

ความคงทนของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและ
เถ้าแกลบ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง



นายพัฒนพงษ์ พันพะมา

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

ความคงทนของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยอีโพอกซีเรซินและ เถ้าแกลบ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้รับโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ปรีชาพร โภษา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พัฒนพงษ์ พันพะมา : ความคงทนของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์
เถ้าลอยและเถ้าแกลบ เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (DURABILITY OF RECYCLED
CONCRETE AGGREGATE STABILIZED WITH FLY ASH – RICE HUSK ASH
BASED GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยาพร โกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาความคงทนของวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นทาง จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้จากส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly Ash, FA) จากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ที่ได้จากโรงสีข้าวในกระบวนการเผาแกลบ ร่วมกับสารเชื่อมประสาน (Liquid Alkaline Activator, L) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) อัตราส่วนระหว่างสารละลายอัลคาไลน์ NaOH/ Na_2SiO_3 เท่ากับ 50/50 และ 100/0 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ (FA/RHA) เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 50/50 และ 40/60 ระยะเวลาในการบ่มเท่ากับ 28 วัน การเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สำหรับการทดสอบเปิกสลับแห้งกระทำตามมาตรฐาน ASTM D559M-15 จำนวนรอบของสภาวะเปิกสลับแห้งเท่ากับ 0 1 3 และ 6 รอบ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของวงรอบเปิกสลับแห้งส่งผลให้ตัวอย่างมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นและมีกำลังอัดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่สภาวะเปิกสลับแห้งเท่ากับ 6 รอบกับกำลังอัดตามมาตรฐานที่แนะนำ โดย American Concrete Institute (ACI) พบว่า ที่อัตราส่วน NaOH/ Na_2SiO_3 เท่ากับ 50/50 และ อัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 80/20 และ 60/40 ก้อนตัวอย่างมีกำลังอัดสูงกว่า 2,068 กิโลปาสกาล ขณะที่ทุกตัวอย่างทดสอบมีค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่เกินร้อยละ 14 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ACI แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบสามารถใช้ปรับปรุงความคงทนของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลได้

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PATPONG PANPAMA : DURABILITY OF RECYCLED CONCRETE
AGGREGATE STABILIZED WITH FLY ASH – RICE HUSK ASH BASED
GEOPOLYMER. ADVISOR : ASST. PROF. PREEYAPHORN KOSA,
Ph.D.

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

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature _____

Academic Year 2017

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการมหابัณฑิตฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบคุณ กลุ่มบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษาช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนิน โครงการงาน อาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยาพร โกษา เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการมหابัณฑิตซึ่งเป็นบุคคล สำคัญอย่างยิ่งที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนโครงการมหابัณฑิตฉบับนี้สำเร็จ ด้วยดี

อาจารย์ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการมหابัณฑิตที่คอยแนะนำให้คำปรึกษา ในการเขียนและตรวจทาน โครงการมหابัณฑิตจน โครงการมหابัณฑิตเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่พนักงานผู้ดูแลห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการมหابัณฑิต

ท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการมหابัณฑิตเล่มนี้ผู้จัดทำขอมอบแต่ บิคา-มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาและบุคคลต่างๆ ที่อาจกล่าวถึงไม่หมดตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้แก่ผู้จัดทำ จนกระทั่งโครงการมหابัณฑิตฉบับนี้สำเร็จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พัฒน์พงษ์ พันพะมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
2 ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบจีโอพอลิเมอร์.....	4
2.1.1 วัสดุรีไซเคิลคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate, RCA).....	4
2.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA).....	5
2.1.3 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ask, RHA).....	7
2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	8
2.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Particle Size Distribution).....	8
2.2.2 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific gravity และ Water absorption).....	8
2.2.3 การหาค่า California Bearing Ratio (CBR) และค่าการบวมตัว (Swelling ratio).....	9
2.2.4 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion.....	10
2.2.5 การทดสอบการบดอัด (Compaction test).....	11
2.2.6 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test).....	13
2.3 เทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer).....	13
2.3.1 พื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์.....	13

2.3.2	กระบวนการการเกิดจีโอพอลิเมอร์	14
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3	วิธีดำเนินการวิจัย	19
3.1	บทนำ	19
3.2	การเตรียมตัวอย่างวัสดุ	21
3.2.1	วัสดุรีไซเคิลคอนกรีต	21
3.2.2	เถ้าลอย	21
3.2.3	เถ้าแกลบ	21
3.3	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ (Basic engineering properties)	22
3.4	การบดอัดวัสดุ (Compaction)	22
3.5	การทดสอบความคงทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้ง (Durability Against Wetting–Drying)	23
3.6	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)	23
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	24
4.1	บทนำ	24
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอยและเถ้าแกลบ	24
4.3	ผลการทดสอบความหนาแน่น	27
4.4	ผลทดสอบความคงทนของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นส่วนผสม	28
4.4.1	ผลการทดสอบกำลังอัด	28
4.4.2	ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก	30
4.5	วิเคราะห์การลดลงของต้นทุนจากอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ	32
5	สรุปและวิเคราะห์	33
5.1	สรุปผล	33
5.2	ข้อเสนอแนะ	33
	เอกสารอ้างอิง	34
	ประวัติผู้เขียน	36

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอย.....	6
2.2 ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าแกลบ.....	7
2.3 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่างๆ.....	9
2.4 การเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor.....	11
3.1 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ.....	19
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของรีไซเคิลคอนกรีต.....	24
4.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ.....	26



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และร้อยละของความชื้น (liquid content) ของการบดอัดแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor.....	12
2.2 แบบจำลองกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทั่วไป.....	15
3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	20
3.2 การสุ่มในสัดส่วนต่างๆของขนาดผล RCA.....	21
3.3 เถ้าแกลบที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10.....	22
3.4 การบดอัดที่สูงกว่ามาตรฐาน.....	23
4.1 ขนาดผลของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตเทียบกับมาตรฐานพื้นที่ทางหินคลุกผสมซีเมนต์.....	25
4.2 แสดงการกระจายขนาดของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ.....	27
4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นและปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม ในแต่ละส่วนผสม.....	28
4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน NaOH/ Na ₂ SiO ₃ เท่ากับ 50/50.....	29
4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน NaOH/ Na ₂ SiO ₃ เท่ากับ 100/0.....	30
4.6 ผลการทดสอบการสูญเสียกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน NaOH/ Na ₂ SiO ₃ เท่ากับ 50/50.....	31
4.7 ผลการทดสอบการสูญเสียกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน NaOH/ Na ₂ SiO ₃ เท่ากับ 100/0.....	31
4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของต้นทุนวัสดุตั้งต้นและร้อยละการใช้เถ้าแกลบ.....	32

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบโครงสร้างพื้นฐานมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาระบบเศรษฐกิจของประเทศการพัฒนา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การคมนาคมขนส่งทางบก ทำให้ “ถนน” เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่อ และการสัญจรของระบบขนส่งมวลชน จึงมีความต้องการก่อสร้างและพัฒนาถนนขึ้นมาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบันทำให้เกิดความต้องการวัสดุก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งส่วนมากล้วนแต่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ ส่งผลทำให้ปริมาณวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะหมดลงในอนาคตอันใกล้ เหตุการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดกระแสของการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ หรือที่เรียกว่า “วัสดุรีไซเคิล (Recycled materials)” มาใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติที่กำลังจะหมดลง งานวิจัยและพัฒนาในช่วงแรกเป็นการประยุกต์วัสดุที่ได้จากการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้าง (Construction & Demolition (C&D) Materials) ในงานวิศวกรรมโยธา ซึ่งประกอบด้วย เศษวัสดุคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate, RCA) อิฐ ไม้ เหล็ก พลาสติก เป็นต้น

วัสดุรีไซเคิลจำพวกคอนกรีต อิฐ และแอสฟัลต์ มีสัดส่วนมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 50 ของวัสดุรีไซเคิลทั้งหมด โดยคอนกรีตมีสัดส่วนมากที่สุดถึงร้อยละ 58 (Sustainability Victoria, 2010) ดังนั้น นักวิจัยหลายท่านจึงให้ความสนใจนำ RCA มาศึกษาวิจัยและประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในงานทาง การประยุกต์ใช้งานดังกล่าวในช่วงแรกเป็นการนำวัสดุ RCA มาบดอัดโดยตรง โดยปราศจากการใส่สารผสมเพิ่ม (Arulrajah et al., 2012; Gabr et al., 2012; Arulrajah et al., 2013; Arulrajah et al., 2014) ในช่วงเวลาต่อมาได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ RCA ด้วยการใส่สารผสม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ (Portland Cement, PC) เพื่อทำให้อุณหภูมิของ RCA ยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น (Mohammadinia et al., 2014; Arulrajah et al., 2015)

แม้ว่าปูนซีเมนต์จะได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ก๊าซเรือนกระจก) จำนวนมาก และส่งผลอย่างมากต่อปัญหาภาวะโลกร้อน ดังนั้น ปูนซีเมนต์จึงถูกจัดว่าเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Mayer, 2008)

Davidovits (1991) ได้คิดค้นสารเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เรียกว่าจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างวัสดุที่มีปริมาณอลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) มาก กับสารอัลคาไลน์ (Alkaline Activator) วัสดุที่มีปริมาณอลูมินาและซิลิกามากและใช้กันอย่าง

แพร่หลาย ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) และ ตะกรัน (Slag) เป็นต้น (Palomo et al., 1999) ซึ่งล้วนแต่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมทั้งสิ้น

จนถึงปัจจุบัน งานวิจัยด้านการเพิ่มกำลังของ RCA ด้วยสารเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่เป็นที่ยอมรับมีอยู่อย่างแพร่หลาย แต่โดยทั่วไปแล้วประเทศไทยนั้นอยู่ในแถบร้อน มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศทั้งในช่วงฤดูฝน และฤดูแล้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาความคงทนของวัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ ในพจน์ของอัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบ (RHA) ต่อ เถ้าลอย (Fly Ash) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยการทดสอบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (w-d) มีซึ่งเป็นการจำลองสภาพอากาศสถานการณ์วิกฤตที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายของวัสดุพื้นทาง ทั้งหมด 6 cycles (6 ฤดู) ซึ่งจะเป็นที่ยอมรับ ผลการศึกษาจะถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวง เพื่อเป็นข้อมูลในการสนับสนุนให้มีการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกใหม่ของพื้นทางซึ่งมีความสำคัญต่อด้านวิศวกรรมด้านเศรษฐศาสตร์และด้านสิ่งแวดล้อม

1.2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความคงทนของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) เป็นส่วนผสมที่ผ่านการบดอัดตามมาตรฐานที่อายุบ่ม 28 วัน เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง

1.3. ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA)
- 1.3.2 การทดสอบความคงทนตัวอย่าง RCA ซึ่งใช้อัตราส่วน L content ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$) คือ 50/50 100/0 อัตราส่วนของ FA/RHA คือ 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 และสำหรับทุกอัตราส่วนการผสมใช้อายุบ่ม 28 วัน ได้มีการใช้วิธีทดสอบเปียกสลับแห้ง (W-D) ตามมาตรฐาน ASTM 599M-15 สำหรับการเตรียมตัวอย่าง ตัวอย่างถูกแช่ในน้ำ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมงและนำมาอบที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 3 ชั่วโมง กระบวนการนี้เรียกว่าวงจร 1 W-D หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดในตัวอย่างหลังก่อรอบ 0, 1, 3 และ 6 W-D ได้รับการพิจารณาในการศึกษารั้งนี้

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

1.4. ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) เพื่อช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม
- 1.4.2 ทราบถึงความคงทนของคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) โดยทำการทดสอบความคงทนโดยวิธี W-D ที่ 6 cycles
- 1.4.3 สร้างกราฟจำลองและใช้ทำนายความคงทนของวัสดุ RCA ที่เกิดจากอิทธิพลสภาวะเปียกสลับแห้ง (การเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศ) เพื่อประกอบการตัดสินใจก่อนการนำไปใช้ได้



บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบจีโอพอลิเมอร์

2.1.1 วัสดุรีไซเคิลคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate, RCA)

วัสดุคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate, RCA) คือ ขนาดผลของวัสดุมวลรวมหยาบที่แตกต่างกัน ซึ่งได้มาจากคอนกรีตที่ผ่านการใช้งานหรือเหลือใช้ ที่เกิดจากการรื้อถอนหรือทำลายไม่ว่าจะเป็น เสาเข็ม โครงสร้างคาน-เสา ถนนและอื่นๆ โดยผ่านกระบวนการทดสอบทางวิศวกรรมและมาตรฐาน

การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ของวัสดุ ทั้งของส่วนเม็ดหยาบ (Coarse aggregate) และส่วนเม็ดละเอียด (Fine aggregate) คือคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของวัสดุซึ่งมีผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุ โดย Poon and Chan (2006) ได้ทำการศึกษาการใช้ RCA ในชั้นรองพื้นทางโดยใช้ขนาดผลของวัสดุที่แตกต่างกันซึ่งผลสรุปที่ได้คือสอดคล้องกับข้อกำหนดขนาดผลของพื้นทาง คั่นดิน ถนนและสะพานตามมาตรฐาน (ASTM D2940, D448) Tam and Tam(2007) ได้ทำการพิจารณาพฤติกรรมทางกายภาพของ RCA และได้สังเกตเห็นค่าความหนาแน่นของ RCA ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2 Mg/m^3 และ 2.65 Mg/m^3 ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนของซีเมนต์ที่ยึดติดอยู่ตามผิวของวัสดุมวลรวม

RCA มีค่าความพรุนที่มาก ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปัญหาการยุบตัวหรือทรุดตัวได้ ซึ่ง Tam and Tam (2007) ได้เก็บค่าการดูดซึมน้ำของ RCA คืออยู่ระหว่างร้อยละ 3 ถึง 10 เปรียบเทียบกับวัสดุที่ได้จากธรรมชาติโดยตรงจะมีค่าไม่เกินร้อยละ 3 (Poon and Chan, 2006) ดังที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า RCA มีค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ความพรุน (porosity) และอัตราการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) มากกว่าวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติ ในปี 2002 Gomez-Soberon ศึกษาค่าความพรุนของ RCA พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 14.86 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติแล้วมีค่าสูงกว่ามากที่ร้อยละ 3 โดยเหตุผลที่ RCA มีความพรุนสูงเนื่องจากปริมาณซีเมนต์มอร์ต้าเกาะอยู่ที่ผิวของมวลรวม สำหรับการศึกษากการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) Poon and Chan (2006) ได้ทำการวัดค่าการซึมผ่านโดยใช้วัสดุเม็ดละเอียด (Fine aggregate) ของ RCA ได้เท่ากับ $3.83 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ โดยมีค่ามากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติซึ่งมีค่าอยู่ที่ $6.59 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

การทดสอบหาค่า California Bearing Ratio (CBR) เป็นการทดสอบเพื่อระบุความแข็งของวัสดุที่ใช้ในงานจำพวกถนน งานคั่นดิน งานสะพาน เป็นต้น ในปี 2006 Poon and Chan ได้

ทำการศึกษาและพบว่า ระยะเวลาการทำให้หุ้มตัวด้วยน้ำเป็นเวลา 4 วัน แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า CBR เช่นเดียวกันกับค่าการบวมตัวของชั้นรองพื้นทางของ RCA การทำให้หุ้มตัวด้วยน้ำเวลา 4 วัน ก็ไม่ทำให้ค่าการบวมตัวเปลี่ยนแปลงมากจนมีความสำคัญ

สำหรับการทดสอบหาค่าการสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) เป็นการทดสอบที่ใช้ประเมินค่าความต้านทานของวัสดุต่อการสึกหรอและแรงกระแทก ในปี 2010 Courard et al. ได้ทำการทดสอบหาค่าความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ของ RCA โดยรายงานว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 25

ในปี 2009 Melbouci ได้ศึกษาการทดสอบการบดอัดและพฤติกรรมเนื่องของวัสดุ RCA และได้แนะนำว่า การเพิ่มดินทรายร้อยละ 5 ซีเมนต์ร้อยละ 10 และอนุภาคอิฐ (ขนาดเล็กกว่า 0.125 mm) ร้อยละ 6 สามารถเพิ่มกำลังต้านทานเชิงกลของวัสดุได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของวัสดุงานทางถนนที่มีปริมาณจราจรสูงก็ยังไม่ผ่านข้อกำหนด ต่อมาในปี 2012 Arulrajah et al. ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานทางด้านธรณีเทคนิคของ RCA โดยเทียบกับข้อกำหนดวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานการทางในประเทศออสเตรเลีย พบว่า ค่าการสึกหรอ Los Angeles Abrasion แสดงให้เห็นว่าวัสดุ RCA มีความความทนทาน และคุณสมบัติทางธรณีเทคนิคที่ได้ทำการศึกษามีสามารถรับรองได้ว่าวัสดุ RCA สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางได้ และผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน

2.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

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

เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นของแข็งเป็นสารแขวนลอยอยู่ในก๊าซไอเสีย โดยปกติแล้วมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอยู่ในช่วง 0.5 μm ถึง 100 μm ซึ่งปรากฏอยู่ในสองรูปแบบ ได้แก่ สัณฐาน ซึ่งมีลักษณะ โคนมน และเรียบเนียน และผลึก ซึ่งมีลักษณะคม แหลม และอันตรายส่วนมากประกอบด้วย 1) SiO_2 , 2) Al_2O_3 และ 3) Fe_2O_3

ในปี 2009 Chindaprasirt et al. ได้ศึกษาพบว่า มีโรงไฟฟ้าในประเทศไทยผลิตเถ้าลอยได้ถึง 4,000 ล้านตันต่อปี แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพียง 1,800 ล้านตันต่อปีเท่านั้น ที่เหลือกลายเป็นขยะทิ้งสิ้น สำหรับทั่วโลกมีการประมาณปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตได้

จากถ่านหินต่อปี มากกว่า 390,000 ล้านตัน ในปี 1998 โดยประเทศที่เป็นผู้ผลิตหลักคือ จีนและอินเดีย และมีเพียงร้อยละ 14 เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในขณะที่ส่วนที่เหลือถูกกองทิ้งไว้ทั่วไป (Malhotra, 1999) ภายในปี 2010 ปริมาณถ่านหินที่ผลิตได้ทั่วโลกประมาณ 780,000 ล้านตันต่อปี (Malhotra, 2002) เนื่องจากปริมาณถ่านหินที่ถูกกองทิ้งไว้ตามพื้นที่ต่างๆ เริ่มส่งผลกระทบต่อภาวะสิ่งแวดล้อมโดยรอบพื้นที่นั้นๆ ดังนั้นการนำถ่านหินกลับมาใช้ใหม่จึงจำเป็นอย่างยิ่ง จากข้อมูลของ American Coal Ash Association (ACAA) ในปี 2003 การใช้ประโยชน์ของถ่านหิน เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตมีประโยชน์อย่างสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังช่วยพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีต ลดการใช้พลังงาน ลดการผลิตก๊าซเรือนกระจก และลดปริมาณถ่านหินที่สะสมอยู่และช่วยประหยัดทรัพยากรและวัสดุธรรมชาติชนิดอื่นด้วย

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหินมาจากชนิดของถ่านหิน การเผาไหม้ของถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous coal) มีแคลเซียมและธาตุเหล็กน้อยกว่าถ่านหินจากถ่านหิน บิทูมินัส (Bituminous coal) คุณสมบัติเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีขึ้นอยู่กับวิธีการเผาไหม้ แหล่งถ่านหินและรูปร่างอนุภาค องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแต่ละชนิดที่มีหลากหลายแสดงให้เห็นว่ามีถ่านหินหลายชนิดที่ถูกใช้ในโรงไฟฟ้าทั่วโลก (Malhotra and Ramezani-pour 1994) จากมาตรฐาน ASTM C618 (2005) จำแนกถ่านหินออกได้ 3 กลุ่มดังนี้ Class N Class F และ Class C ข้อแตกต่างหลักๆ ของทั้ง 3 กลุ่มคือ ปริมาณแคลเซียม (Calcium) ซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเหล็ก (Iron) ในถ่านหิน คุณสมบัติทางเคมีของถ่านหินได้รับอิทธิพลอย่างมากจากองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ถ่านหินสามารถจำแนกได้ตามข้อกำหนด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของถ่านหิน (ASTM C618, 2005)

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

Class N คือ วัสดุปอซโซลาน (pozzolans) ธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการหรือผ่านกระบวนการเผาที่มีคุณสมบัติผ่านข้อกำหนดในกลุ่มนี้เช่นดินเบา (diatomaceous earths) หิน

เชิร์ต(cherts) และหินดินดาน(shales) ที่มันวาว หินเถ้าภูเขาไฟ (tuffs) และเถ้าภูเขาไฟ (volcanic ashes) และวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติที่น่าพอใจเช่นดินดานและดินเหนียวบางชนิด

Class F คือ เถ้าที่ได้มาจากระบวนการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือถ่านหิน บิทูมินัส (Bituminous coal) ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ที่ให้ไว้ในที่นี้ สำหรับเถ้าเคลบในกลุ่มนี้มีคุณสมบัติปอซโซลานิก (pozzolanic properties)

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

2.1.3 เถ้าเคลบ (Rice Husk Ask, RHA)

ในปี 2009 Naiya et al. กล่าวว่า เกลบหรือเรียกอีกอย่างว่าเปลือกข้าวคือส่วนที่ปกปิดเมล็ดข้าวมีลักษณะแข็ง โดยปกติเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าว เถ้าเคลบ (Rice Husk Ask, RHA) เป็นผลผลิตที่ได้หลังจากการเผาเคลบในเตาเผาซึ่งสามารถนำออกมาได้จากเครื่องมือดักจับอนุภาคที่ติดตั้งบริเวณต้นปล่องควันไฟ

จากการศึกษา RHA market study ในปี 2003 ข้าวมีปริมาณคิดเป็น 1% ของพื้นผิวดินของโลกและเป็นแหล่งทรัพยากรอาหารหลักสำหรับประชากรพันล้านคนในปัจจุบัน ทั่วโลกมีการประเมินผลผลิตข้าวมีปริมาณมากถึง 600 ล้านตันต่อปี ดังนั้นเคลบก็ถูกผลิตเป็นจำนวนมากตามไปด้วย ประมาณร้อยละ 20 ของเมล็ดข้าวเป็นเคลบและปริมาณการผลิตคือ 120 ล้านตันต่อปี สำหรับกระบวนการทำให้เคลบกลายเป็นเถ้าเคลบ (RHA) ทำให้เกิดเถ้าเคลบคิดเป็นร้อยละ 20 ของเคลบทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าเคลบ

SiO ₂ (Amorphous)	SiO ₂ (Crystalline)	K ₂ O	C	Total
>90	<1.5	<2.3	<6	99.8 %Wt.

เถ้าเคลบมีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบา โดยพื้นที่ผิวสัมผัสภายนอกมากและเต็มไปด้วยซิลิกาโดยปกติแล้วจะมีซิลิกาอยู่ประมาณร้อยละ 90 – 95 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าเคลบซึ่งจัดทำโดย Agriletric Research Company ในปัจจุบันวิธีการที่เป็นที่นิยมในการกำจัดเถ้าเคลบคือนำไปกองทิ้งไว้ในพื้นที่เก็บขยะซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมรวมไปถึงมลพิษทางอากาศและปัญหาการปล่อยพื้นที่ให้ร้าง (Costa et al., 1999)

เนื่องจากปริมาณของเถ้าแกลบที่ถูกผลิตขึ้นทุกๆ ปี ดังนั้นวิธีการหรือกระบวนการกำจัดเถ้าแกลบที่มีประสิทธิภาพควรได้รับการพัฒนาอย่างเร่งด่วน

2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

2.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Particle Size Distribution)

การหาขนาดเม็ดวัสดุเป็นการทดสอบหนึ่งในหลายๆ การทดสอบที่ต้องรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์ขนาดวัสดุโดยใช้ตะแกรงขนาดต่าง ๆ (Sieve Analysis) โดยจะได้ออกมาเป็นเส้นการกระจายขนาดของตัวอย่างวัสดุ คำนวณได้จากน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ โดยเรียงลำดับจากขนาดใหญ่ไปจนมีขนาดเล็กที่สุด คือตะแกรงขนาดเบอร์ 200 สำหรับขนาดตะแกรงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ผู้ทำการทดสอบได้อ้างอิง

ตามมาตรฐาน ASTM D422-63 การคำนวณร้อยละผ่านตะแกรง (Percent Finer)

ดังต่อไปนี้

$$1. \text{ ร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น้ำหนักดินทั้งหมด}} \times 100 \quad \dots\dots(2.1)$$

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

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

2.2.2 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific gravity และ Water absorption)

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

ตามมาตรฐาน AASHTO T85-70 การคำนวณความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำได้

ดังนี้

$$1. \text{ Bulk Specific Gravity} = \frac{A}{B-C} \quad \dots\dots(2.2)$$

$$2. \text{ Water Absorption} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad \dots\dots(2.3)$$

- เมื่อ A = มวลของวัสดุอบแห้งในอากาศ มีหน่วยเป็นกรัม
 B = มวลของวัสดุที่อิ่มตัวด้วยน้ำและมีผิวแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม
 C = มวลของวัสดุในน้ำ มีหน่วยเป็นกรัม

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

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

$$\text{CBR} = \frac{\text{Test Unit Load}}{\text{Standard Unit Load}} \times 100 \quad \dots\dots(2.4)$$

ค่า standard unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว บนหินคลุกมาตรฐานบดอัดแน่นขนาดต่างๆ กันหลายขนาดมีค่ามาตรฐานดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่า standard unit load ที่ความลึกต่างๆ

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

ค่าร้อยละ CBR โดยทั่วไปแล้ว จะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงกดที่ความลึก 0.1 นิ้ว แต่ถ้าผลปรากฏออกมาว่าร้อยละ CBR ของแรงกดที่ความลึก 0.2 นิ้ว สูงกว่าที่ความลึก 0.1 นิ้ว การ

ทดลองควรจะต้องกระทำซ้ำอีกครั้ง ซึ่งถ้าค่าร้อยละ CBR ที่ได้มายังเป็นไปในรูปเดิม ก็ให้ใช้ค่าร้อยละ CBR ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว

ถ้าหาค่าการบวมตัววัดจากขั้นตอนการอิมตัวด้วยน้ำของตัวอย่างโดยวัดการเปลี่ยนแปลงของความสูงในแนวตั้งของตัวอย่างโดยคำนวณได้ดังนี้

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

2.2.4 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion

มวลรวมหยาบขนาดเล็กปกติใช้เป็นส่วนผสมหลักในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยอาจลดขนาดตามความเหมาะสมเช่นประกอบด้วยมวลรวมหยาบที่มีขนาดค่อนข้างโต และใกล้เคียงกัน (Coarse grade) มวลรวมหยาบที่มีขนาดโตไม่แตกต่างกันมากนักเป็นส่วนใหญ่ (Open grade) มวลรวมหยาบและละเอียดใกล้เคียงกัน (Dense grade) หรือ มวลรวมละเอียดเป็นส่วนใหญ่ (Fine grade) เมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ แอสฟัลต์เหลว (Cutback) แอสฟัลต์ผสมน้ำ (Emulsified asphalt) หรือน้ำมันดินที่ได้จากการกลั่นถ่านหิน (Tar) ใช้ลาดผิวทางเพื่อดำเนินการสึกหรอ (Wearing surface) เนื่องจากน้ำหนัก หรือการเคลื่อนที่ของล้อรถ ซึ่งจะทำให้ผิวสัมผัสขัดสีกระแทก หรือถูกบดขยี้ มวลรวมหยาบที่ดี ควรมีคุณสมบัติทั้งความแข็งแกร่ง (Hardness) ความทนทาน (Soundness) ซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลักได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม น้ำหนัก หรือแรงและเวลาการทดสอบโดยใช้ Los Angeles Abrasion Machine จึงเป็นการจำลอง เพื่อหาความแข็งแกร่ง หรือทนทานของมวลรวมภายใต้ปัจจัยดังกล่าว ความแข็งแกร่ง หรือทนทาน อาจพิจารณา หรือคำนวณจากร้อยละของมวลที่สูญเสียไป (Lose Angles Abrasion Value, LAV) ได้ดังนี้

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

โดยที่ W_i : น้ำหนักของมวลรวมหยาบก่อนทดสอบ

W_f : น้ำหนักของมวลรวมหยาบหลังทดสอบ

ผลต่างระหว่าง W_i และ W_f คือฝุ่นละเอียดที่เกิดจากการขัดสีหรือกระแทกและผ่านตะแกรง เบอร์ 12 (1.7 มิลลิเมตร)

2.2.5 การทดสอบการบดอัด (Compaction test)

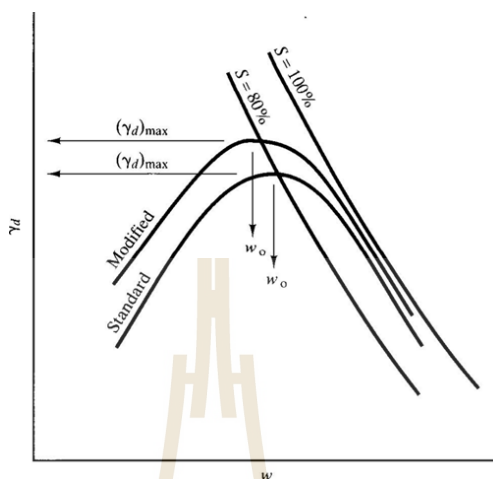
วิธีบดอัดดินให้ได้ความแน่น (Density) สูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน จะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้ามีน้ำมีอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบ ๆ มวลดิน ทำให้อณูของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน หรือถ้าที่น้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว RR. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความแน่น (Density) ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เขื่อนดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูง รับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีทดสอบแบบโมดิฟายด์ (Modified Proctor Test)

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ทดสอบแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor

Test	Mold size	Weight of Hammer (lb.)	No. of Layer	Height of Drop (in.)	No. of blow per layer	Energy/Vol. ft-lb/ft ³
Standard Proctor	ø4"x 4.6"	5.5	3	12	25	12,400
Standard Proctor	ø6"x 5.0"	5.5	3	12	56	12,400
Modified Proctor	ø4"x 4.6"	10	5	18	25	56,000
Modified Proctor	ø6"x 5.0"	10	5	18	56	56,000

ในการทำการบดอัดในห้องทดลองซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนามเข้ามาผึ่งให้แห้ง แล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาณที่เหมาะสมแล้วเริ่มทำการบดอัดในแบบที่ใช้บดอัด โดยวิธีการที่จะพูดถึงรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นอย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดแต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น จะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า “ความ

หนาแน่นสูงสุด” (Maximum Dry Density, γ_d) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า “ความชื้นที่เหมาะสม” (Optimum Water Content, OWC) ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และร้อยละของความชื้น (Water content) ของการบดอัดแบบ Standard Proctor และ Modified Proctor
ที่มา : <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/>

ถ้าพลังงาน ในการบดอัดสูงขึ้นในดินชนิดเดียวกัน เส้นกราฟการบดอัดจะขยับสูงขึ้น ดังเช่นในรูปที่ 2.1 จะสามารถสังเกตลักษณะพิเศษสองประการ คือ ค่า γ_d ของ Modified Proctor จะสูงกว่า γ_d ของ Standard Proctor และค่าร้อยละความชื้นที่จุด γ_d สูงสุด ซึ่งเรียกว่า ความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) ก็จะลดลงด้วย ขณะที่ γ_d เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะพิเศษนี้เป็นคุณสมบัติของดิน โดยทั่วไปเมื่อได้รับการบดอัด

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

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

$$\text{ความหนาแน่นเปียก } (\gamma_p) = \frac{\text{มวลดินเปียก (A)}}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (V)}} \quad \dots\dots(2.8)$$

$$\text{ความหนาแน่นแห้ง}(\gamma_d) = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\text{ร้อยละความชื้นในดิน (w)}}{100}} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

2.2.6 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test)

การทดสอบกำลังอัดของวัสดุเป็นการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้รับแรงอัดว่าจะสามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากน้อยเพียงใดและเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุนั้นด้วย เพื่อที่จะได้นำวัสดุนั้นไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม สำหรับการคำนวณกำลังอัดคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D1633 (2007) ได้ดังนี้

$$\text{ค่ากำลังอัด (Compressive strength)} = \frac{\text{แรงกดสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง}} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

2.3 เทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

2.3.1 พื้นฐานของจีโอพอลิเมอร์

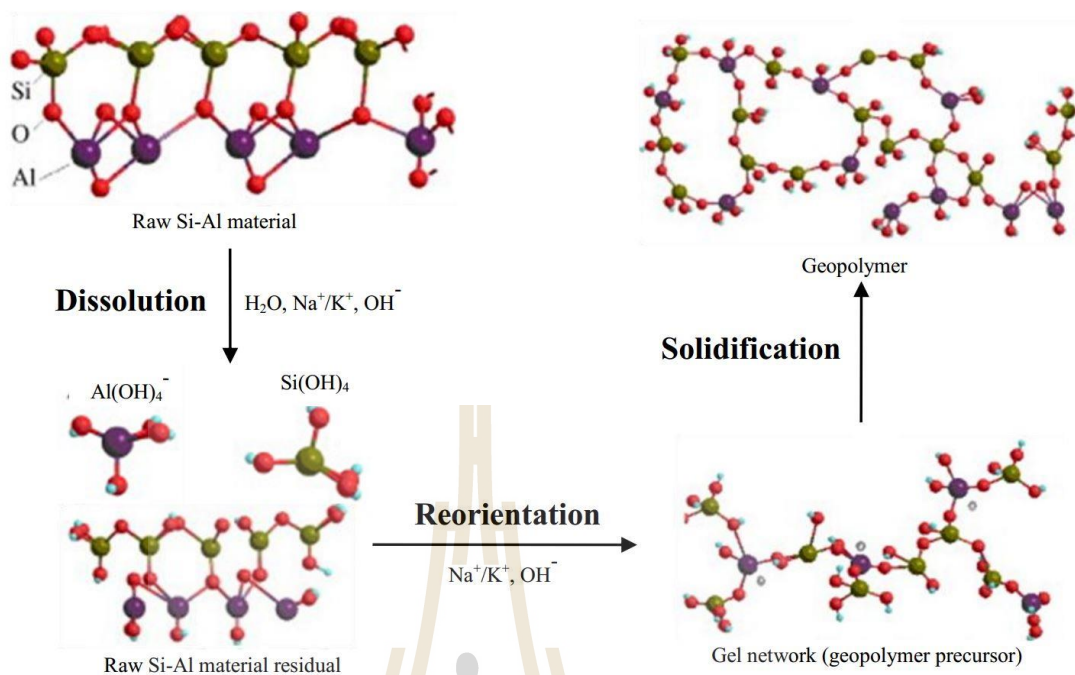
ในปี 1991 ได้มีนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสท่านหนึ่งชื่อว่า Joseph Davidovits ได้ประดิษฐ์และได้ทดลองใช้จีโอพอลิเมอร์ เป็นครั้งแรก สำหรับพื้นฐานของ จีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยธาตุหลักอยู่สองชนิดคือ อลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) ซึ่งธาตุทั้งสองเป็นส่วนประกอบสำคัญขององค์ประกอบโครงสร้างพื้นฐานทางธรณีวิทยา สิ่งอะไรที่เราควรพิจารณาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์เรามีวัสดุใหม่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

นับเป็นเวลามากกว่า 30 ปีแล้วตั้งแต่ Joseph Davidovits ได้เผยแพร่บทความวิจัยชิ้นแรกเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ในปี 1979 แต่ในทางกลับกันแม้ว่าวิทยาการทางจีโอพอลิเมอร์ได้มีการศึกษามาเป็นเวลานานมากกว่า 3 ทศวรรษจนถึงทุกวันนี้ก็ตาม แต่การวิเคราะห์วิจัยในสถาบันการศึกษาต่างๆยังมีน้อยมากในช่วงระยะเวลา 20 ปีแรก ระหว่างปี 1979 และ 1999 มีวารสารทางวิชาการและสิทธิบัตรเพียง 91 ชิ้น และมีเพียงการประชุมวิชาการครั้งเดียวที่มีเนื้อหาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์และจีโอพอลิเมอร์ไลเซชัน (Geopolymerization) (Xu, 2002) แต่อย่างไรก็ตามใน 10 ปีต่อมาการวิจัยเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ก็ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก (Davidovits, 2010) โดยหนึ่งในนั้นคือประเทศจีนเพียงปีเดียว ปี 2010 มีการเผยแพร่บทความเกี่ยวกับ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์เป็นจำนวนมากถึง 135 ชิ้น ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้จีโอพอลิเมอร์เป็นไปได้หลากหลายแนวทาง ตัวอย่างเช่น วัสดุทนไฟ เครื่องประดับ ฉนวนกันความร้อน วัสดุก่อสร้างต้นทุนต่ำ กระเบื้องพลังงานต่ำ วัสดุทนความร้อนสูง วัสดุทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ วัสดุประยุกต์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมโรงหล่อโลหะ วัสดุเชื่อมประสานและคอนกรีต สารประกอบสำหรับบำรุงรักษาและเพิ่มกำลังโครงสร้างพื้นฐาน เทคโนโลยีขั้นสูงเกี่ยวกับยางเรซิน การป้องกันกัมมันตภาพรังสีและขยะพิษ งานศิลปะตกแต่ง มรดกทางวัฒนธรรม โบราณคดี และการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ (Davidovits, 2011) จนถึงปัจจุบันนี้ คุณสมบัติต่างๆและการใช้ประโยชน์จาก จีโอพอลิเมอร์ได้ถูกศึกษาแล้วทั้งในด้านวิทยาศาสตร์หลายแขนงและทางด้านอุตสาหกรรมด้วย เช่น เคมีอนินทรีย์สมัยใหม่ เคมีกายภาพ เคมีคอลลอยด์ วิทยา ธรณีวิทยาและในทุกแขนงของเทคโนโลยีกระบวนการวิศวกรรม (Davidovits, 2011)

2.3.2 กระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์

ในปี 1988 Joseph Davidovits ให้คำจำกัดความการเกิดจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) ว่าเป็นกระบวนการคายความร้อนซึ่งมีโอลิโกเมอร์ (Oligomer) รวมทั้ง ไดเมอร์(Dimer) และไตรเมอร์ (Trimer) เป็นตัวกลางซึ่งโอลิโกเมอร์เป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างมาโครโมเลกุลสามมิติ (Three dimensional macromolecular edifice) ต่อมาในปี 1991 Joseph Davidovits ยังระบุด้วยว่ากระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์อาจจะถือได้ว่าเหมือนกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (zeolite) กล่าวคือปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องของในกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์คล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดโอไลต์ (zeolite) แม้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เป็นอสัณฐานกึ่งผลึก (semi-crystalline) มากกว่าผลึก (crystalline) โดยทั่วไปแล้วกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนการเกิดกระบวนการสลายตัว (dissolution) กระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ (reorientation) และกระบวนการแข็งตัว (solidification) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (Duxson et al., 2005)



รูปที่ 2.2 แบบจำลองกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์ทั่วไป (Yao et al., 2009)

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

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

พันธะที่เชื่อมอยู่ระหว่างอนุภาคซิลิกอนหรืออลูมิเนียมกับส่วนที่เป็นเจลได้ ดังนั้นจึงเป็นการเร่งให้กระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของซิลิกอนและอลูมิเนียมเร็วขึ้น

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

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิชาติ คำภาหล่า (2555) ได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยด้วยวิธีแห้งสลับเปียก พบว่าอายุการใช้งานของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยจะมีค่าต่ำสุดคล้อยกับที่ ACI (1990) และ U.S. Army Corps of Engineers (2004) แนะนำว่ากำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของการแห้งสลับเปียกการเพิ่มเถ้าลอยเพื่อช่วยให้ความหนาแน่นและการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ในดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และปริมาณที่เหมาะสมของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 7 และร้อยละ 20 ตามลำดับ ปริมาณเถ้าลอยที่มากเกินไปจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด

เฉลิมชัย และ วรชัย (2552) ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์ (Soil cement) หรืออิฐ บล็อกประสาน (Interlocking Block) โดยวิธีการทดสอบแบบแห้งสลับเปียก (Wet and Dry Condition) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์โดยมีน้ำเป็นตัวกัดกร่อน ซึ่งใช้เกณฑ์พิจารณาจาก 3 ปัจจัย คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐดินซีเมนต์ ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก และลักษณะทางกายภาพของอิฐดินซีเมนต์ จากการทดสอบการเสื่อมสภาพของอิฐดินซีเมนต์ภายใต้การทดสอบแบบแห้งสลับเปียก พบว่าการสึกกร่อนของอิฐดินซีเมนต์โดยใช้น้ำเป็นตัวกัดกร่อนเกิดกระบวนการกัดกร่อนที่แปรผันตรงกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่จะเกิดในลักษณะที่ค่อย ๆ ลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไปและต้องใช้ระยะเวลาเวลานาน ผลการทดสอบทางด้านน้ำหนัก (Weight Loss) น้ำหนักของอิฐดินซีเมนต์ลดลงแปรผันตรงกับระยะเวลา เกิดการเสื่อมสภาพ

ทางด้านน้ำหนักแบบซ้า ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก (Percent Weight loss) คือ 4.8% จากผลการทดลองของตัวอย่างทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง จำนวนทั้งสิ้น 46 รอบการทดลอง เป็นระยะเวลาในการทดสอบทั้งสิ้น 90 วัน ผลการทดสอบทางด้านกำลังของวัสดุ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ลดลงเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดการทดลอง เท่ากับ 7.71 ksc คิดเทียบเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละลดลงเท่ากับ ร้อยละ 7.0 เทียบจากค่ากำลังรับแรงอัดก่อนเริ่มทำการทดสอบ และได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของทั้ง 3 ชุดการทดลองภายหลังการทดสอบ เท่ากับ 80.29 ksc ผลทางด้าน การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอิฐดินซีเมนต์ มีดังนี้ เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณผิวและเนื้อของอิฐดินซีเมนต์ภายหลังการทดสอบแล้วเสร็จมีจำนวนอิฐบล็อกที่เกิดรอยร้าวประมาณ ร้อยละ 20 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด เกิดการสึกกร่อนของอิฐบล็อกประสานบริเวณรอบรูเสียบเหล็กเสริม รอยบาก และดอกของอิฐบล็อก สีของอิฐบล็อกประสานมีสีซีดลง 31

วิษณุกร สมิงทอง (2556) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของ ตะกอน ดินประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดสอบสรุปว่า สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลา บ่มกำลัง อัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อก ไม่รับน้ำหนัก (25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (70 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร) คืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 ที่ อุณหภูมิ 85°C ระยะเวลาบ่มไม่น้อยกว่า 3 วัน กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้ง แปรผันตามกำลังอัดในสภาวะแช่น้ำเริ่มต้น การทดสอบความ คงทนด้านสภาวะเปียกสลับแห้งใช้เวลานานมากงานวิจัยนี้จึงได้สร้างสมการทำนาย กำลังอัดที่รอบ เปียกสลับแห้งต่างๆ ซึ่ง เป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใน ฟังก์ชันบล็อกกักริซึม ดังนั้น กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียก สลับแห้งค่าหนึ่ง สามารถประมาณได้เมื่อทราบเพียงกำลังอัดในสภาวะแช่เริ่มต้น การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง ในช่วง 6 รอบแรก เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเกินกว่า 6 รอบ การสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยลง และเกือบจะคงที่ สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัดของ ดินตะกอน ประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ร้อยละการดูดซึมน้ำของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ที่ บ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 85°C มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 14.3 ซึ่งเป็นค่ายอมให้สำหรับคอนกรีตบล็อก การบ่ม ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงและนานเกินไป (สูงกว่า 95°C และนานเกิน 72 ชั่วโมง) ก่อให้เกิดการ หดตัว และรอยแตกระดับไมโครเมตรเนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักในตัวอย่างอย่างฉับพลัน ส่งผล ให้ ร้อยละของการดูดซึมน้ำมีเกินกว่าข้อกำหนด

ธีรพฤทธิ พลดี (2559) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตด้วยเถ้าลอย และเถ้าแกลบจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน FA/RHA ที่เท่ากัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 ที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบที่อายุบ่ม 7 วันมาเปรียบเทียบกับค่ายอมให้ตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2,413 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 และ 1,724 kPa ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 อัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงมีดังนี้ 1) ที่ค่าส่วนผสม $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ อัตราส่วน FA/RHA = 40/60 50/50 60/40 80/20 100/0 2) ที่ค่าส่วนผสม $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 60/40$ อัตราส่วน FA/RHA = 40/60 50/50 60/40 80/20 100/0 3) ที่ค่าส่วนผสม $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ อัตราส่วน FA/RHA = 60/40, 80/20, 100/0 และ 4) ที่ค่าส่วนผสม $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$ อัตราส่วน FA/RHA = 100/0 และอัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทเพิ่มเติมมีดังนี้ 1) ที่ค่าส่วนผสม $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ อัตราส่วน FA/RHA = 50/50 2) ที่ค่าส่วนผสม $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$ อัตราส่วน FA/RHA = 80/20 และค่าอัตราส่วน FA/RHA และค่าอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้คือ FA/RHA = 40/60 ที่ปริมาณสารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 60/40$ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของการหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท และราคาของเถ้าลอยมีราคาสูงกว่าเถ้าแกลบมากทำให้ลดต้นทุนของวัสดุไปได้ร้อยละ 45 และเนื่องจากราคาของสารละลาย Na_2SiO_3 ก็มีราคาสูงกว่าสารละลาย NaOH เมื่อคิดในปริมาตรที่เท่ากัน

บทที่ 3

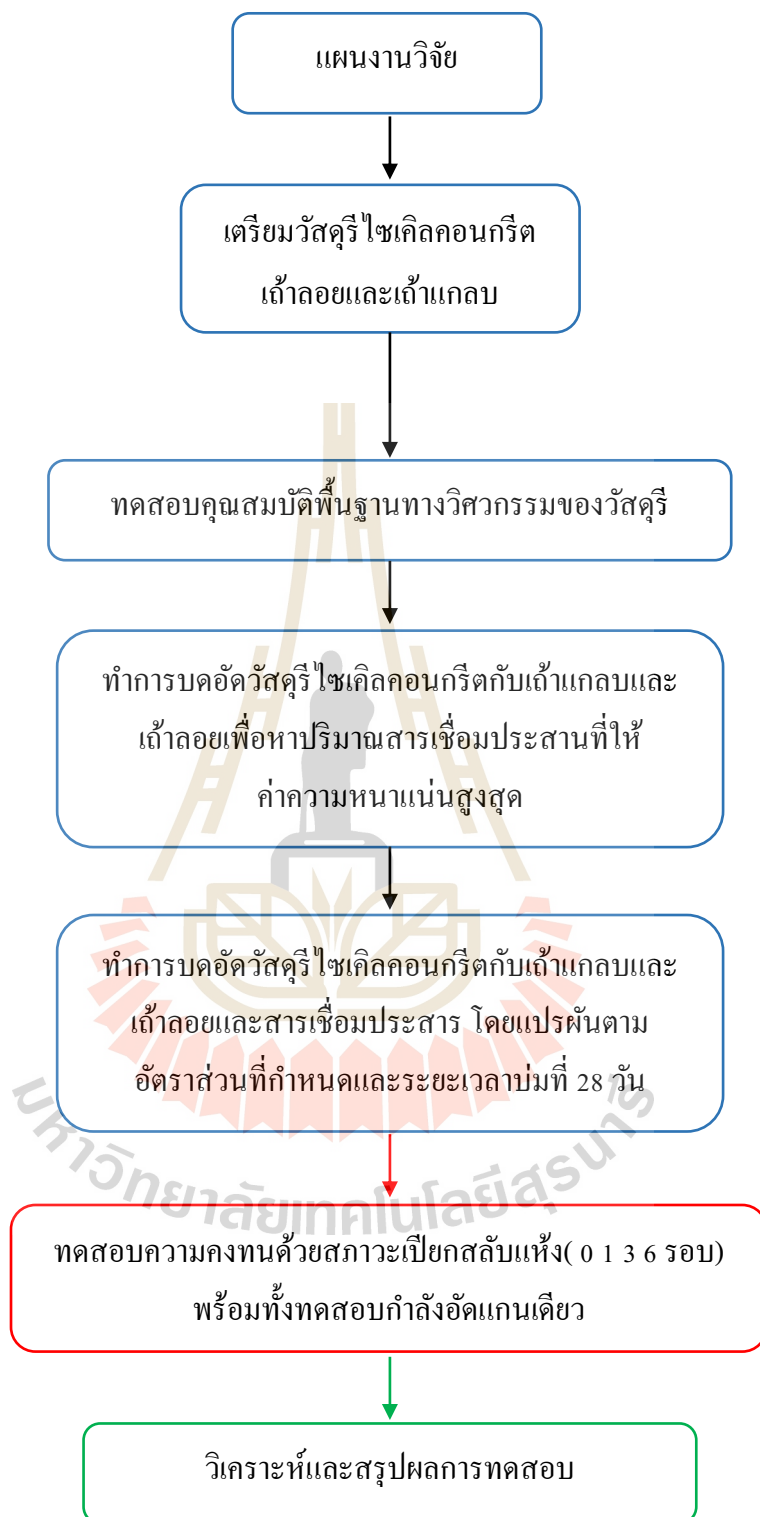
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาความคงทนของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีต (RCA) ที่ได้รับการปรับปรุงด้วย จีโอพอลิเมอร์เถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท วัสดุรีไซเคิลคอนกรีตได้จากการย่อยลู่จากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุงานทาง บริเวณหลังอาคารเครื่องมือ 5 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วัสดุตัวอย่างจะถูกนำมาปรับปรุงการกระจายขนาดของเม็ดดินให้ได้มาตรฐานของชั้นพื้นทาง และผสมกับวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ (ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุตั้งต้น) แล้วทำการบดอัด โดยแปรผันตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยและเถ้าแกลบ อัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ ระยะเวลาการบ่ม ตัวอย่างบดอัดจะถูกนำไปบ่มจนได้อายุ 28 วัน และทดสอบความคงทนด้วยสภาวะเปียกสลับแห้งที่ 0 1 3 และ 6 รอบ โดยแต่ละรอบก็มีการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวด้วย ผลทดสอบความคงทนด้วยสภาวะเปียกสลับแห้งที่อายุบ่ม 28 วัน ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท แต่เนื่องจากกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทไม่มีมาตรฐานทดสอบความคงทนที่อายุบ่ม 28 วัน จึงนำมาเปรียบเทียบกับ American Concrete Institute (ACI) เป็นสถาบันควบคุมมาตรฐานโครงสร้างและคุณภาพคอนกรีตที่ใช้สำหรับชั้นพื้นทาง รายละเอียดจำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ

ตัวแปร	จำนวน	คำอธิบาย
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
ระยะเวลาบ่ม	1	28 วัน (ที่อุณหภูมิห้องปกติ)
อัตราส่วนเถ้าแกลบหรือเถ้าลอยต่อคอนกรีตรีไซเคิล	1	(FA+RHA)/RCA= 30/70
ปริมาณความชื้น	1	ปริมาณของเหลวที่เหมาะสม (OLC)
อัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสาน	2	NaOH/Na ₂ SiO ₃ : 50/50 100/0
อัตราส่วนเถ้าลอยและเถ้าแกลบ	5	FA/RHA : 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60
รอบการทดสอบ	4	สภาวะเปียกสลับแห้ง : 0 1 3 และ 6
จำนวนตัวอย่าง	3	ของแต่ละส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม

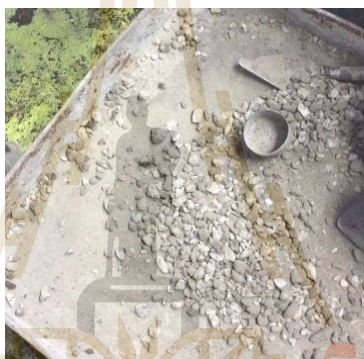


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.2 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ

3.2.1 วัสดุรีไซเคิลคอนกรีต

วัสดุคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มาจากการย่อยคอนกรีตจากห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุงานทาง ซึ่งอยู่บริเวณหลังอาคารเครื่องมือ 5 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แล้วนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีตบริเวณหลังเมืองจราจรจำลองภายในเทคโนโลยีธานี วัสดุที่ได้ถูกนำมาแยกเป็น 3 ขนาด คือ ขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 3/8 ขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 3/8 และเบอร์ 10 และขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 10 ต่อมาวัสดุทั้งสามขนาดถูกนำมาผสมกันในสัดส่วนต่าง ๆ (Trial and error) จนได้ขนาดละเอียดของวัสดุตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล-ม. 203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์



รูปที่ 3.2 การสุมในสัดส่วนต่าง ๆ ของขนาดละเอียด RCA

3.2.2 etailoy

etailoyที่ใช้ในงานวิจัยมาจากบริษัท ซีแพ็ค จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตคอนกรีตในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานและสาธารณูปโภคภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี etailoyนี้ นำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

3.2.3 etailoy

etailoyที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากโรงสีข้าววิจิตรธัญญา ต.นกออก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา etailoyดังกล่าวถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อแยกส่วนหยาบออก ซึ่งส่วนมากเป็นetailoyที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 3.3 เถ้าแกลบที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ (Basic engineering properties)

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

- 3.3.1 การหาค่าความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 และ C535
- 3.3.2 การหาค่า CBR (California bearing ratio) และค่าการบวมตัว (Swelling ratio) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T193
- 3.3.3 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดหยาบ (Specific gravity and Water absorption-Coarse aggregate) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T85
- 3.3.4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดละเอียด (Specific gravity and Water absorption-Fine aggregate) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T84
- 3.3.5 การหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นในการบดอัดสูงสุด (Optimum moisture content and Maximum density) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T180

3.4 การบดอัดวัสดุ (Compaction)

การบดอัดวัสดุทำในแบบมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว โดยแบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ด้วยค้อนการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน AASTHO T180 ผลการบดอัดจะได้ค่าร้อยละปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content) ที่มีความ

หนาแน่นสูงสุดของวัสดุมวลรวมที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) เมื่อทำการบดอัดเสร็จ ตัวอย่างจะถูกดันออกจากแบบหล่อโดยใช้แท่นดันตัวอย่าง และตัวอย่างที่ถูกดันออกจากแบบหล่อจะถูกนำไปห่อด้วยพลาสติกเพื่อความคุมความชื้น และบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน



รูปที่ 3.4 การบดอัดที่สูงกว่ามาตรฐาน

3.5 การทดสอบความคงทนต่อสถานะเปียกสลับแห้ง (DURABILITY AGAINST WETTING-DRYING)

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

- แช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทิ้งตัวอย่างไว้ให้ผิวนอกแห้ง
- นำตัวอย่างเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้น ทิ้งตัวอย่างไว้ในที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ถือว่าเป็นหนึ่งรอบ)
- ทำการทดสอบดังอธิบายข้างต้น จนได้จำนวนรอบทดสอบที่ต้องการ (0 1 3 และ 6 รอบ)
- เมื่อได้จำนวนรอบทดสอบที่ต้องการ แช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างอึมตัวด้วยน้ำ ก่อนทดสอบสอปกำลังอัด

3.6 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)

เมื่อตัวอย่างผ่านการทดสอบความคงทนด้วยสถานะเปียกสลับแห้ง ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Compressive test ตามมาตรฐาน ASTM D 1633 เพื่อหาค่าแรงกดอัดสูงสุดและนำไปคำนวณค่ากำลังอัดสูงสุดต่อไป

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษา คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตรีไซเคิล คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ จากนั้นแสดงผลการศึกษาการบดอัดคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์สุดท้ายนำเสนอผลการศึกษาความคงทนของคอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอย และเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมเปรียบเทียบกับมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกัน หรือ American Concrete Institute (ACI)

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตรีไซเคิล เถ้าลอยและเถ้าแกลบ

เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตเป็นตัวกำหนดคุณภาพของวัสดุมวลรวมรีไซเคิลคอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยและเถ้าแกลบที่ใช้ทำวัสดุชั้นพื้นทาง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตตามมาตรฐานต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

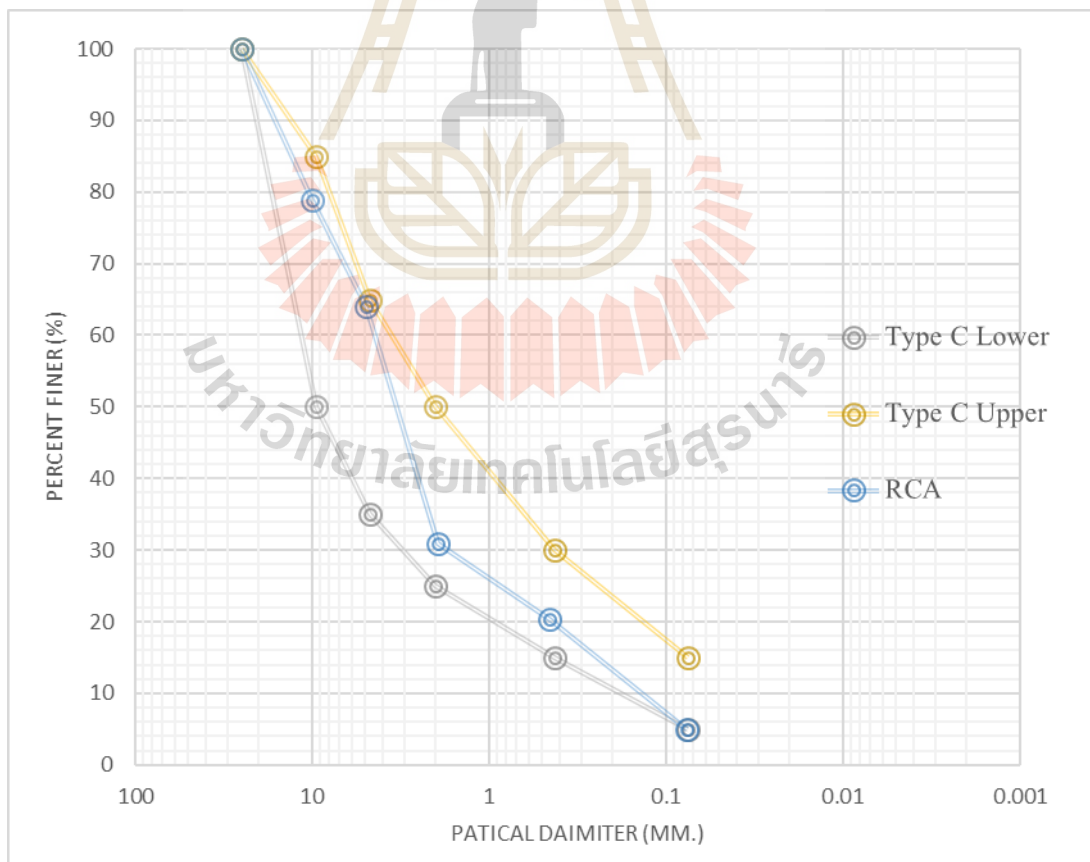
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของรีไซเคิลคอนกรีต

Basic Properties	Standard	RCA
Los Angeles Abrasion <40%	ASTM C131,C535	38.96
California bearing ratio >80%	AASHTO T193	190
Specific gravity-Coarse aggregate	AASHTO T85	2.61
Water absorption-Coarse aggregate, %	AASHTO T85	6.0
Specific gravity-Fine aggregate	AASHTO T84	2.62
Water absorption-Fine aggregate, %	AASHTO T84	9.2
Swelling ratio, %	AASHTO T193	0.01
Optimum moisture content, %	AASHTO T180	11.6
Maximum Dry Density, g/cm ³	AASHTO T180	1.77
USCS Classification		SW
D ₁₀ , mm.		0.18

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Basic Properties	Standard	RCA
D_{30} , mm.		0.82
D_{60} , mm.		3.7
C_u		20.55
C_c		1.01

จากตารางที่ 4.1 วัสดุรีไซเคิลคอนกรีตเมื่อจำแนกดินตามระบบเอกภาพ (USCS) จัดเป็นทรายที่มีขนาดกลาง (SW) การกระจายตัวของคอนกรีตรีไซเคิลแสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตรีไซเคิล มีความคล้อยตาม ทล.-ม.203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงและจัดเป็นเกรด C ทั้งหมด และสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์สำหรับงานหมุนเวียนวัสดุชั้นพื้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement recycling technique)



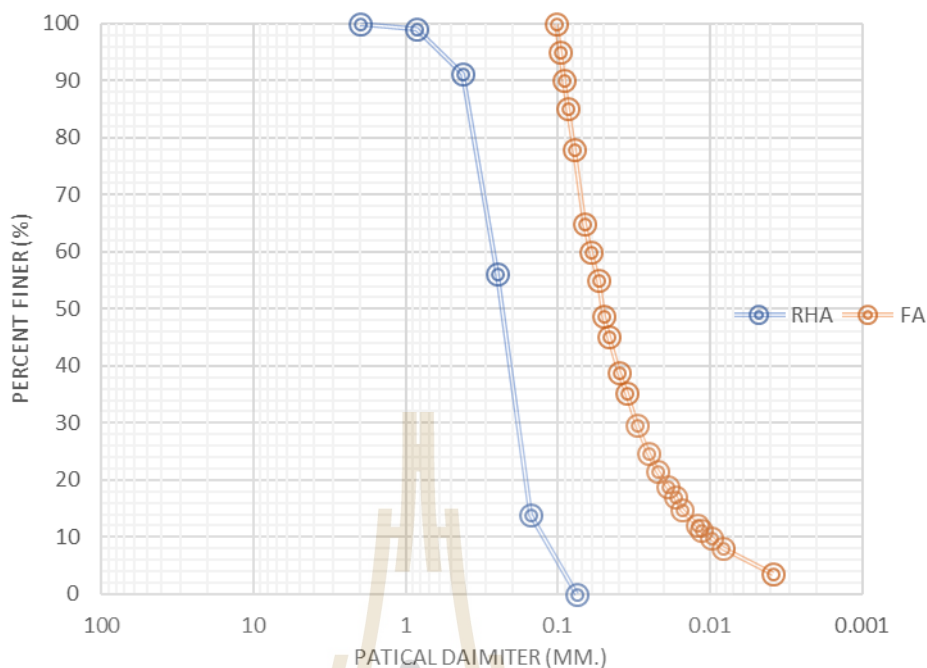
รูปที่ 4.1 ขนาดละเอียดของวัสดุรีไซเคิลคอนกรีตเทียบกับมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์

เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และ เถ้าแกลบ (RHA) จากโรงสีข้าว วิจิตรัญญา ต.นกออก อ.ป่าซาง จ.นครราชสีมา ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีคุณสมบัติทางเคมีดังแสดงใน ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

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

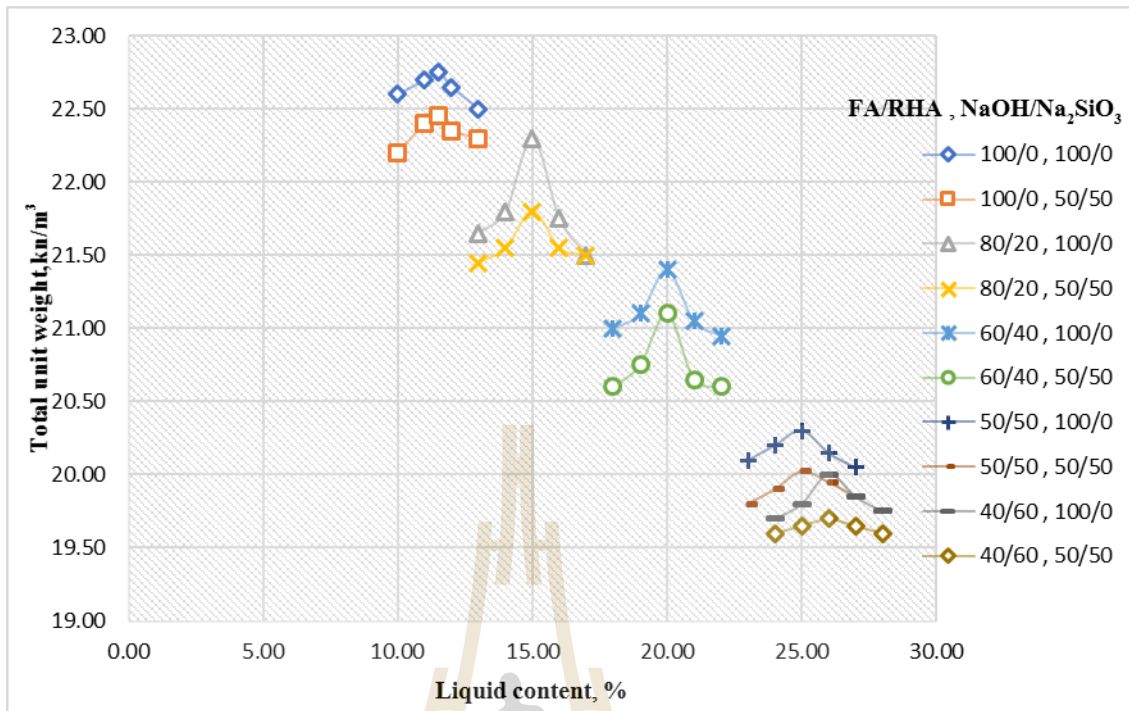
จากตารางที่ 4.1 ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ของเถ้าลอย (FA) เท่ากับ ร้อยละ 73.87 ซึ่งจำแนกเป็น Class C ตามมาตรฐาน ASTM C-618 มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.53 และ ปริมาณธาตุ SiO₂ ของเถ้าแกลบ (RHA) มากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก มีค่าความ ถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.10 ซึ่งการกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอย (FA) และเถ้าแกลบ (RHA) แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วย Laser particle size analysis



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น

รูปที่ 4.3 แสดงผลการบดอัดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน FA/RHA ระหว่าง 100/0 ถึง 0/100 และอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 100/0 และ 50/50 จะเห็นว่า เมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นหน่วยน้ำหนักรวมสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบมีค่าน้อยกว่าเถ้าลอย และปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (OLC) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าแกลบ นอกจากนี้จะเห็นว่าที่อัตราส่วน FA/RHA เท่ากันอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ไม่มีผลต่อปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (OLC)



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นและปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม

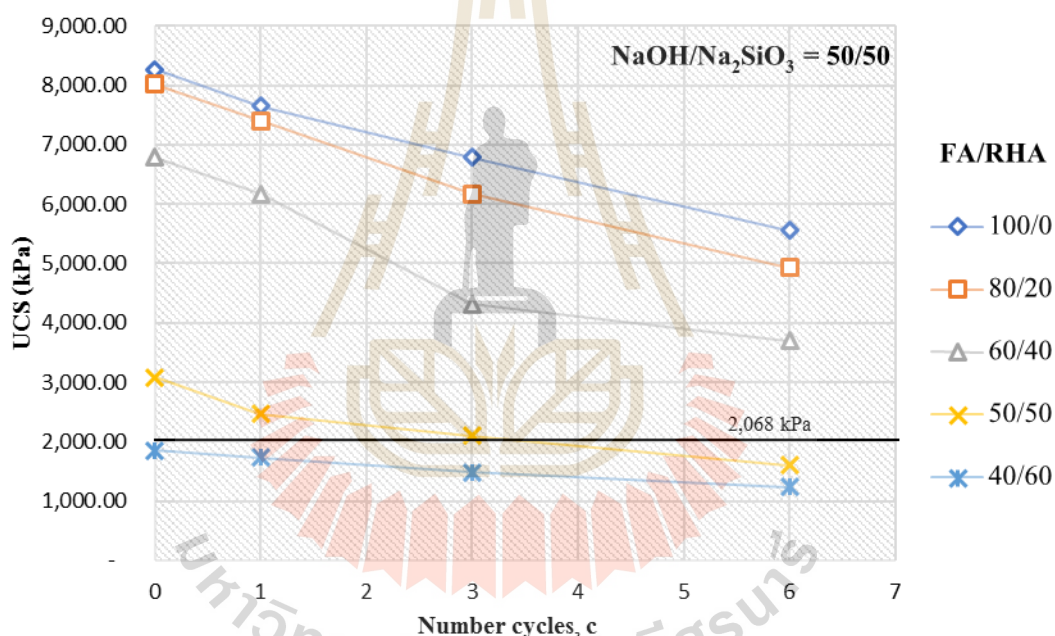
4.4 ผลทดสอบความคงทนของคอนกรีตซีเมนต์โพลิเมอร์ที่มีเส้นลวดและเส้นแกลบเป็นส่วนผสม

การทดสอบความคงทนตามวิธีการทดลองของ ASTM D599M-15 เมื่อสิ้นสุดการเตรียมตัวอย่างเป็ยกลลับหนึ่งในแต่ละรอบ ผู้วิจัยหาค่าสูญเสียน้ำหนักและกำลังอัดของตัวอย่าง ผลการทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกัน หรือ American Concrete Institute (ACI 230.1R-90) ซึ่งระบุให้กำลังอัดมีค่าไม่น้อยกว่า 2,068 kPa และค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่เกินร้อยละ 14 เมื่อผ่านการทดสอบเป็ยกลลับครั้งที่ 6 รอบ ของก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน

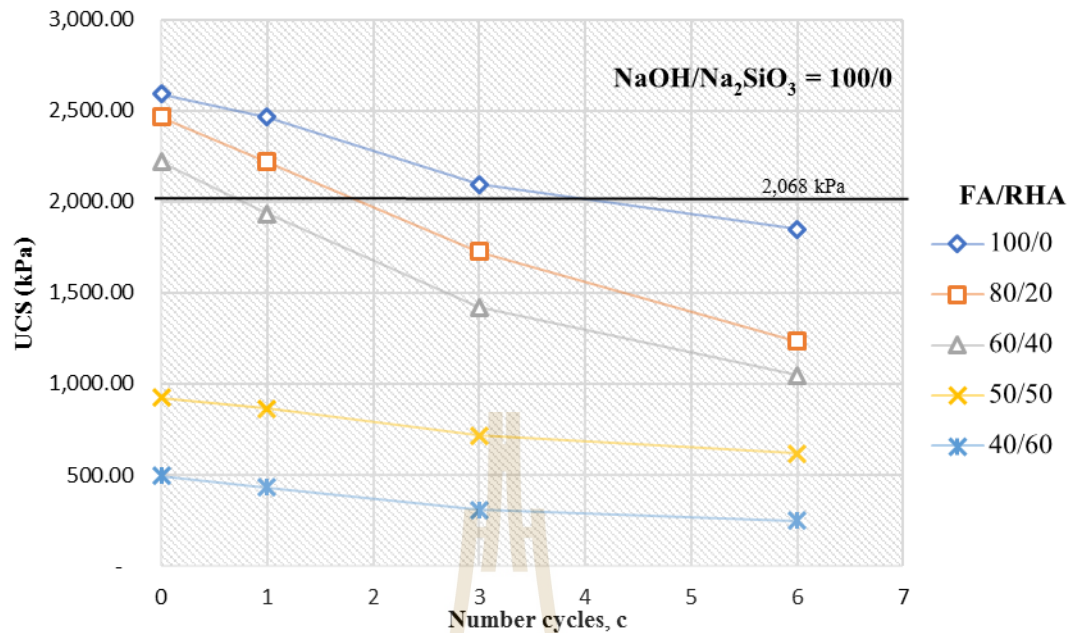
4.4.1 ผลการทดสอบกำลังอัด

รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับจำนวนรอบเป็ยกลลับแห่งของคอนกรีตซีเมนต์โพลิเมอร์ที่อัตราส่วนของปริมาณสารเชื่อมประสาน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 50/50 และ 100/0 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 50/50 และ 40/60 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์โพลิเมอร์ลดลงตามจำนวนรอบการทดสอบสภาวะเป็ยกลลับแห่งที่เพิ่มขึ้น

กำลังอัดของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่สภาวะเปียกสลับแห้งเท่ากับ 6 รอบมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน ACI 230.1R-90 (2,068 kPa) เฉพาะคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของปริมาณสารเชื่อมประสาน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ อัตราส่วน FA/RHA = 100/0 80/20 และ 60/40 โดยที่ตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 40/60 และ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 100/0 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้กำลังอัดต่ำที่สุด (247 KPa) เนื่องจากมีปริมาณเถ้าแกลบ (RHA) ที่มากทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าเนื่องจากเถ้าแกลบมีขนาดเม็ดที่หยาบ (มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.25 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยประมาณ 10 เท่า) และไม่มีสารกระตุ้นโซเดียมซิลิเกตไตรออกไซด์ (Na_2SiO_3) ไปเร่งละลายซิลิกาในเถ้าลอยและเถ้าแกลบเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ที่สมบูรณ์



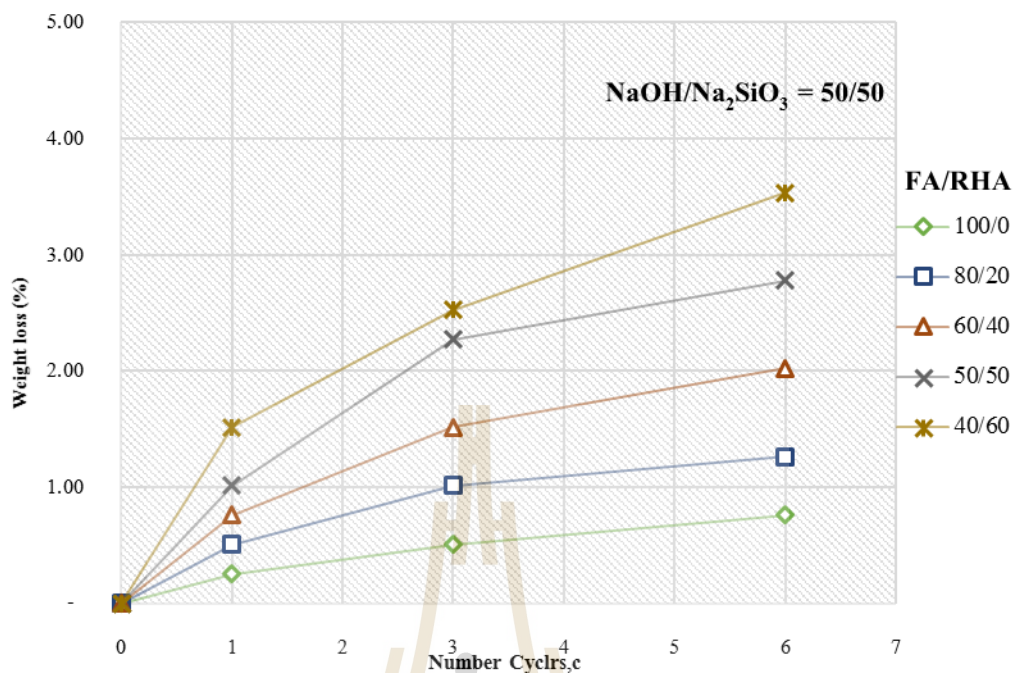
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 50/50



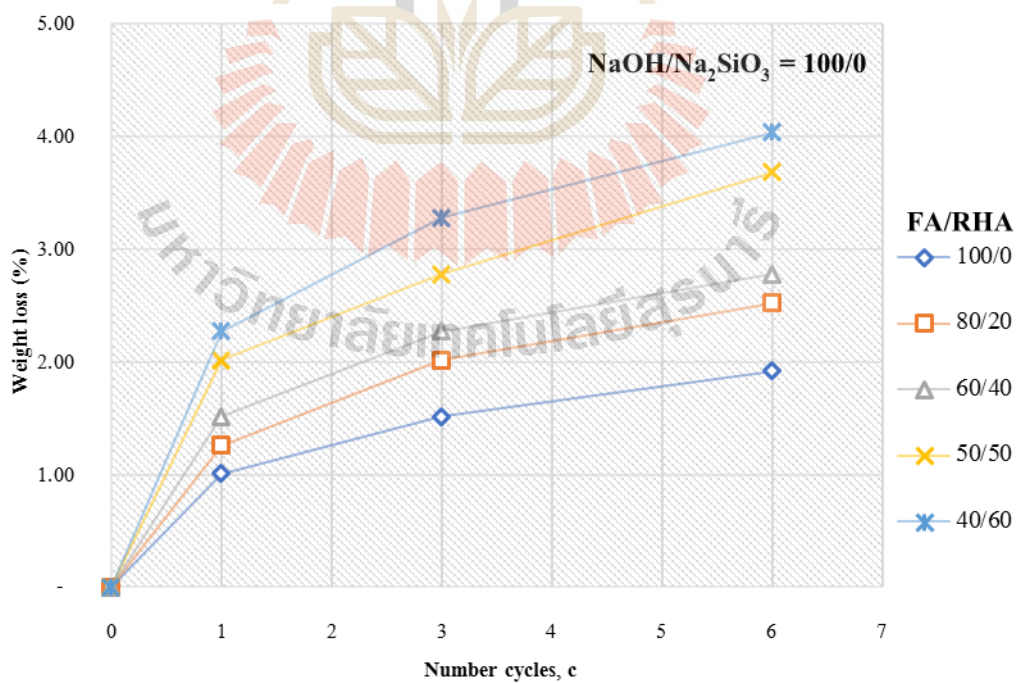
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิล
จีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 100/0

4.4.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก

รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนของปริมาณสารเชื่อมประสาน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 50/50 และ 100/0 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 50/50 และ 40/60 การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัด และพบว่าตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ทุกส่วนผสมของ NaOH/Na₂SiO₃ และทุกอัตราส่วน FA/RHA มีค่าไม่เกินค่าที่ยอมรับ (ไม่เกินร้อยละ 14) ซึ่งกำหนดโดย American Concrete Institute (ACI) โดยตัวอย่างคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 40/60 และ NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 100/0 เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 4) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้กำลังอัดต่ำที่สุด



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบการสูญเสียเกี่ยวกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน NaOH/ Na₂SiO₃ เท่ากับ 50/50

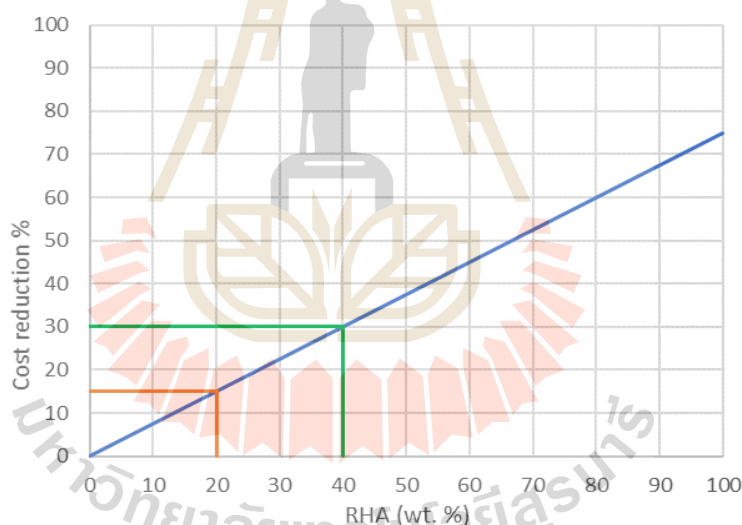


รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการสูญเสียเกี่ยวกับจำนวนรอบการทดสอบของคอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน NaOH/ Na₂SiO₃ เท่ากับ 100/0

เมื่อนำกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบที่อายุบ่ม 28 วัน จากผลทดสอบเป็ยกสลับครั้งที่ 6 รอบ มาเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกัน ACI – 230 ซึ่งต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2,068 kPa และค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่เกินร้อยละ 14 อัตราส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐาน ACI – 230. 1R-90 มีดังนี้ คือ คอนกรีตรีไซเคิลจีโอพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของปริมาณสารเชื่อมประสาน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ อัตราส่วน $\text{FA}/\text{RHA} = 100/0$ 80/20 และ 60/40

4.5 วิเคราะห์การลดลงของต้นทุนจากอัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ

เนื่องจากความแตกต่างของต้นทุนวัสดุที่ใช้ประกอบการปรับปรุงวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลด้วยจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าลอยในท้องตลาดจะมีต้นทุนมากกว่าเถ้าแกลบมาก โดยเถ้าลอยมีราคาประมาณ 1,000 บาทต่อตัน และเถ้าแกลบมีราคาประมาณ 250 บาทต่อตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 25 ของราคาเถ้าลอย (อ้างอิงจาก กรมควบคุมมลพิษ) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการลดลงของต้นทุนวัสดุตั้งต้นและร้อยละการใช้เถ้าแกลบ

จากการทดสอบความคงทนพบว่าสามารถใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอยได้ถึงร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ ในสารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ ซึ่งเป็นปริมาณที่ให้กำลังสูงกว่ามาตรฐาน และเนื่องจากราคาของเถ้าแกลบที่ถูกกว่าเถ้าลอยทำให้อัตราการลดลงของต้นทุนวัสดุที่ใช้มีค่าเท่ากับร้อยละ 75 ของการใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอย (ดังแสดงในรูปที่ 4.8) ดังนั้นเมื่อใช้เถ้าแกลบแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 20 และ 40 ทำให้อัตราการลดลงของต้นทุนวัสดุสารตั้งต้นจะมีค่าเท่ากับ 15 และ 30 ตามลำดับ ในการปรับปรุงคอนกรีตรีไซเคิลด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นส่วนผสม เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์

5.1 สรุปผล

ความเป็นไปได้ในการใช้จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น (Precursor) ในการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยศึกษาอิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดคอนกรีตซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์ โดยการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ของปริมาณ Liquid Alkaline activator (L) และ อัตราส่วนเถ้าลอยแทนที่ด้วยเถ้าแกลบต่อการพัฒนากำลังอัด และเปรียบเทียบค่ากำลังอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักตามมาตรฐาน ACI 230 1R-90 (State-of-the-Art Report on Soil Cement) ประเด็นที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับทุกอัตราส่วนของปริมาณสารเชื่อมประสาน ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$) และเถ้าลอยที่ ถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ (FA/RHA) ของคอนกรีตซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ซึ่งค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 2,068 kPa และค่าการสูญเสียน้ำหนัก ไม่เกินร้อยละ 14 คืออัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ FA/RHA = 80/20 และ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ FA/RHA = 60/40 ตามลำดับ ที่สภาวะเปียกสลับแห้ง 6 รอบ ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน
2. กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์แปรผกผันกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง กล่าวคือ เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์ลดลง ตามลำดับ
3. การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์แปรผันตามจำนวนรอบเปียก สลับแห้ง กล่าวคือ เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของ คอนกรีตซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์ก็เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีต ซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์ที่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเถ้าแกลบมีผลต่อกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนัก ดังนั้นควรมีการนำเถ้า แกลบจากหลาย ๆ แหล่งมาทำการทดสอบ เพราะคุณสมบัติทางเคมีและขนาดคละอาจ มีความแตกต่างกัน
2. ควรมีการทดสอบความคงทนด้วยวิธีแช่แข็งสลับละลาย เพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- กรมทางหลวง. (2556). **มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ (Cement Modified Crushed Rock Base)**, มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203/2556.
- กรมทางหลวงชนบท. (2556). **มาตรฐานงานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base)**. มาตรฐานที่ มทช. 244 – 2556.
- ธีรพฤทธิ พลดี. (2559). **กำลังอัดของคอนกรีตไร้เหล็กปรับปรุงด้วยเถ้าลอยและเถ้าแกลบจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วิษณุกร สมิงทอง. (2556). **อิทธิพลของสถานะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัด ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สมเกียรติ ชูประทีป. (2557). **ความคงทนต่อสถานะเปียกสลับแห้งของบล็อกดินลูกรังที่ใช้เปลือกหอยเชอรี่บดและปูนซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน**. โครงการมหาบัณฑิต สาขาบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2015), Annual Book of ASTM Standards, D 559M – 15.
- ACI - American Concrete Institute. ACI 230.1R-90, State-of-the art report on soil cement, Detroit, 1990.
- Davidovits, J. (1991). **Geopolymers: inorganic polymeric new materials**. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633-1656.
- ACAA – American Coal Ash Association. (2003). **Fly ash facts for highway engineers**. Aurora, USA.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. (2005). Annual Book of ASTM Standards, C 618 – 05.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. (2002), Annual Book of ASTM Standards, D 422 – 63.
- AASHTO. (2002) . **Standard Specifications for Highway and Bridge**. In the 7th edition. Washington D.C., American Association of state Highway and Transportation Officials.

ASTM - American Society for Testing and Materials. (2007), Annual Book of ASTM Standards, D 1633 – 00.

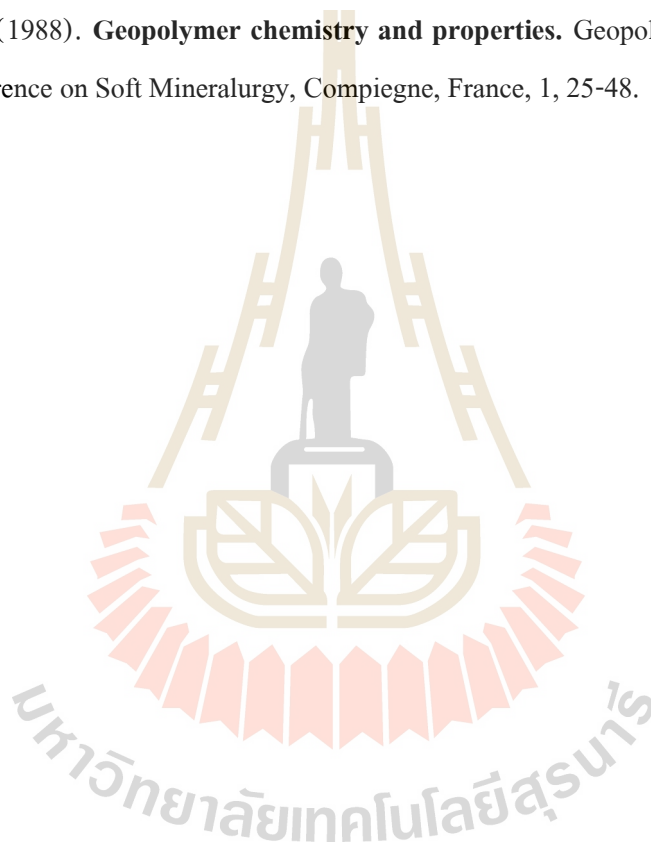
Davidovits, J. (2011). **Geopolymer chemistry and applications**. Geopolymer Institute, 3rd edition, France.

Davidovits, J. (2010). **World-wide Increase in Geopolymer Research**. (online)

<http://www.geopolymer.org/science/world-wide-increase-in-geopolymer-research/>

[8 July 8, 2017].

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



ประวัติผู้เขียน

นายพัฒนพงษ์ พันพะมา เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2536 ที่อำเภอสำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ การศึกษาเริ่มเรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนบ้านหนองคู ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนสำโรงทาบวิทยาคม จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันประกอบอาชีพวิศวกรออกแบบฝายโยธา ที่บริษัท เอทู เทคโนโลยี จำกัด

