูงสุดจะต้องไม่เกิน 10 นาที เพิ่มแรงกดต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งแรงกดลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือจนกระทั่งความเครียดมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณน้ำ 13 ในดินโดยนำแท่งตัวอย่างเข้าเตาอบ นอกจากกรณีที่ต้องเตรียมแท่งตัวอย่าง Remolded ก็ให้ใช้ส่วนของดินที่เป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่างได้เขียนรูป สภาพแท่งตัวอย่างที่ทดลองเสร็จแล้ว ถ้าตัวอย่างมีรอยร้าววัดมุมของรอยแตกร้าวเทียบกับแกนนอน ดินที่อ่อนมากจะมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดมาก ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองโดยใช้อัตราเร็วของความเครียดสูงในทางตรงกันข้าม ดินที่แข็งหรือแตกง่ายซึ่งมีความเครียดไปจนถึงแรงกดสูงสุดน้อย ดินชนิดนี้จึงต้องทดลองด้วยอัตราเร็วของความเครียดที่ต่ำกว่าการประมาณค่านี้ จะต้องมีประสบการณ์พอเพียงมีฉะนั้นจะต้องใช้เครื่อง กดอย่างเล็ก (Penetrometer) กดลงบนส่วนของตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ดูเพื่อหา ค่านี้โดยประมาณ

2.5.2.4 คำนวณหาความเครียดในแนวดิ่ง สำหรับแรงกดใด ๆ (ϵ) โดยใช้สูตร

$$\epsilon = \Delta_L / L_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

เมื่อ Δ_L = ระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใด ๆ โดยอ่านจาก Dial Gauge
 L_0 = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

2.5.2.5 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยสำหรับแรงกดใด ๆ (A) โดยใช้สูตร

$$A = A_0 / (1 - \epsilon) \quad \dots\dots\dots (11)$$

เมื่อ A_0 = พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง
 ϵ = ความเครียดตามแนวดิ่งที่แรงกดนั้น ๆ

2.5.2.6 คำนวณหาความเค้นสำหรับแรงกดใด ๆ (σ_c) โดยใช้สูตร

$$\sigma_c = P/A \quad \dots\dots\dots (12)$$

เมื่อ $P =$ แรงกด
 $A =$ พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้น ๆ

- 2.5.2.7 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_c และ ϵ โดยใช้ σ_c เป็น แกนตั้ง และ ϵ เป็นแกนนอนจากกราฟหาค่าสูงสุดของ σ_c หรือหา ค่าที่ σ_c ที่ ϵ เท่ากับร้อยละ 20 ได้ในกรณีที่ต้องการจะใช้กราฟอธิบายคุณสมบัติของดินก็ให้แนบแผ่นกราฟนี้รวมไว้ในรายงานผลการทดลองด้วยการรายงาน ให้ รายงานผลการทดลองดังต่อไปนี้ ค่า Unconfined Compressive Strength ชนิดและรูปร่างของแท่งตัวอย่าง เช่น Undisturbed, Compacted, Remolded, Cylindrical, Prismatic
- 2.5.2.8 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง
- 2.5.2.9 ลักษณะดินโดยทั่วไป เช่น ชื่อของดิน สัญลักษณ์ เป็นต้น
- 2.5.2.10 Initial Density ปริมาณน้ำในดิน และ Degree of Saturation (ถ้าตัวอย่าง ถูก ทำให้อิ่มตัวในห้องปฏิบัติการให้หมายเหตุ Degree of Saturation อีก ค่าหนึ่ง ไว้ด้วย)
- 2.5.2.11 ค่าความเครียดที่เกินสูงสุดเป็นร้อยละ (อ่านจากกราฟ)
- 2.5.2.12 ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของความเครียดเป็นร้อยละต่อนาทีโดยคิดตั้งแต่เริ่มกด จนถึงแรงกดสูงสุด
- 2.5.2.13 ให้เขียนหมายเหตุในกรณีที่เกิดมีลักษณะผิดปกติในการทดลองหรือแบบ รายละเอียดอื่น ๆ ที่คิดว่ามีความจำเป็นต้องใช้อธิบายผลการทดลองข้อควรระวัง ในการค้นตัวอย่างออกจากท่อเพื่อใช้ทดลองจะต้องดันไปตามทิศทางเดียวกันกับที่ตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าไปในกระบอกในระหว่างเก็บตัวอย่างเพื่อลดการรบกวนตัวอย่างดินและในการทำตัวอย่าง Remolded ถ้าแท่งตัวอย่างจากการทำ Remolded แล้วได้ความแน่นแตกต่างจาก ก่อนทำ Remolded ให้ นำมาดำเนินการใหม่

2.6 การทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสม โพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (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) มีโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอพอลิเมอร์ ดังจะเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอพอลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะปาสกาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลต์ จีโอพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอพอลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ในปริมาณต่ำ

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

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอพอลิเมอร์หรือเรียกว่าอูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีซิลิกอนและอูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถาถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลต์ โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอพอลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์

สมิตร ส่งพิริยะกิจ (2548) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถาถ่านหินและทรายเป็นวัตถุดิบ สารกระตุ้น (Liquid alkaline

activator) เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำ อัตราส่วนระหว่างเถ้านหินต่อทรายเท่ากับ 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 ส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้น แต่กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และในที่สุดจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายปูนซีเมนต์ เมื่อผสมดินขาวเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจด ผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารกระตุ้นสูงเกินกว่าค่าเหมาะสม การก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างดินขาวเผาต่อ Ca(OH)_2 ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถ้านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ถึง 135 ± 5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกะปาสกาล อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอพอลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดร

ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอพอลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับเกลือที่ใช้ สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Ohsawa et al. (1984) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิคติก (Picric acid) และกรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิคติก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดซาลิไซลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของเพสต์จีโอพอลิเมอร์ซึ่งเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหิน และพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้าถ่านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับด่างผิวของเถ้าถ่านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้าถ่านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอพอลิเมอร์และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอพอลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นฉนวนกักความร้อนและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

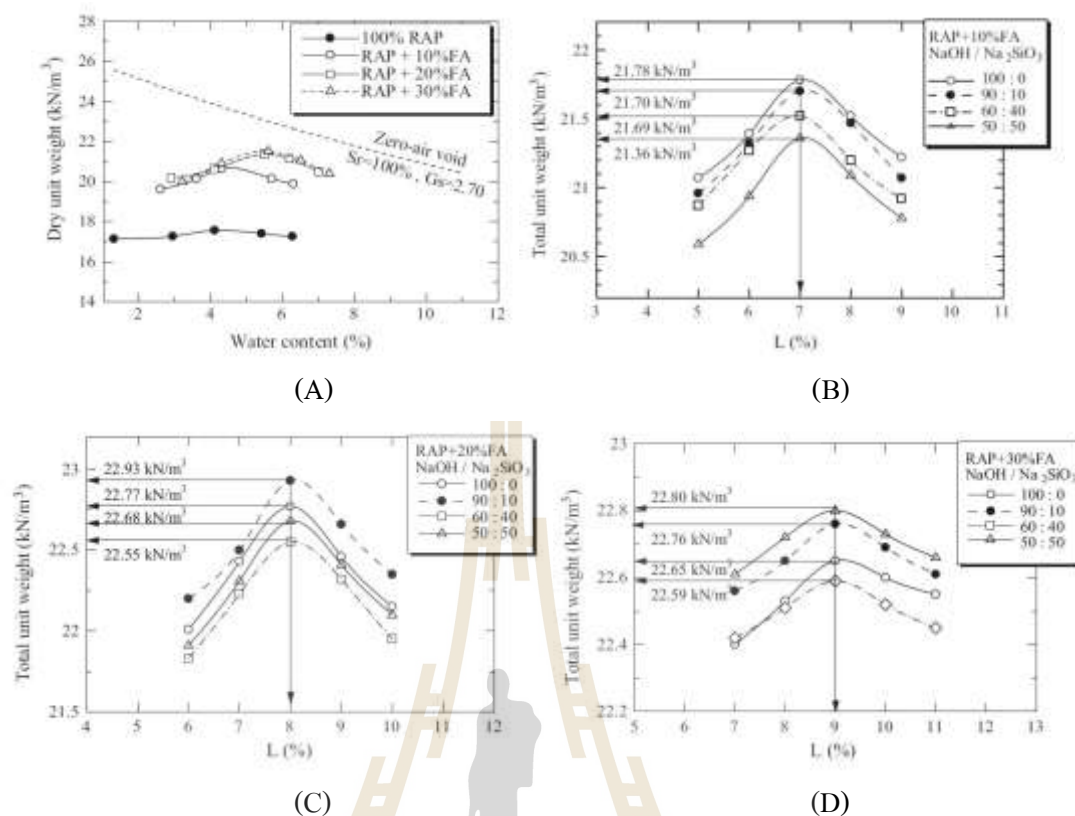
Gordon (1984) กล่าวถึงการใส่สารผสมเพิ่มเพื่อสร้าง Modified materials และ Bound modified materials โดยที่ Materials คือวัสดุที่เกิดจากการเติมสารผสมเพิ่มพอประมาณเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้น วัสดุประเภทนี้จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำ Bound materials เป็นวัสดุที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่มลงไปอย่างมากเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกได้ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูง Kuhlman (1989) กล่าวว่า ได้มีการปรับปรุงถนนเก่าใน 12 รัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีผิวจราจรทำจากยางมะตอยโดยการนำผิวจราจรมาผสมกับซีเมนต์ แล้วใช้เป็นพื้นทางใหม่ในช่วงปี ค.ศ. 1942 ถึง 1958 ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 การปรับปรุงวัสดุเก่านี้ถูกเรียกว่า Recycling ในเวลาต่อมาวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้งานทั้งผิวจราจรยืดหยุ่นที่ชำรุด

เสียหายและพิจารณาการคอนกรีตเก่าซึ่งพบว่าได้ผลดี Tabensky (1990) รายงานว่า Florida department of transportation ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเก่าด้วยการผสมซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของถนนและ Orange country california ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่นำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งกับถนนจำนวน 20 สายระหว่างปี 1950-1960 โดยใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 7 โดยน้ำหนัก และทำผิวทางแบบแอสฟัลต์หนา 75 มิลลิเมตร ในรัฐ Arizona ได้มีการใช้ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่ผสมกันระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับวัสดุชั้นล่างเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางวิ่งในสนามบิน 2 แห่งคือ Winslow municipal airport และ Mohave country airport

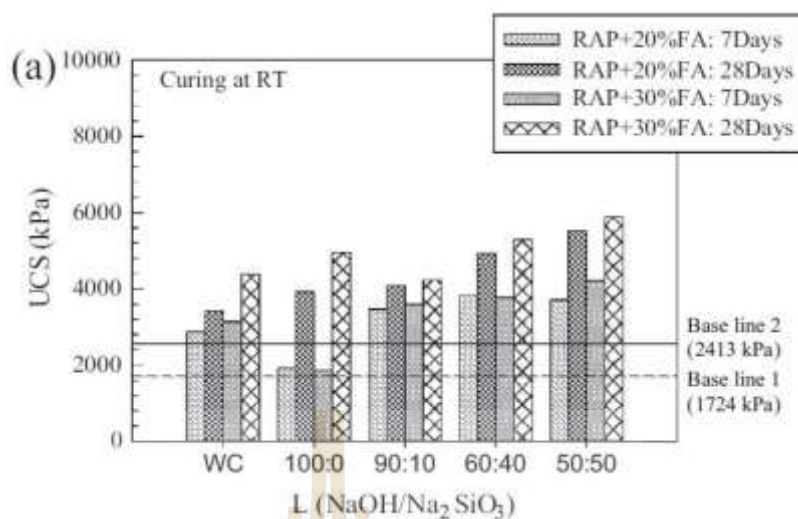
Walton (1995) บันทึกไว้ว่าการนำวัสดุเก่ามาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold in-place recycling) เป็นที่ยอมรับกันว่าประหยัดมาก และได้เริ่มมีการใช้เป็นมาตรฐานในปี ค.ศ. 1970 ในรัฐ Oregon New mexico Kansas และ Florida ต่อมาวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย อิตาลี รัสเซีย แคนาดา เยอรมัน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

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

Hoy Menglim และ S. Horpibulsuk (2016) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของ RAP ที่ผสมวัสดุอิโพอลิเมอร์ ด้วยเกลือและสารปรับคุณสมบัติ NaOH และ Na_2SiO_3 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.3 ข้อมูลการทดสอบการบดอัด (A) กราฟทดสอบการบดอัด RAP 100% และ RAP ผสม Fly Ash ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (B) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+10%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่างๆ (C) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+20%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่าง ๆ (D) กราฟทดสอบกำลังบดอัดของ RAP ผสม วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ RAP+30%FA ที่อัตราส่วนผสมสารปรับคุณสมบัติต่าง ๆ



รูปที่ 2.4 กำลังรับแรงอัดของ RAP+FA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

ผลงานวิจัยของ ชนากร (2014) ศึกษาการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของเถ้าหนักจีโอพอลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในเถ้าหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าหนักและเกิดเป็นผลผลิตของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) จึงส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของระบบจีโอพอลิเมอร์มากกว่าระบบของ จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาหรือเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ ที่อุณหภูมิปกติ เนื่องด้วยระบบแคลเซียมสูงจะมีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าระบบแคลเซียมต่ำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการก่อตัวของ เถ้าหนักจีโอพอลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีแนวโน้มลดลง ขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคที่มี ความแน่นตัว และพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษากำลักรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) และในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ต่อ เถ้าลอย (FA) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานวัสดุหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

3.2 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

- 3.2.1 มวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ได้มาจากการรื้อซ่อมแซมถนนจากกรมทางหลวงที่ 10 จังหวัดนครราชสีมา
- 3.2.2 เถ้าลอยลอย (FA) ที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 3.2.3 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) จาก บริษัทเอ็ม.ไทยอินดัสเทรียล จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร
- 3.2.4 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- 3.2.5 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

3.3 ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่าง ดังนี้

- 3.3.1 ทดสอบความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล(RAP) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA)
- 3.3.2 ทดสอบการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล(RAP) ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน (Sieve Analysis)

- 3.3.3 ทดสอบหาลักษณะ ขนาดและรูปร่างของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง Scanning Electron Microscopy (SEM)
- 3.3.4 ทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ (RAP) เถ้าลอย (FA) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

3.4 การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ

- 3.4.1 เตรียมเครื่องสำหรับการทดสอบความหนาแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.2-2545
- 3.4.2 ทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ (RAP) และเถ้าลอย (Fly ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ (RAP) ด้วยสารกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่อัตราส่วนเท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 บันทึกผลเพื่อนำค่าปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) ที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อดำเนินขั้นตอนต่อไป
- 3.4.3 การทดสอบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ (RAP) ปรับปรุงด้วยซีโอพอลิเมอร์ ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly ash) เท่ากับ ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง KOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 บันทึกผลเพื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อดำเนินขั้นตอนต่อไป
- 3.4.4 การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ (RAP) อัตราส่วนผสมปริมาณเถ้าลอย (FA) ร้อยละ 10 และ 30 ของน้ำหนักวัสดุมวลรวมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซีเมนต์ (RAP) อัตราส่วนผสมของสารกระตุ้นระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อโซเดียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) เท่ากับ 80:20 และ 60:40 โดยแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) อัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของปริมาณเถ้าลอย (FA) โดยใช้ปริมาณสารกระตุ้นเท่ากับ ปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) มาทำ

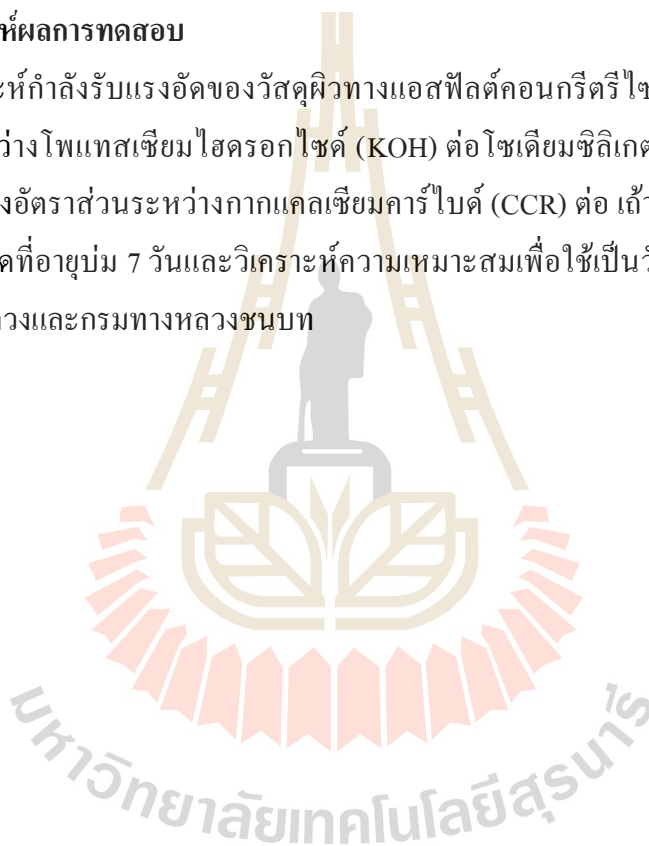
ก้อนตัวอย่างบดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) โดยบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน บันทึกผลเพื่อนำค่ากำลังรับแรงอัด

3.5 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

เมื่อได้ตัวอย่างครบอายุบ่มแล้วจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ข้อมูลที่ต้องบันทึกในการทดสอบได้แก่ น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ การเสียรูปของตัวอย่าง

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

วิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อโซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) และในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ต่อ เถ้าลอย (FA) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันและวิเคราะห์ความเหมาะสมเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท





รูปที่ 3.1 แผนดำเนินงานตลอดการวิจัย

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล(RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมกำลังอัด (ปริมาณของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไดรออกไซด์ (Na_2SiO_3) ปริมาณแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แทนที่ในปริมาณเถ้าลอย (FA)) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ท้ายสุดจะวิเคราะห์ผลจากผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (FA)

4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ

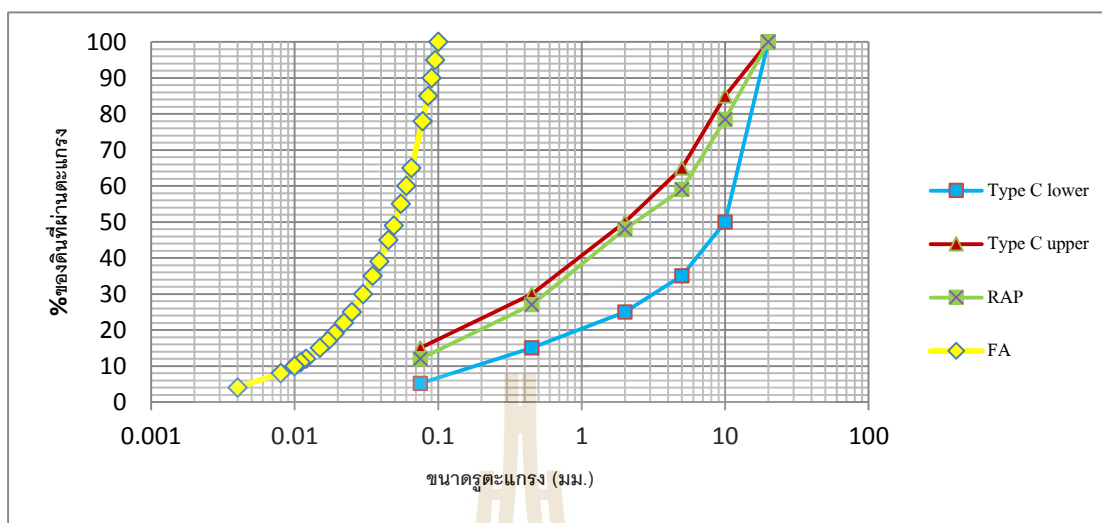
วัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล(RAP) ได้มาจากการรื้อซ่อมแซม ถนนจากกรมทางหลวงที่ 10 จังหวัดนครราชสีมา ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7

เถ้าลอย (FA) ที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.5

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) จาก บริษัทเอ็มไทยอินดัสเทรียล จำกัด จังหวัดสมุทรสาครไทย ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.3

4.2.2 การกระจายขนาด

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



รูปที่ 4.1 ร้อยละของวัสดุรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน (Sieve Analysis)

4.2.3 ปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมี

การทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมีวัสดุรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly ash) โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF) องค์ประกอบทางเคมีหลักที่ตรวจพบใน RAP มีค่าเท่ากับ 41.93%CaO และ 36.11%MgO CaO สูงใน RAP นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาของเถ้าลอย (FA) ในปฏิกิริยาปอซโซแลนที่เหมาะสม องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (FA) จากการแสดงในตารางที่ 4.1 ผลรวมของปริมาณธาตุ 42.862%SiO₂, 13.759%Al₂O₃ และ 15.904% Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 72.525 เถ้าลอยถูกจัดอยู่ในกลุ่ม F เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดของ SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ สูงกว่า 50% และ CaO น้อยกว่า 10% องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) พบว่า พบว่ามี CaO สูงถึงร้อยละ 52.71 และมี LOI (Loss on Ignition) สูงถึงร้อยละ 40.1 ความละเอียดของกาก แคลเซียมคาร์ไบด์แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ทำให้มีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาปอซโซแลนได้ดีขึ้น และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ มีองค์ประกอบ Ca(OH)₂ เป็นส่วนใหญ่ ทำให้สามารถสลายตัวเป็น CaO และไอน้ำระเหยออกไป (Jaturapitakkul & Roongreung, 2003)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน (FA) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และวัสดุผสมรวมหายาจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

Chemical composition (%)	RAP	Fly ash	CCR
SiO ₂	39.446	42.862	3.51
Al ₂ O ₃	9.640	13.759	2.42
Fe ₂ O 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 ₂ O	0.564	0.284	0
K ₂ O	1.981	2.23	0
LOI	1.314	0.890	40.1

ตารางที่ 4.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618

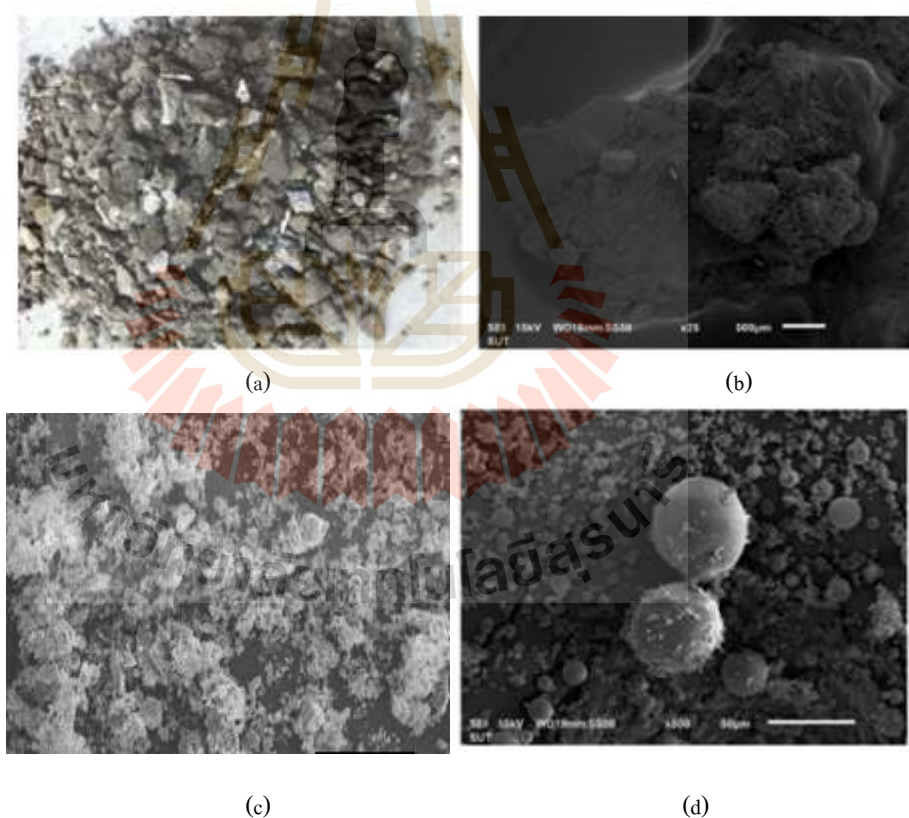
องค์ประกอบทางเคมี	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ และ Fe ₂ O ₃) Min%	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) Max%	5.0	5.0
ประมาณความชื้น Max%	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) Max%	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na ₂ O) Max%	1.5	1.5

เถ้าลอยชนิด F (Class F) เกิดจากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) และ เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มากกว่าร้อยละ 70 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ

เถ้าลอยชนิด C (Class C) เกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซัลฟิวไรด์ มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง รายละเอียดอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.2

4.2.4 ขนาดและรูปร่าง

การทดสอบหาลักษณะขนาดและรูปร่างของวัสดุผลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) แคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) และเถ้าลอย (Fly ash) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง Scanning Electron Microscopy (SEM) รูป 4.2a แสดงภาพ (RAP) ที่ได้พบว่ารูปร่างและขนาด ไม่สม่ำเสมอ และรูป 4.2b 4.2c และ 4.2d แสดงให้เห็นลักษณะของอนุภาค วัสดุผลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ขณะที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็น เหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ และเถ้าลอย (FA) มีรูปร่างทรงกลม



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

4.3 กำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด (ปริมาณของ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แทนที่ในปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash)) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ถ่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 (ถ่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล)

4.3.1 ทดสอบการบดอัด

การทดสอบการบดอัดเพื่อหาปริมาณของสารกระตุ้นเหมาะสมโดยใช้การทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) รูปที่ 4.3 ถึง 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ผสมกับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปริมาณสารกระตุ้นต่อน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) เท่ากับร้อยละ 5 ถึง 17 อัตราส่วนระหว่าง KOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH เท่ากับ 7 โมล

จะเห็นว่า ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 0 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) มีปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) เท่ากับ ร้อยละ 8 ความหนาแน่นมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 19.03 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนระหว่าง KOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 70:30

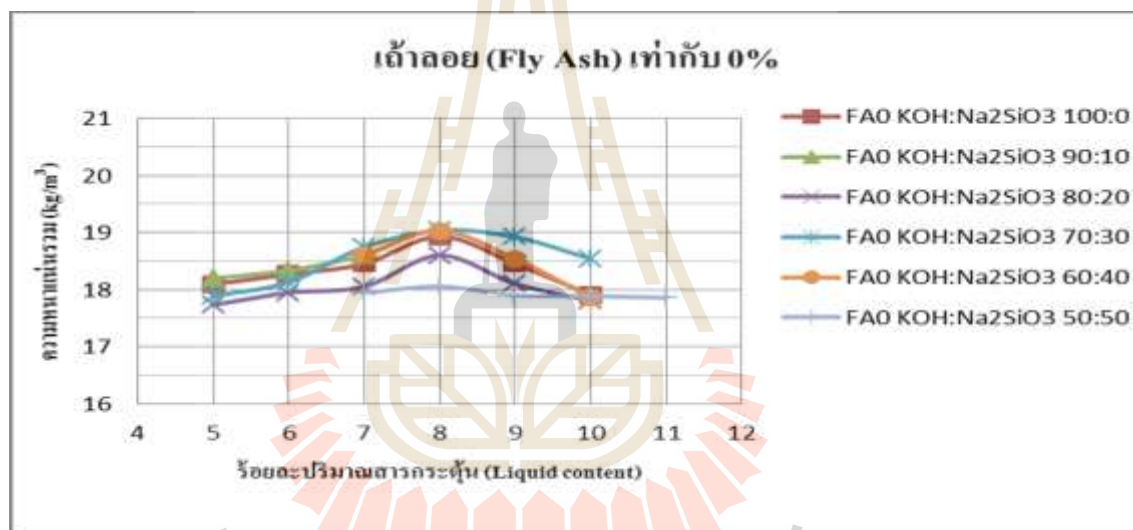
ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) มีปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม(OLC) เท่ากับ ร้อยละ 11 ความหนาแน่นมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 20.62 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนระหว่าง KOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 60:40

ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) มีปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) เท่ากับ ร้อยละ 12 ความหนาแน่น

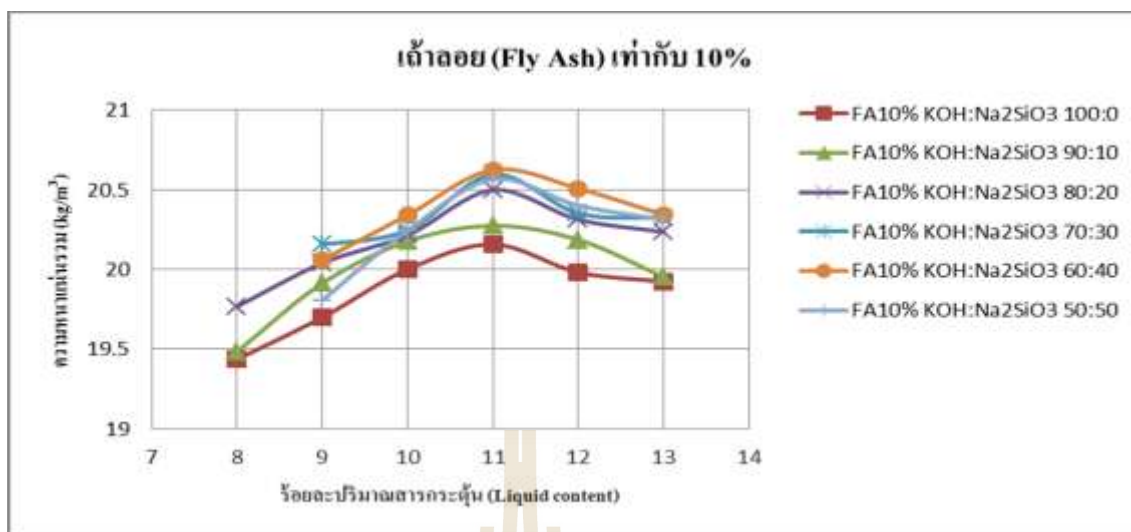
มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 20.23 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนระหว่าง KOH: Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0

ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 30 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซิลิกา (RAP) มีปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม(OLC) เท่ากับ ร้อยละ 15 ความหนาแน่นมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 20.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนระหว่าง KOH : Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0

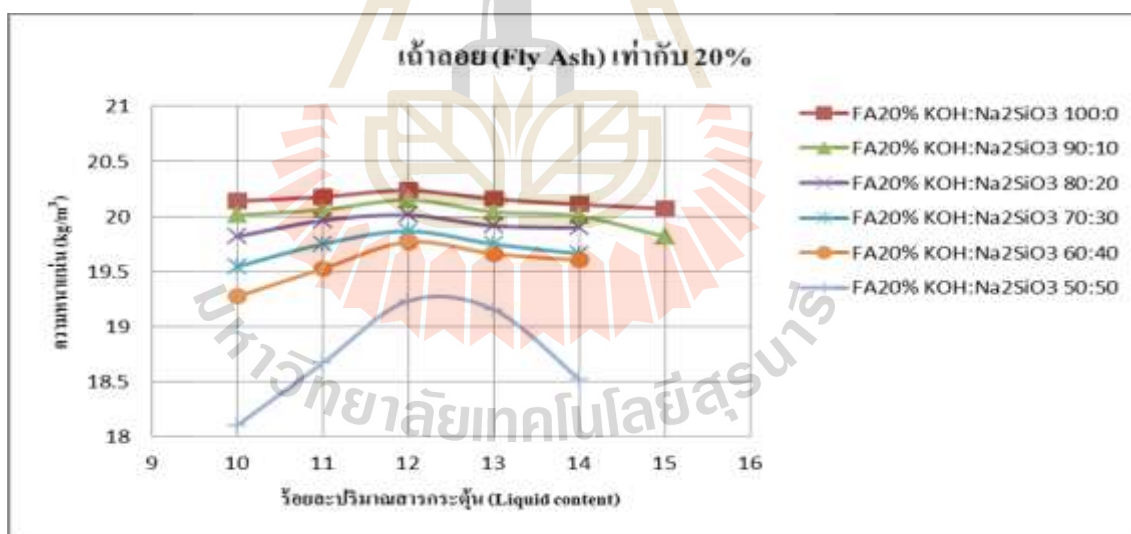
จะเห็นได้ว่า ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากัน อัตราส่วนผสมระหว่าง KOH:Na₂SiO₃ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) จะส่งผลให้ปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) เพิ่มขึ้น



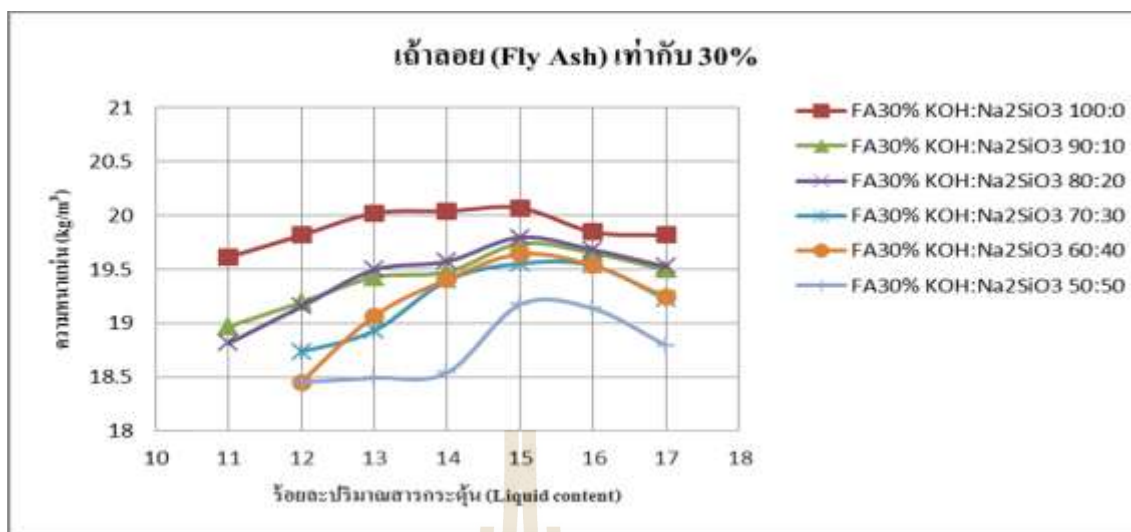
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซิลิกา (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 0 ของน้ำหนักวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้ซิลิกา (RAP)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุผสมรวมหยาบจากฟิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุผสมรวมหยาบจากฟิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)



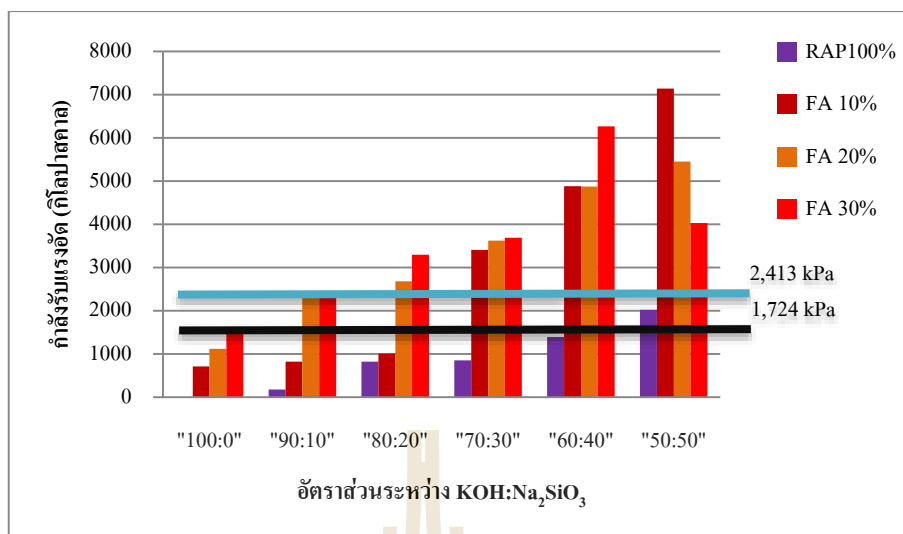
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการทดสอบการบดอัดระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบจากฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) กับเถ้าลอย (Fly Ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 30 ของน้ำหนักวัสดุฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

4.3.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากฟิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่ปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง KOH : Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 ปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) บ่มที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน แสดงดัง รูปที่ 4.7

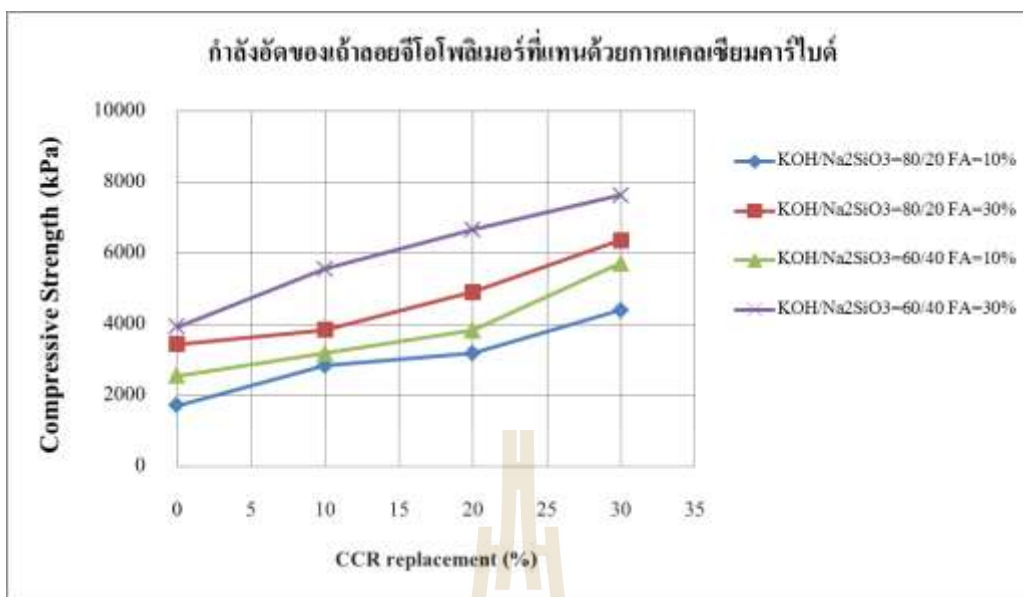
จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วน KOH : Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 และ 60:40 กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ยกเว้นที่อัตราส่วน KOH : Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 กำลังอัดยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 แต่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 20 และ 30 กำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากสารกระตุ้นโซเดียมซิลิเกตไดรอกไซด์ (Na₂SiO₃) ไปละลาย ซิลิกาจากเถ้าลอย (Fly Ash) ได้ถูกใช้ไปหมด ทำให้เถ้าลอยส่วนที่เหลือไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งเป็นการเพิ่มเกิดมวลรวมละเอียดในตัวอย่างทดลองจึงทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากัน พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Na₂SiO₃ ยกเว้นปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 30 ที่อัตราส่วน KOH : Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 มีค่าลดลง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงก้ำรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่เปรียบเทียบค่าตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล)

ผลงานวิจัยของ ชนากร (2014) ได้ศึกษาการพัฒนา ก้ำรับแรงอัดของเก้าหนักจีโอพอลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน สามารถให้ ก้ำรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงคิดค้นนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มาแทนที่ในเก้าลอย (FA) เพื่อช่วยลดปริมาณวัสดุและต้นทุนในงานก่อสร้าง เนื่องจากเก้าลอย (FA) มีราคาแพงประมาณ 1,000 บาท/ตัน (กรมควบคุมมลพิษ <http://www.pcd.go.th>) ในการปรับปรุง ก้ำรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ โดยเลือกที่อัตราส่วน KOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 80:20 60:40 ปริมาณเก้าลอย (FA) ร้อยละ 10 และ 30 และปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แทนที่ในปริมาณเก้าลอย (FA) ที่ร้อยละ 0 10 20 30 เพื่อศึกษา ก้ำรับแรงอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อ โซเดียมซิลิเกตไตรออกไซด์ (Na₂SiO₃) และอัตราส่วนระหว่าง กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ต่อ เก้าลอย (FA)



รูปที่ 4.8 กำลังอัดของถ้ำลอยจีโอพอลิเมอร์ที่แทนด้วยกากเคลเซียมคาร์ไบด์

ผลการทดสอบกำลังอัดของถ้ำลอย (FA) กากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) จีโอพอลิเมอร์ แสดงที่รูปที่ 4.8 อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 80:20 และใช้ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) เท่ากับร้อยละ 10 เมื่อแทนที่ ถ้ำลอย (FA) ด้วย กากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ด้วยกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยที่กำลังอัดเท่ากับ 1,718 2,838 3,181 และ 4,403 กิโลปาสกาล ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังอัดของถ้ำลอย (FA) กากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) จีโอพอลิเมอร์ อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 60:40 และใช้ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) เท่ากับร้อยละ 10 เมื่อแทนที่ ถ้ำลอย (FA) ด้วย กากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ด้วยกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยที่กำลังอัดเท่ากับ 2,545 3,181 3,830 และ 5,727 กิโลปาสกาล ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังอัดของถ้ำลอย (FA) กากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) จีโอพอลิเมอร์ อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 80:20 และใช้ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) เท่ากับร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ด้วยกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยที่กำลังอัดเท่ากับ 3,436 3,843 4,912 และ 6,363 กิโลปาสกาล ตามลำดับ

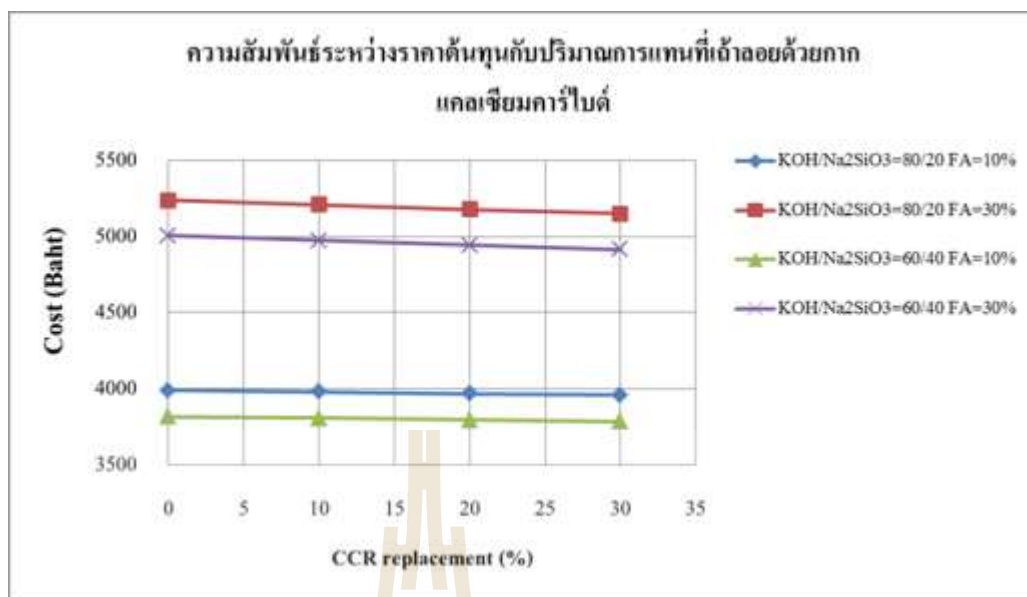
ผลการทดสอบกำลังอัดของถ้ำลอย (FA) กากเคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) จีโอพอลิเมอร์ อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 60:40 และใช้ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) เท่ากับร้อยละ 30

พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) โดยที่กำลังอัดเท่ากับ 3,932 5,561 6,669 และ 7,636 กิโลปาสกาล ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ใน ถ้ำลอย กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ใน ถ้ำลอยตั้งต้น (FA) เนื่องจาก กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มีแคลเซียมออกไซด์สูง (CaO) เท่ากับร้อยละ 52.7 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ใน ถ้ำลอย (FA) ทำให้รับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น

4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ต้นทุนและปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ในปริมาณถ้ำลอย (FA) แสดงดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าต้นทุนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) เนื่องจากถ้ำลอย (FA) มีราคา 1,000 บาท/ตัน (กรมควบคุมมลพิษ <http://www.pcd.go.th>) กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) ไม่มีค่าใช้จ่าย เนื่องจากเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ราคา 70.88 บาท/กิโลกรัม จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด กทม. ใช้ผสมน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 7 mol. ต้นทุนจะลดลงเป็น 27.83 บาท/กิโลกรัม และ สารโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ราคา 20 บาท/กิโลกรัม จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด กทม. เมื่อแทนที่ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ต่อปริมาณถ้ำลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 ที่อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 80:20 ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) ร้อยละ 10 จะมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 3,989 3,979 3,969 และ 3,959 บาท ตามลำดับ ที่ $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 80:20 ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) ร้อยละ 30 จะมีค่าใช้จ่าย 5,240 5,210 5,180 และ 5,150 บาท ตามลำดับ อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 60:40 ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) ร้อยละ 10 จะมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 3,817 3,807 3,797 และ 3,787 บาท ตามลำดับ ที่ $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 60:40 ปริมาณถ้ำลอยตั้งต้น (FA) ร้อยละ 30 จะมีค่าใช้จ่าย 5,005 4,975 4,945 และ 4,915 บาท ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แทนที่ถ้ำลอย (FA) มากขึ้นจะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายลดลง และยิ่งใช้ KOH ในอัตราส่วนที่น้อยก็ยิ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายลดลงด้วย



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ ระหว่าง ต้นทุน และ ปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์ในถ้ำลอย

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานโครงการวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างสูง เถ้าลอยเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า การศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าลอยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยจะทำการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุบ่ม 7 วัน และทำการเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-25561 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล) หาอัตราส่วนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

สรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. ที่อัตราส่วนระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ผสมกับเถ้าลอย (Fly ash) ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) ของสารกระตุ้นต่อวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) เท่ากับ ร้อยละ 8 11 12 และ 15 ตามลำดับ และอัตราส่วนระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และเถ้าลอย (Fly ash) ที่มีปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากัน อัตราส่วนผสมระหว่าง $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) จะส่งผลให้ปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสม (OLC) เพิ่มมากขึ้น
2. กำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 และ 60:40 กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ยกเว้นที่อัตราส่วน $\text{KOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 50:50 กำลังอัดยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 แต่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 20 และ 30 กำลังอัดมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากัน พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Na_2SiO_3 ยกเว้น

ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 30 ที่อัตราส่วน $\text{KOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 50:50 มีค่าลดลง

3. กำลังอัดของวัสดุมวลรวมหยาบจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{KOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 80:20 และ 60:40 ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) ร้อยละ 10 และ 30 และปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แทนที่เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ร้อยละ 0 10 20 และ 30 กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR)
4. ที่อัตราส่วน $\text{KOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 60:40 ที่ปริมาณเถ้าลอย (Fly Ash) เท่ากับร้อยละ 10 ปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) แทนที่เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ร้อยละ 30 มีต้นทุนต่ำที่สุด เท่ากับ 3,787 บาท เนื่องจาก KOH มีราคาที่สูงกว่า Na_2SiO_3 และเมื่อใช้ KOH และ FA ในอัตราส่วนที่น้อยลงจึงทำให้มีต้นทุนต่ำลง

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป

- 5.2.1 งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเพื่อปรับปรุงการรับกำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) โดยเปรียบเทียบกับกำลังอัดตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 (ค่ายอมให้ 2,413 กิโลปาสกาล) และมาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 (ค่ายอมให้ 1,724 กิโลปาสกาล) ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมกับวัสดุรีไซเคิลชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากวัสดุรีไซเคิลเมื่อใช้เป็นวัสดุงานทางเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ทล-ม. 203/2556. (2558). **มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์**. กรมทางหลวง. ประเทศไทย.
- มทข. 244-2556. (2557). **มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์**. กรมทางหลวงชนบท. ประเทศไทย.
- ชนากร ภูเงินขำ. (2560). การพัฒนากำลังอัดของเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์ผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์. คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา.
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ. (2548). อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง.
- สุกษาคี มาตย์ภูธร. (2541). ผลกระทบของขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เผาและไม่เผาคู่ต่อกำลังอัดของมอร์ต้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Alonso S, Palomo A. (2001). **Alkaline Activation of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature Activator Concentration and Solids Ratio**. Cement and Concrete Research, 29 (1-2):55-62.
- Bakharev T. (2004). **Durability of Geopolymer Material in Sodium and Magnesium Sulfate Solution**. Cement and Concrete Research, 35(6):1233-1246.
- Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. (2009). **Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers**. Waste Management, 29 (2) : 539-43.
- Davidovits J. (1991). **Geopolymers**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 37(8):1633-56.
- Davidovits J, Buzzi L, Rocher R, Gimeno D, Marini C, Tocco S. (1999). **Geopolymeric Cement Based on Low Cost Geologic Material**, Results from the European Research project GEOCIS-TEM. In: Davidovits et al. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere, 99:83-96.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan, BV. (2003). **The Effect of Mixture Composition and Curing Temperature on the Compressive Strength of Fly Ash-Vased Geopolymer Concrete**. The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, Indonesia, 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,
- Ohsawa S, Asaga K, Goto S, Daimon M. (1985). **Quantitative Determination of Fly Ash in the Hydrated Fly Ash – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ System.** Cement and Concrete Research, 15(2): 357-366.



ประวัติผู้เขียน

นายสิรภพ ล้อมแพน เกิดวันที่ 31 ธันวาคม 2535 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน สุรธรรมพิทักษ์ อำเภอ เมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี การศึกษา 2558 ปัจจุบันทำงานอยู่ที่ สำนักงาน ชลประทานที่ 8 ในตำแหน่ง วิศวกรชลประทาน มีความสนใจในสาขาบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค จึงเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สำนัก วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี 2558

