

ชั้นพื้นทางจากส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์นำกลับมาใช้ใหม่และดินลูกรังผสมกับซีเมนต์

BASE DERIVED FROM RAP AND LATERITIC SOIL MIXED WITH CEMENT

วรงค์ เสาวนีย์พิทักษ์^{1*}, ภาณุ พร้อมพุทธานกู²

Warong Saowaneevitak^{1*}, Panu Promputthangkoon²

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Graduate Student, Master of Engineering Program Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Master of Engineering Program Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ Corresponding author; E-mail Address: warong.srt@gmail.com

วันที่รับบทความ: 31 มีนาคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 13 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 15 เมษายน 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการพัฒนาการกำลังอัดและสมรรถนะด้านความคงทนของวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรัง วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุนวัตกรรมในงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง 2) วิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด 3) ประเมินความสอดคล้องของคุณสมบัติวัสดุผสมเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานงานทางของกรมทางหลวงชนบท และ 4) เพื่อสังเคราะห์ข้อมูลสนับสนุนทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคสำหรับการนำวัสดุหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ไปปฏิบัติงานจริงในเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้าง วิธีการดำเนินงานวิจัยใช้การทดสอบทางวิศวกรรมเชิงปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการ โดยเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมในอัตราส่วน RAP ต่อดินลูกรังที่ร้อยละ 100:0 0:100 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 1.5 3 และ 4.5 โดยน้ำหนัก กระบวนการทดสอบประกอบด้วยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) เพื่อวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด การทดสอบอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่ออธิบายกลไกการยึดประสานทางเคมี ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนผสมของชุดตัวอย่าง C (RAP ต่อดินลูกรัง 90:10) และชุดตัวอย่าง D (RAP ต่อดินลูกรัง 80:20) เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 สามารถพัฒนาค่า CBR ได้ถึงร้อยละ 152.52 และ 148.87 ตามลำดับ ซึ่งมีสมรรถนะสูงกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานชั้นพื้นทางกำหนดไว้อย่างชัดเจน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการบูรณาการวัสดุเหลือทิ้งจากผิวทางร่วมกับปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกและเป็นทางเลือกนวัตกรรมที่ช่วยเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรในอุตสาหกรรมงานทางให้เกิดประโยชน์สูงสุด

คำสำคัญ: วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่, ปูนซีเมนต์, คุณสมบัติเชิงกล, โครงสร้างจุลภาค, ดินลูกรัง

Abstract: This research aims to: 1) study the development of compressive strength and durability performance of composite mixtures consisting of lateritic soil, Recycled Asphalt Pavement (RAP), and Portland cement type 1 for application as an innovative material in pavement base course construction; 2) analyze the engineering influence of controlled variables, including RAP content, optimum moisture content, cement content, and curing period, on the development of mechanical properties; 3) evaluate the compliance of the mixture properties compared to the pavement standards of the Department of Rural Roads; and 4) synthesize engineering and microstructural supporting data for the practical implementation of recycled materials in the construction industry. The research methodology utilized laboratory engineering tests by preparing mixture samples with RAP to lateritic soil weight ratios of 100:0, 0:100, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, and 50:50, and stabilized with cement at 0%, 1.5%, 3%, and 4.5% by weight. The testing process included modified compaction to determine maximum dry density and optimum moisture content, California Bearing Ratio (CBR) testing, and microstructural analysis using X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) to explain chemical bonding mechanisms. The research results revealed that the mixtures of Sample Set C (90:10 RAP to lateritic soil) and Sample Set D (80:20 RAP to lateritic soil), when stabilized with 3% cement, achieved CBR values of 152.52% and 148.87%, respectively, which significantly exceed the criteria specified by pavement base standards. This study demonstrates that integrating recycled pavement waste with cement enhances load-bearing efficiency and serves as an innovative alternative that adds value to waste materials for optimal resource management in the road construction industry.

Keywords: Recycled asphalt pavement, Cement, Mechanical properties, Microstructure, Lateritic soil

1. บทนำ

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกส่งผลกระทบต่อความต้องการใช้งานระบบสาธารณูปโภคพื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงข่ายการคมนาคมขนส่งทางถนนซึ่งเป็นเส้นเลือดใหญ่ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ประเทศไทยซึ่งมีประชากรสูงเป็นอันดับที่ 20 ของโลกคิดเป็นประมาณร้อยละ 0.9 ของประชากรโลก (แผนกประชากร สำนักงานสังคมและเศรษฐกิจแห่งประชาชาติ 19 มีนาคม 2565) กำลังเผชิญกับความท้าทายจากการขยายตัวของปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สภาพทางหลวงที่ถูกออกแบบไว้ในอดีตจึงไม่สามารถรองรับความต้องการใช้งานในสภาวะปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โครงสร้างทางเกิดการเสื่อมสภาพก่อนครบอายุการใช้งานเชิงวิศวกรรม ความเสียหายที่พบโดยทั่วไปประกอบด้วย การหลุดร่อนของผิวทาง การเกิดร่องล้อจากการสะสมความเครียด และรอยแตกรูปแบบ

ต่าง ๆ ซึ่งหากขาดการวางแผนการบำรุงรักษาที่ถูกต้องและรวดเร็ว ความเสียหายดังกล่าวจะขยายวงกว้างและลดทอนความปลอดภัยในการสัญจร แม้ในปัจจุบันจะมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการก่อสร้างและซ่อมแซมถนนที่หลากหลาย แต่ข้อจำกัดด้านงบประมาณ ระยะเวลา และการขาดแคลนวัสดุก่อสร้างที่ได้มาตรฐานในบางพื้นที่ยังคงเป็นอุปสรรคสำคัญที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐาน [1], [2]

แนวทางการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) [3] เป็นกลยุทธ์ทางเทคโนโลยีที่ได้รับการสนใจอย่างกว้างขวางเพื่อแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ด้านวัสดุ ปัจจุบันกรมทางหลวงชนบทได้นำแนวทางนี้มาใช้ในการบำรุงรักษาถนนโดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ การนำวัสดุไปผสมใหม่ที่โรงงานผลิต (In-plant recycling) และการหมุนเวียนวัสดุกลับมาใช้ในพื้นที่ก่อสร้าง (In-place recycling)

กระบวนการซ่อมแซมถนนด้วยวิธีนี้มักมีการขุดไส (Milling) ผิวทางเดิมทิ้งเพื่อเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพชั้นทางใหม่จากการรวบรวมข้อมูลในโครงการซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่รับผิดชอบของแขวงทางหลวงชนบทปัตตานีพบว่ากระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากซึ่งมักถูกนำไปกองทิ้งโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาในงานวิจัยหลายฉบับระบุถึงศักยภาพในการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการซ่อมแซมถนนมาพัฒนาเป็นส่วนประกอบของชั้นโครงสร้างทางที่มีสมรรถนะสูง [4], [5], [6] ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นความสำคัญในการนำเศษวัสดุเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เป็นนวัตกรรมวัสดุสำหรับชั้นพื้นทางเพื่อเพิ่มมูลค่าทางอุตสาหกรรม

ปัญหาสำคัญในการก่อสร้างทางในภูมิภาคที่ห่างไกลคือการขาดแคลนแหล่งวัสดุธรรมชาติที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตรงตามมาตรฐาน การขนส่งวัสดุจากแหล่งอื่นที่มีระยะทางไกลส่งผลให้ต้นทุนรวมและระยะเวลาดำเนินการเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ประกอบกับข้อจำกัดในการจัดการพื้นที่กักเก็บเศษวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement หรือ RAP) [7], [8], [9], [10] ปัจจุบัน RAP ได้รับการยอมรับในการนำมาเป็นวัสดุผสมรวมทดแทนเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีปริมาณเพียงพอในพื้นที่งานทาง การบูรณาการ RAP ร่วมกับดินลูกรังและปูนซีเมนต์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการเพิ่มกำลังอัดและการยึดประสานของโครงสร้างวัสดุผสม [11], [12], [13], [14] สำหรับในประเทศไทย การนำเทคโนโลยีดินซีเมนต์มาใช้งานทางเริ่มต้นตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2508 โดยมีการทดลองนำดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพและขีดความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นพื้นทาง

ด้วยเหตุผลด้านการบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งเชิงอุตสาหกรรมและข้อจำกัดของทรัพยากรธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนานวัตกรรมวัสดุผสมที่สามารถตอบโจทย์การใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการพัฒนา กำลังอัดและสมรรถนะความคงทนของวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรัง วัสดุ RAP และปูนซีเมนต์ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมเชิงลึกสำหรับงาน

ชั้นพื้นทาง โดยพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนปริมาณ RAP ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม ปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่มตัวที่มีต่อวิวัฒนาการกำลังอัด ผลการศึกษาที่ได้จะถูกนำไปประเมินเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบทเพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนเชิงเทคนิคในการส่งเสริมการใช้วัสดุทางเลือกในระดับอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ดินซีเมนต์ (Soil cement) ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงของถนน ลดต้นทุนการจัดหาวัสดุ และลดงบประมาณการขนส่งได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังช่วยปรับระดับความสูงของชั้นทางและเปลี่ยนผิวถนนที่ชำรุดให้มีความราบเรียบและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น [15], [16], [17], [18], [19] การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในดินลูกรังที่สัดส่วนร้อยละ 2 - 5 ตามคำแนะนำของกรมทางหลวงชนบทถือเป็นแนวทางที่คุ้มค่าและลดระยะเวลาการดำเนินงานในกรณีเร่งด่วน การวิจัยนี้จึงเป็นการต่อยอดเพื่อแก้ปัญหาการจัดการ RAP และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานวัสดุผสมในพื้นที่ห่างไกลให้เกิดประโยชน์สูงสุด [20], [21], [22]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัดและความคงทนของวัสดุผสมระหว่างดินลูกรัง วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง

2.2 เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปริมาณ RAP ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่ม ที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสม

2.3 เพื่อประเมินและเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมกับมาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท

2.4 เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนทางวิศวกรรมในการนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานจริงและเป็นทางเลือกนวัตกรรมสำหรับงานก่อสร้างทาง

3. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ผู้วิจัยได้วางกรอบและขอบเขตของการศึกษาโดยครอบคลุมปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านตัวแปรที่ศึกษา การศึกษาครั้งนี้กำหนดตัวแปรต้นคืออัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) โดยน้ำหนักที่อัตราส่วน 100:0, 0:100, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 0, 1.5, 3 และ 4.5 โดยน้ำหนักสำหรับตัวแปรตามคือคุณสมบัติทางวิศวกรรมเชิงกลและลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม

3.2 ขอบเขตด้านวัสดุที่ใช้ในการวิจัย วัสดุหลักที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมประกอบด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) ซึ่งรวบรวมจากการรื้อและขุดไผ่ผิวทางในโครงการซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดปัตตานี โดยนำมาย่อยและร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐานเพื่อคัดขนาดเศษที่ไม่เหมาะสมออก วัสดุดินลูกรังจัดหาจากบ่อยืมในพื้นที่จังหวัดปัตตานี ซึ่งผ่านการประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นตามเกณฑ์มาตรฐานวัสดุรองพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder)

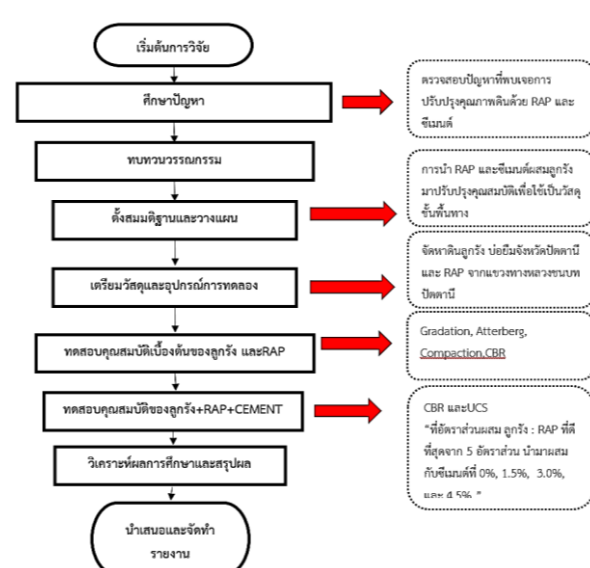
3.3 ขอบเขตด้านการทดสอบและตัวชี้วัด งานวิจัยนี้ประเมินคุณสมบัติของวัสดุผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการแขวงทางหลวงชนบทปัตตานี โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนหลักคือ การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลซึ่งประกอบด้วย การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Grain size analysis) การหาค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limits) การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสม และการทดสอบค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) อีกส่วนหนึ่งคือการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.4 ขอบเขตด้านมาตรฐานการอ้างอิง กระบวนการวิเคราะห์ผลและการประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมจะดำเนินการโดยอ้างอิงและตรวจสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานวัสดุงานทางของกรมทางหลวงชนบท (ทล.ฉ.) เพื่อพิจารณาและยืนยันประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของวัสดุว่ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเป็นวัสดุชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างทางต่อไป

4. วิธีดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยมุ่งเน้นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์และวัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement หรือ RAP) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อประเมินศักยภาพในการนำมาใช้งานทดแทนวัสดุหินคลุกซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ยากในพื้นที่จังหวัดปัตตานี กระบวนการทดสอบครอบคลุมทั้งคุณสมบัติดัชนีพื้นฐานและสมรรถนะด้านการรับกำลังเพื่อกำหนดอัตราส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการก่อสร้างชั้นพื้นทาง โดยลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การรวบรวมข้อมูลทฤษฎีจนถึงการสรุปผลการศึกษาปรากฏรายละเอียดดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.1 วัสดุและคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ดินลูกรัง การศึกษาเริ่มต้นจากการสำรวจและรวบรวมวัสดุดินลูกรังจากบ่อขุดในเขตพื้นที่จังหวัดปัตตานี เพื่อใช้เป็นมวลรวมหลักในส่วนผสม โดยนำมาเตรียมตัวอย่างตามมาตรฐานเพื่อผสมร่วมกับวัสดุ RAP และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามสัดส่วนที่กำหนดเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมเชิงกล

4.1.2 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ วัสดุ RAP ที่นำมาศึกษาได้จากโครงการซ่อมสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดปัตตานี ผู้วิจัยดำเนินการเตรียมวัสดุด้วยการย่อยและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 3 นิ้วเพื่อให้ได้ขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบบดอัด จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) โดยอาศัยวิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) ตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.2-2545 [28] ทั้งนี้มีการแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 1.5, 3.0 และ 4.5 โดยน้ำหนัก โดยจำกัดปริมาณไม่ให้เกินร้อยละ 4.5 เพื่อควบคุมและลดโอกาสการเกิดรอยแตกจากการหดตัว (Shrinkage crack) อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของปูนซีเมนต์ที่สูงเกินไป [20], [21], [22]

4.1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาอ่อนและมีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ถูกนำมาใช้เป็นสารเชื่อมประสานหลัก (Binder) คุณสมบัติการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมทำให้วัสดุผสมมีกำลังอัดสูงขึ้นและสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ดียิ่งขึ้น [18], [19] โดยสัดส่วนการผสมสำหรับชุดการทดสอบต่าง ๆ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของแต่ละชุดการทดสอบที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	อัตราส่วนผสม (ดินลูกรัง : RAP)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)
ชุด A	100 : 0	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด B	0 : 100	0, 1.5, 3 และ 4.5

ลำดับ	อัตราส่วนผสม (ดินลูกรัง : RAP)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)
-------	--------------------------------	---------------------------

ชุด C	90 : 10	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด D	80 : 20	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด E	70 : 30	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด F	60 : 40	0, 1.5, 3 และ 4.5
ชุด G	50 : 50	0, 1.5, 3 และ 4.5

จากรายละเอียดในข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการกำหนดสัดส่วนของตัวแปรที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบอย่างเป็นระบบเพื่อประเมินพฤติกรรมทางวิศวกรรมของวัสดุผสม โดยแบ่งชุดการทดสอบออกเป็น 7 ชุดหลัก ได้แก่ชุด A ถึงชุด G ซึ่งชุด A ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมที่ใช้ดินลูกรังร้อยละ 100 และชุด B เป็นชุดที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) ร้อยละ 100 สำหรับชุด C ถึงชุด G เป็นการผสมวัสดุ RAP เพื่อทดแทนดินลูกรังในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นตามลำดับตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในทุกอัตราส่วนผสมยังได้ทำการแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานที่ระดับร้อยละ 0, 1.5, 3 และ 4.5 โดยน้ำหนัก การออกแบบอัตราส่วนการทดสอบที่ครอบคลุมความหลากหลายของตัวแปรทั้งปริมาณ RAP และปริมาณปูนซีเมนต์นี้ จะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของวัสดุที่มีต่อการพัฒนา กำลังอัดและประสิทธิภาพการรับน้ำหนักได้อย่างละเอียดถี่ถ้วน เพื่อค้นหาสัดส่วนที่มีความเหมาะสมสูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเชิงนวัตกรรม ซึ่งตัวแปรและเงื่อนไขการทดสอบทั้งหมดมีความสอดคล้องตามรายละเอียดที่ปรากฏในตารางที่ 1

4.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในห้องปฏิบัติการ

4.2.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ การวิเคราะห์ขนาดเม็ดวัสดุหรือการทดสอบขนาดคละเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการประเมินลักษณะทางกายภาพของวัสดุงานทางเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการบดอัด กำลังแรงเฉือน และสมบัติการซึมผ่านของน้ำ โดยกระบวนการ

ทดสอบมุ่งเน้นการกำหนดการกระจายตัวของขนาดมวลรวมเพื่อใช้ในการจำแนกประเภทวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D421 [23], [24] และเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ข้อมูลที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานยังถูกนำไปใช้เป็นตัวชี้สำคัญสำหรับการออกแบบส่วนผสมในชั้นโครงสร้างทางทั้งชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และชั้นผิวทาง เพื่อให้วัสดุผสมมีโครงสร้างที่หนาแน่น มีลักษณะการกระจายขนาดเม็ดที่เหมาะสม (Well-graded) ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคสามารถจัดเรียงตัวและถ่ายแรงระหว่างเม็ดวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.2.2 การหาค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก การทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กเป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการจำแนกประเภทและประเมินพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินที่มีอนุภาคละเอียด (Fine-grained soil) โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียวและดินตะกอนซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นพลาสติกและของเหลวเมื่อมีความชื้นเปลี่ยนแปลงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.5-2545 และ ทล.ฉ. 501.6-2545 [25], [26], [27] การทดสอบนี้มีเป้าหมายหลักในการกำหนดค่าดัชนีสำคัญได้แก่ ขีดจำกัดของเหลว (Liquid limit) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และดัชนีพลาสติก (Plasticity index) ข้อมูลดังกล่าวช่วยให้ผู้วิจัยสามารถประเมินพฤติกรรมของวัสดุในสภาวะที่มีความชื้นเปลี่ยนแปลง โดยหากวัสดุมีค่าขีดจำกัดของเหลวสูงอาจมีแนวโน้มเกิดการพองตัวและทรุดตัวเมื่อเปียกน้ำ หรือหากมีค่าดัชนีพลาสติกสูงอาจเกิดการเสียรูปเมื่อถูกบดอัด ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปตรวจสอบกับเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางที่มักควบคุมค่าขีดจำกัดของเหลวให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยเพื่อความเสถียรของโครงสร้างทาง

4.2.3 การทดสอบการบดอัด การบดอัดเป็นกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นให้แก่โครงสร้างวัสดุผสมโดยการให้พลังงานกลด้วยวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction) ตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.2-2545 [28] เพื่อไล่อากาศออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินและมวลรวม RAP วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบคือการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุผสมแต่ละอัตราส่วน เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด

(Maximum dry density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (Optimum moisture content) กระบวนการนี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ลดอัตราการยุบตัวของโครงสร้างทาง และลดสมบัติการซึมผ่านของน้ำ โดยผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรควบคุมที่สำคัญสำหรับการเตรียมตัวอย่างในระดับร้อยละ 95 ของการบดอัดสูงสุดเพื่อหาค่ากำลังรับแบกทานเชิงวัฏกรรมในลำดับถัดไป

4.2.4 การหาค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก การทดสอบค่าซีบีอาร์เป็นเกณฑ์มาตรฐานสากลที่ใช้ในการประเมินกำลังและสมรรถนะการรับแรงของวัสดุผสมผสมสำหรับงานวิศวกรรมทางหลวงชนบทตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.3-2545 [29] โดยเป็นการวัดความแข็งแรงของตัวอย่างวัสดุที่ผ่านการบดอัดในห้องปฏิบัติการและนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับกำลังรับแบกทาน (Bearing capacity) ภายใต้น้ำหนักกดกับกำลังมาตรฐาน ณ ค่าระยะยุบตัวที่กำหนด การทดสอบนี้ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์แรงเฉือนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และประเมินอัตราการบวมตัว (Swelling) ของตัวอย่าง เพื่อจัดลำดับความเหมาะสมของวัสดุผสมแต่ละชุดว่ามีประสิทธิภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในชั้นวัสดุคัตเลือก ชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทางได้อย่างปลอดภัย

4.2.5 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ การวิเคราะห์ในระดับจุลภาคอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุหลังการผสมด้วยปูนซีเมนต์ [30], [31] ประกอบด้วยการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีโดยละเอียด การใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD) เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางแร่ธาตุและโครงสร้างผลึก รวมถึงการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา รูปทรงของผลึก และการจัดเรียงตัวของอนุภาค ข้อมูลเชิงลึกเหล่านี้มีความสำคัญในการใช้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การเกิดสารประกอบเจลซิลิเกตที่ช่วยในการยึดเกาะ และ

พฤติกรรมการพัฒนาที่กำลังเกิดขึ้นภายในวัสดุผสมได้อย่าง มีหลักการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

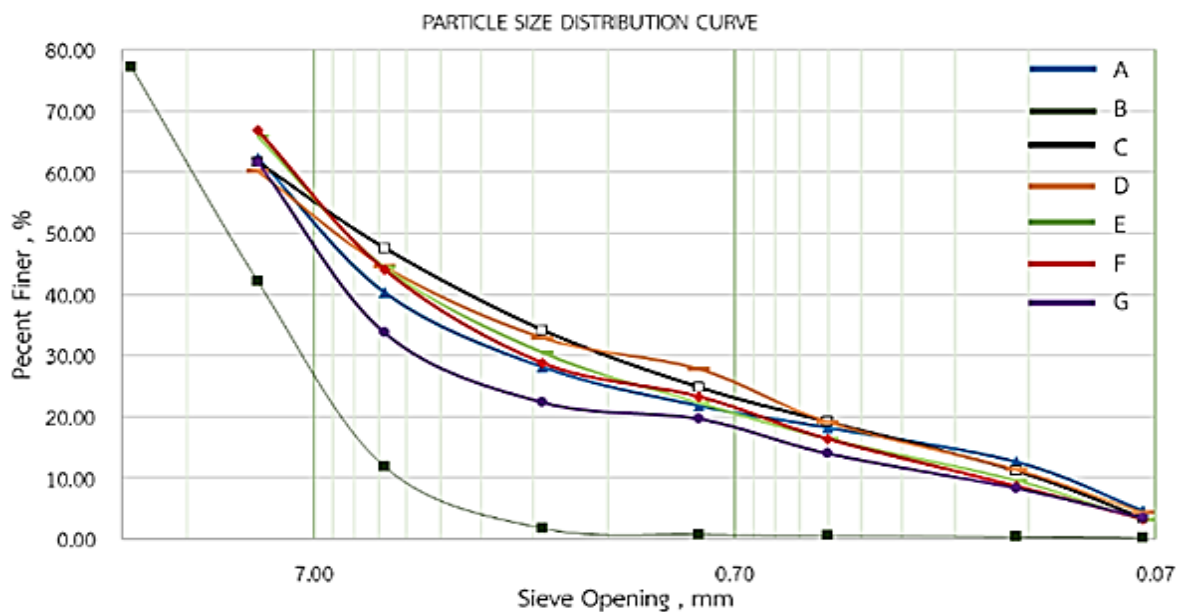
5. ผลการวิจัย

5.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในห้องปฏิบัติการ

5.1.1 ผลการทดสอบการกระจายขนาดเม็ดของวัสดุ การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเม็ดวัสดุ (Particle Size Distribution) สำหรับวัสดุผสมระหว่างดินลูกรัง และวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) ในชุดการ ทดสอบ A, B, C, D, E, F และ G สามารถประเมินพฤติกรรมทาง กายภาพได้จากเส้นโค้งการกระจายขนาดเม็ด (Particle size distribution curve) ร่วมกับการพิจารณาค่าขนาดเม็ดวัสดุ เฉลี่ย (D50) ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญที่บ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอของ ขนาดมวลรวม (Uniformity) ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ งานทาง ASTM D422 [23], [24] จากภาพที่ 2 ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวัสดุผสมในชุดตัวอย่าง A, C และ D มีลักษณะเส้นโค้งการกระจายตัวที่ต่อเนื่องและครอบคลุม ทุกขนาดเม็ด (Well-graded) โดยมีค่า D50 อยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 5 มิลลิเมตร ลักษณะขนาดคละที่ดีย่อมเช่นนี้ส่งผลให้ อนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปเติมเต็มช่องว่าง ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ โครงสร้างวัสดุเกิดการขัดถูและจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น (Interlocking) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยยกระดับศักยภาพใน การถ่ายเทแรงและเพิ่มสมรรถนะการรับน้ำหนักของชั้น โครงสร้างทางให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมชุดอื่น

ในทางตรงกันข้าม วัสดุผสมชุดตัวอย่าง B และ E ปรากฏลักษณะเส้นโค้งที่มีความชันสูงและมีการกระจายตัว ของขนาดเม็ดที่ไม่ต่อเนื่อง (Poorly-graded) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดตัวอย่าง B มีสัดส่วนของมวลรวมหยาบในปริมาณมาก ส่งผลให้ค่า D50 ขยับตัวสูงขึ้นไปอยู่ในช่วงประมาณ 6 ถึง 7 มิลลิเมตร ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะของวัสดุที่มีขนาดสม่ำเสมอ มากเกินไป พฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้เกิดปริมาณช่องว่าง ระหว่างเม็ดวัสดุที่กว้างขึ้น โครงสร้างขาดเสถียรภาพ และ ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างมวลรวมลดต่ำลง สำหรับ วัสดุผสมชุดตัวอย่าง F และ G พบว่าค่า D50 มีแนวโน้มลดลง มาอยู่ในช่วงประมาณ 3 ถึง 4 มิลลิเมตร โดยลักษณะของเส้น โค้งการกระจายตัวจัดอยู่ในระดับปานกลาง แม้ว่าจะมีการ กระจายของขนาดเม็ดที่ค่อนข้างเหมาะสมแต่ก็ยังไม่สามารถ จัดเรียงตัวได้สมบูรณ์และหนาแน่นเทียบเท่ากับชุดตัวอย่าง A, C และ D

ดังนั้นจากการประเมินลักษณะขนาดคละและค่า D50 จึงสามารถวิเคราะห์และสรุปได้ตามหลักวิชาการว่า วัสดุผสม ชุดตัวอย่าง A, C และ D เป็นสัดส่วนที่มีการกระจายขนาดเม็ด ที่เหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้น ทาง ทำให้วัสดุกลุ่มดังกล่าวมีศักยภาพทางวิศวกรรมที่พร้อม สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในชั้นโครงสร้างทางได้ อย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงสุดในการรับ น้ำหนักบรรทุก โดยลักษณะทางกายภาพของการกระจาย ขนาดเม็ดวัสดุในแต่ละชุดการทดสอบปรากฏรายละเอียด ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ผลการทดสอบขนาดเม็ดของวัสดุ

5.1.2 ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limit) การประเมินพฤติกรรมของวัสดุภายใต้ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นสามารถพิจารณาได้จากผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก ซึ่งประกอบด้วย ค่าขีดจำกัดของเหลว (Liquid Limit) ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index) ปริมาณความชื้นในมวลรวมมีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบดอัดและโครงสร้างของวัสดุในเชิงอุตสาหกรรมงานทาง เนื่องจากเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับขีดจำกัด น้ำจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างอนุภาค และทำให้ดินเปลี่ยนสถานะจากกึ่งของแข็งไปสู่สภาวะพลาสติกและของเหลวตามลำดับ ส่งผลให้เสถียรภาพและความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นทางลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.5-2545 และ ทล.ฉ. 501.6-2545 [25], [26] ซึ่งปรากฏผลการทดสอบดังรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

ลำดับ	ค่าขีดจำกัด	ค่าขีดจำกัด	ค่าดัชนี
	เหลว	พลาสติก	พลาสติก
	(L.L.)	(P.L.)	(P.I.)
	%	%	%
ชุด A	35.39	21.12	3.91
ชุด B	-	-	-
ชุด C	22.95	13.98	8.97
ชุด D	21.43	15.31	6.12
ชุด E	20.30	14.24	6.06
ชุด F	19.20	-	19.20
ชุด G	17.50	-	17.50

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และความไวต่อน้ำของวัสดุผสม โดยพบว่าชุดตัวอย่าง A ซึ่งเป็นดินลูกรังล้วน มีค่าขีดจำกัดของเหลวสูงถึงร้อยละ 35.39 ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบทที่กำหนดไว้ว่าต้องมีค่าขีดจำกัดของเหลวไม่เกินร้อยละ 25 อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดแทนดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่าขีดจำกัดของเหลวและค่าขีดจำกัดพลาสติกมีแนวโน้ม

ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในชุดตัวอย่าง C (RAP ร้อยละ 10) ชุดตัวอย่าง D (RAP ร้อยละ 20) และชุดตัวอย่าง E (RAP ร้อยละ 30) ซึ่งมีค่าขีดจำกัดของเหลวลดลงมาอยู่ที่ร้อยละ 22.95 21.43 และ 20.30 ตามลำดับ การปรับลดลงนี้ส่งผลให้คุณสมบัติความไวต่อน้ำของวัสดุผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นชั้นโครงสร้างทางสำหรับชุดตัวอย่าง B ซึ่งใช้ RAP ร้อยละ 100 ไม่ปรากฏค่าความเป็นพลาสติก (Non-plastic) เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของผิวทางแอสฟัลต์เก่าที่ไม่มีสมบัติการอุ้มน้ำ ข้อมูลจากการทดสอบนี้เป็นเครื่องยืนยันทางวิศวกรรมว่าการนำวัสดุ RAP เข้ามาผสมร่วมกับดินลูกรังสามารถช่วยแก้ไขปัญหาดินที่มีความเป็นพลาสติกสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วยควบคุมขีดจำกัดการอุ้มน้ำให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยและเพิ่มเสถียรภาพในการบดอัดให้แก่วัสดุผสมนวัตกรรมนี้

5.1.3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ในกระบวนการก่อสร้างโครงสร้างชั้นพื้นทาง ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content หรือ OMC) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density หรือ MDD) นับเป็นดัชนีทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินประสิทธิภาพการบดอัดและการพิจารณาคัดเลือกวัสดุ เพื่อให้มั่นใจว่าชั้นโครงสร้างจะมีความหนาแน่นเพียงพอในการรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างสมบูรณ์ และช่วยลดอัตราการยุบตัวของโครงสร้างในระยะยาว การประเมินค่าดังกล่าวดำเนินการผ่านการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยอาศัยพลังงานกลเพื่อไล่อากาศออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.2-2545 [28] ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุผสมทั้ง 7 ชุดการทดสอบ (ชุด A ถึงชุด G) ได้ถูกรวบรวมและวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังในขั้นตอนถัดไป ซึ่งแสดงรายละเอียดความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและปริมาณความชื้นในตารางที่ 3

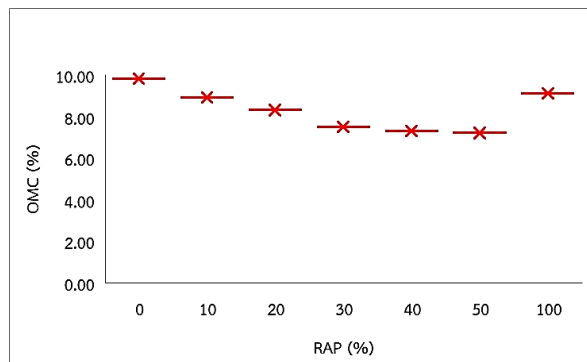
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

ลำดับ	การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน	
	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม %	ความหนาแน่นแห้ง g/cm ³
ชุด A	9.8	2.101
ชุด B	9.1	2.037
ชุด C	8.9	2.105
ชุด D	8.3	2.126
ชุด E	7.5	2.190
ชุด F	7.3	2.185
ชุด G	7.2	2.098

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเมื่อพิจารณาร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายขนาดเม็ดดินจากค่าดัชนี Cu และ Cg พบว่าความหนาแน่นแห้งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะการกระจายของเม็ดวัสดุผสม กล่าวคือ ชุดตัวอย่าง C, D และ E (ที่มีสัดส่วนวัสดุ RAP ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ) มีค่าความหนาแน่นแห้งที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.2, 1.2 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุละเอียด (Well-graded) เนื่องจากมีค่า Cu สูงและค่า Cg อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐานงานทาง ลักษณะการกระจายขนาดเม็ดดินที่ดีเยี่ยมนี้ส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้โครงสร้างวัสดุเกิดการขัดถูและจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น (Interlocking) ลดช่องว่างภายใน และส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับชุดตัวอย่าง A ที่เป็นดินลูกรังเดิม ในทางตรงกันข้าม ชุดตัวอย่าง B, F และ G จัดเป็นวัสดุละเอียดไม่ดี (Poorly-graded) เนื่องจากมีค่า Cu ต่ำ หรือค่า Cg เบี่ยงเบนจากช่วงที่เหมาะสม แสดงถึงการกระจายขนาดที่ไม่มีประสิทธิภาพ มีขนาดเม็ดวัสดุใกล้เคียงกันหรือขาดช่วงของขนาดเม็ด ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุมากขึ้น แม้จะมีการเพิ่มปริมาณวัสดุ RAP แต่ไม่สามารถช่วยให้การเรียงตัวหนาแน่นขึ้นได้ จึงทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะในอัตราส่วนที่มีปริมาณ RAP สูง (ร้อยละ 40-50)

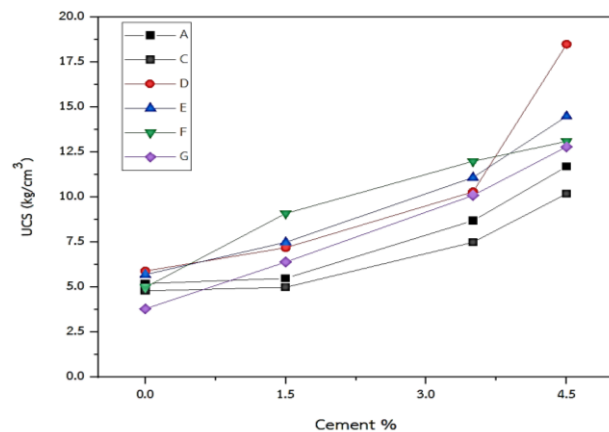
ในขณะที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) พบว่ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผกผันกับปริมาณวัสดุ RAP ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะ

ทางกายภาพของวัสดุ RAP ที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ มีคุณสมบัติไม่ดูดซับน้ำ ร่วมกับการลดลงของสัดส่วนมวลละเอียดในดินลูกรังจึงทำให้ความต้องการปริมาณน้ำเพื่อการหล่อลื่นอนุภาคระหว่างการบดอัดลดลงตามลำดับ โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบได้ถูกรวบรวมและแสดงรายละเอียดไว้ดังปรากฏในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด

5.1.4 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) เป็นการประเมินความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้ในทางชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.10-2545 หรือ AASHTO T208-15 [27] จากผลการทดสอบในตารางที่ 4 พบว่าชุดตัวอย่าง A, C, D, E, F และ G เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณสารเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่ากำลังอัดสูงสุดในแต่ละชุดการทดสอบอยู่ที่ 11.7, 7.5, 10.3, 11.1, 12.0 และ 10.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ วิวัฒนาการของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดโครงสร้างผลึกที่ช่วยยึดโยงระหว่างมวลรวมดินและวัสดุ RAP ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสม

No.	Unconfined Compressive Strength; UCS	
	Cement %	kg/cm2
A	0	5.2
	1.5	5.5
	3.0	8.7
	4.5	11.7
C	0	N/P
	1.5	4.8
	3.0	5.0
	4.5	7.5
D	0	10.2
	1.5	5.9
	3.0	7.2
	4.5	10.3
E	0	18.5
	1.5	5.7
	3.0	7.5
	4.5	11.1
F	0	14.5
	1.5	5.0
	3.0	9.1
	4.5	12.0
G	0	13.1
	1.5	3.8
	3.0	6.4

No.	Unconfined Compressive Strength; UCS	
	Cement	
	%	kg/cm ²
	4.5	10.1

5.1.5 ผลการทดสอบอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก การทดสอบค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) เป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะที่สำคัญในการประเมินขีดความสามารถในการรับแรงแบกทานของนวัตกรรมวัสดุผสมเพื่อใช้ในงานโครงสร้างทาง กระบวนการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ทล.ฉ. 501.3-2545 [29] โดยจัดเตรียมตัวอย่างที่ระดับความหนาแน่นแห้งร้อยละ 95 ของการบดอัดสูงสุด (95% Maximum dry density) เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงในภาคสนาม ผลการวิเคราะห์สมรรถนะการรับกำลังและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุผสมแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่าซีพีอาร์และการบวมตัวของวัสดุผสมแต่ละชุดการทดสอบ

No.	ความหนาแน่นแห้ง		ค่า CBR	การบวมตัว
	Cement	ที่บดอัด 95 %		
	%	g/cm ³	%	%
A	0	1.995	20.87	16.31
	1.5	1.982	54.57	8.60
	3.0	2.031	135.66	3.91
	4.5	1.992	195.66	3.44
C	0	2.022	21.94	7.75
	1.5	2.011	72.02	7.74
	3.0	2.000	152.52	6.49
	4.5	2.009	189.40	6.45
D	0	2.096	12.6	17.23
	1.5	2.021	64.58	8.66
	3.0	2.002	148.87	5.16
	4.5	2.018	196.24	3.45
E	0	1.988	19.64	15.91
	1.5	2.024	64.04	7.44
	3.0	2.007	106.68	6.05
	4.5	2.052	222.42	5.19

No.	ความหนาแน่นแห้ง		ค่า CBR	การบวมตัว
	Cement	ที่บดอัด 95 %		
	%	g/cm ³	%	%
F	0	2.156	19.01	6.73
	1.5	2.071	65.62	2.59
	3.0	2.056	135.86	2.57
	4.5	2.287	191.71	0.69
G	0	1.999	17.34	11.16
	1.5	2.033	70.26	6.05
	3.0	2.050	126.50	3.46
	4.5	2.017	168.60	3.45

หมายเหตุ: ชุด B (RAP 100%) ไม่สามารถดำเนินการบดอัดและทดสอบตามมาตรฐานนี้ได้เนื่องจากขาดวัสดุประสาน

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการแปรผันปริมาณปูนซีเมนต์และสัดส่วนของวัสดุ RAP มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะเชิงกลและเสถียรภาพทางปริมาตร เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 4.5 ค่าซีพีอาร์ของทุกชุดการทดสอบมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งอธิบายได้จากกลไกการก่อตัวของสารประกอบยึดประสานเชิงโครงสร้าง (Cementitious products) ที่ช่วยยึดเกาะระหว่างมวลรวม [18], [19], [30] โดยชุดการทดสอบ E (RAP ร้อยละ 30 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5) พัฒนาค่าซีพีอาร์ได้สูงสุดถึงร้อยละ 222.42 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และวัสดุ RAP ที่เหมาะสมช่วยลดอัตราการบวมตัว (Swelling) ของวัสดุลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อมูลสมรรถนะการรับแรงทั้งหมดได้ถูกสรุปและเปรียบเทียบในรูปแบบแผนภาพกราฟิกดังปรากฏในภาพที่ 5

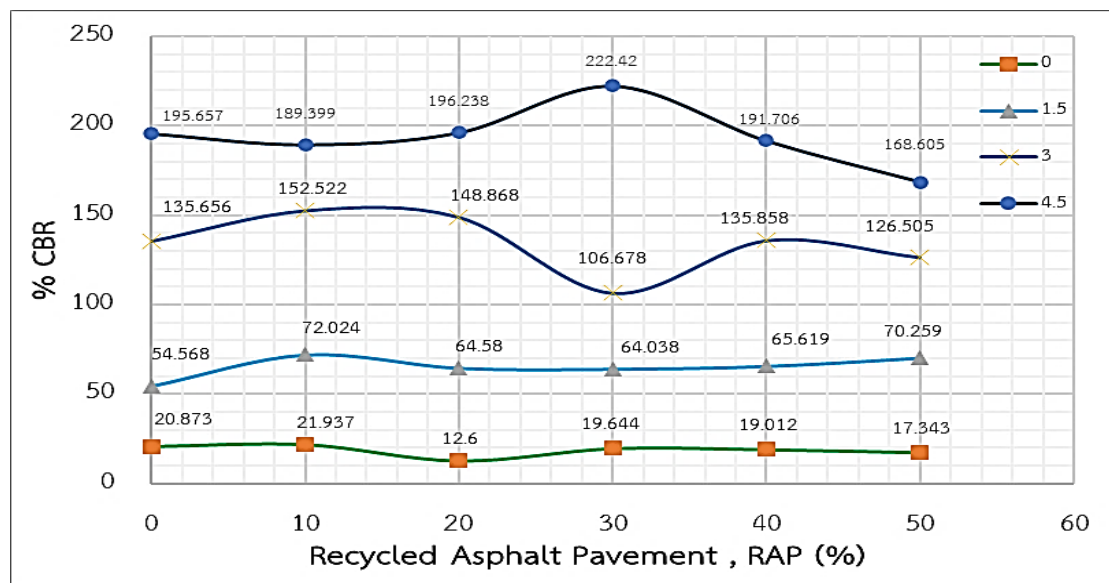
ในการปรับปรุงเนื้อหาส่วนผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and discussion) เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางของวารสารนวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (AJIT) โดยยึดตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิและหลักเกณฑ์การเขียนภาษาไทยเชิงวิชาการที่คุณกำหนดไว้ มีรายละเอียดการปรับปรุงและขยายความข้อมูลดังนี้

ในด้านการเปลี่ยนแปลงปริมาตรพบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่าการบวมตัว (Swelling) ของวัสดุผสมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพทางวิศวกรรมที่เพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุต้องเผชิญกับสถานะความชื้นสูง โดยเฉพาะในชุดการทดสอบ F ที่ระดับปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5 มีค่าการบวมตัวต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 0.69 พฤติกรรมดังกล่าวยืนยันว่าการใช้ปูนซีเมนต์ไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแต่ยังช่วยควบคุมพฤติกรรมการพองตัวของดินลูกรังได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลเชิงลึกด้านการพัฒนากำลังและการลดอัตราการบวมตัวนี้เป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่ยืนยันความเหมาะสมของวัสดุนวัตกรรมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นพื้นทางตามเกณฑ์มาตรฐานงานทางที่ปรากฏรายละเอียดเชิงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5

พฤติกรรมการรับกำลังของวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 0 1.5 3 และ 4.5 แสดงรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงดังปรากฏในภาพที่ 4 ผลการทดสอบระบุว่า การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนักหรือค่าซีบีอาร์ (CBR) ของทุกชุดอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน พฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลสืบเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งก่อให้เกิดสารประกอบโครงสร้างร่างแหในรูปของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate

Hydrate: C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate: C-A-H) [18], [19] โดยสารประกอบเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานที่มีประสิทธิภาพสูงเข้าห่อหุ้มและยึดเกาะระหว่างเม็ดดินลูกรังกับอนุภาคของวัสดุ RAP ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคภายในมีความหนาแน่นและมีเสถียรภาพในการถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกได้ดียิ่งขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น [30]

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกพบว่าที่ระดับการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5 ให้ค่าซีบีอาร์สูงที่สุดในทุกสัดส่วนการแทนที่ของวัสดุ RAP โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดการทดลอง E (สัดส่วนวัสดุ RAP ร้อยละ 30) ซึ่งให้ค่าสมรรถนะการรับกำลังสูงสุดที่ร้อยละ 222.42 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดตัวอย่างควบคุม A (ดินลูกรังร้อยละ 100) พบว่ามีค่ากำลังเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 13.67 ข้อมูลเชิงประจักษ์นี้แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ในสัดส่วนร้อยละ 30 ร่วมกับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์เป็นสัดส่วนที่เกิดกระบวนการขัดประสานระหว่างมวลรวม (Aggregate interlocking) ได้อย่างเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ยังส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าการบวมตัวของวัสดุผสม ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางปริมาตรและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นโครงสร้างทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลักษณะการพัฒนากำลังรับน้ำหนักของวัสดุผสมในแต่ละอัตราส่วนได้ถูกสรุปและแสดงผลไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และค่าซีบีอาร์ของวัสดุผสมแต่ละอัตราส่วนผสม

5.1.6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังจากแหล่งวัสดุในพื้นที่จังหวัดปัตตานีด้วยเทคนิคการเรืองแสงรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence: XRF) พบว่าสารประกอบหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 75.99 และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 15.27 ในขณะที่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ปรากฏเพียงร้อยละ 0.05 สัดส่วนของ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในมวลดินนี้มีบทบาทสำคัญในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เพื่อเกิดกระบวนการไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดและเสถียรภาพของวัสดุผสมในระยะยาว [30] โดยรายละเอียดขององค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดปรากฏดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังจากแหล่งวัสดุจังหวัดปัตตานี

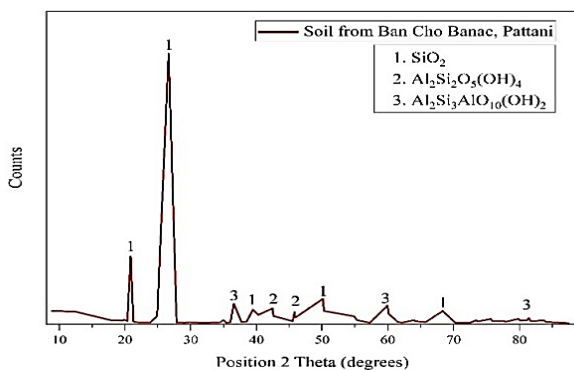
สารประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ดินลูกรังจากแหล่งวัสดุ จังหวัดปัตตานี
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	75.99
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	15.27
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.44
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.05
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	0.012

สารประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ดินลูกรังจากแหล่งวัสดุ จังหวัดปัตตานี
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.75
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.03

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังจากบ่อขุดในพื้นที่จังหวัดปัตตานีโดยภาพรวมประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลักที่เอื้อต่อการปรับปรุงคุณภาพ โดยค่าซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่มีปริมาณสูงบ่งชี้ว่ามวลดินมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ได้ดีเมื่อมีการเติมสารกระตุ้นที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบ อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ได้ระบุถึงคุณลักษณะทางเคมีที่สำคัญ 2 ประการที่จำเป็นต้องได้รับการพิจารณาในการพัฒนาเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง คือ 1) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.05 ซึ่งแสดงถึงสภาวะการขาดแคลนสารเชื่อมประสานตามธรรมชาติในมวลดิน หากนำดินลูกรังนี้ไปใช้เป็นโครงสร้างชั้นพื้นทางโดยตรงจะส่งผลให้ชั้นทางขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและเกิดการเสียรูปได้ง่าย และ 2) สัดส่วนของซิลิกาและอลูมินาที่มีปริมาณรวมกันสูงกว่าร้อยละ 91 เป็นตัวบ่งชี้ว่าการพัฒนากำลังอัดของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากปูนซีเมนต์

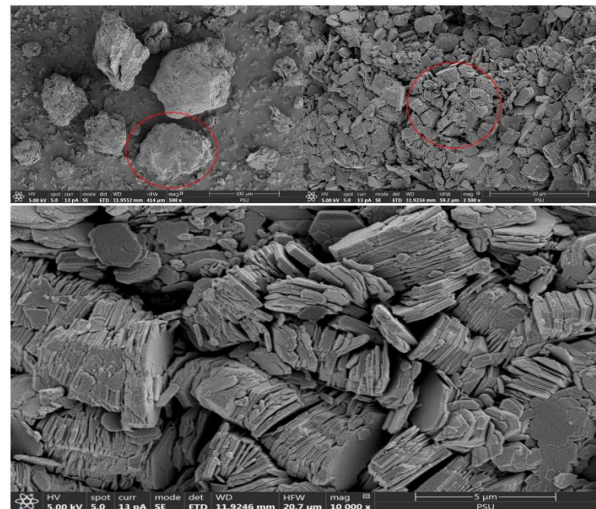
ภายนอกเพื่อสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาค [30] ดังนั้น ดินลูกรังจากแหล่งวัสดุนี้จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับวัสดุ RAP ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้มั่นใจในสมรรถนะเชิงอุตสาหกรรมและความปลอดภัยของโครงสร้างทางหลวงชนบท ซึ่งสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังได้ถูกรวบรวมและแสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 6

5.1.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (Mineralogical analysis) ของวัสดุดินลูกรังจากบ่อยืมในพื้นที่จังหวัดปัตตานีด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่าดินลูกรังมีองค์ประกอบทางแร่ที่สำคัญ ได้แก่ แร่ควอตซ์ หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แร่เคลโอไลไนต์ (Kaolinite) และแร่อีลไลต์ (Illite) การจัดเรียงตัวและสัดส่วนของแร่เหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของดินเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงและเสถียรภาพของวัสดุชั้นทางในเชิงอุตสาหกรรม การปรากฏของแร่ซิลิกาและอะลูมิเนียมซิลิเกตในปริมาณสูงเป็นปัจจัยสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาพอซโซลานเมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากปูนซีเมนต์ ก่อให้เกิดสารประกอบยึดประสานที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ยืนยันองค์ประกอบแร่ของดินลูกรังปรากฏรายละเอียดชัดเจนดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของดินลูกรัง (XRD Pattern)

5.1.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphological analysis) ของดินลูกรังผ่านเทคโนโลยีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าแร่เคลโอไลไนต์มีลักษณะทางกายภาพเป็นแผ่นซ้อนทับกัน (Stacked flakes) และมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอรวมตัวกันเป็นมวลหนาแน่น ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงซึ่งเอื้อต่อกระบวนการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินและสารยึดประสานในระบบวัสดุผสมเชิงประกอบ เมื่อมีการเติมปูนซีเมนต์และวัสดุ RAP เข้าไปในระบบ โครงสร้างเหล่านี้จะถูกหล่อหุ้มด้วยเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมี ช่วยเติมเต็มช่องว่างและเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลภาพถ่ายกำลังขยายสูงที่แสดงรายละเอียดพื้นผิวและลักษณะสัณฐานวิทยาเชิงลึกของดินลูกรังปรากฏรายละเอียดดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สัณฐานวิทยาของดินลูกรังจากการส่องกราดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

ผลการวิเคราะห์ทั้งในระดับองค์ประกอบแร่และระดับโครงสร้างจุลภาคมีความสอดคล้องเชิงทฤษฎีและสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินลูกรังได้อย่างครบถ้วน โดยชี้ให้เห็นว่าแม้ดินชนิดนี้จะมีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงตามธรรมชาติแต่มีศักยภาพสูงในการนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยนวัตกรรมวัสดุผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของโครงสร้างงานทางอุตสาหกรรมในระยะยาว

การวิจัยครั้งนี้ได้ประเมินศักยภาพของการนำดินลูกรังมาบูรณาการร่วมกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) และปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อยกระดับเป็นวัสดุทางเลือกในงานวิศวกรรมทาง จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลเชิงลึกพบว่าขีดจำกัดในการแทนที่ดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ที่เหมาะสมที่สุดไม่ควรเกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ RAP ที่ระดับร้อยละ 40 และ 50 ส่งผลให้สัดส่วนของมวลละเอียดลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนไม่สามารถดำเนินการบดอัดให้เกิดความหนาแน่นสูงสุดตามเกณฑ์มาตรฐานได้ และนำไปสู่การถดถอยของสมรรถนะการรับแรงอัดและค่าซีบีอาร์ ในขณะที่การแทนที่ในระดับร้อยละ 10 20 และ 30 ร่วมกับการใช้ปูนซีเมนต์ช่วยให้เกิดกระบวนการอัดประสานของมวลรวมและการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่หนาแน่นที่สุด ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลมีความพร้อมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพตามมาตรฐานงานทางหลวงชนบท โดยข้อมูลสรุปความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของวัสดุผสมทั้งหมดได้ถูกนำเสนอและเปรียบเทียบเชิงวิเคราะห์ไว้ในส่วนสรุปผลการวิจัย

5.2 การประเมินสมรรถนะของวัสดุผสมเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานงานทาง จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อประเมินความสอดคล้องกับมาตรฐานงานทาง (มทข. 203-2557) พบว่าพฤติกรรมทางกายภาพของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนการแทนที่ของวัสดุ RAP โดยในชุดตัวอย่างควบคุม A ซึ่งเป็นดินลูกรังร้อยละ 100 ปรากฏค่าขีดจำกัดของเหลวสูงถึงร้อยละ 35.39 ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทางที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 25 อย่างไรก็ตาม เมื่อดำเนินการแทนที่ด้วยวัสดุ RAP ในสัดส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 พบว่าค่าขีดจำกัดของเหลวของชุดตัวอย่าง C D และ E ปรับลดลงเหลือร้อยละ 22.95 21.43 และ 20.30 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้คุณลักษณะของวัสดุผสมผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์อย่างครบถ้วนตามเกณฑ์ของกรมทางหลวงชนบท ในมิติด้านสมรรถนะการรับกำลังพบว่าชุดตัวอย่าง C และ D ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 สามารถพัฒนาค่าซีบีอาร์ (CBR) ได้สูงถึง

ร้อยละ 152.52 และ 148.87 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำสำหรับวัสดุชั้นพื้นทางอย่างชัดเจน ผลการวิจัยจึงเป็นเครื่องยืนยันเชิงประจักษ์ว่าการใช้อัตราส่วนผสมดังกล่าวร่วมกับสารเชื่อมประสานสามารถตอบสนองต่อข้อกำหนดเชิงคุณภาพของหน่วยงานภาครัฐได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดการเปรียบเทียบค่าดัชนีทางวิศวกรรมที่สำคัญปรากฏในตารางที่ 2 และตารางที่ 4

5.3 การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรและข้อมูลสนับสนุนทางวิศวกรรมเพื่อการนำไปใช้งานจริง ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุมระบุว่าปริมาณวัสดุ RAP และความเข้มข้นของปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่กำหนดประสิทธิภาพเชิงกลของส่วนผสม โดยปริมาณวัสดุ RAP ที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการบดอัดเชิงกลคือร้อยละ 10 ถึง 30 เนื่องจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเรียงอนุภาคจนสามารถยกระดับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดได้ โดยเฉพาะในชุดตัวอย่าง E (RAP ร้อยละ 30) ที่ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดถึง 2.190 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมีอัตราการเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบกับดินลูกรังปกติ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังรับน้ำหนักและความคงทนผ่านการก่อตัวของสารประกอบไฮเดรตในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 75.99 และอลูมินาออกไซด์ร้อยละ 15.27 อันเป็นสารตั้งต้นสำคัญในปฏิกิริยาปอซโซลาน [30] ข้อมูลเชิงลึกทั้งมิติด้านวิศวกรรมทางและลักษณะทางเคมีที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนที่สำคัญสำหรับการเลือกใช้วัสดุผสมระหว่าง RAP และดินลูกรังเป็นทางเลือกนวัตกรรมสำหรับงานก่อสร้างทาง ซึ่งช่วยยกระดับสมรรถนะของโครงสร้างทางหลวงชนบทและเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากการซ่อมบำรุงผิวทางให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นระบบ โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรควบคุมและการพัฒนากำลังรับน้ำหนักได้ถูกสรุปและแสดงผลเชิงวิเคราะห์ไว้ในภาพที่ 3 และภาพที่ 4

6. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางวิศวกรรมอย่างครอบคลุมตามวัตถุประสงค์การวิจัย สามารถสรุปประเด็นสำคัญและอภิปรายผลการวิจัยโดยเชื่อมโยงกับหลักการทางวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

6.1 สรุปผล ผลการวิจัยยืนยันว่าวัสดุผสมเชิงประกอบระหว่างดินลูกรังและวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) จากพื้นที่จังหวัดปัตตานี มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการพัฒนาเป็นวัสดุนวัตกรรมสำหรับงานทางหลวงชนบท เนื่องจากสามารถพัฒนาค่าอัตราส่วนความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (CBR) ได้สูงสุดถึงร้อยละ 222.42 ในชุดการทดลอง E (RAP ร้อยละ 30 ปูนซีเมนต์ร้อยละ 4.5) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 13.67 แม้คุณภาพดินลูกรังเดิมจะมีค่าขีดจำกัดของเหลวสูงถึงร้อยละ 35.39 แต่เมื่อทดแทนด้วย RAP ในสัดส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 ค่าดังกล่าวลดลงเหลือร้อยละ 20.30 ถึง 22.95 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มทข. 203-2557 สำหรับวัสดุชั้นพื้นทางอย่างชัดเจน นอกจากนี้ งานวิจัยยังนำไปสู่นวัตกรรม “Pattani RAP-Laterite Stabilization” ที่ใช้กลยุทธ์การแทนที่มวลละเอียดที่ไวต่อน้ำด้วยวัสดุผิวทางเดิมร่วมกับการสร้างพันธะทางเคมีด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 3 ถึง 4.5 เพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพเชิงโครงสร้างโดยไม่ต้องพึ่งพามวลรวมหินคลุกคุณภาพสูงที่มีต้นทุนการขนส่งเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงกลพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ทางวิศวกรรมและการสร้างประสิทธิภาพในการบริหารจัดการเศษวัสดุงานทางในระยะยาวเชิงประจักษ์

6.2 อภิปรายผล จากข้อสรุปเบื้องต้นสามารถนำมาอภิปรายผลในประเด็นสำคัญต่าง ๆ โดยเชื่อมโยงกับหลักการทางวิศวกรรมงานทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

6.2.1 ศักยภาพและการขัดประสานเชิงโครงสร้างของวัสดุผสม Suebsuk, et al. [10] ระบุว่า การใช้ RAP เข้าไปแทนที่มวลละเอียดที่ไวต่อน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะจะช่วยยกระดับความหนาแน่นแห้งสูงสุดและเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายแรงเชิงโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความเหมาะสมของลักษณะขนาดผลในชุดตัวอย่าง C และ D ที่เป็นไปตามแนวคิดการเพิ่มเสถียรภาพมวลรวมด้วยวิธีเชิงกล

(Mechanical stabilization) โดยเน้นการจัดเรียงอนุภาคแบบต่อเนื่อง (Well-graded) เพื่อให้เกิดแรงขัดประสานระหว่างมวลรวม (Aggregate interlocking) การที่ค่าขีดจำกัดของเหลว (LL) ลดลงเหลือร้อยละ 20.30 ถึง 22.95 เมื่อเปรียบเทียบกับดินลูกรังดั้งเดิมที่มีค่า LL สูงถึงร้อยละ 35.39 ถือเป็นการแก้ไขปัญหาความเปราะบางต่อความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สภาพความเป็นพลาสติกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มทข. 203-2557 อันเป็นปัจจัยวิกฤต (Critical factor) ที่ช่วยป้องกันการเสียรูของชั้นพื้นทางภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกหนก [10]

6.2.2 นวัตกรรมพัฒนาการกำลังด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชัน Amadi, et al. [19] และ Nafissatou, et al. [30] พบว่า กระบวนการก่อตัวของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) จะเข้าไปทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน (Binding agent) ระหว่างผิวสัมผัสของมวลรวมดินและวัสดุ RAP ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาการรับน้ำหนักของวัสดุผสมผ่านค่า CBR ที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 ถึง 4.5 โดยเป็นการประยุกต์ใช้หลักการสร้างร่างแหยึดเกาะ (Cementitious bonding) ที่มีประสิทธิภาพสูง นวัตกรรมนี้โดดเด่นด้วยการเปลี่ยนพฤติกรรมวัสดุจากมวลรวมร่วน (Granular material) ไปสู่มวลรวมเชื่อมประสาน (Stabilized material) ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับกำลังรับแรงเพียงอย่างเดียว แต่ยังช่วยลดอัตราการบวมตัว (Swelling) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Ayoola และ Philip [6] ที่ใช้เถ้ากระดุกัวเป็นส่วนผสมเพิ่ม โดยยืนยันว่าการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่กำหนดช่วยสร้างความมั่นคงเชิงปริมาตรให้กับชั้นทางในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศแบบฝนชุกได้ [6], [19], [30]

6.2.3 ความคุ้มค่าเชิงวิศวกรรมและการจัดการวัสดุหมุนเวียน กรมทางหลวงชนบท [3] กำหนดแนวทางเกี่ยวกับการนำวัสดุทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (In-place recycling) ซึ่งสอดคล้องกับการบูรณาการเศษวัสดุชุดไสผิวทางเดิม (RAP) ร่วมกับดินลูกรังภายใต้โมเดลการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ในการศึกษาครั้งนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าด้านต้นทุนวัสดุและการลดภาระงบประมาณในการจัดหาหินคลุก

จากแหล่งใกล้เคียง โดยสัดส่วนการแทนที่ RAP ร้อยละ 30 (ชุดตัวอย่าง E) ให้ประสิทธิภาพการบดอัดสูงสุดและมีค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.23 เมื่อเทียบกับดินลูกรังปกติ นับเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบแนวทางใหม่จากการมองเศษวัสดุผิวทางเป็นขยะไปสู่การบริหารจัดการทรัพยากรที่มีอยู่อย่างชาญฉลาดและคุ้มค่า ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อเป้าหมายการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่คำนึงถึงขีดจำกัดของทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด [3]

6.3 องค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากการวิจัย งานวิจัยเรื่อง “ชั้นพื้นทางจากส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์นำกลับมาใช้ใหม่และดินลูกรังผสมกับซีเมนต์” ก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในบริบทของวิศวกรรมงานทางและการจัดการนวัตกรรมวัสดุอุตสาหกรรม ดังนี้

6.3.1 นวัตกรรมกระบวนการผสมผสานวัสดุ งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีผสมวัสดุในรูปแบบ “การปรับเสถียรวัสดุผสมแบบไฮบริด (Hybrid Material Stabilization Model)” ซึ่งประยุกต์ใช้หลักการเจือจางคุณสมบัติทางกายภาพที่ไม่พึงประสงค์ของดินลูกรังด้วยวัสดุ RAP ที่มีคุณสมบัติไม่ดูดซับน้ำ (Hydrophobic) ผลการศึกษาในเชิงประจักษ์แสดงให้เห็นว่ากระบวนการนี้สามารถควบคุมค่าดัชนีพลาสติก (PI) และค่าขีดจำกัดของเหลว (LL) ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมทางหลวงชนบทกำหนดได้โดยไม่ต้องพึ่งพาสารผสมเพิ่มทางเคมีที่มีราคาสูง จึงถือเป็นต้นแบบ (Model) สำหรับแนวทางการบริหารจัดการวัสดุในพื้นที่จังหวัดปัตตานีและพื้นที่ใกล้เคียงที่มีข้อจำกัดด้านแหล่งวัสดุธรรมชาติคุณภาพสูง

6.3.2 องค์ความรู้เชิงบริบทโครงสร้างจุลภาค แนวทางการจัดการสมรรถนะชั้นพื้นทางผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างแร่ธาตุ มุ่งเน้นการออกแบบนวัตกรรมวัสดุที่สอดคล้องกับลักษณะทางธรณีวิทยาเฉพาะถิ่นของพื้นที่จังหวัดปัตตานี โดยการตรวจพบแร่ควอตซ์และแคลไซต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนทับกัน (Stacked flakes) ผ่านเทคนิค SEM ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องได้รับสารเชื่อมประสานในระดับวิกฤต (Critical Dosage) ที่ร้อยละ 3 เพื่อให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดการยึดเกาะที่สมบูรณ์และแข็งแรง อันเป็นปัจจัยชี้ขาดสำคัญต่อความเสถียรของโครงสร้างถนนในพื้นที่ที่มี

อิทธิพลจากสภาพดินกรดและดินพรุซึ่งมักส่งผลกระทบต่อความทนทานของวัสดุงานทาง

6.3.3 ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักแบบยกระดับ

การเสริมสร้างความมั่นคงทางโครงสร้างผ่านนวัตกรรมการกระจายความเสี่ยงด้วยวัสดุทางเลือก ช่วยเปลี่ยนมุมมองจากการพึ่งพามวลรวมธรรมชาติเพียงอย่างเดียวไปสู่การเพิ่มมูลค่าวัสดุหมุนเวียนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยผลการวิเคราะห์สมรรถนะระบุว่าแนวทางนี้ช่วยขยายอายุการใช้งานของโครงสร้างทางและลดโอกาสการเกิดร่องล้อ (Rutting) ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยในการบำรุงรักษาต่อหน่วย (Unit maintenance cost) มีความคุ้มค่าสูงกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีดั้งเดิม นับเป็นการบริหารจัดการทรัพยากรเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในระยะยาวของการคมนาคมขนส่งในระดับท้องถิ่นและเกิดประโยชน์สูงสุดในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 ควรขยายขอบเขตการศึกษาวิจัยไปยังแหล่งดินลูกรังที่หลากหลายหรือดินที่มีคุณสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานทางในหลายพื้นที่ เพื่อประเมินขีดความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุด้วยวัสดุ RAP และปูนซีเมนต์ในสถานะที่แตกต่างกัน รวมถึงควรดำเนินการทดสอบในแปลงทดสอบจริงในภาคสนามเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของพฤติกรรมทางวิศวกรรมระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับสถานะการใช้งานจริงภายใต้การบรรทุกน้ำหนักจราจรหนักในเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้าง

7.1.2 ควรมีการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับอิทธิพลของขนาดมวลรวมวัสดุ RAP โดยการแยกวิเคราะห์สมรรถนะของส่วนที่เป็นมวลรวมหยาบและมวลละเอียด เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่มีต่อความหนาแน่นและกำลังรับน้ำหนักของส่วนผสมอย่างชัดเจน ซึ่งข้อมูลที่ได้จะช่วยในการกำหนดมาตรฐานการคัดขนาดวัสดุ RAP ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดก่อนนำไปใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุชั้นพื้นทางเชิงอุตสาหกรรม

7.1.3 ควรจัดให้มีการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์อย่าง

ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาการก่อตัวของสารประกอบไฮเดรตในรูปของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาค ข้อมูลนี้จะช่วยอธิบายกลไกการพัฒนากำลังรับน้ำหนักและพฤติกรรมการบวมตัวของวัสดุในระดับลึกได้อย่างมีหลักวิชาการและมีความชัดเจนยิ่งขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.2.1 หน่วยงานที่รับผิดชอบงานก่อสร้างและซ่อมบำรุงทางควรนำอัตราส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจากผลการวิจัย เช่น ชุดตัวอย่าง C D และ E มาประยุกต์ใช้เป็นทางเลือกนวัตกรรมในการผลิตวัสดุชั้นพื้นทาง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ประสบปัญหาขาดแคลนวัสดุมวลรวมธรรมชาติ เพื่อลดข้อจำกัดด้านงบประมาณและระยะเวลาในการขนส่งวัสดุจากแหล่งอื่น

7.2.2 ควรมีการแจ้งเกณฑ์มาตรฐานทางวิศวกรรมที่ได้จากการศึกษา เช่น ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ให้แก่เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมงานและผู้ปฏิบัติงานทราบ เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดในการตรวจสอบคุณภาพการบดอัดในภาคสนามให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุผสมนวัตกรรมนี้

7.2.3 ควรส่งเสริมให้มีการนำเศษวัสดุจากการขุดไผ่ผิวทางเดิมมาหมุนเวียนใช้งานอย่างต่อเนื่องตามแนวทางการจัดการทรัพยากรเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งนอกจากจะช่วยลดภาระในการจัดหาพื้นที่กักเก็บวัสดุเหลือทิ้งแล้ว ยังช่วยยกระดับเสถียรภาพของโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ห่างไกลได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนที่มอบให้อย่างต่อเนื่อง และขอขอบคุณหน่วยงานต้นสังกัดที่ให้การส่งเสริมและสนับสนุนจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chotikakrai, J. 2014. *Highway Engineering*, 5th ed. Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)
- [2] Aydogmus, T. 2004. "Investigation of interaction behaviour of cement-stabilized cohesive soil and PVA geogrids," in *Proceedings of the 3rd European Geosynthetics Conference*, pp. 559-564. [Online]. Available: <https://www.geosyntheticsociety.org/>
- [3] Department of Rural Roads. 2014. *Standard No. 242-2557 In-Place Recycling of Existing Pavement Materials*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [4] Lambe, T. W. 1959. "Physico-chemical properties of soils: Role of soil technology," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 85(2): pp. 1-55. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/JSE.1959.014>
- [5] Sukprasert, S. 2017. "Application of natural rubber and soil-cement for road construction," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. [Online]. Available: <https://ir.sut.ac.th/> (in Thai)
- [6] Ayoola, A. and Philip, A. 2023. "Stabilization of lateritic soil for road application using lime and cow bone ash," *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(6): pp. 109-121. [Online]. Available: <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i6929>

- [7] Montepara, A. and et al. 2012. "Effect on pavement performance of a subbase layer composed by natural aggregate and RAP," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53: pp. 981-990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.947>
- [8] Chattanajai, P. and et al. 2023. "Effect of temperature on recycled asphalt concrete pavement mixed with lateritic soil," *Journal of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin*, 5(3): pp. 55-63. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutr/> (in Thai)
- [9] Wangno, P. 2017. "Improvement of recycled asphalt concrete pavement using calcium carbide residue and fly ash," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. [Online]. Available: <https://ir.sut.ac.th/> (in Thai)
- [10] Suebsuk, J. and et al. 2016. "Unconfined compressive strength and microstructure of marginal lateritic soil improved with recycled asphalt pavement and cement," *KMITL Engineering Journal*, 33(2): pp. 112-116. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/kmitlj/> (in Thai)
- [11] Rungreang, T. 2013. "Improvement of cement-treated crushed rock base mixed with reclaimed asphalt concrete using portland cement," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. [Online]. Available: <https://ir.sut.ac.th/> (in Thai)
- [12] Charitngam, S. 2014. "Use of lateritic soil-cement for road rehabilitation after flooding," Research report. Nakhon Si Thammarat, Thailand: Nakhon Si Thammarat Rajabhat University. (in Thai)
- [13] Kaewma, P. and et al. 2022. "Effect of temperature on the performance of subbase materials containing reclaimed asphalt pavement," in *Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE 27)*, paper No. GTE51, pp. 1-8. (in Thai)
- [14] Htet, O. K. and Nyam, M. K. 2025. "Stabilization of lateritic soil using cement and lime for road construction," *Innovation in Engineering*, 2(1): pp. 31-43. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3785/innovation.2025.1>
- [15] Mills, W. H. 1936. "Stabilizing soils with Portland cement, experiments by South Carolina Highway Department," *Highway Research Board Proceedings*, 16: pp. 322-347.
- [16] Ngernphrom, N. 2010. "Study on the properties of pavement base materials mixed with lateritic soil, Portland cement, and steel slag," *Journal of Research, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon*. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutp/> (in Thai)
- [17] Agus, S. M. and et al. 2013. "Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber," *Journal of Materials in Civil*

- Engineering*, 25(9). [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000659](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000659)
- [18] Wahab, N. A. and et al. 2015. "Effects of cement on the compaction properties of lateritic soil," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1153. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1153/1/012015>
- [19] Amadi, A. A. and et al. 2025. "Stabilization characteristics of cement soil produced with selected cement types," *Cement*, 19: pp. 1-15. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2025.100019>
- [20] Boonthifong, B. and et al. 2016. "Improvement of subbase materials below standard using Portland cement and FGD gypsum," *Engineering Journal Chiang Mai University*: pp. 139-151. [Online]. Available: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/engcmu/> (in Thai)
- [21] Khirirat, C., Keesawatkorn, P. and Rungsakthaweekul, T. 2021. "Improvement of lateritic soil using bottom ash geopolymer for pavement applications," Research report. (in Thai)
- [22] Joseph, E. E., Adrian, O. E. and Onah, A. 2012. "Lateritic soil stabilization of reclaimed asphalt pavement as flexible highway pavement materials," *Advanced Materials Research*, 367: pp. 3-11. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.367.3>
- [23] American Society for Testing and Materials. 2007. *ASTM D422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07E02>
- [24] American Society for Testing and Materials. 2016. *ASTM D421-85 Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants*. West Conshohocken, PA: ASTM International. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/D0421-85R07>
- [25] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.6-2545 Test Method for Determining Plastic Limit*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [26] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.5-2545 Test Method for Determining Liquid Limit*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials. 2019. *AASHTO T 208-15 Standard Method of Test Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. Washington, DC: AASHTO.
- [28] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.2-2545 Test Method for Determining Compaction - Modified Method*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)
- [29] Department of Rural Roads. 2002. *Standard (T) 501.3-2545 Test Method for Determining California Bearing Ratio (CBR)*. Bangkok: Department of Rural Roads. (in Thai)

- [30] Nafissatou, S. and et al. 2024. "Stabilization of lateritic soil with Portland cement and crushed granite for pavement base courses," *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 3(23): pp. 3090-3099. [Online]. Available: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.3.3090>
- [31] Dabou, B., Kanali, C. and Zachary, A. G. 2021. "Structural performance of laterite soil stabilized with cement and blue gum (*Eucalyptus globulus*) wood ash for use as a road base material," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69(9): pp. 257-264. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I9P231>