

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับแรงอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์ สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

Effect of Temperature on Compressive Strength of Geopolymer-Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications

นริศรา ขำธานี¹ ประกิจ เปรมธรรมกร² ธนัท นกเอี้ยงทอง³ และพรเทพ พวงประโคน⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: narissaraktn21@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับแรงอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยทำการวิเคราะห์การรับกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่าง RAP ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าหนัก ซึ่งใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่เกิดจากโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ภายใต้สภาวะการบ่มแบบสลับอุณหภูมิ (อุณหภูมิห้อง, 40 และ 70 องศาเซลเซียส) โดยการนำเข้าสู่ตู้อบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำมาพักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำสลับไปจนครบอายุบ่ม 7 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่าง RAP ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าหนัก สามารถพัฒนากำลังอัดแกนเดียวได้มากกว่า 40 กก./ซม.² หลังการบ่ม 7 วัน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง นอกจากนี้สัดส่วนของเถ้าลอยและเถ้าหนักมีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยค่ากำลังอัดแกนเดียวจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนเถ้าหนักทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลง สำหรับการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง การบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ทุกตัวอย่างมีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งบ่งชี้ว่าอุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ: ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุง, วัสดุชั้นพื้นทาง, การบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิ, เถ้าลอย, เถ้าหนัก

Abstract

This study investigates the effect of temperature on the compressive strength of reclaimed asphalt pavement (RAP) stabilized with geopolymer derived from coal ash as a potential material for roadway base. The Unconfined Compressive Strength (UCS) of RAP specimens modified with geopolymers from fly ash and bottom ash was analyzed. The geopolymerization process was activated using an alkaline solution composed of sodium hydroxide and sodium silicate. The specimens subjected to heating-cooling cycles curing (room temperature, 40°C, and 70°C),

where the specimens underwent alternating cycles of 12 hours of heating and 12 hours of resting at room temperature, continuing until the curing period reached 7 days. The results indicate that RAP stabilized with geopolymer from fly ash and bottom ash achieved a UCS greater than 40 kg/cm² after 7 days of curing, meeting the criteria for roadway base applications. The proportions of fly ash and bottom ash significantly influenced the UCS, with an increase in fly ash content enhancing compressive strength, while a higher bottom ash proportion resulted in a decrease. Furthermore, the UCS of specimens subjected to heating-cooling cycles at 40°C exhibited no significant difference from those cured at room temperature. However, curing at 70°C resulted in an increased UCS for all specimens compared to room temperature curing, suggesting that higher curing temperatures contribute to enhanced compressive strength.

Keywords: Recycled Asphalt Pavement, Base Materials, Heating-cooling Cycles Curing, Fly Ash, Bottom Ash

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความเจริญทางด้านการคมนาคมขนส่งที่เพิ่มขึ้นตามการพัฒนาของประเทศ และมีการก่อสร้างถนนเพิ่มมากขึ้น รวมถึงปรับปรุงซ่อมแซมถนนที่ชำรุดจากการรับน้ำหนักของยานพาหนะที่มากเกินไป หรือการเสื่อมสภาพของวัสดุ เช่น การหลุดร่อน การเกิดรอยล้อ และการเกิดรอยแตกแบบต่างๆ เพื่อให้ถนนกลับคืนสู่สภาพเดิม และเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้ทาง จึงจำเป็นต้องมีการซ่อมแซมบำรุงรักษาดูแลถนนสำหรับถนนลาดยาง ในการปรับปรุงผิวทางประเภทนี้ต้องทำการขุดใส่ (Mill) ผิวทางเดิมจนถึงชั้นวัสดุพื้นทางทั้งก่อน แล้วจึงปูผิวทางใหม่ด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด โดยผิวทางเก่าจะถูกนำไปทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ นับวันยังมีปริมาณสะสมมากขึ้นจนกลายเป็นปัญหาของหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน และในปัจจุบันกรมทางหลวงได้มีการจัดการนำขยะผิวทางมาใช้เป็นวัสดุหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) โดยการนำผิวทางแอสฟัลต์ที่ปรับปรุง (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) กลับมาใช้เป็นวัสดุผสมรวมสำหรับงานก่อสร้างทาง อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของ RAP ต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงจนสามารถ

นำมาใช้ทดแทนวัสดุในงานทางได้ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.-ม 213/2543 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ [1]

งานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาการใช้วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมาผสมกับหินคลุกในสัดส่วนต่างๆ และนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมปูนซีเมนต์ เพื่อให้ผ่านคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามมาตรฐานงานทางและนำไปในแทนวัสดุชั้นพื้นทาง อ้างอิงการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้มาตรฐาน ทล.-ม 214/2566 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ [2] ผลพบว่าอัตราการแทนที่หินคลุกด้วย RAP ในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้กำลังของวัสดุมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพยังใช้ปูนซีเมนต์มากกำลังของวัสดุชั้นพื้นทางก็มากตามไปด้วย [3-5]

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้ RAP ร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ แต่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน เนื่องจากต้องใช้ความร้อนสูงถึง 1400 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศในปริมาณมาก คิดเป็นประมาณร้อยละ 5 ของการปล่อยก๊าซ CO₂ ทั้งหมดในชั้นบรรยากาศ [6] ดังนั้นงานวิจัยจึงได้มุ่งเน้นการหาวัสดุทางเลือกที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งก็คือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer Materials) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และสามารถลดหรือไม่ปล่อย CO₂ ออกสู่บรรยากาศเลย จีโอพอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ไรเซชันของวัสดุปอซโซลานิกที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างเข้มข้นสูง โดยไอออนซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างแข็งที่สามารถเชื่อมตัว แข็งตัว และทนต่อแรงอัดได้ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่มีศักยภาพในการทดแทนปูนซีเมนต์

ผ่านมาการศึกษาการนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุในงานทาง [7-11] โดยวัสดุปอซโซลานิก (Pozzolan materials) เป็นวัสดุของเหลือจากพวกเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร ได้แก่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย ตะกรันเหล็ก พบว่าการใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ในการปรับปรุงคุณภาพ RAP เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้

จากปัญหาดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็นปริมาณวัสดุถนนเก่าที่เพิ่มขึ้นจากการกัดผิวถนนในแต่ละปี ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งภาครัฐและเอกชน หรือปริมาณเถ้าถ่านหินที่สะสมเพิ่มขึ้นทุกปี รวมถึง ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีความต้องการสูงแต่มีปริมาณจำกัด

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการใช้ RAP ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง นอกจากนี้การศึกษายังมุ่งเน้น การวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุวัสดุชั้นพื้นทาง ผ่านการทดสอบการบ่มภายใต้สภาวะสลับ ซึ่งจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกลางวันและกลางคืน

2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ได้จากการขุดลอกผิวทางที่ชำรุดบริเวณทางด่วนพิเศษบูรพาวิถี กิโลเมตรที่ 6+000 ถึง 9+000 ดังแสดงในรูปที่ 1 มาใช้ใหม่โดยมีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน

ทล.-ม 214/2566[2] พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ใช้ศึกษา

การทดสอบ	เกณฑ์มาตรฐาน	ผลทดสอบ
Specific Gravity	-	2.3
Absorption of Aggregate	>2%	4%
Los Angeles Abrasion	<35%	29.7%
Dry Density	-	2.02 g/cm ³
Optimum Moisture Content	-	8%

ขนาดผลของผิวทางที่ใช้ในการศึกษานี้ ส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40) ซึ่งขนาดผลของผิวทางที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐาน

2.2 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินที่ใช้ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) class C และ เถ้าหนัก (Bottom Ash) ดังแสดงในรูปที่ 2 จากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 เถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าหนัก

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย	เถ้าหนัก
SiO ₂	29.66	28.16
Al ₂ O ₃	14.42	13.92
Fe ₂ O ₃	15.03	15.83
CaO	29.25	28.71
MgO	3.33	3.61
SO ₃	3.29	5.86
K ₂ O	1.78	1.31
Na ₂ O	2.57	1.98

2.3 สารละลายอัลคาไลน์

สารละลายที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์โรเซชัน ในการศึกษานี้ ประกอบไปด้วยสารละลาย 2 อย่าง ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิเกต (Na₂SiO₃) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 สารละลายอัลคาไลน์

2.4 อัตราส่วนทดสอบ

อัตราส่วนผสมของวัสดุชั้นพื้นทางในการศึกษานี้มีส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ วัสดุทางแอสฟัลต์คอนกรีตโรเซชัน (RAP) เถ้าลอย (FA) เถ้าหนัก (BA) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิเกต (Na₂SiO₃) โดยกำหนดให้ปริมาณเถ้าลอยและเถ้าหนักเท่ากับร้อยละ 20 ของปริมาณ RAP ในอัตราส่วนเท่ากับ 100:0 75:25 และ 50:50 โดยน้ำหนัก และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิเกต (Na₂SiO₃) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ในอัตราส่วนเท่ากับ 100:0 75:25 และ 50:50 โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนทดสอบ

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	เถ้าถ่านหิน (%)		สารละลายอัลคาไลน์ (%)	
	เถ้าลอย	เถ้าหนัก	NaOH	Na ₂ SiO ₃
RAP-A(100:0)-S(100:0)	100	0	100	0
RAP-A(100:0)-S(75:25)	100	0	75	25
RAP-A(100:0)-S(50:50)	100	0	50	50
RAP-A(75:25)-S(100:0)	75	25	100	0
RAP-A(75:25)-S(75:25)	75	25	75	25
RAP-A(75:25)-S(50:50)	75	25	50	50
RAP-A(50:50)-S(100:0)	50	50	100	0
RAP-A(50:50)-S(75:25)	50	50	75	25
RAP-A(50:50)-S(50:50)	50	50	50	50

หมายเหตุ : RAP-A(50:50)-S(75:25) = ใช้ RAP เป็นวัสดุทดสอบ โดยมีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าหนัก เท่ากับ 50:50 และใช้อัตราส่วนสารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 75:25

3. วิธีการศึกษา

3.1 การทดสอบ Compaction Test

การทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท.108/2517 [12] เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และ ค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) เพื่อใช้เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.8 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างทดสอบ

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโรเซชัน(RAP) ผสมกับเถ้าลอย (FA) และเถ้าหนัก (BA) ให้เข้ากันตามอัตราส่วนที่กำหนดตามตารางที่ 3 จากนั้นผสมสารละลายอัลคาไลน์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เมื่อผสมจนเข้ากันดีแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำมาทำการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน [12] เพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างที่กำหนด และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการต่อไป

3.3 การบ่มตัวอย่าง

การบ่มตัวอย่างแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม

กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส) โดยห่อด้วยพลาสติกและเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นเป็นระยะเวลา 7 วัน

กลุ่มที่ 2 และ 3 ตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิควบคุมที่ 40 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิจำลองผิวถนนที่ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้กระบวนการให้ความร้อนสลับกับการพักที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส) ในห้องควบคุมความชื้น โดยทำการให้ความร้อน 12 ชั่วโมง และ พัก 12 ชั่วโมง ดังรูปที่ 5 และ 6 ทำต่อเนื่องจนครบระยะเวลาการบ่มที่ 7 วัน



รูปที่ 5 นำก้อนตัวอย่างเข้าตู้อบ 12 ชั่วโมง

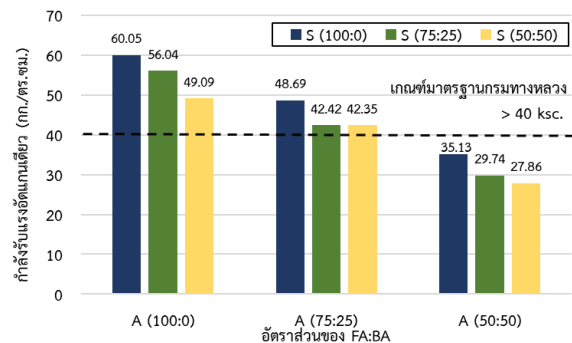


รูปที่ 6 นำตัวอย่างออกจากตู้อบวางพักที่อุณหภูมิปกติ

หลังจากครบระยะเวลาการบ่มตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม นำตัวอย่างมาแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength - UCS) ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ [2]

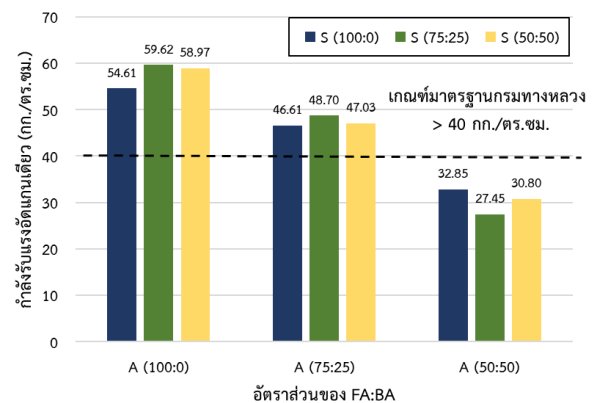
4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว



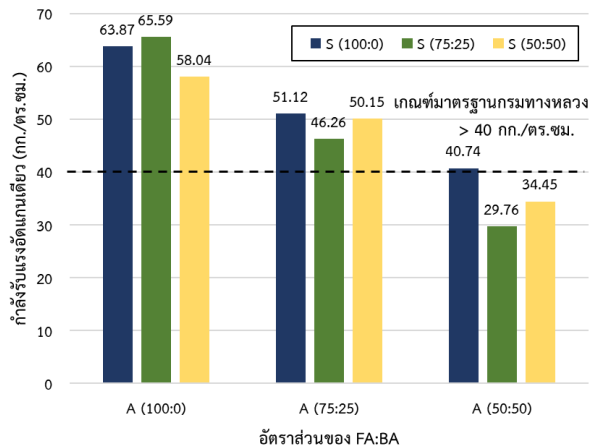
รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส)

จากรูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของก้อนตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิห้อง อายุบ่ม 7 วัน พบว่าก้อนตัวอย่างที่มีอัตราส่วน FA:BA เท่ากับ 100:0 และ 75:25 ที่อัตราส่วนสารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0, 75:25 และ 50:50 พบว่ามีตัวอย่างที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวมากกว่า 40 กก./ตร.ซม. ตามมาตรฐาน ทล.-ม 214/2566 พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ [2] จำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ RAP-A(100:0)-S(100:0), RAP-A(100:0)-S(75:25), RAP-A(100:0)-S(50:50), RAP-A(75:25)-S(100:0), RAP-A(75:25)-S(75:25) และ RAP-A(75:25)-S(50:50) ตามลำดับ ซึ่งมีค่า UCS เท่ากับ 60.05, 56.04, 49.09, 48.69, 42.42 และ 42.35 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน บ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของก้อนตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวมากกว่า 40 กก./ตร.ซม. ตามมาตรฐาน ทล.-ม 214/2566 พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ [2] จำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ RAP-A(100:0)-S(100:0), RAP-A(100:0)-S(75:25), RAP-A(100:0)-S(50:50), RAP-A(75:25)-S(100:0), RAP-A(75:25)-S(75:25) และ RAP-A(75:25)-S(50:50) ตามลำดับ ซึ่งมีค่า UCS เท่ากับ 54.61, 59.62, 58.97, 46.61, 48.70 และ 47.03 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ



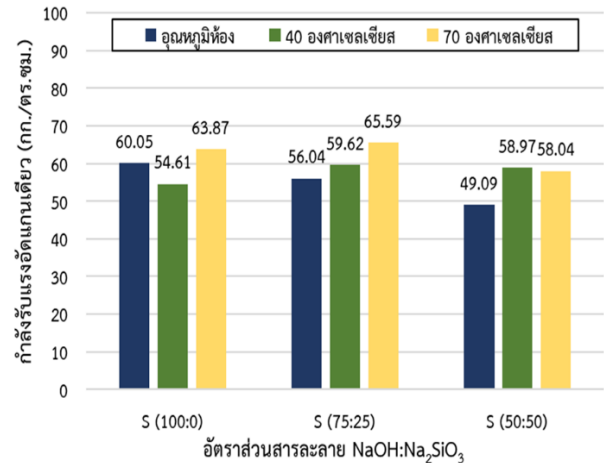
รูปที่ 10 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน บ่มภายใต้สภาวะสลับอลูมิเนียมที่ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่ามีตัวอย่างที่กำลังอัดแกนเดียวมากกว่า 40 กก./ซม² ตามมาตรฐาน ทล.-ม 214/2566 พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ [2] จำนวน 7 ตัวอย่าง ได้แก่ RAP-A(100:0)-S(100:0), RAP-A(100:0)-S(75:25), RAP-A(100:0)-S(50:50), RAP-A(75:25)-S(100:0), RAP-A(75:25)-S(75:25), RAP-A(75:25)-S(50:50) และ RAP-A(50:50)-S(100:0) ตามลำดับ ซึ่งมีค่า UCS เท่ากับ 63.87, 65.59, 58.04, 51.12, 46.26, 50.15 และ 40.74 กก./ซม² ตามลำดับ

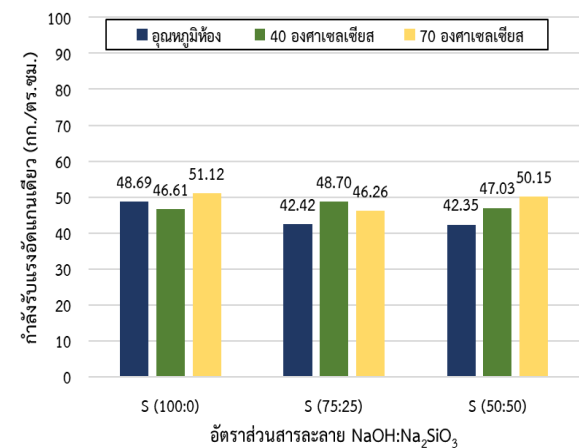
จากรูปที่ 11-13 ตารางที่ 4 แสดงค่าเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength - UCS) ของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 7 วัน ทั้งในสภาวะอุณหภูมิห้อง และตัวอย่างที่ผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอลูมิเนียมที่ 40 และ 70 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน ภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้อง และสภาวะสลับอลูมิเนียมที่ 40 และ 70 องศาเซลเซียส

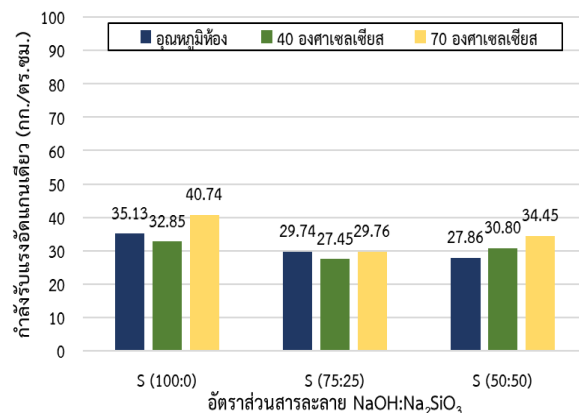
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (กก./ซม ²) - (ร้อยละการเพิ่มขึ้นเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง)		
	อุณหภูมิห้อง	40 องศาเซลเซียส	70 องศาเซลเซียส
RAP-A(100:0)-S(100:0)	60.05	54.61 (-9.06)	63.87 (6.35)
RAP-A(100:0)-S(75:25)	56.04	59.62 (6.40)	65.59 (17.06)
RAP-A(100:0)-S(50:50)	49.09	58.97 (20.13)	58.04 (18.24)
RAP-A(75:25)-S(100:0)	48.69	46.61 (-4.28)	51.12 (4.99)
RAP-A(75:25)-S(75:25)	42.42	48.70 (14.80)	46.26 (9.04)
RAP-A(75:25)-S(50:50)	42.35	47.03 (11.04)	50.15 (18.41)
RAP-A(50:50)-S(100:0)	35.13	32.85 (-6.50)	40.75 (15.98)
RAP-A(50:50)-S(75:25)	29.74	27.45 (-7.70)	29.76 (0.09)
RAP-A(50:50)-S(50:50)	27.86	30.80 (10.56)	34.45 (23.64)



รูปที่ 11 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของอัตราส่วน FA:BA เท่ากับ 100:0 ที่อายุบ่ม 7 วัน บ่มภายใต้สภาวะสลับอลูมิเนียม



รูปที่ 12 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของอัตราส่วน FA:BA เท่ากับ 75:25 ที่อายุบ่ม 7 วัน บ่มภายใต้สภาวะสลับอลูมิเนียม



รูปที่ 13 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของอัตราส่วน FA:BA เท่ากับ 50:50 ที่อายุบ่ม 7 วัน บ่มภายใต้สภาวะสลับอลูมิเนียม

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมแตกต่างกัน 9 แบบ และผ่านกระบวนการบ่ม 3 อุณหภูมิ รวมเป็นตัวอย่างทั้งหมด 27 แบบ พบว่า 19 ตัวอย่างเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงประเทศไทย ซึ่งกำหนดว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ต้องไม่ต่ำกว่า 40 กก./ซม² หลังจากบ่มเป็นเวลา 7 วัน ตามมาตรฐาน ทล.-ม 214/2566 พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ [2]

พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าหนัก FA:BA เท่ากับ 100:0 และ 75:25 มีค่า UCS มากกว่า 40 กก./ซม² ทุกอัตราส่วน โดยไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ NaOH: Na₂SiO₃ และสำหรับตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าหนัก เท่ากับ 50:50 มีเพียงตัวอย่าง RAP-A(50:50)-S(100:0) ซึ่งใช้ NaOH เพียงอย่างเดียวและผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส เท่านั้น ที่สามารถผ่านเกณฑ์ด้วยค่า UCS ที่ 40.75 กก./ซม²

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าหนัก FA:BA ที่มีผลต่อค่า UCS โดยไม่พิจารณาอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ NaOH: Na₂SiO₃ พบว่า ตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียวจะมีค่า UCS สูงกว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยกับเถ้าหนัก โดยที่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน FA:BA เท่ากับ 100:0 มีค่า UCS อยู่ในช่วง 49.09 ถึง 63.87 กก./ซม² ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน FA:BA เท่ากับ 75:25 มีค่า UCS ลดลงอยู่ในช่วง 42.35 ถึง 51.12 กก./ซม² และตัวอย่างที่มีอัตราส่วน FA:BA เท่ากับ 50:50 มีค่า UCS ลดลงอีก อยู่ในช่วง 27.86 ถึง 40.75 กก./ซม² ซึ่งเป็นผลมาจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ละเอียดกว่าสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี และช่วยในการเติมเต็มช่องว่างระหว่างมวลรวมได้ดี ส่งผลให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นสูง และมีค่า UCS ที่ดีกว่า ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนเถ้าหนักที่มากขึ้น จะมีค่าความหนาแน่นที่ลดลง เนื่องจากเถ้าหนักมีลักษณะคล้ายทราย มีความพรุน ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังแรงอัดแกนเดียวก็ลดลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่า UCS พบว่า ค่า UCS ของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามพบว่าตัวอย่างที่ใช้ NaOH เพียงอย่างเดียวและผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส มีค่า UCS ลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ ตัวอย่าง RAP-A(100:0)-S(100:0), RAP-A(75:25)-S(100:0) และ RAP-A(50:50)-S(100:0) มีค่า UCS ลดลงร้อยละ 9.06, 4.28 และ 6.50 ตามลำดับ ในทางกลับกันตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน NaOH: Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 ได้แก่ RAP-A(100:0)-S(50:50), RAP-A(75:25)-S(50:50) และ RAP-A(50:50)-S(50:50) มีค่า UCS เพิ่มขึ้นร้อยละ 20.13, 11.04 และ 10.56 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

และผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่า UCS ของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวอย่างทั้งหมดที่ผ่านการบ่มด้วยวิธีนี้มีค่า UCS สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่างร้อยละ 0.09 ถึง 23.64 โดยเฉพาะตัวอย่างที่ใช้ NaOH เพียงอย่างเดียวและผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส มีค่า UCS เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.99 ถึงร้อยละ 15.98 เมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน NaOH: Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 มีค่า UCS เพิ่มขึ้นมากกว่า อยู่ในช่วงร้อยละ 18.24 ถึง 26.64

พิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ NaOH: Na₂SiO₃ ต่อค่า UCS พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างที่ใช้ NaOH เพียงอย่างเดียวมีค่า UCS ที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ NaOH ร่วมกับ Na₂SiO₃ อย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าตัวอย่างที่ใช้ NaOH เพียงอย่างเดียวจะส่งผลให้มีค่า UCS สูงขึ้นในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อนำตัวอย่างมาผ่านกระบวนการให้ความร้อน โดยการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 40 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนสารละลาย Na₂SiO₃ เพิ่มขึ้น มีความสามารถในการรับกำลังได้มากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เห็นได้ชัดเจนในตัวอย่าง RAP-A(100:0)-S(75:25) และ RAP-

A(100:0)-S(50:50) ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่า UCS เท่ากับ 59.62 และ 58.97 กก./ซม² สูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ร้อยละ 6.40 และ 20.13 ตามลำดับ และตัวอย่าง RAP-A(100:0)-S(75:25) และ RAP-A(100:0)-S(50:50) ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่า UCS เท่ากับ 65.59 และ 58.04 กก./ซม² ซึ่งสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ร้อยละ 17.06 และ 18.24 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารละลาย Na₂SiO₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้เร็วขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

และเมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของ UCS ในการบ่มที่อุณหภูมิต่าง พบว่า ตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิห้อง คือ RAP-A(100:0)-S(100:0) มีค่า UCS สูงสุดเท่ากับ 60.05 กก./ซม² ตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คือ RAP-A(100:0)-S(75:25) มีค่า UCS สูงสุดเท่ากับ 59.62 กก./ซม² และตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส คือ RAP-A(100:0)-S(75:25) มีค่า UCS สูงสุดเท่ากับ 65.59 กก./ซม²

5. สรุป

การงานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ที่ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินเพื่อทำเป็นชั้นพื้นทาง โดยศึกษาผลกระทบอุณหภูมิต่อการรับแรงอัดรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ของตัวอย่างที่บ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. RAP สามารถนำมาประยุกต์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอ้างอิงจากค่า UCS ที่อายุบ่ม 7 วัน ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 40 กก./ซม² ผลจากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างที่มีค่า UCS สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดในทุกการบ่ม ได้แก่ ตัวอย่าง RAP-A(100:0)-S(100:0), RAP-A(100:0)-S(75:25), RAP-A(100:0)-S(50:50), RAP-A(75:25)-S(100:0), RAP-A(75:25)-S(75:25) และ RAP-A(75:25)-S(50:50)
2. อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าหนักส่งผลต่อค่า UCS ของตัวอย่าง โดยการใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียวทำให้ค่า UCS สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเถ้าหนัก ค่า UCS ของตัวอย่างลดลง
3. ค่า UCS ของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่ผ่านการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ทำให้ค่า UCS ของตัวอย่างทุกแบบเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง
4. การบ่มที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างที่ใช้ NaOH เพียงอย่างเดียวมีค่า UCS สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ NaOH ร่วมกับ Na₂SiO₃ อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำตัวอย่างมาผ่านกระบวนการให้ความร้อน โดยการบ่มภายใต้สภาวะสลับอุณหภูมิที่ 40 และ 70 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่มีการใช้ NaOH ร่วมกับ Na₂SiO₃ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่า UCS สูงกว่าการใช้ NaOH เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากสารละลาย Na₂SiO₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้เร็วขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อวัสดุขยะผิวทาง กฟผ.โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ให้ความอนุเคราะห์เถ้าถ่านหิน

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง, มาตรฐานที่ ทล.ม. 213/2543. การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling).
- [2] กรมทางหลวง, มาตรฐานที่ ทล.-ม 214/2566. มาตรฐานพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์.
- [3] อธิคมมาตร แสงแก้ว, “อิทธิพลของการกระจายตัวของขนาดคลุ่ที่มีผลต่อการอัดแน่นเดียวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์”, โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2561.
- [4] ศุภกฤต เลิศคันธักษ์, “กำลังรับแรงอัดของวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่และ ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์”, โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [5] สราวุธ จริตงาม, โอภาส สมใจนึก และพิษณุ ช่วยเวช. “การใช้แอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมกับหินคลุกและซีเมนต์ในงานก่อสร้างถนน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, 2565.
- [6] ศุภกร อริญเสน และคณะ. “การเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂-e) ที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตคอนกรีตทั่วไปและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่ออุตสาหกรรมการก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต”. วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา), ปีที่ 21, ฉบับที่ 4, 2564.
- [7] พงษ์พัฒน์ วังโน, “การปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย”, โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2560.
- [8] กนกพล จันทรา และคณะ, “การปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลผสมหินคลุกด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แบบผง” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, 2566
- [9] คภวรรณ วิรุฬบุตร, “กำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย ตะกรันเหล็กหรือสแลก และซิลิกาฟุ่มจีโอโพลิเมอร์”, โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2560.
- [10] Arulraja, A., Horpibulsuk, S., and Hoy, M. 2016. Strength development of Recycled Asphalt Pavement – Fly ash geopolymers as a road construction material. Construction and Building Materials 117: 209–219.
- [11] Khamtanee, N., Wongrueng, C., Sukkaew, N., Meethaem, P., Tothram, P., Bunthai, W., and Puangprakhon, P.(2024) Recycled asphalt pavement modified with geopolymers obtained from coal ash as a roadway material. World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM24), 19-22 August 2024.
- [12] กรมทางหลวง, มาตรฐานที่ ทล.-ท.108/2517 ทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction).