

อิทธิพลของขนาดคละในแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเก่าต่อค่า CBR ของวัสดุผสม

ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ¹ วีรพร พงศ์ติณบุตร^{2*} สรวงสุตา ขุนใหญ่³ สรัญชญา พัฒนจันทร์⁴

ทรงพล สุวรรณประทีป⁵ และ จุลตาภรณ์ กุลบุตร⁶

^{1,2*,3,4,5,6}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

E-mail: ¹piyachatc@eng.buu.ac.th, ^{2*}weeraporn@buu.ac.th, ³63050610@go.buu.ac.th,

⁴63050611@go.buu.ac.th, ⁵63050381@go.buu.ac.th, ⁶63050063@go.buu.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่รื้อออกมาด้วยวิธีการขุดไสมีความสามารถในการบดอัดที่ต่ำจึงเป็นสาเหตุให้ไม่สามารถนำวัสดุนี้มาใช้งานดินถมได้โดยตรงโดยไม่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมก่อน หนึ่งในวิธีที่ง่ายและประหยัดต้นทุนนั้นคือการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าเข้ากับดิน วิธีการนี้จะเป็นการปรับปรุงขนาดคละเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวด้วยซีเมนต์ อย่างไรก็ตามขนาดคละของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่รื้อออกมาด้วยวิธีการขุดไสนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการกัดผิวลงไปในพื้นที่แอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่นอกจากจะต้องมีการวางแผนทั้งในด้านต้นทุน แต่ยังคงคำนึงถึงผลกระทบของขนาดคละต่อกำลังแบกทานของวัสดุผสมด้วย ในงานวิจัยนี้แอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่มีขนาดคละที่แตกต่างกันจะถูกนำมาผสมกับดินลูกรังและหินคลุกในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันโดยน้ำหนัก วัสดุผสมจะถูกบดอัดและทดสอบหาค่า CBR เพื่อศึกษาผลกระทบด้านขนาดคละของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าต่อความสามารถในการกำลังแบกทาน จากผลการทดสอบพบว่า ค่า CBR นั้นสูงขึ้นตามปริมาณดินทั้งสองประเภทที่ใส่เข้าไป แต่ค่า CBR สูงสุดไม่ได้ถูกควบคุมโดยขนาดคละของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าแต่จะถูกควบคุมโดยค่า CBR ของดินที่นำมาผสมซึ่งจะมีค่าเท่ากันและจะคงที่หลังจากผ่านอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด แอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่มีความหยาบนอกจากจะให้ผลดีกว่าในด้านต้นทุนยังสามารถรับแรงแบกทานที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าละเอียดที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน

คำสำคัญ: ขนาดคละของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม วัสดุดินถม ค่า CBR

* Corresponding author, e-mail: weeraporn@buu.ac.th

Influence of Recycled Asphalt Concrete Pavement Gradation on CBR of Mixed Materials

Piyachat Chattonjai¹, Weeraporn Phongtinnaboot^{2*}, Sruangsuda Khunayai³, Saranchana Pattanajan⁴,
Songpol Suwannapartee⁵ and Junladaphon Kunlabut⁶

^{1,2*,3,4,5,6}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

E-mail: ¹piyachatc@eng.buu.ac.th, ^{2*}weeraporn@buu.ac.th, ³63050610@go.buu.ac.th,
⁴63050611@go.buu.ac.th, ⁵63050381@go.buu.ac.th, ⁶63050063@go.buu.ac.th

Abstract

Due to its inherently low compactibility, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) cannot be directly used as a landfill material for road structures without improving its engineering properties. One simple and economical method to enhance RAP is by adding RAP with soil to improve the gradation without the addition of cementitious materials. However, the gradation of RAP, which is a by-product of the removal process of old asphalt concrete pavements, varies depending on the penetration speed during the milling process. Therefore, it is important that construction planning considers not only the economic benefits, but also the impact of RAP gradation on the bearing capacity of the mixed materials. In this research, the different gradations of RAP were mixed with lateritic soil and crushed rock at various weight ratio. The mixed materials were compacted and tested using California Bearing Ratio (CBR) to investigate the influence of RAP gradation on bearing capacity. Based on the test results, the CBR value increased with the amount of both types of soil added. However, the maximum CBR value of the mixed material was not governed by the gradation of RAP, but controlled by the CBR of the mixed soil, which is equal to the CBR of mixed soil at the maxing ratio of optimal mix proportion point and will constant after beyond this point. Coarse-grained RAP not only offers greater cost benefits compared to fine-grained RAP, but also provides better bearing capacity at the same mixing ratio.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement gradation, Improvement, Landfill material, CBR

* Corresponding author, e-mail: weeraporn@buu.ac.th

1. ที่มาและความสำคัญ

ถนนนั้นถือเป็นหนึ่งในโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญอย่างมากในการพัฒนาประเทศเพื่อใช้ในการเชื่อมโยงพื้นที่ต่าง ๆ ในแต่ละภูมิภาคเข้าหากัน ถึงแม้ในปัจจุบันการพัฒนาการเดินทางและขนถ่ายสินค้าจะให้ความสำคัญกับระบบรางมากขึ้น แต่การสร้างถนนใหม่ก็ยังคงมีความจำเป็นอยู่เนื่องจากง่ายและรวดเร็วกว่า ถนนที่สร้างโดยใช้แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นผิวทาง (Flexible Pavement) นั้นถูกใช้ในประเทศไทยมาอย่างยาวนาน ถึงแม้ต้องใช้โครงสร้างคันทางที่มีความแข็งแรงกว่าถนนผิวทางคอนกรีต (Rigid Pavement) [1], [2], [3] และ [4] ตามพฤติกรรมการถ่ายแรงที่แตกต่างกัน [5] แต่ก็ยังมีต้นทุนการก่อสร้างโดยรวมที่ต่ำกว่า เมื่อพิจารณาในเรื่องความคงทนนั้นพบว่า ถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตพบความเสียหายได้ง่ายกว่าเมื่อผ่านการใช้งานไปช่วงเวลาหนึ่ง ลักษณะความเสียหายที่มักพบ เช่น การเกิดร่องล้อ รอยแตก และการหลุดร่อน ซึ่งจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาผิวแอสฟัลต์คอนกรีตให้อยู่ในสภาพที่ดีอยู่เสมอเพื่อให้คงประสิทธิภาพทั้งในด้านความเร็ว ความสะดวกสบายและปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

การบำรุงรักษาถนนด้วยการชุบไส (Milling Drum) ผิวทางเดิมออกเพื่อลดความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตลงนั้นมักนำมาใช้กับงานหมุนเวียนวัสดุแบบในที่ (In-Place Recycling) ที่มีผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา เนื่องจากผิวทางที่หาย่อมมีส่วนผสมของชั้นทางเดิมที่ถูกชุบไส (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) ต่อหินคลุกมากและส่งผลให้ค่า CBR (California Bearing Ratio) น้อยลงตามสัดส่วน RAP ที่เพิ่มขึ้น [6] ทำให้ไม่เพียงพอที่นำมาใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Base) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เข้ามาช่วยในการปรับปรุงในปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วยซึ่งส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้นและอาจเกิดการแตกร้าวในวัสดุที่หมุนเวียน (Shrinkage Cracks) ส่วน RAP ที่ได้จากการชุบไสมีปริมาณเพิ่มขึ้นในแต่ละปีซึ่งมักมีการกองเก็บตามไหล่ทางทำให้เสียพื้นที่และภูมิทัศน์ โดย RAP เหล่านี้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุถมโดยไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมก่อน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่า CBR ของ RAP ที่บดอัดด้วยวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) มีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ [6], [7] ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้เป็นดินถม ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการนำเอา RAP หรือวัสดุเหลือใช้อื่น ๆ กลับมาใช้ในงานทางเพื่อประหยัดต้นทุนและรักษาสิ่งแวดล้อม [8] ปิยะฉัตร และคณะ 2566 [6] ได้ศึกษาการนำ RAP มาใช้ใหม่ด้วยการปรับปรุงขนาดละเอียดเพียงอย่างเดียวด้วยการผสมเข้ากับดินลูกรังซึ่งได้ทดสอบทั้งในอุณหภูมิห้องและที่ 60°C พบว่า ค่า CBR เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของดินลูกรังที่เพิ่มเข้าไปจนถึงค่า CBR ของดินลูกรัง หลังจากนั้นค่า CBR ก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก โดยได้กำหนดจุดที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนผสมเมื่อค่า CBR เริ่มคงที่เป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด เนื่องจากใช้ดินที่มีต้นทุนเข้ามาผสมน้อยที่สุดแต่ยังคงความสามารถในการรับแรงแบบทานได้เท่าดินเดิมที่นำมาผสมและที่อัตราส่วนผสมนี้เมื่อต้องเผชิญกับอุณหภูมิที่ 60°C พบว่าค่า CBR สูงขึ้นกว่า 80% ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุถมที่สัมผัสกับแดดได้โดยตรง แต่การศึกษานี้ทำในดินเพียงชนิดเดียว ดังนั้น ปิยะฉัตร และคณะ 2566 [7] ได้ศึกษาเพิ่มเติมในกรณีเมื่อดินที่นำมาผสมกับ RAP มีค่า CBR ที่แตกต่างกันพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนผสมยังคงมีค่าสูงสุดเท่ากับค่า CBR ของดินที่นำมาผสม และยังพบอีกว่าการนำเอา RAP เข้ามาผสมในดินช่วยเพิ่ม CBR ในกรณีที่ทดสอบแบบแช่น้ำและยังช่วยลดการบวมตัวได้อีกด้วย ทั้งนี้จากการสังเกตขนาดละเอียดของ RAP ที่กองเก็บหน้างาน

ในขณะที่เข้าไปเก็บตัวอย่างในพื้นที่พบว่าบางกองมีขนาดคละไม่เท่ากันเนื่องจากใช้ความเร็วและอัตราการชุบไสที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของขนาดคละของ RAP ที่นำมาผสมกับหินคลุกและดินลูกรังซึ่งเป็นวัสดุหลักในงานดินถมและงานทาง ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการได้มาซึ่ง RAP ที่มีขนาดคละที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ดีมากยิ่งขึ้นในด้านการลดต้นทุนของวัสดุซึ่งพิจารณาโดยเปรียบเทียบปริมาณของ RAP ที่สามารถนำไปแทนที่การใช้ดินลูกรังหรือหินคลุกโดยไม่ทำให้คุณสมบัติการรับแรง (CBR) เปลี่ยนไป และยังถือเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมจากการนำเอาวัสดุเหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งสามารถใช้เป็นแนวปฏิบัติของผู้ควบคุมงานในการควบคุมความเร็วและอัตราการชุบไสเพื่อให้ได้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้มีประสิทธิภาพสูงในด้านกำรับกำลังแบกทานเมื่อต้องนำไปผสมกับดิน

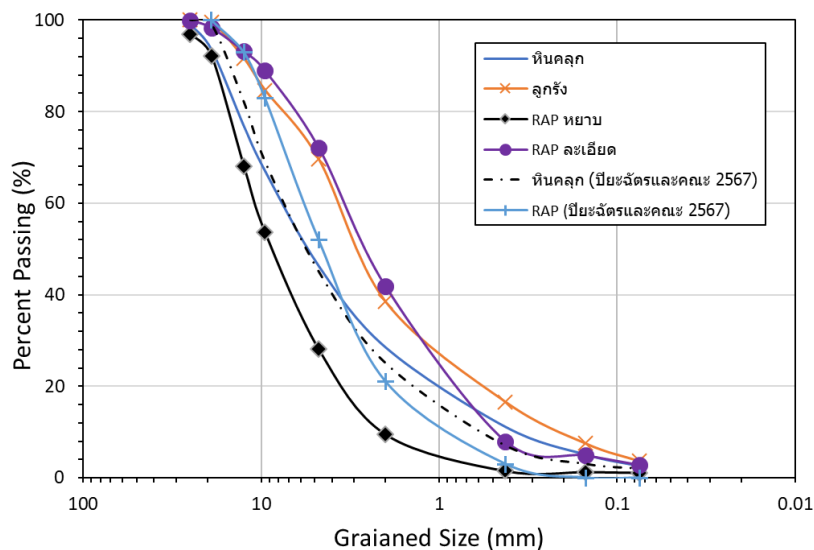
2. วิธีดำเนินงานวิจัยและขอบเขต

การบดอัดดินนั้นใช้แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) และการศึกษาการรับกำลังแบกทานถูกทดสอบด้วยการทดลอง CBR แบบไม่แช่น้ำเนื่องจากมีงานวิจัยที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้พบว่าการผสม RAP เข้าไปในดินนั้นลดการบวมตัวและเพิ่มค่า CBR ในกรณีทดสอบแบบแช่น้ำ ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนผสมนั้นสามารถนำมาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในด้านต้นทุน (จุด A, B, C และ D ในรูปที่ 4) ของวัสดุผสมและสามารถนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดคละของ RAP ที่มีผลต่อค่า CBR ของวัสดุผสมต่อไป การทดสอบจะมีการทำซ้ำเพิ่มอีก 1 ตัวอย่างซึ่งผลที่ออกมาต้องผิดพลาดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยผลที่แสดงในงานวิจัยนี้เป็นผลเฉลี่ยของการทดสอบ 2 ตัวอย่าง แต่หากผลทั้ง 2 ต่างกันมากก็จะทำการทดสอบใหม่โดยเลือก 2 ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันมาเฉลี่ยเป็นผลที่แสดง วัสดุที่นำมาใช้ผ่านการทดสอบเพื่อหาขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้ได้ผลการทดสอบของ ปิยะฉัตร และคณะ 2567 [7] มาแสดงเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบเพิ่มเติมต่อไปในหัวข้อการทดลองและผลการทดลอง ตารางที่ 1 แสดงสรุปผลข้อมูลพื้นฐานทางวิศวกรรมที่สำคัญ งานวิจัยนี้แบ่งประเภทวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบได้ดังต่อไปนี้

2.1 หินคลุก โดยหินคลุกที่นำมาใช้ได้มาจากโรงโม่หินในจังหวัดชลบุรี จากการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรง (Sieve Analysis) แล้วนำผลที่ได้ไปจำแนกประเภทดินด้วยระบบ Unified Soil Classification System (USCS) พบว่าเป็นดินชนิด GW โดยมีทรายผสมมากถึง 46 เปอร์เซ็นต์ (Well- Graded Gravel with Sand) การทดสอบค่า CBR ได้ผลการทดสอบที่ 84.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทาง พบว่า หินคลุกนี้สามารถนำมาใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Base)

2.2 ดินลูกรัง ดินที่ใช้นำมาจากบ่อดินในจังหวัดชลบุรี จากการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรงแล้วนำผลที่ได้ไปจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินชนิด SW โดยมีกรวดผสมอยู่ 30 เปอร์เซ็นต์ (Well-graded Sand with Gravel) การทดสอบค่า CBR ได้ผลการทดสอบที่ 33.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทาง พบว่า ดินลูกรังนี้สามารถนำมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทาง (Subbase)

2.3 แอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ได้จากการชุบไส (RAP) สำหรับ RAP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากโครงการซ่อมแซมปรับปรุงพื้นผิวทางขับ (Taxiway) ทางขับเข้าสู่หลุมจอด (Taxilane) สนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่ง RAP ออกเป็น 2 ประเภทคือ RAP หยาบและ RAP ละเอียด RAP หยาบหมายถึง RAP ที่มีขนาดคละเดิมที่ได้จากการเก็บในสนาม โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรงแล้วนำผลที่ได้ไปจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินชนิด GW โดยมีทรายผสมมากถึง 27 เปอร์เซ็นต์ (Well- Graded Gravel with Sand) ส่วน RAP ละเอียดนั้นหมายถึง RAP ที่ได้จากการนำเอา RAP หยาบมาปรับขนาดคละใหม่ด้วยตะแกรงให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น จากการจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินชนิด SP โดยมีกรวดผสมอยู่ 28 เปอร์เซ็นต์ (Well-graded Sand with Gravel) การทดสอบค่า CBR พบว่า RAP หยาบได้ผลการทดสอบที่ 12.7 เปอร์เซ็นต์ ส่วน RAP ละเอียดได้ผลการทดสอบที่ 6.5 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองเทน้ำลงไปใน RAP พบว่าน้ำไหลซึมออกทางด้านล่างทันที ดังนั้นจึงไม่สามารถทดสอบเพื่อหาค่า OWC ได้ ด้วยเหตุนี้การทดสอบในงานวิจัยนี้ RAP ถูกเตรียมโดยแผ่ลงบนพื้นแล้วตากแห้งในที่ร่มด้วยอุณหภูมิห้องอย่างน้อย 3 วันดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขนาดคละของดิน และ RAP

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติพื้นฐาน	Percent Passing (%)			
	หินคลุก	ลูกรัง	RAP หยาบ	RAP ละเอียด
D10	0.37	0.21	2.20	0.50
D30	2.2	1.2	5.0	1.2
D60	7.7	3.7	11.0	3.3
CU	20.8	17.6	5.0	6.6
CC	1.7	1.9	1.0	0.9
USCS	GW	SW	GW	SP

3. การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบหลังจากนำ RAP หยาบที่ตากแล้วไปหาขนาดคละด้วยตะแกรงก็นำผลขนาดคละที่ได้มาออกแบบขนาดคละใหม่ให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นแล้วกำหนดค่าร้อยละของการผ่านตะแกรงในช่วงนั้น ๆ ใหม่ จากนั้นนำ RAP หยาบร่อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกขนาดคละที่ผ่านและค้างชุดตะแกรงในแต่ละช่วงออกมาเตรียมไว้ เมื่อต้องการสร้างขนาดคละใหม่ก็ทำการชั่งน้ำหนัก RAP ที่ได้แยกขนาดคละเอาไว้แล้วในตอนต้นตามสัดส่วนที่กำหนดเพื่อนำมาสร้างเป็น RAP ละเอียด นำ RAP หยาบและละเอียดที่เตรียมไว้ไปทดสอบการบดอัดและหาค่า CBR ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2 การเตรียมหินคลุกและดินลูกรังต้องผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงทิ้งไว้ให้เย็นตัวแล้วใช้ค้อนยางทุบให้เม็ดดินแยกออกจากกันให้มากที่สุด นำดินที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้วไปเก็บในภาชนะปิดมิดชิดซึ่งขั้นตอนนี้จะทำในปริมาณที่เหมาะสมกับการทดลองครั้งนั้นๆ การแบ่งตัวอย่างเพื่อนำดินและ RAP มาทดสอบทำด้วยเครื่องมือแบ่งตัวอย่างวัสดุผสมรวม (Sample Splitter Riffle) เพื่อให้ได้ตัวแทนของวัสดุที่ใกล้เคียงกันในทุกการทดสอบซึ่งขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2 จากผลการทดลองการบดอัดและ CBR ได้ผลตามที่แสดงในตารางที่ 2 โดย OMC ของหินคลุกมีค่าเท่ากับ 6% ส่วนดินลูกรังมีค่าเท่ากับ 7% การผสมตัวอย่างนั้นเริ่มจากการใส่น้ำที่ปริมาณ OMC ชนิดของดินนั้น ๆ คลุกดินกับน้ำให้เข้ากันก่อนนำไปผสมกับ RAP ตามสัดส่วนที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 2 หลังจากคลุกเคล้าให้ส่วนผสมเข้ากันดีแล้วใช้ผ้าขึ้นคลุมไว้โดยไม่ให้ผ้าสัมผัสกับดินและหมักดินทิ้งไว้ 15 นาทีแล้วจึงนำวัสดุผสมไปทดสอบ

ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอัตราส่วนผสมแสดงในรูปที่ 3 หินคลุกเมื่อผสม RAP เข้าไปจะมีค่าหน่วยน้ำหนักลดลงเนื่องจากใน RAP มีส่วนผสมของยางมะตอยที่เบากว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนักหิน แต่เมื่อลดปริมาณ RAP ในส่วนผสมลง หน่วยน้ำหนักของวัสดุผสมก็เพิ่มขึ้นและจะกลับเข้าสู่หน่วยน้ำหนักของตัวหินคลุกเมื่ออัตราส่วนผสมหินคลุกต่อ RAP มากกว่า 10 ส่วนอิทธิพลของขนาดคละของ RAP ที่ผสมลงในหินคลุกต่อค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุผสมพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักลดลงเล็กน้อยในตัวอย่างที่ใช้ RAP ละเอียดเมื่ออัตราส่วนผสมหินคลุกต่อ RAP ต่ำกว่า 10

ส่วนในดินลูกรังพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเมื่อใส่ปริมาณ RAP ที่น้อยลงเนื่องจากปริมาณหินที่มาจาก RAP ในส่วนผสมจะลดลงและไม่ต่ำลงไปกว่าค่าหน่วยน้ำหนักของดินลูกรัง เมื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของขนาดคละของ RAP ที่ผสมลงในดินลูกรังต่อค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุผสม พบว่า ไม่สามารถสรุปผลความแตกต่างได้เนื่องจากการทดลองที่ผสม RAP ละเอียดเข้าไปในดินลูกรังนั้นใช้ RAP น้อยมาก ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 3 พบว่าเมื่อผสม RAP เข้าไปในดินลูกรังเกินอัตราส่วน 1:10 ค่าหน่วยน้ำหนักจะไม่ต่างจากดินลูกรังเดิมทั้งในตัวอย่างที่ใช้ RAP หยาบและละเอียด

จากผลการทดสอบหาค่า CBR ของวัสดุผสมที่อัตราส่วนผสมต่างๆ หลังการบดอัดแสดงในรูปที่ 4 สามารถแยกประเด็นผลการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 ผลของขนาดคละของ RAP ต่อค่า CBR ก่อนการปรับปรุง การศึกษานี้ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นนั้นใช้ RAP ที่มีขนาดคละแตกต่างกัน 2 ขนาด โดย RAP หยาบมีค่า $D_{60} = 11.0$ mm ส่วน RAP ละเอียดมีค่า $D_{60} = 3.3$ mm

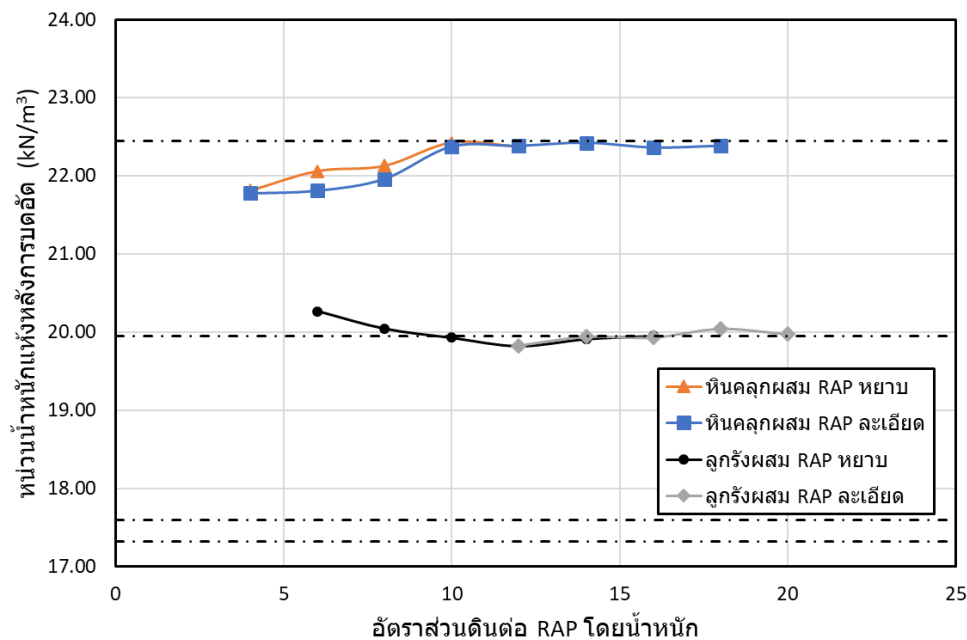
นอกจากนี้ยังนำงานวิจัยของ ปิยะฉัตรและคณะในปี 2567 [7] ซึ่งได้นำตัวอย่าง RAP มาจากแหล่งเดียวกันแต่มีการชุดใส่ในช่วงเวลาที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่ามีขนาดคละอยู่ในช่วงตรงกลางระหว่าง RAP หยาบและ RAP ละเอียดโดยมีค่า $D_{60} = 5.9 \text{ mm}$ จากเอกสารของ NCHRP [9] ได้แนะนำสมการเชิงประสพการณ์ (Empirical formula) เพื่อหาค่า CBR สำหรับดินเม็ดหยาบที่ไม่มีพลาสติกซึ่งโดยใช้ค่า D_{60} เป็นตัวแปลเพียงตัวเดียวด้วยสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{60} ค่า CBR ของ RAP พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรงซึ่งได้ค่า $R^2 = 0.943$ ดังนั้น RAP ที่มีเม็ดหยาบกว่าจะมีค่า CBR เริ่มต้นก่อนการปรับปรุงสูงกว่า RAP ละเอียด

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการบดอัดและซีปอาร์ของดินผสมในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของวัสดุ	อัตราส่วนผสมดินต่อ RAP โดยน้ำหนัก	Dry Unit Weight (kN/m ³)	CBR (%)	ชนิดของวัสดุ	อัตราส่วนผสมดินต่อ RAP โดยน้ำหนัก	Dry Unit Weight (kN/m ³)	CBR (%)
หินคลุกกับ RAP ละเอียด	4	21.78	57.0	ลูกรังกับ RAP ละเอียด	12	19.82	14.8
	6	21.81	61.0		14	19.94	20.1
	8	21.96	64.0		16	19.93	28.0
	10	22.37	70.7		18	20.04	31.8
	12	22.38	79.9		20	19.97	31.9
	14	22.42	83.3	ลูกรังกับ RAP หยาบ	6	20.26	15.8
	16	22.36	84.1		8	20.04	20.5
	18	22.38	84.1		10	19.93	24.3
หินคลุกกับ RAP หยาบ	4	21.81	65.5		12	19.82	31.8
	6	22.06	72.5	14	20.04	31.5	
	8	22.13	83.0	16	19.95	31.7	
	10	22.42	83.2	RAP ละเอียด	-	17.32	6.6
	12	22.37	83.6	RAP หยาบ	-	17.59	12.8
			ลูกรัง	-	19.95	32.0	
			หินคลุก	-	22.44	84.7	



รูปที่ 2 ตัวอย่าง RAP, ดินลูกรัง, หินคลุก และการแบ่งตัวอย่างดินด้วยเครื่องแบ่งตัวอย่างวัสดุมวลรวม (Sample Splitter Riffle)



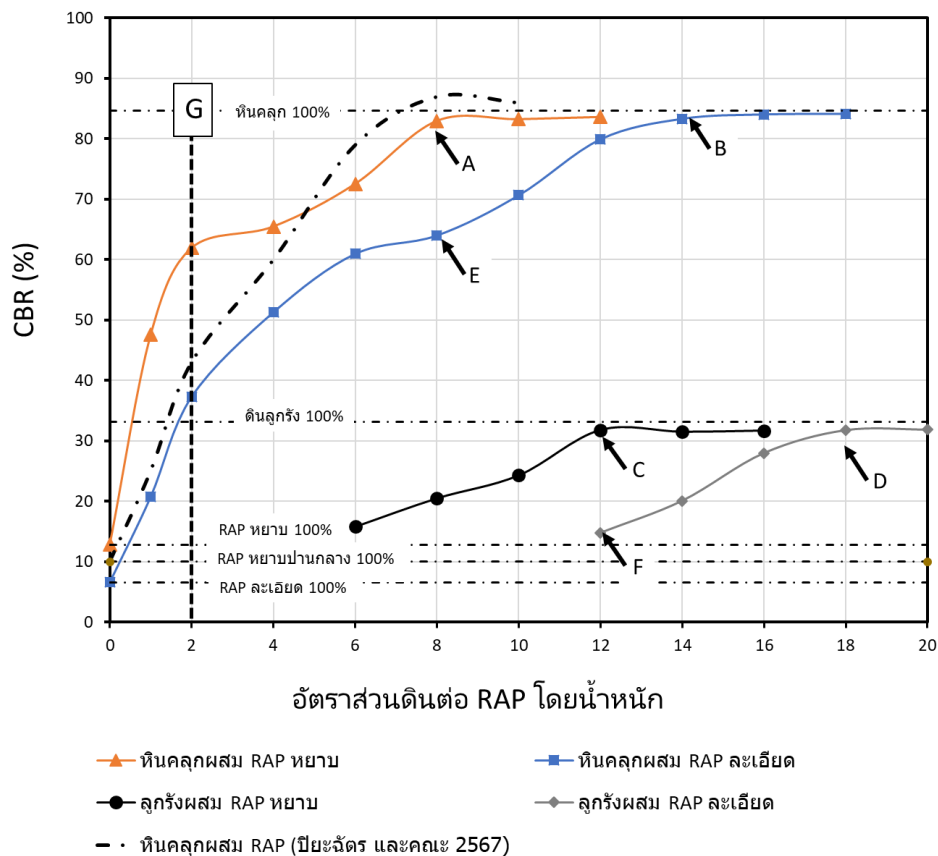
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับอัตราส่วนน้ำหนักดินพื้นฐานต่อ RAP

3.2 ผลกระทบของขนาดคละใน RAP ต่อค่า CBR ประการปรับปรุงด้วยหินคลุกและดินลูกรัง จากผลการทดสอบพบว่าค่า CBR สูงขึ้นตามปริมาณหินคลุกหรือดินลูกรังที่ใส่เพิ่มเข้าไปซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [6] และ [7] ดังนั้นหินคลุกและดินลูกรังสามารถปรับปรุงขนาดคละและลดการจับตัวกันของ RAP ทำให้มีความสามารถในการปรับโครงสร้างและบดอัดได้ดีขึ้นทั้งใน RAP หยาบและละเอียดซึ่งเดิมมีค่า CBR ที่ต่ำมากจนไม่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุผสมได้ ดังนั้นดินเดิมที่ใส่เข้าไปสามารถปรับปรุงคุณภาพการรับน้ำหนักของ RAP ทั้งหยาบและละเอียดได้ ค่า CBR ของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดซึ่งแสดงด้วยจุด A, B, C และ D ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่า CBR ของวัสดุผสมจะกลับเข้าสู่ค่า CBR ของดินเดิมที่นำมาผสมและจะคงที่ต่อไปถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณดินเดิมเข้าไปอีกก็ตามและพฤติกรรมนี้เกิดขึ้นในทุกตัวอย่างของการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณดินเดิมเข้าไปถึง

จุดที่อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด พฤติกรรมการรับแรงถูกควบคุมโดยดินเดิมที่นำมาผสมโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการใช้ RAP ทั้งหยาบและละเอียดนั้นไม่มีผลต่อค่า CBR สูงสุดและการผสม RAP ทั้งหยาบและละเอียดเข้าไปในดินเดิมนั้นไม่ถือว่าเป็นการปรับปรุงคุณภาพดิน จากผลการทดสอบพบว่าการใช้ RAP ทั้งหยาบและละเอียดในอัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นสามารถนำมาใช้แทนที่ดินเดิมได้ แต่สามารถลดต้นทุนของดินเดิมที่นำมาผสมได้เล็กน้อยเพียงใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่จุด A เทียบกับจุด B และ จุด C เทียบกับจุด D พบว่า ค่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดต่างกันถึง 6 หน่วย ดังนั้นการใช้ RAP หยาบสามารถลดปริมาณการใช้หินคลุกได้มากถึงร้อยละ 42.86 เมื่อเทียบกับการใช้ RAP ละเอียด ส่วนในกรณีดินลูกรัง RAP หยาบสามารถลดปริมาณการใช้ดินลูกรังได้มากถึงร้อยละ 33.33 เมื่อเทียบกับการใช้ RAP ละเอียด ดังนั้นการใช้ RAP หยาบเข้ามาผสมกับหินคลุกและดินลูกรังนั้นจะทำให้สามารถเพิ่มการใช้ RAP ในส่วนผสมได้มากกว่า RAP ละเอียดได้อย่างมีนัยสำคัญจึงสามารถลดต้นทุนได้มากกว่าการใช้ RAP ละเอียด แต่หากพิจารณาถึงความสามารถในการรับน้ำหนักนั้น พบว่า RAP หยาบมีการพัฒนาค่า CBR ในวัสดุผสมได้ดีกว่า RAP ละเอียดอย่างมากซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนตลอดช่วงอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อพิจารณาที่จุด A เทียบกับจุด E พบว่า ค่า CBR ในหินคลุกที่ใช้ RAP หยาบให้ค่า CBR สูงกว่าการผสม RAP ละเอียดร้อยละ 19 ที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน และเมื่อพิจารณาในกรณีดินลูกรังโดยเทียบระหว่างจุด C กับจุด F พบว่า ค่า CBR ในดินลูกรังที่ใช้ RAP หยาบให้ค่า CBR สูงกว่าการผสม RAP ละเอียดร้อยละ 17 ที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน ทั้งนี้ค่า CBR ของ RAP หยาบและละเอียดที่ยังไม่มีการผสมดินเดิมเข้าไบนั้น RAP หยาบมีค่ามากกว่า RAP ละเอียดเพียงร้อยละ 6.2 ดังนั้นค่า CBR เดิมของ RAP ซึ่งแปรผันตรงกับขนาดคละนั้นมีผลค่อนข้างน้อยในด้านการพัฒนากำลังเมื่อเทียบกับประเด็นของการพัฒนากำลังที่เป็นผลมาจากการปรับปรุงขนาดคละภายในวัสดุผสมซึ่งทำให้คุณสมบัติที่ดีขึ้นจากความสามารถในการบดอัดที่ดีขึ้น ส่วนในประเด็นของความอ่อนไหวพบว่าตัวอย่างที่ใช้หินคลุกมีความอ่อนไหวต่อขนาดคละของ RAP ต่ำกว่าดินลูกรังเป็นอย่างมากโดยสังเกตได้จากเปรียบเทียบระยะห่างโดยรวมระหว่างเส้นกราฟการทดสอบที่ใช้ RAP หยาบกับละเอียด และยังพบว่าดินลูกรังมีระยะห่างดังกล่าวมากกว่าหินคลุกมาก นั้นอาจเป็นผลมาจากหินคลุกซึ่งเดิมมีค่า CBR สูงกว่าดินลูกรังและเมื่อนำ RAP ที่มีค่า CBR ต่ำมากเข้ามาผสม หินคลุกจึงสามารถรักษาคุณสมบัติเดิมไว้ได้ดีกว่าดินลูกรัง ดังนั้นการควบคุมงานที่ใช้ดินลูกรังมาปรับปรุง RAP นั้นต้องมีความเข้มงวดเป็นอย่างสูงในการควบคุมขนาดคละของ RAP ไม่ให้ละเอียดกว่าที่ได้กำหนดไว้

3.3 ผลกระทบของขนาดคละใน RAP ต่อค่า CBR จากการปรับปรุงด้วยหินคลุก ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยการนำผลวิจัยของปิยะฉัตรและคณะในปี 2567 [7] มาเปรียบเทียบกับร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งงานวิจัยของปิยะฉัตรและคณะ ในปี 2567 นั้นมุ่งศึกษาในประเด็นของอิทธิพลของค่า CBR ในดินเดิมโดยใช้หินคลุกและดินลูกรังมาปรับปรุงคุณสมบัติการรับกำลังของ RAP แต่ในงานวิจัยนี้จะนำเฉพาะผลการทดสอบในหินคลุกมาเปรียบเทียบเท่านั้น เนื่องจากมีขนาดคละโดยรวมที่ใกล้เคียงกันกับหินคลุกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากการเปรียบเทียบขนาดคละของหินคลุกดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า หินคลุกทั้งสองมีขนาดคละใกล้เคียงกันมากโดยเฉพาะช่วงที่ขนาดคละใหญ่กว่า D_{40} แต่ขนาดคละของหินคลุกในงานวิจัยของปิยะฉัตรและคณะในปี 2567 มีความหยาบกว่าเล็กน้อยเมื่อขนาดคละเล็กกว่า D_{40}

นั่นจึงทำให้ค่า CBR สูงกว่าเล็กน้อยเช่นกัน การวิเคราะห์ผลในหัวข้อนี้แบ่งส่วนการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 2 (เส้น G ในรูปที่ 4) โดยทางฝั่งซ้ายเป็นอิทธิพลของขนาดของ RAP เดิมซึ่งพบว่า RAP ที่มีขนาดละเอียดที่ใหญ่มักรับการพัฒนา CBR ได้เร็วกว่าในช่วงต้น โดยดูได้จากความชันของเส้นกราฟใน RAP หยาบจะมีค่าสูงสุดและลดลงตามความหยาบของ RAP แต่เมื่ออัตราส่วนผสมเกิน 2 ความชันของเส้นกราฟใน RAP หยาบจะลดลงอย่างมากเนื่องจากค่า CBR เดิมของหินคลุกเริ่มส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของ CBR จนทำให้ค่า CBR ในวัสดุผสมที่ใช้ RAP หยาบปานกลางกลับมามีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ RAP หยาบที่อัตราส่วนผสมมากกว่า 4.8 และจะกลับเข้าสู่ความสามารถของดินเดิมโดยสมบูรณ์เมื่ออัตราส่วนผสมถึงจุดที่ดีที่สุด



รูปที่ 4 ผลการทดสอบ CBR ที่ค่าอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ต้องการทราบถึงอิทธิพลของขนาดละเอียดใน RAP ต่อค่า CBR โดยการใช้ RAP ที่มีขนาดละเอียดต่างกัน มาผสมกับดินลูกรังและหินคลุกซึ่งถือเป็นวัสดุหลักที่สำคัญในงานทางและงานดินถมทั่วไป จากผลการทดสอบสามารถสรุปออกมาได้ดังต่อไปนี้

4.1 ขนาดคละของ RAP ไม่มีผลต่อค่า CBR สูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับค่า CBR ของดินเดิมที่นำมาปรับปรุง RAP แต่มีผลอย่างมากในการพัฒนาค่า CBR ในช่วงแรกของอัตราส่วนผสมโดยเฉพาะในหินคลุก ซึ่ง RAP ที่หยาบทำให้การพัฒนาค่า CBR ในช่วงแรกดีกว่าการใช้ RAP ละเอียด แต่เมื่อผ่านช่วงแรกไป พฤติกรรมของวัสดุผสมจะค่อย ๆ กลับเข้าสู่ความสามารถในการรับกำลังของดินเดิม

4.2 ขนาดคละของ RAP มีผลอย่างมากต่ออัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด โดย RAP หยาบนั้นใช้ปริมาณดินเดิมน้อยกว่า RAP ละเอียดที่ค่า CBR เดียวกัน ทำให้ประหยัดต้นทุนในการซื้อดินถมมากกว่า ดังนั้นหากต้องการนำ RAP ไปใช้งานต่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อนำไปผสมกับดินถม ควรมุ่งเน้นการขุดใส่เพื่อให้ได้ RAP ที่มีเนื้อหยาบ

4.3 ในช่วงที่อัตราส่วนผสมก่อนจุดที่ดีที่สุด วัสดุผสมที่ใช้ RAP หยาบจะให้ค่า CBR ที่สูงกว่าการใช้ RAP ละเอียดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อัตราส่วนผสมเท่ากัน ดังนั้นจึงควรควบคุมขนาดคละของ RAP ไม่ให้ละเอียดกว่าที่กำหนด

4.4 ผลกระทบของขนาดคละใน RAP ที่นำมาใช้ปรับปรุงด้วยดินลูกรังที่มีค่า CBR เดิมต่ำนั้นมีแนวโน้มที่จะมีความอ่อนไหวต่อค่า CBR สูง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมขนาดคละของ RAP ที่เข้มงวดกว่าการนำไปใช้กับหินคลุก

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). *มาตรฐานงานทาง*. กระทรวงมหาดไทย.
- [2] กรมทางหลวง. (2544). *มาตรฐานที่ ทล.-ม.201/2544 มาตรฐานพื้นทางหินคลุก*. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- [3] กรมทางหลวง. (2532). *มาตรฐานที่ ทล.-ม. 205/2532 มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม*. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- [4] กรมทางหลวง. (2532). *มาตรฐานที่ ทล.-ม. 208/2532 มาตรฐานวัสดุคัดเลือก ก*. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- [5] Mohod, M. V., & Kadam, K. N. (2016). A comparative study on rigid and flexible pavement: A review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(3), 84-88.
- [6] ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ, วีรพร พงศ์ติณบุตร, ภาวิณี แคมวงศ์ และ สุวิจักขณ์ เอมจิตต์. (2566). ผลกระทบของอุณหภูมิต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้เคลือบดินลูกรัง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*, 5(3), 5-13.
- [7] ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ, วีรพร พงศ์ติณบุตร, ต๋อวงศ์ด้อยวงศ์ และ มนัญชัย นาอู่. (2567). อิทธิพลของค่า CBR ในวัสดุชั้นทางต่อการปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไร้เคลือบ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*, 6(3), 10-19.
- [8] จักราวุธ ต้นสกุล, ศุภชัย ไทยพุ่ม และ นพดล สุดสุย. (2564). ประสิทธิภาพของเศษยางเหลือใช้ที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมสำหรับงานคันทาง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*, 4(2), 40-52.
- [9] National Cooperative Highway Research Program. (2001). *Guide for mechanistic and empirical – design for new and rehabilitated pavement structures*. final document. In: Appendix CC-1: correlation of CBR values with soil index properties. West University Avenue Champaign, Illinois: Ara, Inc.