

สมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน
Mechanical Properties of Pavement Recycling Materials as Base Layer
for Quality Improvement with Cement and Asphalt Emulsion

ศุภศิษฐ์ สีลา¹ และ นิรชร นกแก้ว^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Suppasit Seela¹ and Nirachorn Nokkaew^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Corresponding Author Email : nirachorn.n@en.rmutt.ac.th

Received 22 August 2025

Revised 13 January 2026

Accepted 23 January 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุจากโครงสร้างทางเดิมถนนทางหลวงชนบท นย.3027 โดยมีความหนาผิวทางแอสฟัลต์เดิม 0.05 m และความหนาพื้นทางหินคลุกเดิม 0.15 m นำไปทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม และออกแบบวัสดุบนพื้นฐานวัสดุรีไซเคิล (Recycled Materials) โดยผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 โดยน้ำหนักมวลรวม ก่อนนำวัสดุไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลเพิ่มเติมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักมวลรวม และเปรียบเทียบผลของระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ผลการทดสอบพบว่า วัสดุมวลรวมมีการกระจายตัวเข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุก ชนิด ก. โดยมีความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.291 g/cm³ และความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 5.60 การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.82 โดยน้ำหนักมวลรวม ทำให้วัสดุมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 17.50 kg/cm² จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (ITS) โมดูลัสคืนตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (ITSM) และ โมดูลัสคืนตัว (RM) พบว่า CSS-1 สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลด้านความยืดหยุ่น ความต้านทานการเสียดสีและการสึกกร่อนและความต้านทานการแตกร้าวได้ดี โดยที่ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมวลรวม เหมาะสมกับการนำมาปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทาง เพราะปริมาณ CSS-1 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุมีค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลง และระยะเวลาในการบ่มที่อายุ 28 วัน ช่วยพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันสมบูรณ์ขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากช่วยลดการนำวัสดุใหม่มาใช้งาน และลดมลพิษจากการขนส่งด้วย

คำสำคัญ: การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิม, ปูนซีเมนต์, แอสฟัลต์อิมัลชัน

Abstract

This research was conducted by using pavement recycling materials from rural road structure No.3027 with the reclaimed asphalt pavement thickness of 0.05 m and the reclaimed crushed rock thickness of 0.15 m. Firstly, the basic properties of the materials were tested and then designed on the basis of recycled materials with a cement hydraulic GU type in the ratios of 0, 1, 2, 3, 4, and 5% by total mass weight. Then the material was further improved with an asphalt emulsion of CSS-1 type in the ratio of 0, 1, 2, and 3% by total mass weight, and the results of the curing periods of 7 and 28 days were compared.

The test results showed that the aggregate material was distributed close to the standard of crushed rock base layer type A with a maximum dry density of 2.291 g/cm³ and an optimum moisture content of 5.60%. The use of cement was 2.82% by total weight, resulting in an unconfined compressive strength of 17.50 kg/cm². Based on indirect tensile strength, indirect tensile stiffness modulus, and Resilient Modulus, it was found that CSS-1 can improve its mechanical properties of elasticity, permanent deformation resistance, and cracking resistance, where CSS-1 was equal to 1% by total mass weight. It was suitable for use to improve the base course layer material because of the increased amount of CSS-1. As a result, the material has a reduced unconfined compressive strength. In addition, the incubation period at the age of 28 helped to develop the hydration reaction of cement and asphalt emulsions and was also environmentally friendly because it reduced the use of new materials and also the pollution from transportation.

Keywords: Pavement Recycling, Cement, Asphalt Emulsion

1. บทนำ

จากรายงานสำนักงบประมาณของรัฐบาล ฉบับที่ 8/2562 กล่าวว่า การพัฒนาระบบการคมนาคมขนส่งของประเทศไทยมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ระบบการขนส่งทางถนนยังคงเป็นหลักในการขนส่งสินค้าภายในประเทศ สัดส่วนการขนส่งสินค้ากว่าร้อยละ 90 ถูกขนส่งโดยรถบรรทุกและรถหัวลาก ทำให้ปริมาณการคมนาคมขนส่งทางถนนมีมากกว่าความจุของถนนที่สามารถรองรับได้ [1] การรับน้ำหนักจากการจราจรที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ถนนเกิดความเสียหาย โดยเฉพาะจากยานพาหนะที่มีน้ำหนักมาก การกระจายแรงจากล้อของยานพาหนะทำให้เกิดความเครียดในวัสดุชั้นทางและโครงสร้างทาง ส่งผลให้เกิดการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) และเกิดรอยแตกร้าวจากความล้า (Fatigue Cracking) ในระยะยาว ซึ่งมีผลต่อการใช้งานถนนในอนาคต การซ่อมบำรุงถนนที่เสื่อมสภาพก่อนระยะเวลาอันควร จะเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมถนนมากขึ้น

การซ่อมบำรุงรักษาถนนที่เสียสภาพถาวร เช่น การหลุดตัวเป็นร่องล้อ (Rutting) จะต้องขุดรื้อชั้นผิวทางลงไปถึงชั้นโครงสร้างทางและทดแทนด้วยวัสดุใหม่ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นโครงสร้างทาง อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการ

ขาดแคลนวัสดุคุณภาพดีและค่าใช้จ่ายแพง รวมถึงปัญหาการจราจรและฝุ่นละอองจากการขนส่ง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูงขึ้น การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการบำรุงรักษาโครงสร้างทางเดิม ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยผลการศึกษาของธนาคารโลกชี้ให้เห็นว่า การใช้วัสดุชั้นทางเดิมในกรณีที่ดินเสื่อมสภาพลงร้อยละ 40 จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 3-4 เท่าของการซ่อมถนนที่เสื่อมสภาพถึงร้อยละ 80 และช่วยยืดอายุการใช้งานของถนนได้อีกระยะหนึ่ง [2]

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยการนำผิวจราจรเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) [3] และวัสดุมวลรวม เช่น ทางหินคลุกเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR) [4] หรือวัสดุหินมวลรวมใหม่มาผสมกัน และปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ แล้วนำกลับมาใช้ใหม่เป็นโครงสร้างชั้นพื้นทาง (Base Course) เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตาม ดังรูปที่ 1 ปูนซีเมนต์อาจนำไปสู่ปัญหาการแตกหักและเกิดการหดตัว (Shrinkage Cracking) และการเสื่อมสภาพจากกระบวนการทางเคมีได้และสะท้อนมาถึงผิวจราจร [2] ชิตินทรีย์ โสภณพงษ์ [5] พบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าความเร็วคลื่นเฉือนเพิ่มขึ้น แต่ทำให้วัสดุเหล่านั้นเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุแข็งเปราะ B. DotZycki and P. Jaskuta [6] ยืนยันว่า การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากเกินไปร่วมกับแอสฟัลต์อิมัลชันในถนนของประเทศโปแลนด์ มีความเสี่ยงไปและเกิดรอยแตกกว้างตามขวางจำนวนมาก J. Yan, Z. Leng, F. Li, H. Zhu, and S. Bao [7] พบว่า การเติมปูนซีเมนต์ในปริมาณเกินร้อยละ 2 ทำให้วัสดุมีความเปราะและลดความต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ การลดปริมาณปูนซีเมนต์และเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันช่วยลดความแข็งของวัสดุและเพิ่มความยืดหยุ่นได้ T. Ma, H. Wang, Y. Zhao, X. Huang, and Y. Pi [8] พบว่า การเลือกใช้อิมัลชันชนิดแตกตัวช้าถือเป็นการเลือกที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากช่วยให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น ธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ [9] พบว่า แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 มีความสามารถในการรับกำลังได้ดีกว่า CMS-2 ในอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน L. Kihnl and A. F. Braham [10] พบว่า CSS เหมาะกับงานก่อสร้างที่ต้องการระยะเวลาในการผสมที่ช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ CMS และยังคงความยืดเกาะดี วรุช เลิศไพฑูรย์นิตย์ [11] พบว่า ปริมาณบิทูเมน CSS-1h และ CSS-1 ร้อยละ 3 ในทุกรูปแบบการผสมจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าเฉลี่ย 2 ถึง 4 เท่า ของวัสดุที่ไม่ได้รับการปรับปรุง B. DotZycki, M. Jaczewski, and C. Szydlowski [12] และ Y. Li, Y. Lv, L. Fan, and Y. Zhang [13] ต่างยืนยันว่า การใช้แอสฟัลต์อิมัลชันมากกว่าร้อยละ 4 อาจทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ความพรุน (Void Ratio) ในวัสดุเพิ่มขึ้น ขณะที่ปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างตัวประสานกับวัสดุเดิมเติมได้อย่างมีนัยสำคัญ P. Nanthavisit [14] การปรับปรุงถนนด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน พบว่า สามารถแก้ไขปัญหาการแตกร้าวและความเสียหายจากน้ำ รวมทั้งเพิ่มกำลังรับแรงอัด แรงดึง ความยืดหยุ่น และความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ จักรพงษ์ วงศ์คำจันทร์ และคณะ [15] พบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลงเมื่อปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันเพิ่มขึ้น เมธากุล มีธรรม และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร [16] นำเสนอมิติด้านสิ่งแวดล้อม โดยการก่อสร้างชั้นทางงานหมุนเวียนวัสดุเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการซ่อมบำรุงรักษาถนนด้วยวิธีอื่น และ Y. Yang, Y. Yang, and B. Qian [17] สนับสนุนแนวคิดนี้ โดยกล่าวว่า การเติมปูนซีเมนต์ในวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุในงานก่อสร้างถนน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการบำรุงรักษาถนน จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า วิธีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงและเกิดรอยแตกร้าวจากการหดตัวได้ง่ายด้วยเหตุนี้ จึงมีความพยายามในการหาสารปรับปรุงคุณภาพชนิดอื่น ๆ มาผสมรวมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้ายังคงมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ การเลือกใช้วัสดุรีไซเคิล (RAP หรือ RCR) เพียงอย่างเดียวหนึ่ง หรือ การใช้อัตราส่วนผสมที่ไม่สอดคล้องกับโครงสร้างถนนทางหลวงชนบทส่วนมากของประเทศไทย นอกจากนี้ วิธีการเก็บตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยบางส่วนยังไม่สะท้อนถึงรูปแบบการก่อสร้างของเครื่องจักรหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิม

กลับมาใช้ใหม่แบบในที่ ซึ่งทำให้ยังขาดข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริงในประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบในที่ของถนนทางหลวงชนบท ซึ่งเป็นวิธีการบำรุงรักษาถนนที่นิยมในปัจจุบัน โดยให้ความสำคัญกับสัดส่วนผสมของ RAP กับ RCR และรูปแบบในการบำรุงรักษาถนนดังกล่าว รวมทั้งศึกษาสารปรับปรุงคุณภาพเพียง 2 ชนิดร่วมกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU และ แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 แต่งานวิจัยนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางการก่อสร้างที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน และ CSS-1 เนื่องจากมีสมบัติเด่นในการกันน้ำและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวม [18] ทั้งนี้งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งทำให้วัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ยังคงมีความแข็งแรง (Strength) ขณะเดียวกันก็ยังคงมีความยืดหยุ่น (Flexibility) และความทนทานต่อการแตกร้าวภายใต้สภาวะการใช้งานจริงและการแทรกซึมของน้ำในโครงสร้างทาง ซึ่งจะช่วยยืดระยะเวลาการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 รอยแตกร้าวจากงานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) พื้นทางหินคลุกเดิม (RCR) จากถนนทางหลวงชนบทสายทาง นย.3027 สายแยกทางหลวงหมายเลข 305 - บ้านบางไพล อ.เมือง จ.นครนายก โดยเครื่องจักรชุดไสผิวถนน (Milling Machine) และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU และแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 วัสดุที่นำมาใช้ศึกษาได้มาจากแหล่งเดียวกันตลอดการทดลอง

2.2 ศึกษาการออกแบบการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยใช้สัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 ของความลึกจากการชุดไส และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ได้แก่ ขนาดคละของวัสดุผสม เพื่อตรวจสอบลักษณะของวัสดุมวลรวมเปรียบเทียบกับมาตรฐานงานชั้นพื้นทาง ตามมาตรฐาน มทข. 223-2545 [19] และค่าความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อนำปริมาณความชื้นที่เหมาะสมไปกำหนดปริมาณน้ำในวัสดุมวลรวมของก้อนตัวอย่าง

2.3 ศึกษาสัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 โดยน้ำหนักของมวลรวม บ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 7 วัน และวิเคราะห์ข้อมูลหาปริมาณ

ปูนซีเมนต์ที่ทำให้ก้อนตัวอย่างวัสดุมีค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) เท่ากับ 17.50 kg/cm^2

2.4 ศึกษาสัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยใช้สัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 ปูนซีเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ และแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำการทดสอบหลังการบ่มที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน เพื่อหาสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการทดสอบต่อไปนี้

2.4.1 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 303-2545 [20] และ AASHTO T 208 [21]

2.4.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) ตามมาตรฐาน ASTM 6931 [22]

2.4.3 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus, ITSM) ตามมาตรฐาน AASHTO TP-31 [23]

2.4.4 การทดสอบหาโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, RM) ตามมาตรฐาน AASHTO T 307 [24]

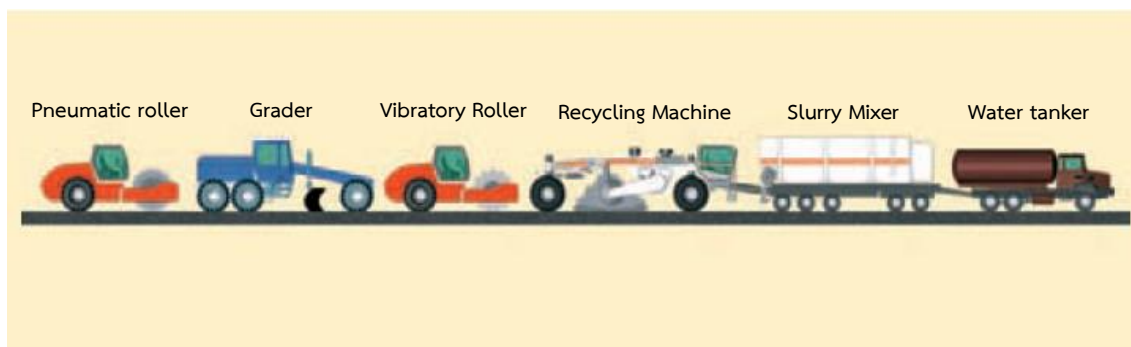
2.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) [25]

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการซ่อมบำรุงถนนที่มีความเสียหายลึกถึงชั้นโครงสร้าง โดยใช้วัสดุจากถนนเดิมผสมกับวัสดุใหม่หรือวัสดุที่รีไซเคิลจากถนนเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับชั้นโครงสร้างทาง ในปัจจุบันสามารถจำแนกเป็น 5 หมวดหมู่ เช่น การชุบไสแบบเย็น (Cold Planing) การรีไซเคิลแบบร้อน (Hot Recycling) การรีไซเคิลแบบร้อนในที่ (Hot In-Place Recycling) การรีไซเคิลแบบเย็น (Cold Recycling) และการปรับปรุงโครงสร้างทางแบบเต็มความลึก (Full Depth Reclamation) โดยวิธีที่นิยมในประเทศไทยคือวิธีการรีไซเคิลโดยวิธีผสมเย็น

การรีไซเคิลโดยวิธีผสมเย็นสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การหมุนเวียนโดยไม่เติมสารปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งใช้เมื่อถนนรองรับการจราจรที่มีปริมาณค่อนข้างต่ำ และการหมุนเวียนโดยเติมสารปรับปรุงคุณภาพ เช่น ปูนซีเมนต์หรือปิทิวเมนอิมัลชัน เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุ เมื่อถนนรองรับการจราจรที่มากขึ้น การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมโดยวิธีผสมเย็นนี้สามารถทำได้ทั้งในโรงงานและในสถานที่ โดยการหมุนเวียนในสถานที่ (In-Place Recycling) ดังรูปที่ 2 เป็นวิธีที่มีต้นทุนการก่อสร้างต่ำกว่าและได้รับการยอมรับในระดับสากล



รูปที่ 2 ขบวนการเครื่องจักรในการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ [25]

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่มีประโยชน์หลายประการ เช่น ลดการใช้วัสดุใหม่จากแหล่งเหมืองหิน ลดการขนส่งและภาระการใช้พลังงานในกระบวนการซ่อมบำรุง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางลดระยะเวลาในการก่อสร้าง และลดผลกระทบต่ออาการจราจร การใช้กระบวนการนี้จึงเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าในการบำรุงรักษาถนน ทั้งในแง่ของต้นทุนและการอนุรักษ์ทรัพยากร

3.2 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก [26]

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นปูนซีเมนต์ที่ก่อตัวและแข็งตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยมีสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 2594 การผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกใช้วิธีเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ (Performance Based) และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยการใช้วัสดุทดแทน เช่น ส่วนประกอบของแคลเซียม ปอซโซลาน และกากถลุง ซึ่งช่วยพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ในแง่ของกำลังอัด ความไหลลื่นของคอนกรีต และความคงทน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เปรียบเทียบการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรณีใช้วัสดุทดแทนที่ร้อยละ 10 [26]

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้รับการรับรองจากหลายมาตรฐานและสามารถตอบสนองความต้องการในงานก่อสร้างโครงสร้างได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปสู่การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและเป็นการสนับสนุนการสร้างสังคมคาร์บอนต่ำ

ในส่วนของคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีการอุ้มน้ำและความต้องการน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่ามากกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด ความต้านทานซัลเฟตและคลอไรด์ และการหดตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าที่เทียบเท่าหรือดีกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเฉพาะในการต้านทานการกัดสีและการทำปฏิกิริยาระหว่างต่างและมวลรวมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

3.3 แอสฟัลต์อิมัลชัน [27]

แอสฟัลต์อิมัลชันเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นเม็ดเล็ก ๆ แล้วตีให้แพร่กระจายผสมกับน้ำที่ประกอบด้วยอิมัลซิฟายดิ่งเอเจนต์ (Emulsifying Agent) ผสมอยู่เล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.25-2.0 โดยน้ำหนัก และมีแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 55-70 นอกนั้นเป็นน้ำ ซึ่งช่วยให้แอสฟัลต์อยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีเสถียรภาพ แอสฟัลต์อิมัลชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ อิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Anionic) และอิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก (Cationic) ซึ่งจะมีลักษณะประจุไฟฟ้าต่างกัน การเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่เหมาะสมจะทำให้การผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสูง

แอสฟัลต์อิมัลชันถูกใช้ในหลายงานวิจัยและการผลิตวัสดุถนนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุชั้นทางเดิม โดยสามารถทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น ความต้านทานแรงอัดและแรงดึงทางอ้อม การใช้แอสฟัลต์

อิมัลชันในการก่อสร้างถนนมีประโยชน์ในการปรับปรุงความทนทานและการยึดเกาะของวัสดุต่าง ๆ และเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในงานบำรุงรักษาผิวทาง โดยมีข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเกรดยางแอสฟัลต์อิมัลชัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเกรดยางแอสฟัลต์อิมัลชัน [27]

แอสฟัลต์อิมัลชัน (ASTM D977, AASHTO M140)	แอสฟัลต์อิมัลชัน (ASTM D2397, AASHTO M208)
RS-1	CRS-1
RS-2	CRS-2
HFRS-2	-
MS-1	-
MS-2	CMS-2
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	-
HFMS-2	-
HFMS-2h	-
HFMS-2s	-
SS-1	CSS-1
SS-1h	CSS-1h

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) ผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) ความลึกของการขุดไสที่ 0.05 m โดยเครื่องจักรขุดไสผิวถนน (Milling Machine) ยี่ห้อ Wirtgen รุ่น W2200 จากถนนกรมทางหลวงชนบท สายทาง นย.3027 แยกทางหลวงหมายเลข 305-บ้านบางไพล อ.เมือง จ.นครนายก

2) พื้นทางหินคลุกเดิม (RCR) เก็บจากกองวัสดุบริเวณหน้างานก่อสร้าง โดยวิธีขุดด้วยรถแบคโฮ ซึ่งเป็นวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

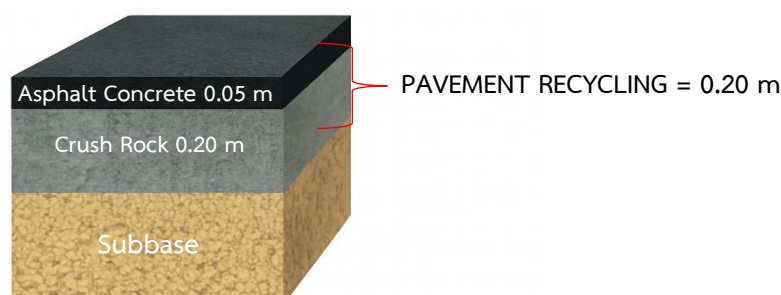
3) แอสฟัลต์อิมัลชันประเภทแยกตัวช้า (Cationic Slow Setting) ชนิด CSS-1 มอก.371-2530 [28] จากแหล่ง บริษัท โมเดอร์น แอสฟัลท์ จำกัด

4) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU (General Use Portland Cement) มอก.2594-2556 [29] จากแหล่ง บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

4.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถนนทางหลวงชนบทที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานระยะหนึ่ง โดยเน้นการบำรุงรักษาโครงสร้างทางเดิมเพื่อให้สามารถใช้งานต่อไปได้ ซึ่งโครงสร้างทางทั่วไปของถนนทางหลวงชนบทประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตหนา 0.05 m และพื้นทางหินคลุกหนา 0.20 m ทั้งนี้การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมใหม่กลับมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบในที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ที่ผ่านมานิยมขุดตัดผสมที่ความหนารวม 0.20 m

เนื่องจากผลกำลังของรถบดและเครื่องจักรรีไซเคิล ในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการกำหนดสัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมระหว่าง RAP และ RCR เท่ากับ 0.05 m และ 0.15 m หรือคิดเป็นสัดส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ ร้อยละ 25:75 โดยความหนา ในการเก็บตัวอย่างจะใช้เครื่องจักรชุดไสผิวถนน (Milling Machine) ซึ่งสมมติฐานคือ ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมไม่แตกต่างกัน เนื่องจากผลกำลังในการชุดตัดวัสดุเหมือนกันภายใต้ความหนา รวมที่เท่ากัน เพื่อให้สอดคล้องกับการรูปแบบการบำรุงรักษาถนนในปัจจุบัน และทดสอบหาสมบัติพื้นฐานของวัสดุ เพื่อกำหนดค่าตัวแปรต้นที่จะใช้ในการทดลองต่อไป โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 แบบจำลองความหนาชั้นโครงสร้างทางหลวงชนบทและความลึกในการชุดตัดผสมของเครื่องจักร

1) การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1.1) การทดสอบหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง ตามมาตรฐานที่ มทข. (ท) 501.8-2545 [30] เพื่อหาขนาดคละของวัสดุมวลรวมหายาบ (Gradation) คำนวณได้จากสมการที่ (1) เปรียบเทียบกับ มาตรฐานงานชั้นพื้นทาง ตาม มทข. 223-2545 [19] ดังตารางที่ 2

$$\text{ร้อยละผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

A คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด หน่วย g

B คือ น้ำหนักของตัวอย่างแห้งทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ หน่วย g

ตารางที่ 2 มาตรฐานขนาดคละของวัสดุชั้นพื้นทาง [19]

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	%Passing	
	ชนิด ก.	ชนิด ข.
2"	100	100
1"	-	75 - 95
3/8"	30 - 65	40 - 75
เบอร์ 4	25 - 55	30 - 60
เบอร์ 10	15 - 40	20 - 45
เบอร์ 40	8 - 20	15 - 30
เบอร์ 200	2 - 8	5 - 20

1.2) การทดสอบหาค่าความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ตามมาตรฐาน มทข. (ท) 501.2 – 2545 [31] เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของวัสดุรวมกับน้ำที่ใช้ในการบดอัด โดยความชื้นจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบดอัดส่วนผสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{1+(w/100)} \quad (2)$$

โดยที่

γ_d คือ ความแน่นแห้งของดิน หน่วย g/cm^3

γ_w คือ ความแน่นชื้นของดิน หน่วย g/cm^3

w คือ ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

2) การออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุผสม โดยใช้สัดส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75 ผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 โดยน้ำหนักของมวลรวม แ่งตัวอย่างจะถูกบดอัดแน่นโดยใช้ปริมาณความชื้น (OMC) ที่เหมาะสม แล้วทำการบ่มภายในถุงพลาสติก เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นระยะเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบ UCS ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 303-2545 [20] และ AASHTO T 208 [21] ดังรูปที่ 5 แล้วนำไปเขียนกราฟสมการเชิงเส้นตรงสองตัวแปร แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ และค่า UCS จากผลการกดแ่งตัวอย่างโดยมีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน จากนั้นเลือกปริมาณปูนซีเมนต์ ที่สามารถทำให้แ่งตัวอย่างมีค่า UCS เท่ากับ 17.50 kg/cm^2 ซึ่งเป็นค่าเป้าหมาย แล้วนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลขั้นต่อไป



(ก) บ่มแ่งตัวอย่างในถุงพลาสติก



(ข) กดแ่งตัวอย่างด้วยเครื่อง UCS

รูปที่ 5 การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวปรับปรุงคุณภาพปูนซีเมนต์

3) การทดสอบหาสมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) ด้วยการทดสอบชั้นสูง โดยนำสัดส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75 และปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมนำไปผสมแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำการทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกลดังต่อไปนี้

3.1) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Strength, UCS) ของชั้นพื้นทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ตามมาตรฐาน [20], [21] ด้วยเครื่องมือการทดสอบ UCS ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 101.6×116.4 mm แท่งตัวอย่างจะถูกบดอัดโดยวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน [31] และใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ทดสอบหลังจากการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน โดยทดสอบด้วยอัตราความเครียด (Strain Rate) ร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 ต่อนาที ค่ากำลังอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่าค่าเป้าหมาย 17.50 kg/cm^2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3, 4, 5) และรูปที่ 6

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

$$A_C = \frac{A}{1-\varepsilon} \quad (4)$$

$$\sigma_C = \frac{P}{A_C} \quad (5)$$

โดยที่

ε คือ ความเครียดตามแนวดิ่งที่น้ำหนักกดใด ๆ

L คือ การทรุดตัวในแนวดิ่งของแท่งตัวอย่างที่น้ำหนักกดใด ๆ อ่านได้จากมาตรวัด

L_0 คือ ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง หน่วย cm

A คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง หน่วย cm^2

A_C คือ พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปจากการคำนวณ หน่วย cm^2 (ดังสมการที่ 3 และ 4)

P คือ น้ำหนักกด หน่วย kg

σ_C คือ หน่วยแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สำหรับน้ำหนักกดใด ๆ หน่วย kg/cm^2



(ก) ผสมแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ในอัตราส่วนต่าง ๆ



(ข) กดแท่งตัวอย่างด้วยเครื่อง UCS

รูปที่ 6 การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน

3.2) การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) เพื่อหาสมบัติต้านทานแรงดึงของวัสดุประกอบ (Composite Material) ตามมาตรฐาน [22] ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ใช้แท่งตัวอย่างขนาด 50.0 x 101.6 mm บดอัดก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมด้านละ 75 ครั้ง ด้วยเครื่องบดอัดแบบอัตโนมัติ (Marshall Hammer Machine) แล้วทำการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน เตรียมแท่งตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25°C โดยให้แรงกระทำที่บนแท่งตัวอย่างบนระนาบเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งภายใต้อัตราความเร็วของหัวกด 50.8 mm/s จนกระทั่งแท่งตัวอย่างทลาย ดังรูปที่ 7 และบันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุดแล้วคำนวณค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม และดั่งสมการที่ (6)

$$ITS = \frac{2000P}{\pi DT} \quad (6)$$

โดยที่

ITS คือ ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม หน่วย KPa

P คือ ค่าน้ำหนักกดสูงสุด หน่วย N

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง หน่วย mm

T คือ ความหนาเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง หน่วย mm



(ก) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine



(ข) ทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

รูปที่ 7 การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

3.3) การทดสอบโมดูลัสคั้นตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus, ITSM) เพื่อประเมินโมดูลัสความแข็ง (Stiffness Modulus, SM) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อน้ำหนักมากระทำ โดยให้แรงกระทำในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน [23] ทดสอบด้วยเครื่อง UTM ใช้แท่งตัวอย่างขนาด 50.0 x 101.6 mm บดอัดก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมด้านละ 75 ครั้ง ด้วยเครื่อง Marshall Hammer แล้วทำการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน เตรียมแท่งตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25°C กำหนดอัตราการป้อนน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15 ของค่า ITS จากสมการ (6) โดยให้น้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที พัก 0.9 วินาที ในรูปแบบของ Haversine เครื่องจะทำการวัดการขยายตัวในแนวราบ (Horizontal Deformation) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำ ดังรูปที่ 8 แล้วทำการคำนวณค่าโมดูลัสความแข็ง ดังสมการที่ (7)

$$SM = \frac{P(0.273+v)}{\Delta ht} \quad (7)$$

โดยที่

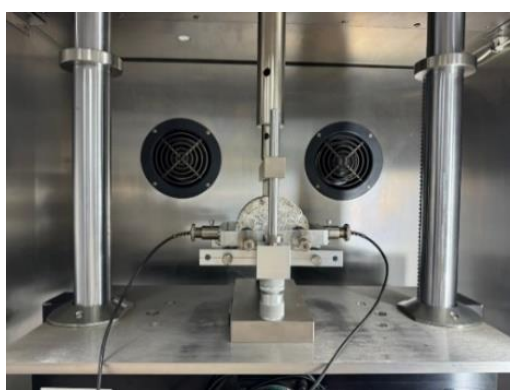
SM คือ โมดูลัสความแข็ง หน่วย kPa

P คือ ค่าสูงสุดของแรงกระทำตามแนวดิ่ง หน่วย N

v คือ อัตราส่วนปัวซอง

Δh คือ ค่าการเสียรูปในแนวนอน หน่วย m

t คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง หน่วย m



รูปที่ 8 การทดสอบโมดูลัสความแข็ง

3.4) การสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, RM) ตามมาตรฐาน [24] ทดสอบด้วยเครื่อง UTM ใช้แท่งตัวอย่างขนาด 101.6×200.0 mm แท่งตัวอย่างจะถูกบดอัดโดยวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน [31] และใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ทดสอบหลังจากการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน แล้วทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C โดยให้น้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที พัก 0.9 วินาที ในรูปแบบ Haversine ตามเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งในช่วงแรกเป็นการปรับสภาพของแท่งตัวอย่างด้วยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 1,000 ครั้ง จากนั้นทำการทดสอบจริงโดยแบ่งเป็น 15 ลำดับ แต่ละลำดับมีแรงดันด้านข้างและแรงกระทำซ้ำที่ต่างกันในแต่ละลำดับให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 100 ครั้ง ดังรูปที่ 9 โปรแกรมจะบันทึกผลการทดสอบ แล้วทำการคำนวณค่าโมดูลัส ดังสมการที่ (8)

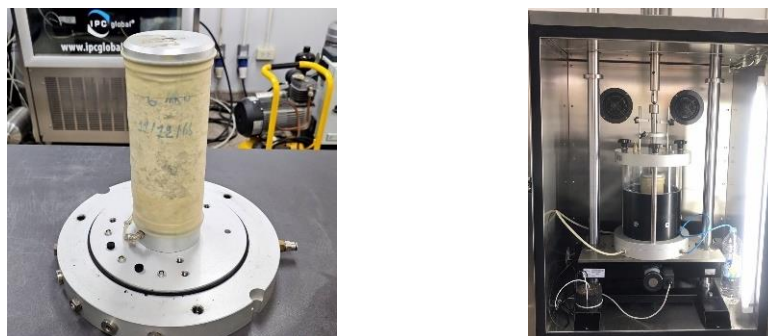
$$M_r = \frac{S_{cyclic}}{\epsilon_r} \quad (8)$$

โดยที่

M_r คือ โมดูลัสคืนตัว หน่วย kPa

S_{cyclic} คือ แรงที่กระทำในรูปแบบซ้ำในระหว่างการทดสอบ หน่วย kPa

ϵ_r คือ ความเครียดกลับคืน

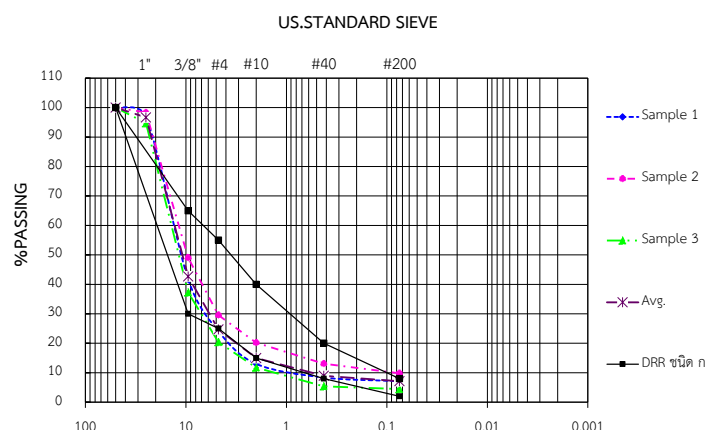


รูปที่ 9 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

5. ผลการวิจัย

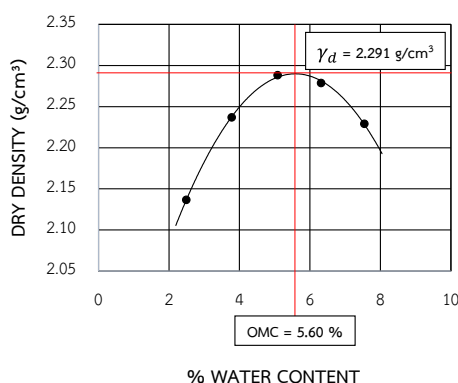
5.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1) ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ดังรูปที่ 10 พบว่า ตัวอย่างที่ 2 แสดงความแปรปรวนของการกระจายตัวที่สูงกว่าตัวอย่างที่ 1 และ 3 โดยเฉพาะในช่วงเม็ดขนาดกลางถึงเล็ก ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของวัสดุที่ละเอียดมากเกินไปในบางส่วน การเบี่ยงเบนเล็กน้อยของร้อยละผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เป็นเรื่องปกติของวัสดุมวลรวมรีไซเคิล โดยสาเหตุหลักมาจากการเกาะตัวของแอสฟัลต์เดิมที่เคลือบมวลรวมของวัสดุ RAP อยู่ การกระจายขนาดคละของวัสดุโดยรวมนั้น อยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการนำไปออกแบบเป็นวัสดุรีไซเคิล โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นเน้นย้ำถึงความแปรปรวนในพื้นที่ และผลกระทบของการเกาะตัวของแอสฟัลต์เดิมซึ่งจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงด้วยสารยึดเกาะในภายหลังเพื่อชดเชยช่องว่างของเม็ดมวลรวม ดังนั้น ตัวอย่างทั้งสามชุดมีแนวโน้มการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยการกระจายขนาดคละที่เข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุกชนิด ก. [19]



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมของอัตราส่วน RAP:RCR เท่ากับร้อยละ 25:75 กับมาตรฐานงานชั้นพื้นทาง

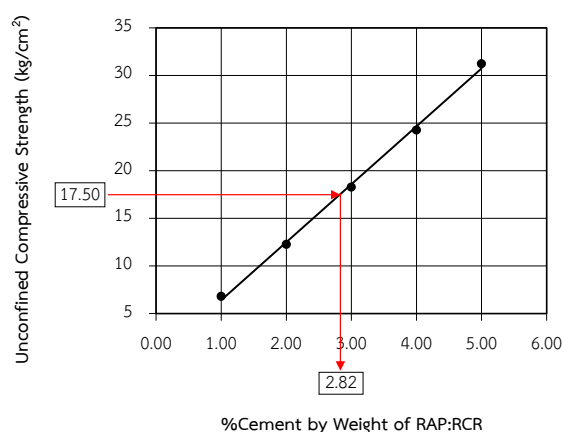
2) ความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดังรูปที่ 11 พบว่า ค่าความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.291 g/cm^3 โดยค่า OMC เท่ากับร้อยละ 5.60 ของสัดส่วนผสม RAP:RCR เท่ากับ 25:75 โดยจะนำค่า OMC ที่ได้จากการทดสอบนี้มาใช้เป็นค่าสำหรับการควบคุมปริมาณน้ำในการทดลองอื่น ๆ ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของอัตราส่วน RAP:RCR เท่ากับร้อยละ 25:75

5.2 ผลการออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุมวลรวม

จากรูปที่ 12 พบว่า ตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0 ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากก้อนตัวอย่างไม่มีความสามารถในการยึดเกาะ ทำให้ทลายในระหว่างขั้นตอนการแช่น้ำก่อนนำไปทดสอบ จึงไม่นำมาวิเคราะห์รวมในงานวิจัยนี้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า UCS เพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ และทำให้ค่าความแน่นแห้งของวัสดุมวลรวมสูงขึ้น อาจเป็นเพราะปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มน้ำหนักรวมของวัสดุมวลรวม และทำให้วัสดุมีการบีบอัดและการจัดเรียงที่ดีกว่า และผลการออกแบบนี้สรุปได้ว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2.82 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำให้วัสดุมวลรวมมีค่า UCS เท่ากับค่าเป้าหมาย โดยจะนำปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมนี้ไปใช้เป็นค่าสำหรับการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ในการทดลองอื่น ๆ ในการดำเนินงานวิจัยขั้นต่อไป ทั้งนี้ การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในวัสดุโครงสร้างทางเกินกว่าปริมาณที่เหมาะสม ทำให้วัสดุเหล่านั้นเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุแข็งเปราะ [5]

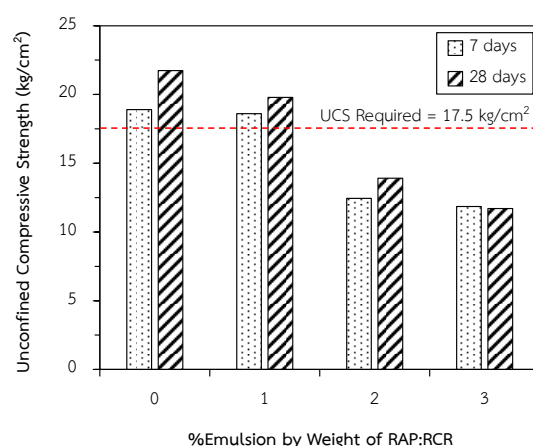


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วน RAP:RCR เท่ากับร้อยละ 25:75

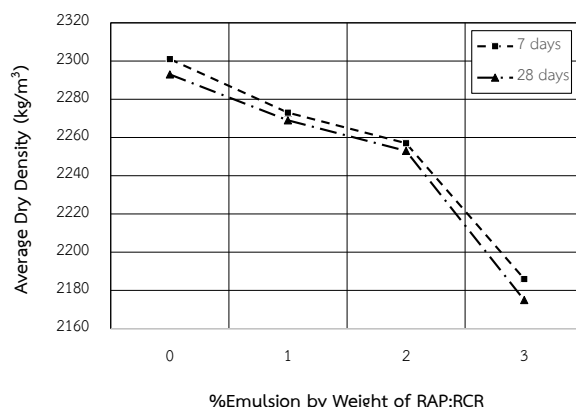
5.3 ผลการทดสอบหาสมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยการทดสอบขั้นสูง

1) ผลการทดสอบ UCS ดังรูปที่ 13 พบว่า ที่ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 และ 1 เมื่ออายุการบ่ม 7 และ 28 วันทำให้ค่า UCS ของก้อนตัวอย่างผ่านเกณฑ์เป้าหมาย เท่ากับ 17.50 kg/cm² เมื่อ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 และ 2 ทำให้ค่า UCS ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่าสูงกว่าที่อายุการบ่มตัว 7 วัน และปริมาณ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 3 กลับ

ส่งผลให้ค่า UCS ลดลง เป็นเหตุมาจาก CSS-1 เมื่อแตกตัวจะปล่อยสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ที่มีประจุบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ สารเหล่านี้จะทำหน้าที่เคลือบผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ และส่งผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น แม้ว่าแอสฟัลต์จะช่วยเพิ่มความยึดหยุ่น แต่ปริมาณ CSS-1 ที่สูงเกินไป จะสร้างฟิล์มแอสฟัลต์ที่หนาเกินไประหว่างเม็ดมวลรวม และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ซึ่งลดการยึดเกาะทางกายภาพ (Physical Bond) ของโครงสร้างซีเมนต์ ทำให้ UCS โดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และจากรูปที่ 14 พบว่า เมื่อปริมาณ CSS-1 เพิ่มขึ้น จะทำให้วัสดุมีค่าความแน่นแห้งลดลงและความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากแอสฟัลต์อิมัลชันมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่



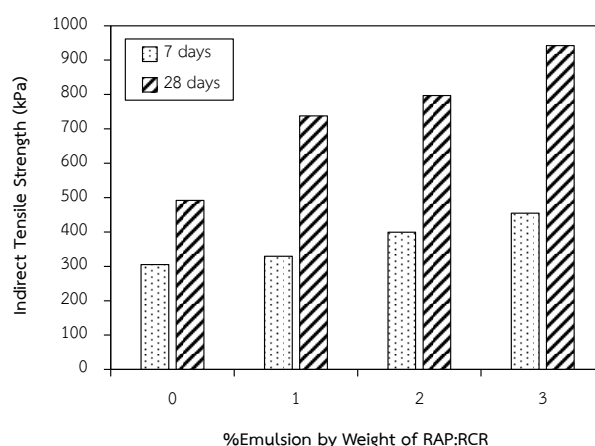
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม



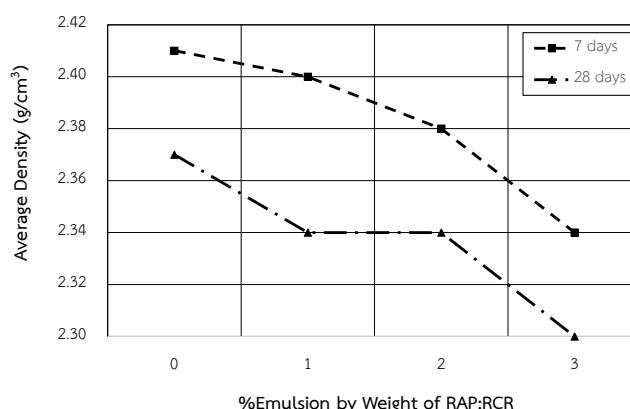
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อทดสอบ UCS

2) ผลการทดสอบ ITS ดังรูปที่ 15 พบว่า ค่า ITS เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณ CSS-1 ที่สูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุในด้านความต้านทานต่อการแตกร้าวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักการจราจรแบบไดนามิก การเพิ่มขึ้นของ ITS นี้เกิดจากกลไกการเชื่อมประสานของแอสฟัลต์ ฟิล์มแอสฟัลต์ที่มาจาก CSS-1 เมื่อแตกตัวและบ่มตัว จะสร้างแรงยึดเหนี่ยวที่ยืดหยุ่น (Flexible Bond) ที่มีประสิทธิภาพสูงระหว่าง

อนุภาควรรวมและโครงสร้างผลึก CSH Gel ที่เกิดจากปูนซีเมนต์ GU แรงยึดเหนี่ยวนี้จะช่วยชดเชยความเปราะ (Brittleness) ของวัสดุที่เสริมด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ทำให้วัสดุสามารถดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติได้มากขึ้น และจากรูปที่ 16 พบว่า ความแน่นแข็งของก้อนตัวอย่างแปรผกผันกับปริมาณ CSS-1 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณ CSS-1 ทำให้ความแน่นของวัสดุรวมลดลงและช่องว่างอากาศ (Air Void) เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CSS-1 เกิดการแตกตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันจากการระเหยของน้ำที่เป็นส่วนผสมหลัก โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าย่อมมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ต่ำไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบ UCS และเป็นไปในทิศทางเดียวกับ [13] อย่างไรก็ตาม การบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน ช่วยให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันสมบูรณ์ขึ้น



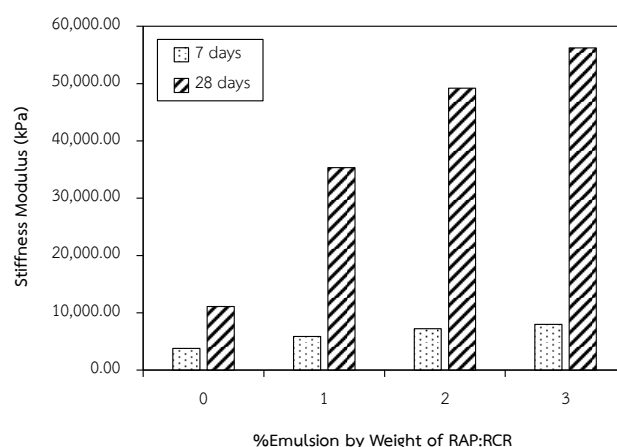
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงทางอ้อมและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม



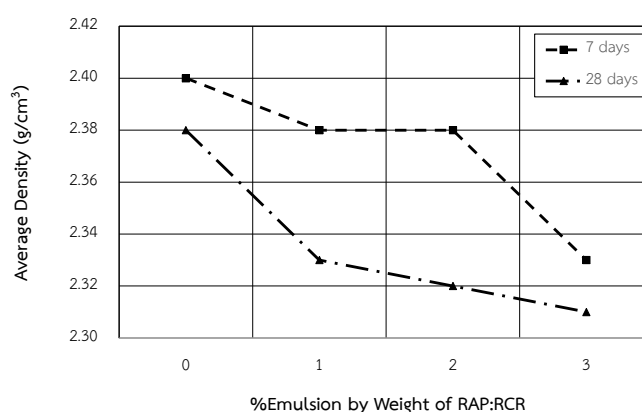
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแข็งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อทดสอบ ITS

3) ผลการทดสอบ ITSM แสดงไว้ในรูปที่ 17 ปริมาณ CSS-1 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่า SM อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่า วัสดุมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรงภายใต้แรงที่กระทำได้ดีขึ้น โดยปูนซีเมนต์จะสร้างความแข็งแกร่ง และ CSS-1 จะสร้างแรงยึดเหนี่ยวที่ยืดหยุ่น (Cohesion) ช่วยลดความเปราะและกระจายความเค้นได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่า ITS

แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพร่วมกับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและ CSS-1 ไม่แข็งแรงเกินไป เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงสมบัติด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 18 พบว่า แนวโน้มของความแน่นแข็งของก้อนตัวอย่างเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบ ITS ที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน การพัฒนากำลังของวัสดุมีความชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อผ่านการบ่มในระยะเวลา 28 วัน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสำคัญของเวลาในการให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและการก่อตัวของโครงสร้างจุลภาคเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



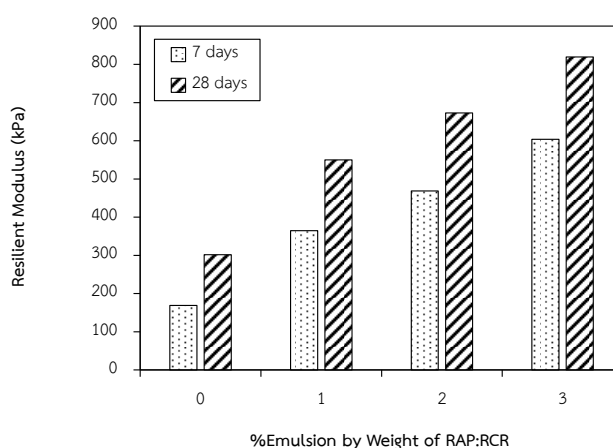
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความแข็งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแข็งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อทดสอบ ITS

4) ผลการทดสอบ RM แสดงไว้ในรูปที่ 19 พบว่า ค่า RM เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณ CSS-1 ที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในช่วงอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน โดยที่ปริมาณ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 3 ให้ค่า RM สูงสุดในทุกช่วงอายุการบ่ม บ่งชี้ถึงการปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นและความสามารถของวัสดุในการคืนตัวจากความเครียดกลับคืน (Recovery Strain) ภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) ซึ่งจำลองสภาวะการรับน้ำหนักจากการจราจรในการใช้งานจริง ค่า RM ที่สูงขึ้นสะท้อนถึงความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงกระทำจากภายนอก

และฟื้นคืนสภาพเดิมได้ดีในระหว่างการใช้งาน เนื่องจากฟิล์มแอสฟัลต์จะช่วยกระจายแรงเค้นที่กระทำต่อมวลรวมและโครงสร้างซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้วัสดุสามารถดูดซับและปลดปล่อยพลังงานความเครียดได้มากขึ้น โดยไม่เกิดความเสียหายถาวร ตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าตัวอย่างที่บ่ม 7 วัน ในทุกอัตราส่วนการผสม ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง และการบ่มตัวที่สมบูรณ์ของ CSS-1 ทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์มีความเหนียวแน่นและทำให้วัสดุมีสมบัติคืนตัวได้สูงสุด เห็นได้ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของ RM มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบ ITS และ ITSM อย่างมีนัยสำคัญ โดย ITS และ RM แสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นและความทนทานต่อความล้า และ SM แสดงให้เห็นถึงความต้านทานต่อการเสียรูปถาวร



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืนตัวและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เทากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม

6. สรุป

สรุปผลการศึกษาพบว่า การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ในอัตราส่วน RAP:RCR เทากับ 25:75 วัสดุมวลรวมมีการกระจายตัวเข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุก ชนิด ก. โดยมีความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.291 g/cm^3 และความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 5.60 เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 2.82 โดยน้ำหนักของมวลรวม และแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของมวลรวม สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลได้อย่างมีนัยสำคัญ ในมิติความแข็งแรงและความทนทาน CSS-1 ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสร้างพันธะยึดเกาะแบบยืดหยุ่น (Flexible Cohesive Bond) ที่ช่วยกระจายแรงดึงและชดเชยความเปราะที่เกิดจากปูนซีเมนต์ ทำให้วัสดุสามารถทนทานต่อการขยายตัวและหดตัวได้ดีขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบ ITS ITSM และ RM แสดงให้เห็นว่า วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวจากความล้าและฟื้นคืนสภาพเดิมภายใต้ภาระพลวัต (Dynamic Load) ได้ดี และจากผลการทดสอบ UCS แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ CSS-1 ที่สูงขึ้นเกินกว่าร้อยละ 1 ส่งผลให้ UCS ลดลงต่ำกว่าเกณฑ์เป้าหมายคือ 17.50 kg/cm^2 เนื่องจากน้ำที่เป็นส่วนผสมหลัก ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลงและช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น รวมถึงการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ถูกจำกัด ซึ่งทำให้วัสดุขาดความแข็งแรงเชิงโครงสร้างที่จำเป็นสำหรับชั้นพื้นทาง นอกจากนี้ ระยะเวลาการบ่มวัสดุที่ 28 วัน มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกล เนื่องจากจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและการรวมตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ วัสดุมวลรวมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพจากการศึกษานี้ มีศักยภาพในการนำไปใช้งานก่อสร้างจริงในการบำรุงรักษาทางหลวงชนบทด้วยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุ

ชั้นพื้นทางของประเทศไทย เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการบำรุงรักษาดนแบบเดิม และสอดคล้องกับแนวคิดการก่อสร้างที่ยั่งยืนจากการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU และการนำวัสดุเดิมกลับมาใช้ซ้ำต่อไป

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ควรทำการทดสอบความทนทานต่อความล้า (Fatigue Life) ภายใต้แรงดิ่งซ้ำ เพื่อประเมินอายุการใช้งานจริงของชั้นพื้นทางภายใต้ภาระจราจรแบบวัฏจักร และควรศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเพิ่มเติม เพื่อให้ได้แบบจำลองพฤติกรรมวัสดุที่ถูกต้องตามสภาพภูมิอากาศจริง

7.2 ควรดำเนินการวิเคราะห์เชิงจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM) และเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อสังเกตโครงสร้างของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H Gel) และการกระจายตัวของฟิล์มแอสฟัลต์ที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานในระดับอนุภาค

7.3 เนื่องจากอายุการบ่ม 28 วัน ยังไม่สะท้อนพฤติกรรมในระยะยาว ควรขยายระยะเวลาการบ่มวัสดุเพื่อประเมินการพัฒนาความแข็งแรงในระยะยาว และควรทดลองนำร่องในภาคสนาม เพื่อยืนยันสมรรถนะเชิงโครงสร้างในสภาพการใช้งานจริง

7.4 จากการศึกษาพบว่า CSS-1 ทำให้ความแน่นแห้งลดลงเนื่องจากน้ำที่เป็นส่วนผสมหลัก ควรทดลองการใช้สารลดน้ำ (Water-Reducing Admixtures) หรือสารกระตุ้นการแตกตัวแบบรวดเร็ว (Fast-Breaking Additives) ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และ CSS-1 เพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการบดอัด ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าความแน่นแห้งและลดช่องว่างอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบดอัดโดยไม่ลดทอนสมบัติเชิงกล

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่และวิศวกร สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 13 (ฉะเชิงเทรา) กรมทางหลวงชนบท ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการและการเก็บข้อมูล สนับสนุนข้อมูลและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงบประมาณของรัฐบาล, *แนวทางการพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งของประเทศ*, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร, 2562, หน้า 1–2. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://web.parliament.go.th/assets/portals/82/news/452/1_452.pdf
- [2] U.S. Department of Transportation, *Basic Asphalt Recycling Manual*, Glen Ellyn, IL, US: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), 2001, pp. 1–7. [Online]. Available: <https://apps.itd.idaho.gov/apps/manuals/Materials/Materials%20References/BasicAsphaltRecyclingManual.pdf>
- [3] *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*, ASTM D 8-12, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, pp. 1–3. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d0008-12.html>
- [4] *Standard Specification for Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses*, AASHTO M 147, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2017, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://store.transportation.org/item/publicationdetail/3851>

- [5] ชิตินทรีย์ โสภณพงษ์, “การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางผสมซีเมนต์ด้วยวิธีทดสอบดินด้านพลศาสตร์,” วศ.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2560.
- [6] B. Dotzycki and P. Jaskuła, “Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 6, no. 4, pp. 311–323, May 2019, doi: 10.1016/j.jtte.2019.02.002.
- [7] J. Yan, Z. Leng, F. Li, H. Zhu, and S. Bao, “Early-age strength and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixes with various cement contents,” *Construction and Building Materials*, vol. 137, pp. 153–159, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.114.
- [8] T. Ma, H. Wang, Y. Zhao, X. Huang, and Y. Pi, “Strength mechanism and influence factors for cold recycled asphalt mixture,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, pp. 1–10, Sep. 2015, Art. no. 181853, doi: 10.1155/2015/181853.
- [9] ธัญรดี ก่อตั้งสัมพันธ์, “การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น,” วศ.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2552.
- [10] L. Kiihl and A. F. Braham, “Developing a particle size specification for asphalt emulsion,” *construction and building materials*, vol. 293, pp. 1-10, May 2021, Art. no. 123414, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123414.
- [11] วรุช เลิศไพฑูริย์, “การปรับปรุงผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง,” วศ.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2557. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://digiverse.chula.ac.th/Info/item/dc:42433>
- [12] B. Dotzycki, M. Jaczewski, and C. Szydlowski, “The impact of long-time chemical bonds in mineral-cement-emulsion mixtures on stiffness modulus,” *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 121–126, 2018, doi: 10.7250/bjrbe.2018-13.406.
- [13] Y. Li, Y. Lyv, L. Fan, and Y. Zhang, “Effects of cement and emulsified asphalt on properties of mastics and 100% cold recycled asphalt mixtures,” *Materials*, vol. 12, no. 5, Mar. 2019, Art. no. 754, doi: 10.3390/ma12050754.
- [14] P. Nanthavisit, “Development of cement-asphalt emulsion mixture for Thailand road rehabilitation,” Ph.D. dissertation, D.Eng. (Civil Engineering), Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2020.
- [15] จักรพงษ์ วงศ์คำจันทร์ และคณะ, “คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน,” ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, จังหวัดภูเก็ต, 24–26 พฤษภาคม 2566, หน้า 1–6. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://www.conference.thaince.org/index.php/ncce28/article/download/2287/1430>
- [16] เมธากุล มีธรรม และ วรภูมิ เบญจโอฬาร, “การเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากงานก่อสร้างถนนโดยการเลือกเทคนิคการก่อสร้างที่ต่างกัน,” *วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 1–9, ก.ค. – ธ.ค. 2559.
- [17] Y. Yang, Y. Yang, and B. Qian, “Performance and microstructure of cold recycled mixes using asphalt emulsion with different contents of cement,” *Materials*, vol. 12, no. 16, Aug. 2019, Art. no. 2548, doi: 10.3390/ma12162548.

- [18] G. Flores, J. Gallego, L. Miranda and J. R. Marcobal. "Cold asphalt mix with emulsion and 100% RAP: Compaction energy and influence of emulsion and cement content." *Construction and Building Materials*, Vol. 250, Mar. 2020, Art. no. 118804, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118804.
- [19] มทข.223-2545 มาตรฐานงานชั้นพื้นทาง (Base), สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, ปทุมธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2559, หน้า 94–95.
- [20] มทข.(ท) 303-2545 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว (UNCONFINED COMPRESSION TEST), สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, ปทุมธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2559, หน้า 272–280.
- [21] *Standard Method of Test Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, AASHTO T 208-15, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2015, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://store.transportation.org/Item/PublicationDetail?ID=5493>
- [22] *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures*, ASTM D6931-17, West Conshohocken, PA, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d6931-17.html>
- [23] *Standard Method of Test for Resilient Modulus of Asphalt Mixtures*, AASHTO TP 31-96, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1996, pp. 380–409. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/475728404/AASHTO-TP31-Resilient-modulus-of-bituminous-mixtures-by-indirect-tension-pdf>
- [24] *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*, AASHTO T 307-99 (2007), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, 2007, pp. 1–42. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/733275991/AASHTO-T307-99-Determination-of-Resilient-Modulus>
- [25] Wirtgen GmbH, *Wirtgen Cold Recycling Technology*, 1st ed. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2012, pp. 73–98. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Kim-Jenkins-4/publication/327738860_Recommendation_of_RILEM_TC237-SIB_on_cohesion_test_of_recycled_asphalt/links/5bab48b445851574f7e65b40/Recommendation-of-RILEM-TC237-SIB-on-cohesion-test-of-recycled-asphalt.pdf
- [26] สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA), *ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก หนึ่งในมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยตามข้อตกลงปารีส*, ฉบับปรับปรุง. กรุงเทพฯ: สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA), 2565, หน้า 1–20. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://shorturl.at/oHE7U>
- [27] วชิรินทร์ วิทยกุล, *ยางมะตอยน้ำสำหรับงานถนน*, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548, หน้า 1–33.
- [28] *แคตอิกอนิกแอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับถนน*, มอก. 371-2530, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 2530, หน้า 1–16.
- [29] *ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก*, มอก. 2594-2556, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 2556, หน้า 1–10. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://a.tisi.go.th/t/?n=8133>
- [30] *วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis)*, มทข. (ท) 501.8-2545, สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, กรุงเทพฯ, 2559, หน้า 57–62.

- [31] วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (*Modified Compaction Test*), มทช. (ท) 501.2-2545, สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, กรุงเทพฯ, 2559, หน้า 10–17.