

กำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มี เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

ธีรฤทธิ์ พลดี¹ อภิชาติ สุดดีพงษ์² และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข^{3*}
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้มวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้จากส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly Ash, FA) จากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ที่ได้จากโรงสีข้าวในกระบวนการเผาแกลบร่วมกับสารเชื่อมประสาน (Liquid Alkaline Activator, L) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) อัตราส่วน FA/RHA ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 และ 0/100 อัตราส่วน NaOH/ Na_2SiO_3 เท่ากับ 50/50 60/40 80/20 และ 100/0 ตัวอย่างมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์สำหรับทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวถูกเตรียมที่ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม และบดอัดด้วยวิธีสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) การทดสอบกำลังอัดกระทำที่อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน และ 60 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน FA/RHA อายุบ่ม และการลดลงของอัตราส่วน NaOH/ Na_2SiO_3 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานด้านกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท สำหรับวัสดุชั้นพื้นทาง เถ้าแกลบสามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยได้สูงสุดถึงร้อยละ 76.8 และ 87.1 ที่สารละลาย NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ ตามลำดับ วัสดุมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบยั่งยืนที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : มวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิล / เถ้าลอย / เถ้าแกลบ / จีโอพอลิเมอร์

* Corresponding Author : suksun@g.sut.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

² นักวิจัย ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน

³ ศาสตราจารย์ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

Strength of Recycled Concrete Aggregate Binding with Fly Ash-Rice Husk Ash based Geopolymer for Pavement Sub Bases Application

Theerapruet Poltue¹ Apichat Suddeepong² and Suksun Horpibulsuk^{3*}
Suranaree University of Technology, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Abstract

This research presents the use of fly ash-rice husk ash (FA-RHA) based geopolymer for improving the compressive strength of recycled concrete aggregate (RCA) to meet the standard requirements for base material specified by the Department of Highway (DOH) and Department of Rural Road (DRR), Thailand. The geopolymers that were used in the study were from a mixture of fly ash from coal-burning power plants and rice husk ash from rice mill, which was obtained in the process of burning rice husk with a liquid alkaline activator (L), which is a mixture of sodium hydroxide solution (NaOH) and sodium silicate solution (Na_2SiO_3). FA/RHA ratios studied were 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 and 0/100, while the NaOH/ Na_2SiO_3 ratios studied were 50/50 60/40 80/20 and 100/0. The mixtures were compacted under the modified proctor energy. RCA-FA-RHA geopolymer samples at each NaOH/ Na_2SiO_3 ratio were prepared at optimum liquid alkaline activator content (OLC) for unconfined compressive strength (UCS) tests. The UCS test was conducted at 7, 28 and 60 days of curing. The test results showed that the UCS of RCA-FA-RHA geopolymer increased as the FA and curing time increased and the NaOH/ Na_2SiO_3 ratio decreased. By comparing the 7-day UCS results to the specified strength requirement for base material of the DOH and DRR, rice husk ash was noted to be able to be used in conjunction with fly ash for up to 76.8% and 87.1 % at NaOH/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$, respectively. RCA-FA-RHA geopolymers can be used as a sustainable stabilized base material.

Keywords : Recycled Concrete Aggregate / Fly Ash / Rice Husk Ash / Geopolymer

* Corresponding Author : suksun@g.sut.ac.th

¹ Graduate Student, School of Civil Engineering.

² Researcher, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development.

³ Professor, Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, and School of Civil Engineering.

1. บทนำ

การพัฒนาอุตสาหกรรมและโครงสร้างพื้นฐานอย่างต่อเนื่องในปัจจุบันทำให้เกิดความต้องการวัสดุก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งล้วนแต่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ ส่งผลให้ปริมาณวัสดุธรรมชาติลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะหมดลงในอนาคตอันใกล้ เหตุการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดกระแสของการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ หรือที่เรียกว่า “วัสดุรีไซเคิล” (Recycled material) มาใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติที่กำลังจะหมดลง งานวิจัยและพัฒนาในช่วงแรกเป็นการประยุกต์วัสดุที่ได้จากการรื้อถอน สิ่งปลูกสร้าง (Construction & Demolition (C&D) Materials) ในงานวิศวกรรมโยธา ซึ่งประกอบด้วย เศษวัสดุคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate, RCA) อิฐ (masonry) ไม้ เหล็ก พลาสติก เป็นต้น

วัสดุรีไซเคิลจำพวกคอนกรีต อิฐ และแอสฟัลต์มีสัดส่วนมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 50 ของวัสดุรีไซเคิลทั้งหมด โดยคอนกรีตมีสัดส่วนมากที่สุดถึงร้อยละ 58 [1] ดังนั้น นักวิจัยหลายท่านจึงให้ความสนใจนำ RCA มาศึกษาวิจัยและประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในงานทาง การประยุกต์ใช้งานดังกล่าวในช่วงแรกเป็นการนำวัสดุ RCA มาบดอัดโดยตรง โดยปราศจากการใส่สารผสมเพิ่ม [2-5] และต่อมานักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของ RCA ที่ผสมปูนซีเมนต์ (Portland Cement, PC) เพื่อเพิ่ม แรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของ RCA [6-7]

แม้ว่าปูนซีเมนต์จะได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ก๊าซเรือนกระจก) จำนวนมาก และส่งผลอย่างมากต่อปัญหาภาวะโลกร้อน ดังนั้น ปูนซีเมนต์จึงถูกจัดว่าเป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [8]

Davidovits [9] ได้คิดค้นสารเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เรียกว่าจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างวัสดุที่มีปริมาณอลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) มาก กับสารอัลคาไลน์ (Alkaline Activator) วัสดุที่มีปริมาณอลูมินาและซิลิกามากและใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) ตะกรัน (Slag) เป็นต้น [10] ซึ่งล้วนแต่เป็นของ

เสียจากอุตสาหกรรมทั้งสิ้น

Saride และคณะ [11] ได้ทำการศึกษากำลังอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่ากำลังอัดของมวลรวมเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจนถึงร้อยละ 30 และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 30 กำลังอัดของมวลรวมจะมีค่าลดลง

Khater และคณะ [12] ได้เปรียบเทียบอัตราส่วนของปริมาณซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ และพบว่าการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นและอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) โดยทั่วไป สารตั้งต้นที่เป็นเถ้าลอย (FA) จะมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาใกล้เคียงกัน ขณะที่เถ้าแกลบ (RHA) จะมีปริมาณซิลิกาเกือบทั้งหมด ดังนั้นการปรับสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในเถ้าลอยเพื่อเพิ่มกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการผสมเถ้าลอยเข้ากับเถ้าแกลบในสัดส่วนต่างๆ

Ahmari และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาและพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Na_2SiO_3 ของสารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ในวัสดุส่วนผสมพิเศษผงคอนกรีตกับเถ้าลอย สามารถเพิ่มกำลังอัดของวัสดุส่วนผสมได้รวมไปถึงระยะเวลาในการเซตตัวของส่วนผสมได้ด้วยซึ่งสอดคล้องกับการศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยของ Makul และ Chatveera [14] ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณ Na_2SiO_3 ของสารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ในส่วนผสม ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

งานวิจัยด้านการเพิ่มกำลังของ RCA ด้วยสารเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นมีอยู่อย่างจำกัด [2-7] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยและเถ้าแกลบ และปริมาณ Liquid Alkaline Activator (L) ต่อกำลังอัดของ RCA ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง เนื่องจากมาตรฐานงานทางหลวงในประเทศไทยรองรับปริมาณจราจรที่แตกต่างกันเพื่อการนำไปใช้งานที่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบมาตรฐานงานทางหลวงทั้งสองคือมาตรฐานพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 203/2556 [15] โดยมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 2,413 กิโลพาสคัล ที่อายุบ่ม 7 วัน และตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556 [16] โดยมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 1,724 กิโลพาสคัล ที่อายุบ่ม 7 วันงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนา

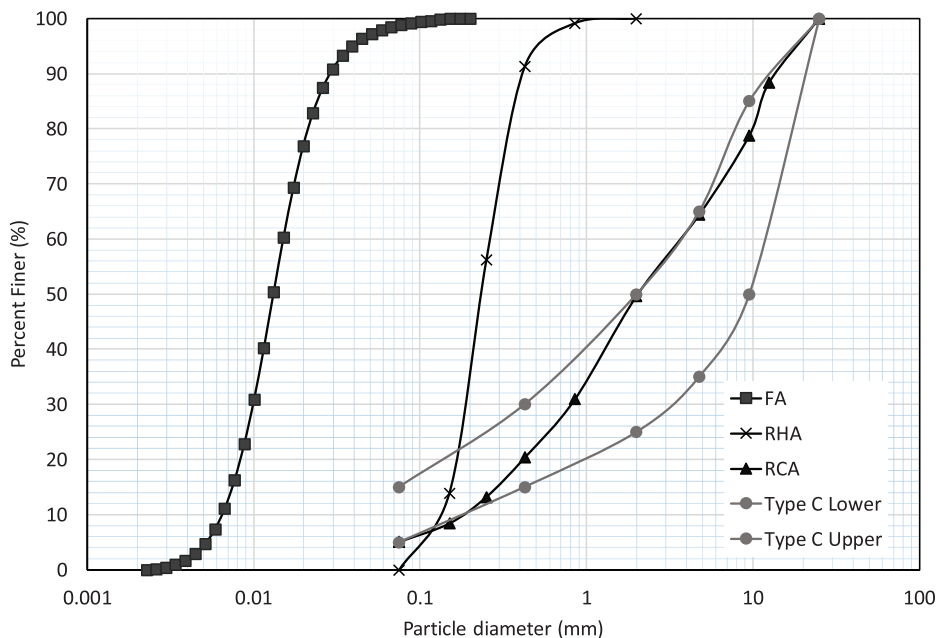
วัสดุผิวทางอย่างยั่งยืนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้จากการย่อยลูกปูนคอนกรีตด้วยเครื่องย่อยคอนกรีต วัสดุที่ได้ถูกนำมาแยกเป็น 3 ขนาด คือขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 3/8

ขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 3/8 และเบอร์ 10 และขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 10 ต่อมาวัสดุทั้งสามขนาดถูกนำมาผสมกันในสัดส่วนต่างๆ (Trial and error) จนได้ขนาดคละของวัสดุตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203/2556 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดคละของเถ้าลอย เถ้าแกลบ และวัสดุคอนกรีตรีไซเคิลที่ผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐานข้อกำหนดของกรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203/2556

สมบัติพื้นฐานและสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตรีไซเคิลทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล.-ม. 203/2556 มาตรฐานพื้นทาง หินคลุกผสมซีเมนต์ดังนี้ 1) การหาค่าความสึกหรอของมวลรวมหยาบด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion ตามมาตรฐาน ASTM C131[17] และC535[18] 2) การหาค่า CBR (California bearing ratio) และค่าการบวมตัว (Swelling ratio) ตามมาตรฐาน AASTHO T193 [19] 3) การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดหยาบ (Specific gravity and Water absorption-Coarse aggregate) ตามมาตรฐาน AASTHO

T85 [20] 4) การหาค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุของวัสดุเม็ดละเอียด (Specific gravity and Water absorption-Fine aggregate) ตามมาตรฐาน AASTHO T84 [21] และ 5) การหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นในการบดอัดสูงสุด (Optimum moisture content and Maximum density) ทดสอบตามมาตรฐาน AASTHO T180 [22] ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานและสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตรีไซเคิล

Basic Engineering 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
D10, mm.		0.18
D30, mm.		0.82
D60, mm.		3.7
C _u		20.55
C _c		1.01

2.1.2 แก้วลอย

แก้วลอยที่ใช้ในงานวิจัยนำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยมี Specific gravity เท่ากับ 2.53 สมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2 และขนาดของอนุภาคแสดงในรูปที่ 1

2.1.3 แก้วกลบ

แก้วกลบที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากโรงสีข้าววิจิตรธัญญา ต.นอกออก อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา แก้วกลบดังกล่าวถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยมี Specific gravity เท่ากับ 2.10 สมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2 และขนาดผลแสดงในรูปที่ 1

2.1.4 สารละลายต่าง

สารละลายต่าง (Liquid Alkaline Activator) ที่ใช้มี 2 ชนิด คือสารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkaline Hydroxide) ได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10M และสารละลายซิลิเกต (Alkali-metal Silicate) ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ชนิด CR53

2.2 จำนวนตัวอย่างและอัตราส่วนตัวแปรต่าง ๆ

อัตราส่วนแก้วกลบและแก้วลอยต่อคอนกรีตรีไซเคิล {(FA+RHA)/RCA} ปริมาณอัตราส่วนผสมสารละลายจีโอพอลิเมอร์ อัตราส่วนผสมแก้วลอยและแก้วกลบระยะเวลาปม และจำนวนตัวอย่างในแต่ละส่วนผสมต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

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

ตารางที่ 3 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

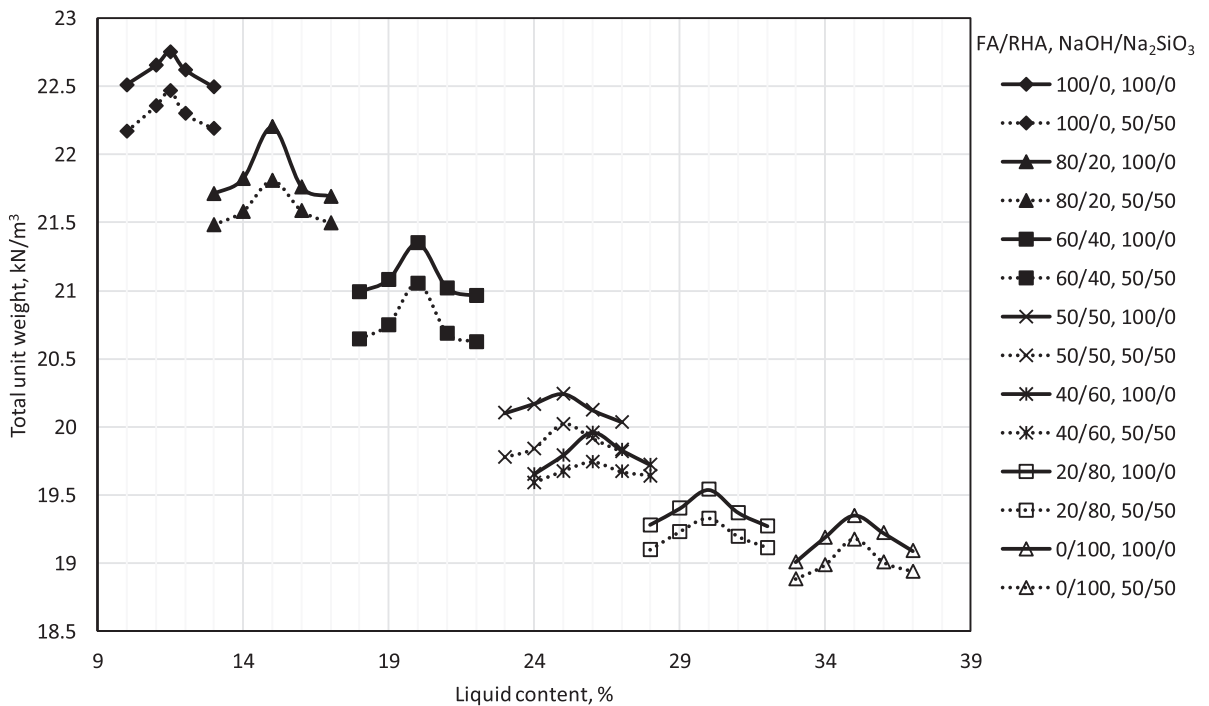
ตัวแปร	จำนวน	คำอธิบาย
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
ระยะเวลาบ่ม	3	7 28 60 วัน
อัตราส่วนเถ้าแกลบหรือเถ้าลอยต่อคอนกรีตวิโซเซล	1	(FA+RHA)/RCA= 30/70
ปริมาณสารเชื่อมประสาน	1	ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (OLC)
อัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสาน	4	NaOH/Na ₂ SiO ₃ = 50/50 ; 60/40 ; 80/20 ; 100/0
อัตราส่วนเถ้าลอยและเถ้าแกลบ	7	FA/RHA = 100/0 ; 80/20 ; 60/40 ; 50/50 ; 40/60 ; 20/80 ; 0/100
จำนวนตัวอย่าง	3	ของแต่ละส่วนผสมและระยะเวลาบ่ม

2.3 การทดสอบ

การบดอัด (Compaction)

การบดอัดวัสดุทำในแบบมาตรฐาน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และสูง 4.6 นิ้ว โดยแบ่งการบดอัดเป็น 5 ชั้น ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Energy) ตามมาตรฐาน AASTHO T180 [23] ผลการบดอัดจะได้ค่าร้อยละปริมาณสารเชื่อมประสาน

ที่เหมาะสม (Optimum Liquid Content, OLC) ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่มีความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุผสมรวมที่ปรับปรุงด้วยโซลีโอพอลิเมอร์ในสัดส่วนผสมต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 3) เมื่อทำการบดอัดเสร็จ ตัวอย่างจะถูกดันออกจากแบบหล่อโดยใช้แท่นดันตัวอย่าง และตัวอย่างที่ถูกดันออกจากแบบและจะถูกนำไปห่อด้วยพลาสติกเพื่อความคุ้มครองความชื้น และบ่มที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2 ปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมในแต่ละส่วนผสม

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

(Unconfined Compressive Strength)

เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบกำหนดที่ 7 วัน 28 วัน และ 60 วัน ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Compressive test ตามมาตรฐาน ASTM D1633 เพื่อหาค่ากำลังอัด

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์

รูปที่ 2 แสดงการบดอัดของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล จีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน FA/RHA ระหว่าง 100/0 ถึง 0/100 และอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เท่ากับ 100/0 และ 50/50 จะเห็นว่า เมื่อปริมาณแก้วเพิ่มขึ้นหน่วยน้ำหนักรวมสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความว่างจำเพาะของแก้วกลบมีค่าน้อยกว่าแก้วลอย และปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (OLC) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแก้วกลบ นอกจากนี้จะเห็นว่าที่อัตราส่วน FA/RHA เท่ากันอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ ไม่มีผลต่อปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม (OLC) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hoy และคณะ [24]

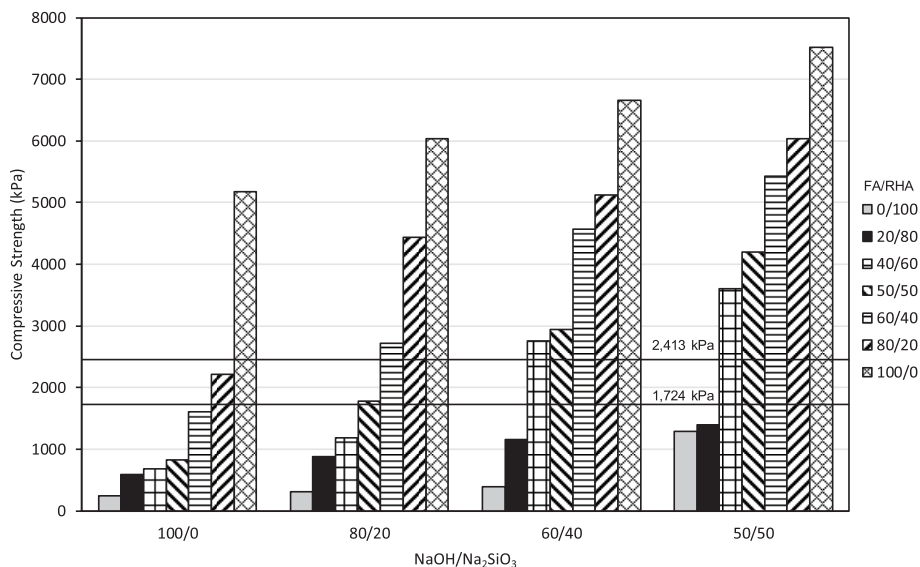
ผลการทดสอบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและแก้วกลบเป็นสารตั้งต้น ที่อัตราส่วน FA/RHA เท่ากับ 0/100 20/80 40/60 50/50 60/40 80/20 และ 100/0 บดอัดด้วยปริมาณสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมและบ่มที่อุณหภูมิห้องที่อายุบ่ม 7 28 และ 60 วัน แสดงดังรูปที่ 3 ถึง 5 ตามลำดับ จะเห็นว่า ที่อายุบ่ม 7 วัน อัตราส่วน FA/RHA = 0/100 กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าต่ำที่สุดในทุกอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ และมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดมาตรฐานสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบที่อัตราส่วน FA/RHA = 100/0 จะเห็นว่ากำลังอัดของตัวอย่างมีค่าสูงสุดในทุกอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ เนื่องจากผลการผสม FA จะทำให้กำลังอัดของมวลรวมเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสมควรใช้ FA ร่วมด้วยเพื่อพัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ ก็ส่งผลต่อกำลังอัดของมวลรวมที่อัตราส่วน FA/RHA = 0/100 โดยถ้าเพิ่มปริมาณ Na₂SiO₃ จะทำให้กำลังอัดของมวลรวมสูงขึ้นได้

ที่อัตราส่วนสารเชื่อมประสานและอายุบ่มเดียวกัน กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย เนื่องจากอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของ FA และ RHA มีผลต่อกำลังอัดของมวลรวม ขณะที่กำลังอัดของมวลรวมยังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน FA/RHA อายุบ่มเดียวกัน เนื่องมาจากซิลิกาที่มีอยู่ในสารละลาย Na_2SiO_3 ช่วยทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเร็วและเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้กำลังอัดของมวลรวมเพิ่มขึ้น [24] นอกจากนี้ระยะเวลาบ่มที่มากขึ้นทำให้กำลังอัดของวัสดุเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่มีตะกอนเป็นสารตั้งต้น [12] และการศึกษาแอสฟัลต์คอนกรีตไรโซเคลจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารตั้งต้น [24] อัตราการพัฒนา กำลังอัด (การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดกับเวลา) สัมพันธ์กับอัตราส่วนของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ และอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$

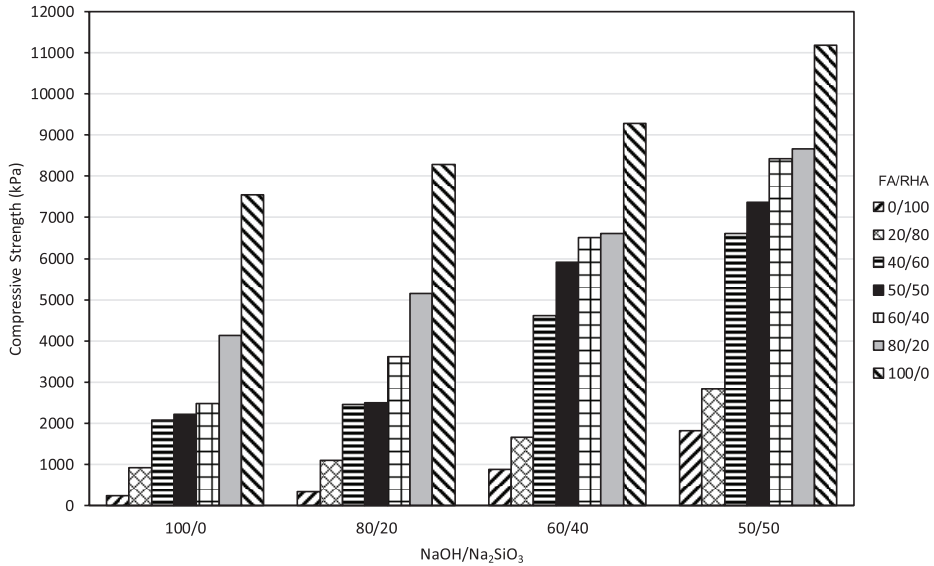
เมื่อพิจารณากำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไรโซเคลจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น (ไม่มีเถ้าลอย) แสดงดังรูปที่ 3 พบว่ากำลังอัด ที่อายุบ่ม 7 วัน มีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ มีค่าเท่ากับ 60/40 80/20 และ 100/0 ขณะที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เท่ากับ 50/50 ให้กำลังอัดสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน อัตราการพัฒนา กำลังอัด

มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 ในอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Homsriprasert และ Chatveera [25] ที่เสนอว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อสารละลาย NaOH ที่มากกว่ามีการพัฒนากำลังอัดที่ดีกว่าในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไรโซเคลจีโอพอลิเมอร์ที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ที่อัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ค่าหนึ่ง พบว่ากำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไรโซเคลจีโอพอลิเมอร์ที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น (ไม่มีเถ้าลอย) ให้กำลังอัดต่ำที่สุดในทุกอายุบ่ม ในขณะที่กำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไรโซเคลจีโอพอลิเมอร์ที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารตั้งต้น (ไม่มีเถ้าแกลบ) มีค่าสูงสุดที่อายุบ่มและอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เดียวกัน นอกจากนี้ อัตราการพัฒนา กำลังอัดกับเวลายังมีค่าสูงที่สุด

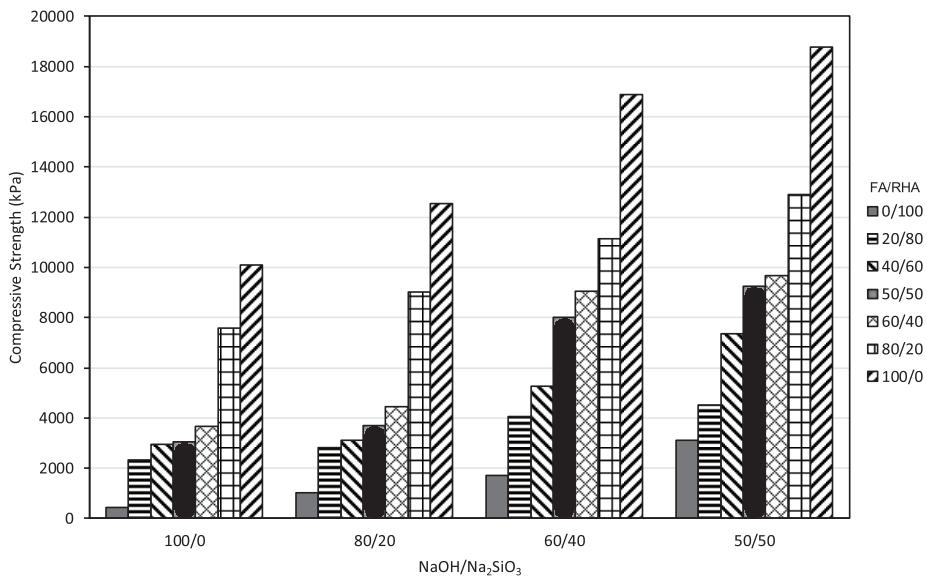
รูปที่ 3 แสดงกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบที่อายุบ่ม 7 วัน สำหรับทุกอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ และ FA/RHA เปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน (2,413 kPa ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล-ม. 203/2556 และ 1,724 kPa ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทที่ มทข. 244-2556) สำหรับผิวทางหินคลุกผสมซีเมนต์



รูปที่ 3 กำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตไรโซเคลจีโอพอลิเมอร์ที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4 กำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตซีเมนต์ที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและเถ้าแกลบ เป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



รูปที่ 5 กำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตซีเมนต์ที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีแก้วลอยและเถ้าแกลบ เป็นสารตั้งต้น ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน

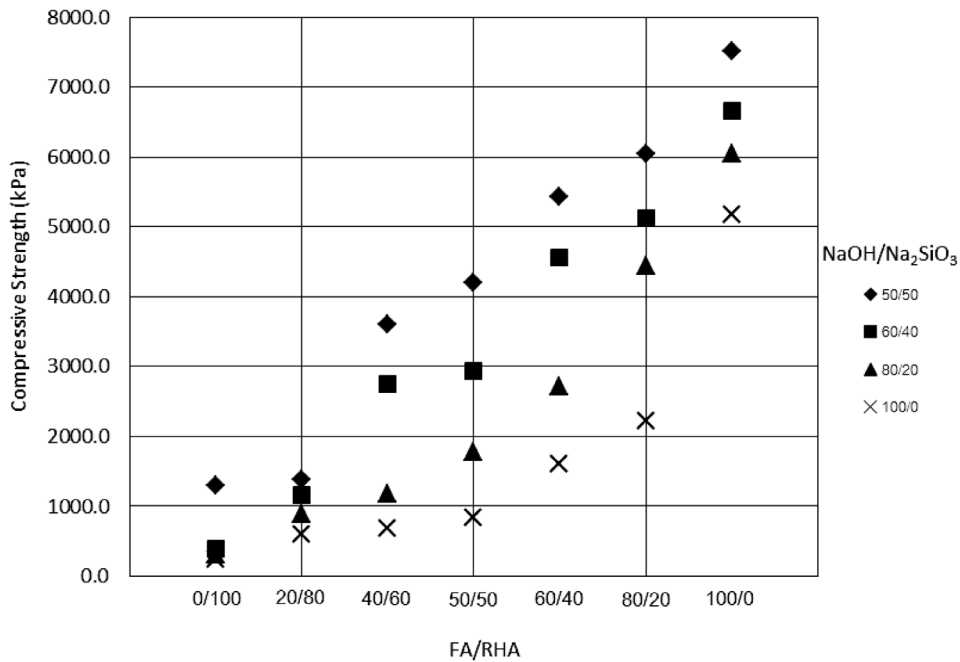
ผลทดสอบในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน FA/RHA ที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงมีดังนี้ 1) อัตราส่วน FA/RHA = 40/60, 50/50, 60/40, 80/20, 100/0 สำหรับอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ = 50/50 2) อัตราส่วน FA/RHA = 40/60, 50/50, 60/40, 80/20, 100/0 สำหรับอัตราส่วน NaOH/

Na₂SiO₃ = 60/40 3) อัตราส่วน FA/RHA = 60/40, 80/20, 100/0 สำหรับอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ = 80/20 และ 4) อัตราส่วน FA/RHA = 100/0 สำหรับอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ = 100/0 และอัตราส่วน FA/RHA ที่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงชนบทเพิ่มเติมมีดังนี้ 1) อัตราส่วน FA/RHA

= 50/50 สำหรับอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 80/20$ และ
 2) อัตราส่วน FA/RHA = 80/20 สำหรับอัตราส่วน $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 100/0$

อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในสารตั้งต้นมีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ Timakul และคณะ [26] พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ของ FA-Kaolin มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.65 ที่อุณหภูมิ 70°C ระยะเวลาบ่ม 96

ชั่วโมง Chindaprasit และคณะ [27] ได้เสนอว่าค่าอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์ FA-RHA ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 3.20-3.70 Silva และ Sagoe-Cretnsil [28] เสนออัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ให้จีโอพอลิเมอร์ Metakaolin มีค่าสูงสุด ภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิ 40°C ระยะเวลา 72 ชั่วโมง มีค่าอยู่ระหว่าง 3.4-3.8



รูปที่ 6 กำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถาลอยและเถาเกลบเป็นสารตั้งต้น เปรียบเทียบกับอัตราส่วนเถาลอยและเถาเกลบที่อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 6 แสดงกำลังอัดที่ 7 วัน ของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถาลอยและเถาเกลบเป็นสารตั้งต้น ที่อัตราส่วน FA/RHA ต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน FA/RHA = 0/100 กำลังอัดของมวลรวมมีค่ากำลังอัดพอสมควร แสดงให้เห็นว่า เถาเกลบมีส่วนช่วยในการพัฒนา กำลังอัดของมวลรวม และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ FA/RHA กำลังอัดของมวลรวมก็เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4 แสดงผลคำนวณอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่อัตราส่วน FA/RHA ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณอัตราส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในเถาลอยและเถาเกลบแปรผันตาม

อัตราส่วนของ FA/RHA จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน FA/RHA ที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ FA/RHA = 100/0 ซึ่งมีค่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.9$ แตกต่างจากผลการศึกษาที่ผ่านมา ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากขนาดของเถาเกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่ และทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยอิทธิพลของความละเอียดเถาลอยแคลเซียมสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ของ Hanjitsuwan และคณะ [29] ที่เสนอว่าความละเอียดของเถาลอยมีผลต่อกำลังรับแรงอัด แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้กำลังอัดของ

มวลรวมรีไซเคิลคอนกรีตมีค่าลดลงตามผลการศึกษาที่ผ่านมา [26-27] งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นของจีโอพอลิเมอร์ เพื่อให้ได้กำลังอัดตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท การ

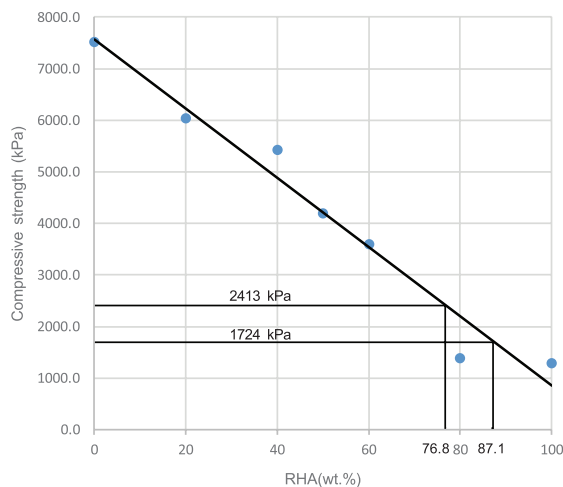
ใช้เถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอย ส่งผลทำให้ต้นทุนการก่อสร้างลดลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว (นิยมใช้กันมากในประเทศไทย) เนื่องจากเถ้าลอยมีราคาที่สูงกว่าเถ้าแกลบถึง 3 เท่า [30-31]

ตารางที่ 4 อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในแต่ละอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

FA (wt.%)	RHA (wt.%)	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
100	0	1.9
80	20	3.0
60	40	4.7
50	50	6.0
40	60	8.0
20	80	16.9
0	100	115.5

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุปม 7 วัน กับอัตราส่วนการใช้เถ้าแกลบ ที่ปริมาตรสารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$ เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท เถ้าแกลบในปริมาณ

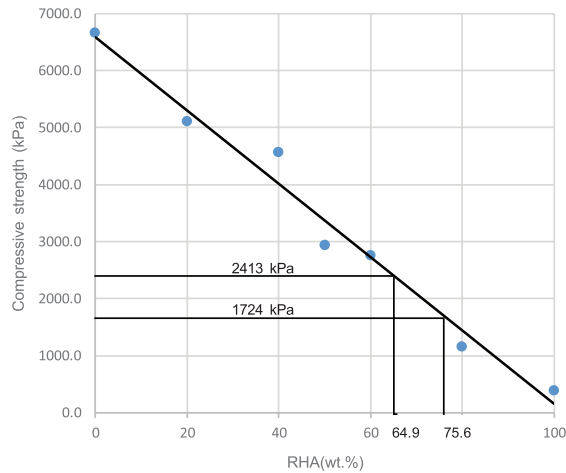
มากถึงร้อยละ 76.8 และ 87.1 สามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอย เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบที่ $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 50/50$

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับอัตราส่วนการใช้ RHA ที่ปริมาณสารละลาย NaOH/Na₂SiO₃ = 60/40 เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ถ้าแปลงในปริมาณ

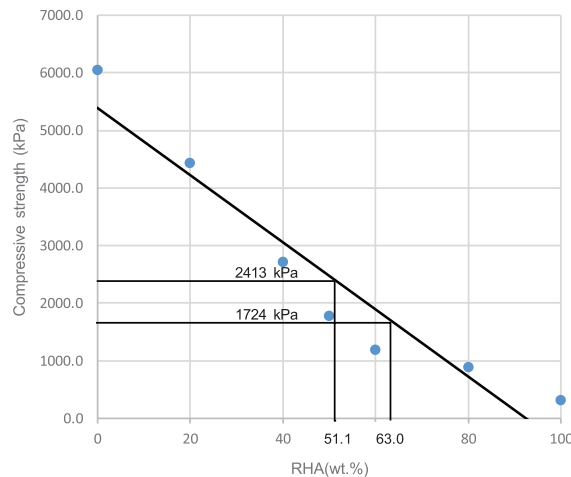
มากถึงร้อยละ 64.9 และ 75.6 สามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้ากลบที่ NaOH/Na₂SiO₃ = 60/40

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับอัตราส่วนการใช้ RHA ที่ปริมาณสารละลาย NaOH/Na₂SiO₃ = 80/20 เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ถ้าแปลงใน

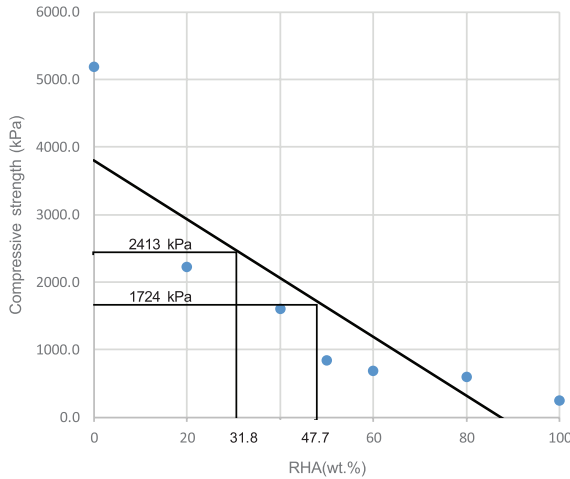
ปริมาณร้อยละ 51.1 และ 63.0 สามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ตามลำดับ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้ากลบที่ NaOH/Na₂SiO₃ = 80/20

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน กับอัตราส่วนการใช้ RHA ที่ใช้เฉพาะสารละลาย NaOH เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 31.8 และ 47.7 สามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท

ตามลำดับ รูปที่ 7 ถึง 10 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการใช้เถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอยที่ปริมาณสารละลาย NaOH/Na₂SiO₃ ค่าต่างๆ เพื่อปรับปรุงกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลและร้อยละเถ้าแกลบที่ NaOH/Na₂SiO₃ = 100/0

4. สรุปผลการศึกษา

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดสูงสุดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น และภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้องสรุปได้ดังนี้

4.1 อัตราส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1.9 ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาที่ผ่านมาอาจเนื่องมาจากขนาดของเถ้าแกลบที่มีขนาดใหญ่ ทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันต่ำ

4.2 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย (FA) ในอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ (FA/RHA) ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณสารละลาย Na₂SiO₃ ในอัตราส่วน NaOH/Na₂SiO₃ มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุจะเพิ่มขึ้น

4.3 ในการปรับปรุงกำลังอัดของมวลรวมจากคอนกรีตรีไซเคิลที่เชื่อมประสานด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยและ

เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทเถ้าแกลบสามารถใช้ร่วมกับเถ้าลอยในสารละลาย NaOH/Na₂SiO₃ = 50/50 ได้สูงสุดร้อยละ 76.8 และ 87.1 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงเรียนวิศวกรรมปัญญา และบริษัท ซีแพ็ค จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนโครงการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Sustainability Victoria, 2010, Victorian Recycling Industries Annual Report 2008-2009, ISSN 1836-9902, Melbourne, VIC, Australia.
2. Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M.M.Y. and Bo, M.W. 2012, "Geotechnical Properties of

Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications,” *Geotechnical Testing Journal*, 35 (5).

3. Gabr, A. and Cameron, D., 2012, “Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (6), pp. 754-764.

4. Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. and Bo, M., 2013, “Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (8), pp. 1077-1088.

5. Arulrajah, A., Piratheepan, J. and Disfani, M., 2014, “Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases : Laboratory and Field Evaluation,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (2), pp. 349-357.

6. Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M., Bo, M. and Darmawan, S., 2014, “Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (6), pp. 04014186-1-12.

7. Arulrajah, A., Disfani, M., Haghghi, H., Mohammadinia, A. and Horpibulsuk, S., 2015, “Modulus of Rupture Evaluation of Cement Stabilized Recycled Glass/recycled Concrete Aggregate Blends,” *Construction and Building Materials*, 84, pp. 146-155.

8. Meyer, C., 2009, “The Greening of The Concrete Industry,” *Cement and Concrete Composites*, 31, pp. 601–605.

9. Davidovits, J., 1991, “Geopolymers : Inorganic Polymeric New Materials,” *Journal of Thermal Analysis*, 37 (8), pp. 1633-1656.

10. Palomo, A., Grutzeck, M. and Blance, M.T., 1999, “Alkali-Activated Fly Ashes : A Cement for the Future,” *Cement and Concrete Research*, 29 (8), pp. 1323-1329.

11. Saride, S., Deepti, A., Rao, T., Sarath Chandra Prasad, J. and Dayakar Babu, R., 2014, “Evaluation of

Fly-Ash-Treated Reclaimed Asphalt Pavement for the Design of Sustainable Pavement Bases : An Indian Perspective,” *Proceedings of the Geo-Congress*, pp. 3676–3685.

12. Khater, H.M., El-Sabbagh, B.A., Fanny, M., Ezzat, M. and Lottfy, M., 2012, “Effect of Nanosilica on Alkali Activated Water Cooled Slag Geopolymer,” *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2, pp. 170-176.

13. Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V. and Zhang, L., 2012, “Production of Geopolymeric Binder from Blended Waste Concrete Powder and Fly Ash,” *Construction and Building Materials*, 35, pp. 718-729

14. Makul, N. and Chatveera, B., 2013, “Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar : Influence of Fly Ash Sources and Sodium Silicate (Na_2SiO_3)/Sodium Hydroxide (NaOH) Ratios,” *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (1), pp. 99-125. (In Thai)

15. DHS., 2013, “Standard for Cement Modified Crushed Rock Base,” DH-S 203/2556, Department of Highways, Thailand. (In Thai)

16. SDR., 2013, “Standard for Soil Cement Base,” SDR 244-2556, Department of Rural Roads, Thailand. (In Thai)

17. ASTM, 2014, “Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine,” *ASTM Standard C131*, West Conshohocken, PA, USA.

18. ASTM, 2016, “Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine,” *ASTM Standard C535*, West Conshohocken, PA, USA.

19. AASHTO, 2013, “Standard Method of Test for The California Bearing Ratio,” AASHTO T193, Washington, DC, USA.

20. AASHTO, 2014, “Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate,” AASHTO T85, Washington, DC, USA.

21. AASHTO, 2013, “Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine

Aggregate,” AASHTO T84, Washington, DC, USA.

22. AASHTO, 2008, “Standard Method of Test for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials,” AASHTO T80, Washington, DC, USA.

23. AASHTO, 2015, “Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop,” AASHTO T180, Washington, DC, USA.

24. Hoy, M., Horpibulsuk, S. and Arulrajah, A., 2016, “Strength Development of Recycled Asphalt Pavement – Fly Ash Geopolymer as a Road Construction Material,” *Construction and Building Materials*, 117, pp. 209–219.

25. Homsriprasert, W. and Chatveera, B., 2016, “Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks,” *KMUTT Research and Development*, 39 (2), pp. 271-286. (In Thai)

26. Timakul, P., Thanaphatwetphisit, K. and Aungkavattana, P., 2015, “Effect of Silica to Alumina Ratio on the Compressive Strength of Class C Fly Ash-Based

Geopolymers,” *Key Engineering Materials*, 659, pp. 80-84.

27. Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Hanjitsuwan, S., 2012, “Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems,” *Journal of Materials Science*, 47, pp. 4876-4883.

28. Silva, P.D. and Sagoe-Crenstil, K., 2008, “The Effect of Al_2O_3 and SiO_2 on Setting and Hardening of $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ Geopolymer Systems,” *Journal of the Australian Ceramic Society*, 44, pp. 39-46.

29. Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T. and Chindaprasirt, P., 2013, “Influence of Fineness of High Calcium Fly Ash on Properties of Geopolymer Paste,” *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (4), pp. 399-408. (In Thai)

30. www.kokomax.com (In Thai)

31. Wongummat, J. and Ketkeson, A., 2015, The Fly Ash Study Report, Faculty of Engineering, Mahasarakham University. (In Thai)

