

กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย และตะกอนประปาเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง

Unconfined Compressive Strength of Geopolymer-Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Incorporating Fly Ash and Water Treatment Sludge for Roadway Applications

วัลย์รัตน์ บุญไทย^{1,*} เอกชัย อุ่นอำไพ² ภูวคณ เสี่ยมวงษ์³ อธิป อนุกุล⁴ นริศรา ขำธานี⁵ และ พรเทพ พวงประโคน⁶

^{1,2,3,4,5,6} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

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

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุชั้นพื้นทางที่ทำจากแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและตะกอนประปา โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซิน วัสดุชั้นพื้นทางในการศึกษาได้จากส่วนผสมระหว่าง RAP เถ้าลอย ตะกอนประปา และสารละลายอัลคาไลน์ในสัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้น้ำหนักของเถ้าลอยและตะกอนประปารวมกันเท่ากับร้อยละ 20 ของปริมาณ RAP กำหนดอัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อตะกอนประปาที่ 100:0, 75:25 และ 50:50 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และผสมในอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยปริมาตร ทำการบดอัดตัวอย่างแบบสูงกว่ามาตรฐาน บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างวัสดุชั้นพื้นทางที่ทำจาก RAP ร่วมกับเถ้าลอยและตะกอนประปาในอัตราส่วน FA:WTS เท่ากับ 100:0 สำหรับทุกอัตราส่วนของสารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ รวมถึงอัตราส่วน FA:WTS เท่ากับ 75:25 ที่ใช้สารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ ในอัตราส่วน 75:25 และ 50:50 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดแกนเดียวหลังการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันได้สูงกว่า 40 กก./ซม.² ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางในงานทางได้

คำสำคัญ: ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล, วัสดุชั้นพื้นทาง, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, เถ้าลอย, ตะกอนประปา

Abstract

This study aims to investigate the unconfined compressive strength (UCS) of base course material made from reclaimed asphalt pavement (RAP) improved with geopolymer derived from fly ash and water treatment sludge. The alkaline solution,

consisting of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃), was used to activate the geopolymerization reaction. The base course specimens were prepared by mixing RAP with different proportions of fly ash, water treatment sludge, and the alkaline solution. The combined weight of fly ash and water treatment sludge was fixed at 20% of the RAP weight. The fly ash-to-water treatment sludge ratio was varied at 100:0, 75:25, and 50:50 by weight. The alkaline solution had a concentration of 10 M and was mixed at NaOH-to-Na₂SiO₃ ratios of 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100 by volume. The specimens were compacted using a modified Proctor test, cured at room temperature for 7 days, and then tested for unconfined compressive strength. The study found that base material specimens made from RAP combined with fly ash and water treatment sludge at a FA:WTS ratio of 100:0 for all NaOH:Na₂SiO₃ solution ratios, as well as those with a FA:WTS ratio of 75:25 using NaOH:Na₂SiO₃ solution ratios of 75:25 and 50:50, were able to develop UCS values exceeding 40 kg/cm² after 7 days of curing at room temperature. This meets the standard specified by the Department of Highways, indicating the potential for application of these materials as base layers in road construction.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement, Base Material, Unconfined Compressive Strength, Fly Ash, Water Treatment Sludge

1. บทนำ

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างถนนเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาพอากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อถึงระยะเวลาที่ผิวทางแอสฟัลต์เสื่อมสภาพหรือไม่

สามารถใช้งานได้อีกต่อไป จะมีการขุดลอกพื้นผิวเพื่อนำวัสดุเก่าออกจากการใช้งาน กระบวนการนี้ทำให้เกิดเศษผิวทางเก่าแอสฟัลต์จำนวนมากซึ่งมักจะถูกทิ้งไปโดยไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้ผิวทางแอสฟัลต์กลายเป็นขยะที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากไม่มีการจัดการหรือกำจัดอย่างเหมาะสม ดังนั้นการนำเศษผิวทางเก่าเหล่านี้มาปรับปรุงคุณสมบัติและนำกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดขยะจากอุตสาหกรรม จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ร่วมกับวัสดุซีโอโพลิเมอร์ พบว่ามีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้างถนน [1-3]

ถั่วลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งถูกปล่อยออกมาในรูปของฝุ่นผงละเอียด การจัดการถั่วลอยถือเป็นปัญหาสำคัญ เนื่องจากเป็นของเสียที่ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ ผลกระทบของถั่วลอยต่อสิ่งแวดล้อมนั้นมีมากมาย ทั้งก่อให้เกิดฝุ่นละอองในอากาศซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพระบบทางเดินหายใจของมนุษย์และสัตว์ รวมถึงการปนเปื้อนในดินและแหล่งน้ำใกล้เคียง การนำถั่วลอยกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นหนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้การใช้ถั่วลอยในกระบวนการก่อสร้างยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จากการศึกษาของ [2-4] พบว่าถั่วลอยมีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นวัสดุซีโอโพลิเมอร์ เพื่อเพิ่มคุณภาพของวัสดุ RAP ให้สามารถใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตะกอนประปาเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบเพื่อผลิตเป็นน้ำประปา การจัดการตะกอนประปายังเป็นปัญหาที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากปริมาณที่เกิดขึ้นมีจำนวนมาก โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง มีการผลิตน้ำประมาณ 3 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่ง 1 ลูกบาศก์เมตร ของน้ำดิบจะมีปริมาณตะกอนประปาประมาณ 25-35 กรัม ดังนั้นในการผลิตน้ำ 1 วัน จะมีปริมาณตะกอนประปาประมาณ 75,000-105,000 กิโลกรัม จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าตะกอนประปามีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิตซีโอโพลิเมอร์ โดยเฉพาะเมื่อผสมร่วมกับถั่วลอยและวัสดุประสานอื่น ๆ [5-6] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตะกอนประปาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่อย่างมีคุณค่า

บทความนี้ทำการศึกษาการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งประกอบด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ถั่วลอย และตะกอนประปา เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางสำหรับงานทาง โดยมุ่งศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ผลิตจาก RAP ซึ่งปรับปรุงด้วยวัสดุซีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอยและตะกอนประปาในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามเกณฑ์มาตรฐาน ทล.-ม. 214/2566 [7] สำหรับพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ของกรมทางหลวง ซึ่งกำหนดให้ต้องมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวไม่ต่ำกว่า 40 กก./ซม.² หลังการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ทั้งนี้ผลการศึกษาจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุในงานทางจากวัสดุหมุนเวียนสำหรับการประยุกต์ใช้งานในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP)

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ได้จากการขุดลอกผิวทางที่ชำรุดบริเวณทางด่วนพิเศษบูรพาวิถี กิโลเมตรที่ 6+000 ถึง 9+000 มาใช้ใหม่โดยมีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามมาตรฐาน ทล.-ม. 214/2566 [7] พื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าคุณสมบัติพื้นฐานของ RAP ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ในรูปที่ 1 แสดงตัวอย่าง RAP ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล

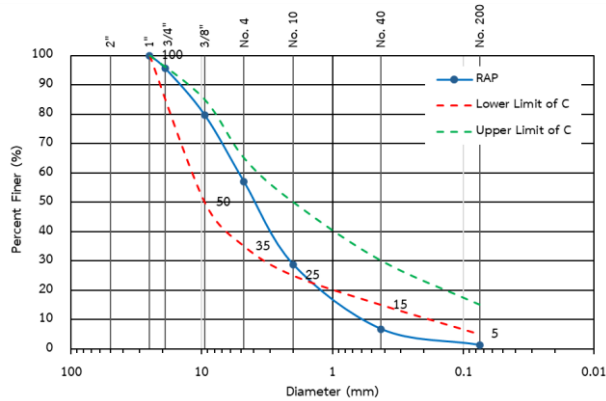
การทดสอบ	ผลการทดสอบ	เกณฑ์มาตรฐาน
การทดสอบหาค่าความสึกหรอ	29.8%	ไม่เกิน 35%
การทดสอบหาค่าของส่วนไม่คงทน	7.5%	ไม่เกิน 9%
การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ	1.4%	ไม่เกิน 2%



รูปที่ 1 ตัวอย่าง RAP ที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดผลของ RAP ที่ใช้ในการศึกษานี้ ทดสอบตามมาตรฐาน ทล.-ท. 205/2517 [8] วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล่าน้ำ โดยส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสาม (2/3) ของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40) ผลการทดสอบขนาดผลของ RAP แสดงดังรูปที่ 2

จากผลการทดสอบพบว่าขนาดผลของ RAP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับขนาด C ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 203/2567 [9] มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ ดังนั้น RAP ที่ใช้ทำก้อนตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้ได้เตรียมให้มีขนาดผลตามขนาด C ดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้เมื่อจำแนก RAP ตามระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO พบว่าจัดอยู่ในกลุ่ม SW และ A-1-a ตามลำดับ



รูปที่ 2 ลักษณะการกระจายตัวของ RAP ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 2 การกระจายตัวของ RAP ที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล		
	RAP ที่ใช้ในการศึกษา	ทล.-ม. 203/2567 ขนาดคละ C	RAP ที่ใช้ทำก่อน ตัวอย่างทดสอบ
50.00 (2 นิ้ว)	100	-	100
25.00 (1 นิ้ว)	100	100	100
9.50 (3/8 นิ้ว)	79.74	50-85	80
4.75 (เบอร์ 4)	56.94	35-65	57
2.00 (เบอร์ 10)	28.79	25-50	29
0.425 (เบอร์ 40)	6.74	15-30	15
0.075 (เบอร์ 200)	1.30	5-15	5

2.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยถูกนำมาผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เพื่อคัดขนาดอนุภาคใหญ่ออก และต้องมีคุณสมบัติสม่ำเสมอตามมาตรฐาน ทล.-ม. 213/2567 [10] มาตรฐานการหมุนเวียนวัสดุขึ้นทางเดิมมาใช้ในงานใหม่ โดยขนาดของเม็ดเถ้าลอยต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.60 มิลลิเมตร (เบอร์ 30) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 และต้องผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษามีองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3 ตัวอย่างเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 3

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันคิดเป็นร้อยละ 62.03 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 26.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งจัดอยู่ใน Class C ตามข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618-23 [11] (SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 และ CaO ต้องมากกว่าร้อยละ 18) ปริมาณของซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_3) ที่พบในเถ้าลอยมีร้อยละ 3.41 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-23 [11] (ต้องไม่เกินร้อยละ 5) มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 3.13 และ 2.37 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและตะกอนประปา

ชนิดองค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก	
	เถ้าลอย ¹	ตะกอนประปา ²
SiO_2	31.54	57.78
Al_2O_3	15.36	27.86
Fe_2O_3	15.13	8.57
CaO	26.45	0.71
MgO	3.13	1.39
SO_3	3.41	0.42
K_2O	1.98	2.15
Na_2O	2.37	ND ³
สารประกอบอื่นๆ	0.63	1.12

¹โรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ

²วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

³ND (NOT Detected) หมายถึง ตรวจไม่พบ



รูปที่ 3 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

2.1.3 ตะกอนประปา (Water Treatment Sludge, WTS)

ตะกอนประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบเพื่อผลิตเป็นน้ำประปา มีลักษณะคล้ายดินเหนียวที่มีความชื้น ตะกอนประปาได้ถูกนำมาตากแดดให้แห้ง นำเข้าเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball Mill) เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618-23 [11] ซึ่งกำหนดไว้ว่าวัสดุปอซโซลานต้องมีร้อยละค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก การศึกษานี้ใช้ตะกอนประปาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 34 และผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 66 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปาแสดงดังตารางที่ 3 ตัวอย่างตะกอนประปาดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตะกอนประปาที่ใช้ในการศึกษา

ตะกอนประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันคิด

เป็นร้อยละ 94.21 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตาม ASTM C618-23 [11] (ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีเพียงร้อยละ 0.71 โดยน้ำหนัก ปริมาณของซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO₃) ที่พบในตะกอนประปามีร้อยละ 0.42 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-23 [11] (ต้องไม่เกินร้อยละ 5) มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 1.39 โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ตรวจไม่พบอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na₂O)

2.1.4 สารละลายอัลคาไลน์

สารละลายที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซิน ในการศึกษานี้ ประกอบไปด้วยสารละลาย 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเหลวความเข้มข้นที่ 50 โมลาร์ และโซเดียมซิลิเกตแบบเหลวความเข้มข้นที่ 50 โมลาร์ มาทำการผสมสารละลายใหม่ โดยใช้ซึ่งน้ำเป็นตัวละลายที่ทำให้ได้สารละลายในความเข้มข้น 10 โมลาร์ ตามที่ต้องการ

2.2 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมของตัวอย่างวัสดุชั้นพื้นทางทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างวัสดุชั้นพื้นทางที่ใช้ในการศึกษา

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณเถ้าลอยและตะกอนประปา (ร้อยละ)		สารละลายอัลคาไลน์ (ร้อยละ)	
	FA	WTS	SH	SS
RAP(FA100:WTS0-SH100:SS0)	100	0	100	0
RAP(FA75:WTS25-SH100:SS0)	75	25	100	0
RAP(FA50:WTS50-SH100:SS0)	50	50	100	0
RAP(FA100:WTS0-SH75:SS25)	100	0	75	25
RAP(FA75:WTS25-SH75:SS25)	75	25	75	25
RAP(FA50:WTS50-SH75:SS25)	50	50	75	25
RAP(FA100:WTS0-SH50:SS50)	100	0	50	50
RAP(FA75:WTS25-SH50:SS50)	75	25	50	50
RAP(FA50:WTS50-SH50:SS50)	50	50	50	50
RAP(FA100:WTS0-SH25:SS75)	100	0	25	75
RAP(FA75:WTS25-SH25:SS75)	75	25	25	75
RAP(FA50:WTS50-SH25:SS75)	50	50	25	75
RAP(FA100:WTS0-SH0:SS100)	100	0	0	100
RAP(FA75:WTS25-SH0:SS100)	75	25	0	100
RAP(FA50:WTS50-SH0:SS100)	50	50	0	100

หมายเหตุ : RAP(FA50:WTS50-SH75:SS25) หมายถึง ใช้ RAP เป็นวัสดุทดสอบ โดยมีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อตะกอนประปา เท่ากับ 50:50 และใช้อัตราส่วนสารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 75:25

ในการศึกษานี้ตัวอย่างวัสดุชั้นพื้นทางประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ชนิด ได้แก่ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) เถ้าลอย (FA)

ตะกอนประปา (WTS) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, SH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃, SS) โดยใช้ น้ำหนักของเถ้าลอยและตะกอนประปารวมกันเท่ากับร้อยละ 20 ของปริมาณ RAP กำหนดอัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อตะกอนประปาที่ 100:0, 75:25 และ 50:50 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และผสมในอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 โดยปริมาตร

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของวัสดุชั้นพื้นทางที่ทำจากแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ซึ่งได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย (FA) และตะกอนประปา (WTS) โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ในอัตราส่วนที่กำหนด ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบประกอบด้วย

- เตรียมตัวอย่างโดยนำวัสดุ RAP ผสมกับเถ้าลอยและตะกอนประปาให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลายอัลคาไลน์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ตามปริมาณความชื้นที่ต้องการผสมใส่เข้าไปในตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อตะกอนประปา และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3
- ทำการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท. 108/2517 [12] และ ASTM D1557 [13] เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของแต่ละอัตราส่วน โดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.8 มิลลิเมตร (4.6 นิ้ว)
- หลังจากได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการเตรียมก้อนตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนต่ออัตราส่วนผสม รวมทั้งสิ้น 45 ก้อน จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดนำก้อนตัวอย่างแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ทล.-ท. 105/2515 [14] รูปที่ 5 แสดงก้อนตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว



รูปที่ 5 ก้อนตัวอย่าง

3. ผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด

ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ของวัสดุ RAP แต่ละอัตราส่วนที่ได้จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

NaOH:Na ₂ SiO ₃	ร้อยละปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ความหนาแน่นแห้งสูงสุด, กรัม/ซม. ³)		
	FA:WTS 100:0	FA:WTS 75:25	FA:WTS 50:50
100:0	5.5% (2.29)	7.0% (2.16)	9.0% (2.14)
75:25	6.0% (2.29)	6.5% (2.13)	8.0% (2.15)
50:50	7.0% (2.16)	7.0% (2.11)	7.0% (2.14)
25:75	5.5% (2.18)	7.0% (2.15)	7.0% (2.15)
0:100	5.0% (2.12)	6.5% (2.14)	7.5% (2.03)

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนสารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อตะกอนประปา (FA:WTS) ที่ 100:0, 75:25 และ 50:50 เท่ากับร้อยละ 5.5, 7.0 และ 9.0 ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.29, 2.16 และ 2.14 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ

ในกรณีที่ใช้อัตราส่วน NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 75:25 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับ FA:WTS เท่ากับ 100:0, 75:25 และ 50:50 มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.0, 6.5 และ 8.0 ตามลำดับ โดยมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.29, 2.13 และ 2.15 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ

เมื่อใช้อัตราส่วน NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 พบว่าค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับที่ร้อยละ 7.0 สำหรับทุกอัตราส่วน FA:WTS (100:0, 75:25 และ 50:50) โดยให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.16, 2.11 และ 2.14 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ

สำหรับอัตราส่วน NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 25:75 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วน FA:WTS ที่ 100:0, 75:25 และ 50:50 เท่ากับร้อยละ 5.5, 7.0 และ 7.0 ตามลำดับ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.18, 2.15 และ 2.15 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ

เมื่อใช้อัตราส่วน NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 0:100 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วน FA:WTS เท่ากับ 100:0, 75:25 และ 50:50 มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.0, 6.5 และ 7.5 โดยให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.12, 2.14 และ 2.03 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อตะกอนประปา (FA:WTS) และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ NaOH:Na₂SiO₃ ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผสมที่นำมาทดสอบ

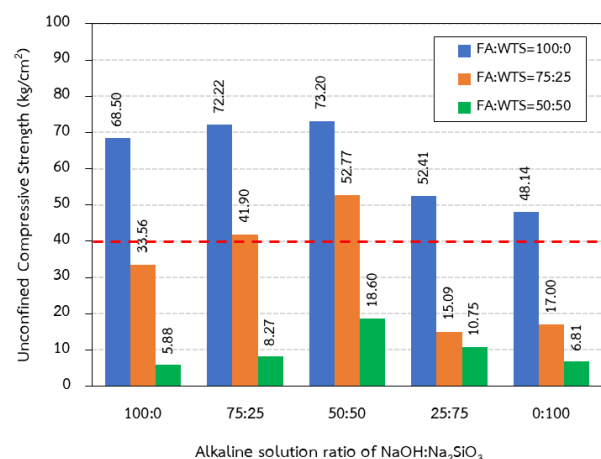
เมื่อพิจารณาในแต่ละอัตราส่วนของ NaOH:Na₂SiO₃ พบว่า การเพิ่มสัดส่วนตะกอนประปาในส่วนผสมส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง แนวโน้มดังกล่าวอาจเกิดจากตะกอนประปามีลักษณะรูพรุนและมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าเถ้าลอย [15] จึงต้องการน้ำมากขึ้นในการบดอัด และมีผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุลดลง

นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของ Na₂SiO₃ ในสารละลายอัลคาไลน์ (จาก NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0 ไปจนถึง 0:100) มีแนวโน้มทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการที่ Na₂SiO₃ มีคุณสมบัติในการเพิ่มความหนืดของสารละลายส่งผลให้น้ำในวัสดุมีลักษณะเหนียวและจับตัวเร็วไปรอบกวนกระบวนการบดอัดและลดความหนาแน่น [16]

3.2 กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ของตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตามค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสม และผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน แสดงไว้ในรูปที่ 6 และสรุปผลไว้ในตารางที่ 6

จากผลการทดสอบ UCS ของตัวอย่างวัสดุจำนวน 15 อัตราส่วนผสม พบว่า มีจำนวน 7 อัตราส่วนผสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยกรมทางหลวง ทล.-ม 214/2566 [7] ซึ่งกำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต้องไม่ต่ำกว่า 40 กก./ซม.² โดยอัตราส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์ ได้แก่ ตัวอย่าง RAP(FA100:WTS0-SH100:SS0), RAP(FA100:WTS0-SH75:SS25), RAP(FA75:WTS25-SH75:SS25), RAP(FA100:WTS0-SH50:SS50), RAP(FA75:WTS25-SH50:SS50), RAP(FA100:WTS0-SH25:SS75), และ RAP(FA100:WTS0-SH0:SS100) ซึ่งมีค่า UCS เท่ากับ 68.50, 72.22, 41.90, 73.20, 52.77, 52.41 และ 48.14 กก./ซม.² ตามลำดับ



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน

ตารางที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของคอนกรีตอัดแรงเป็นเวลา 7 วัน

NaOH:Na ₂ SiO ₃	กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, UCS (กก./ซม. ²)		
	FA:WTS 100:0	FA:WTS 75:25	FA:WTS 50:50
100:0	68.50	33.56	5.88
75:25	72.22	41.90	8.27
50:50	73.20	52.77	18.60
25:75	52.41	15.09	10.75
0:100	48.14	17.00	6.81

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า ค่า UCS มีความแตกต่างกันตามอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อตะกอนประปา (FA:WTS) และอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ NaOH:Na₂SiO₃

สำหรับตัวอย่างที่มีอัตราส่วน FA:WTS เท่ากับ 100:0 พบว่าค่า UCS สูงสุดอยู่ในช่วง 48.14–73.20 กก./ซม.² โดยค่าที่สูงที่สุดได้จากการใช้สารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 ซึ่งให้ค่า UCS สูงถึง 73.20 กก./ซม.² แสดงถึงผลของปฏิกิริยาไอพอลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง ในขณะที่ค่าต่ำที่สุดคือ 48.14 กก./ซม.² พบในอัตราส่วน NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 0:100

เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนประปาในอัตราส่วน FA:WTS เป็น 75:25 พบว่าค่า UCS ลดลงโดยรวม โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 15.09–52.77 กก./ซม.² ค่าสูงสุดยังคงอยู่ที่อัตราส่วนสารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 ส่วนค่าต่ำสุดพบในอัตราส่วน 25:75 ของสารละลาย

ในกรณีของอัตราส่วน FA:WTS เท่ากับ 50:50 พบว่าค่า UCS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.88–18.60 กก./ซม.² ซึ่งไม่สามารถผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ที่ 40 กก./ซม.² ได้ในทุกอัตราส่วนของสารละลาย NaOH:Na₂SiO₃

จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน FA:WTS ที่เหมาะสมที่สุดคือ 100:0 หรือ 75:25 ร่วมกับการใช้สารละลาย NaOH:Na₂SiO₃ ในอัตราส่วน 50:50 หรือ 75:25 ซึ่งสามารถให้ค่า UCS มากกว่า 40 กก./ซม.² ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง การเพิ่มปริมาณตะกอนประปาในส่วนผสมมีแนวโน้มส่งผลให้ค่า UCS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากโครงสร้างของซิลิกาและอะลูมินาในตะกอนประปาที่มีลักษณะเป็นผลึกมากกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าลอย ทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้กำลังอัดของวัสดุลดลง [17]

4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการศึกษา

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุชั้นพื้นทางที่ทำจากแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) ปรับปรุงด้วยไอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและตะกอนประปา โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาไอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของตะกอนประปา (จาก FA:WTS เท่ากับ 100:0 ไปจนถึง 50:50) ส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง การเพิ่มสัดส่วนของ NaOH:Na₂SiO₃ ในสารละลายอัลคาไลน์ (จาก NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 100:0 จนถึง 0:100) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง

แอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) หลังการบดอัดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 40 กก./ซม.² ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ทั้งนี้ RAP จะมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยไอพอลิเมอร์ที่ได้จากเถ้าลอยและตะกอนประปาในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ให้ค่า UCS สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วน RAP(FA100:WTS0–SH100:SS0), RAP(FA100:WTS0–SH75:SS25), RAP(FA75:WTS25–SH75:SS25), RAP(FA100:WTS0–SH50:SS50), RAP(FA75:WTS25–SH50:SS50), RAP(FA100:WTS0–SH25:SS75), และ RAP(FA100:WTS0–SH0:SS100) ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 68.50, 72.22, 41.90, 73.20, 52.77, 52.41 และ 48.14 กก./ซม.² ตามลำดับ

ค่า UCS มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มสัดส่วนของตะกอนประปา โดยเฉพาะอัตราส่วน FA:WTS เท่ากับ 50:50 ซึ่งไม่สามารถผ่านเกณฑ์ UCS ได้ในทุกอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ (ค่าต่ำสุด 5.88 และสูงสุด 18.60 กก./ซม.²) ทั้งนี้ค่าที่สูงที่สุดพบในตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วน NaOH:Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไอพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นซึ่งยังขาดการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ดังนั้นการศึกษาในอนาคตควรดำเนินการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคอย่างละเอียด เพื่อทำความเข้าใจกลไกของการเกิดปฏิกิริยาไอพอลิเมอร์ไรเซชันในเถ้าลอยและตะกอนประปา

ตะกอนประปามีลักษณะโครงสร้างผลึกในระดับที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย ดังนั้นจึงควรศึกษาวิธีการเคลือบตะกอนประปาโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกให้เป็นโครงสร้างอสัณฐาน ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น [18]

การศึกษาในประเด็นต่าง ๆ เพิ่มเติม ได้แก่ อายุการบ่มมากขึ้น อุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้น ความคงทนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ชั้นผิวทางแก่ร่วมกับวัสดุไอพอลิเมอร์ในการใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

นอกจากนี้ควรศึกษาถึงต้นทุนการผลิตของวัสดุไอพอลิเมอร์ที่ใช้ปรับปรุง RAP โดยเฉพาะในด้านต้นทุนของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายสูง หากมีการประเมินต้นทุนและวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์จะช่วยให้สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดี เป็นรูปธรรม รวมถึงควรมีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของ

กระบวนการผลิตวัสดุทั้งหมดเพื่อพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเปรียบเทียบกับวัสดุพื้นทางแบบดั้งเดิม

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับความอนุเคราะห์ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์จากการทางพิเศษแห่งประเทศไทย ได้รับการสนับสนุนเงินอุดหนุนจากไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ และได้รับความอนุเคราะห์ตะกอนประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประสานรหลว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hoy, M., Rachan, R., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., and Mirzababaei, M. (2017). Effect of Wetting–Drying Cycles on Compressive Strength and Microstructure of Recycled Asphalt Pavement–Fly Ash Geopolymer. *Construction and Building Materials*, 144, pp. 624-634.
- [2] กนกพล จันทรา, ชยภฤต เพชรช่วย, วรวิทย์ โพธิ์จันทร์, วีระวัฒน์ วรรณกุล และ ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์ (2566). การปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ผสมหินคลุกด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แบบผง. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, กรุงเทพฯ, 24-26 พฤษภาคม 2566, หน้า GTE22-1.
- [3] Khamtane, N., Wongruang, C., Sukkaew, N., Meethaem, P., Toham, P., Bunthai, W. and Puangprakhon, P. (2024). Recycled asphalt pavement modified with geopolymer obtained from coal ash as a roadway material. *The 2024 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM24)*, Seoul, 19-22 August 2024, South Korea.
- [4] Bunthai, W., Khamtane, N., and Puangprakhon, P. (2024). Strength and durability against wetting-drying cycles of geopolymer-stabilized reclaimed asphalt pavement for roadway subgrade materials. *The 2024 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM24)*, Seoul, 19-22 August 2024, South Korea.
- [5] เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง และ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ (2563). หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปาปรับปรุงด้วยทรายและเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 30-38.
- [6] พิมพ์ศิลป์ จันทร์ประเสริฐ (2556). *การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา – เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์*. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ประเทศไทย.
- [7] กรมทางหลวง (2566). *ทล.-ม. 214/2566 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์*. ประเทศไทย.
- [8] กรมทางหลวง (2517). *ทล.-ท. 205/2517 วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้างน้ำ*. ประเทศไทย.
- [9] กรมทางหลวง (2567). *ทล.-ม. 203/2567 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์*. ประเทศไทย.
- [10] กรมทางหลวง (2567). *ทล.-ม. 213/2567 มาตรฐานการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่*. ประเทศไทย.
- [11] ASTM C618-23 (2022). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [12] กรมทางหลวง (2517). *ทล.-ท. 108/2517 วิธีการทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน*. ประเทศไทย.
- [13] ASTM D1557-12 (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [14] กรมทางหลวง (2515). *ทล.-ท. 105/2515 วิธีการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน*. ประเทศไทย.
- [15] เอกรัฐ ตั้งศรีวงศ์, สิทธิศักดิ์ บัวโถม และ ดนุพล ทาบุญ (2561). *การศึกษาจีโอโพลิเมอร์โดยใช้ตะกอนดินประปา*. โครงการวิศวกรรมโยธา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, ประเทศไทย.
- [16] Chindaprasit, P., Chareerat, T., and Sirivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224–229.
- [17] ทรงสุตา วิจารณ์ (2565). การศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาและซีเมนต์จากเตาเผาขยะด้วยปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันและการอบไอน้ำ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า MAT35-1-8.
- [18] อนุรัตน์ ภูวนาคา (2560). *การพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากกากดินตะกอนประปา*. รายงานการวิจัยรหัสโครงการ SUT7-708-58-12-63, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ประเทศไทย.