

**การเปรียบเทียบสมบัติทางวิศวกรรมและต้นทุนของแอสฟัลต์
คอนกรีตรีไซเคิลที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ ๑
ซีเมนต์ไฮดรอลิก ปูนขาว แล้วย และแอสฟัลต์อิมัลชัน เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง**
(A comparative study of engineering properties and costs of
recycled asphalt concrete improved with type I Portland
cement, hydraulic cement, lime, fly ash, and asphalt emulsion
for use as base course material)

สุขสันต์ หอพิบูลสุข^{๑,๔,๕}, กิตติยา แผนจะบก^๒, อภิชาติ สุตติพงษ์^๓, นันทิพัฒน์ พงษ์ศรี^๔ และ
คงศักดิ์ อัครวงศ์วัฒนา^๕

^๑ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโยธา ประเพณีวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา,
suksun@g.sut.ac.th

^๒ หลักสูตรวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^๓ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^๔ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^๕ หลักสูตรวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางถนนของประเทศไทยต้องใช้วัสดุก่อสร้างจำนวนมาก ส่งผลให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุมวลรวมธรรมชาติสำหรับงานก่อสร้างถนน (ชั้นผิวทาง ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และดินถมคันทาง) ขณะเดียวกัน ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เสื่อมสภาพและถูกรื้อถอนจากงานบำรุงรักษานั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Reclaimed asphalt pavement, RAP) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดความยั่งยืนและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การนำ RAP กลับมาใช้โดยตรงมักมีข้อจำกัดด้านสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่า California Bearing Ratio (CBR) ต่ำ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุที่จำเป็น (วัสดุปรับปรุงคุณภาพ) เช่น ซีเมนต์ เพื่อให้เหมาะแก่การใช้เป็นวัสดุงานทาง (Suddepong et al., 2018) อย่างไรก็ตาม ยังมีช่องว่างความรู้เกี่ยวกับต้นทุนของ RAP ที่ปรับปรุงด้วยวัสดุปรับปรุงคุณภาพชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งจะสร้างดุลระหว่างกำลังอัดที่ต้องการกับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Arulrajah et al., 2014) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและต้นทุนของ RAP ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุปรับปรุงคุณภาพหลากหลายชนิด เพื่อใช้เป็นแนวทางเลือกวิธีปรับปรุงคุณภาพวัสดุที่เหมาะสมในงานก่อสร้างชั้นพื้นทาง (Base course) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท

วัสดุและวิธีดำเนินงานวิจัย

วัสดุมวลรวมหลักของงานวิจัยนี้คือ RAP ที่ได้จากโครงการบำรุงรักษาทางหลวงชนบทในจังหวัด นครราชสีมา ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นพลาสติก (non-plastic) มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (maximum dry density) เท่ากับ ๒.๐๐ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความสึกหรอ (LA abrasion) เท่ากับ ร้อยละ ๒๙.๘๐ และค่า CBR ร้อยละ ๑๕ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด คือ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ ๘๐ (ตาม มทข. ๒๐๓-๒๕๕๗) การศึกษาบ่งชี้ว่า RAP เพียงอย่างเดียวไม่เหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางโดยตรง และ จำเป็นต้องปรับปรุงด้วยวัสดุปรับปรุงคุณภาพ

วัสดุปรับปรุงคุณภาพหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ ๑ (ตาม มอก. ๑๕) และ ซีเมนต์ไฮดรอลิก (ตาม มอก. ๒๕๙๔) ส่วนวัสดุที่ใช้ร่วมกับวัสดุปรับปรุงคุณภาพหลักได้แก่ปูนขาว (Lime) (ตาม มอก. ๒๔๑) ที่มี CaO และ MgO เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ ๙๔.๑๕ และ ๒.๙๕ ตามลำดับ เถ้าลอย (Fly ash) (ตาม มอก. ๒๑๓๕) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมี SiO₂, Al₂O₃, และ Fe₂O₃ เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ ๗๘.๗๓, ๑๕.๙๗ และ ๒.๘๗ ตามลำดับ อีกทั้งแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (ตาม มอก. ๓๗๑-๒๕๒๙) งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้วัสดุปรับปรุงคุณภาพสำหรับปรับปรุง RAP จำนวน ๕ รูปแบบ คือ ๑) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ ๑ (OPC type 1) ๒) ซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement, HC) ๓) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ ๑ ร้อยละ ๗๐ ร่วมกับปูนขาว (Lime, L) ร้อยละ ๓๐ ของน้ำหนักวัสดุปรับปรุงคุณภาพ (OPC type 1+L) ๔) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ ๑ ร้อยละ ๗๐ ร่วมกับเถ้าลอย (Fly ash, FA) ร้อยละ ๓๐ ของน้ำหนักวัสดุปรับปรุงคุณภาพ (OPC type 1+FA) และ ๕) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ ๑ ร่วมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CCS-1h ร้อยละ ๒ ของน้ำหนักซีเมนต์ (OPC type 1+CSS-1h)

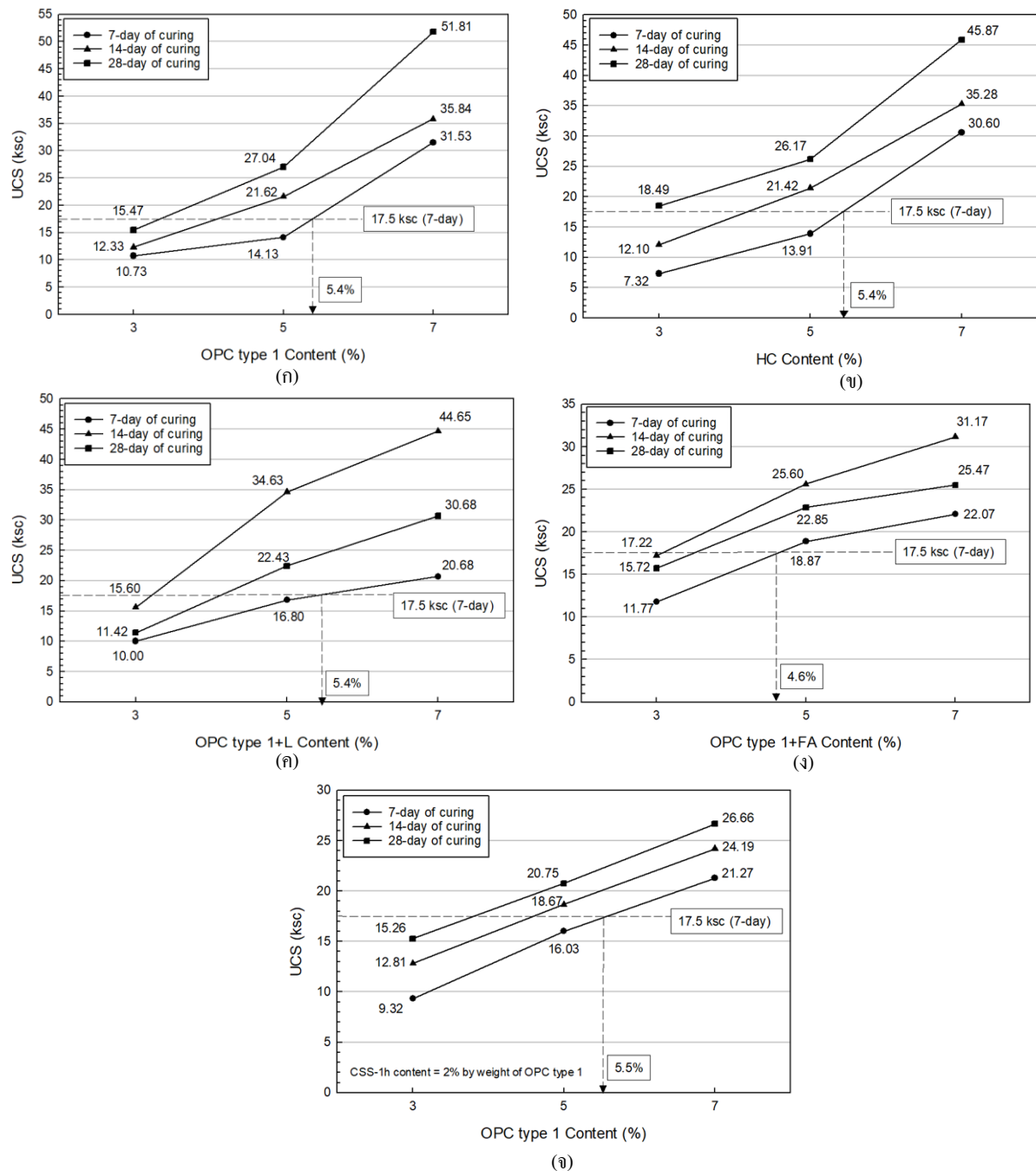
ตัวอย่างทดสอบ UCS ของ RAP ที่ปรับปรุงด้วยวัสดุปรับปรุงคุณภาพทุกประเภทดังกล่าวถูกเตรียม โดยใช้ปริมาณวัสดุปรับปรุงคุณภาพร้อยละ ๓, ๕ และ ๗ โดยน้ำหนักของ RAP ตามมาตรฐาน มทข. ๒๔๔-๒๕๖๗ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัดตามมาตรฐาน มทข. ๕๐๑.๒ การทดสอบ UCS ดำเนินการตามมาตรฐาน มทข.(ท) ๓๐๓-๒๕๕๕ ที่อายุบ่ม ๗, ๑๔ และ ๒๘ วัน คำนวณต้นทุนของวัสดุปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิดต่อปริมาณ RAP อ้างอิง ๑,๐๐๐ กิโลกรัม (Cost) สำหรับประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการเลือกวัสดุปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุง RAP เพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงชนบท

ผลการศึกษา

อิทธิพลของปริมาณวัสดุปรับปรุงคุณภาพและอายุบ่มต่อ UCS ของ RAP ที่ปรับปรุงด้วยวัสดุปรับปรุงคุณภาพ ๕ ประเภท ได้แก่ OPC type 1, HC, OPC type 1+L, OPC type 1+FA และ OPC type 1+CSS-1h นั้นแสดงดังภาพที่ ๑ (ก) ถึง (จ) ตามลำดับ ที่อายุบ่มค่าเดียวกัน จะเห็นได้จากภาพนี้ว่า เมื่อปริมาณวัสดุปรับปรุงคุณภาพเพิ่มขึ้น ค่า UCS ของทุกส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนผสมทุกแบบใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพหลัก ดังนั้น ปริมาณวัสดุปรับปรุงคุณภาพที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไฮดรเจน โดยเฉพาะ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (calcium silicate hydrate, CSH) และ แคลเซียมอะลูมิเนต (calcium aluminate

hydrates, CAH) ภายในโครงสร้าง RAP เพิ่มขึ้นตาม และช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค นอกจากนี้ ค่า UCS ยังเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นในทุกปริมาณและประเภทของวัสดุปรับปรุงที่ศึกษา สอดคล้องกับการพัฒนา กำลังของวัสดุซีเมนต์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามอายุบ่มที่ขึ้น (Suddepong et al., 2018)

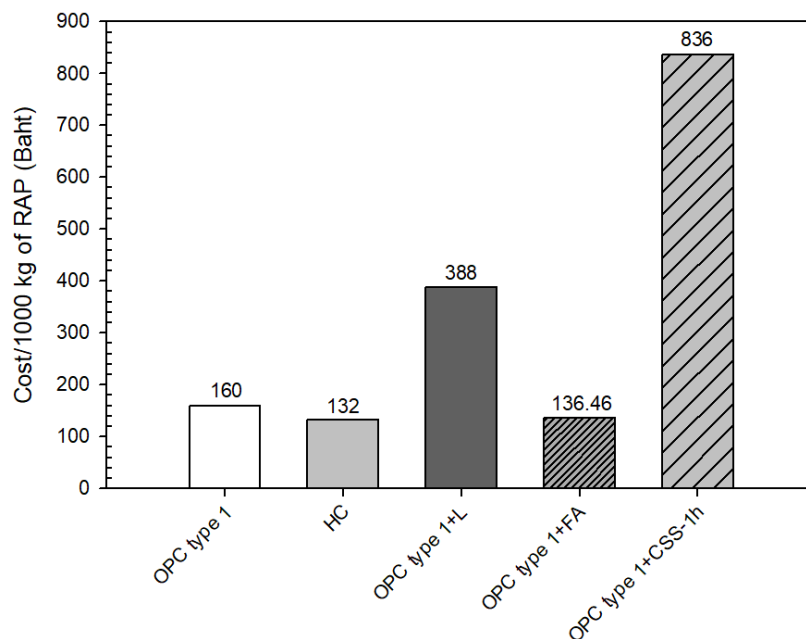
ค่า UCS ของ RAP ที่ปรับปรุงด้วย HC [ภาพที่ ๑ (ข)] มีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้ OPC type 1 [ภาพที่ ๑ (ก)] ที่ระยะเวลาการบ่มค่าเดียวกัน เนื่องจาก OPC type 1 มีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate, C_3S) สูง ทำให้เกิด CSH ได้รวดเร็วและให้ค่ากำลังในระยะต้นสูง (Debbarma et al., 2021) ขณะที่ HC มักประกอบด้วยวัสดุเสริมปูนซีเมนต์ที่ต้องอาศัยปฏิกิริยาพอซโซลานิก (Pozzolanic) ที่ดำเนินไปช้ากว่า ส่งผลให้ การพัฒนากำลังอัดเกิดช้ากว่า OPC type 1 (Divya et al., 2024) การใช้ OPC type 1+Lime [ภาพที่ ๑ (ค)] ให้ค่า UCS ที่อายุการบ่ม ๗ วัน สูงกว่า OPC type 1 เล็กน้อยที่ปริมาณวัสดุปรับปรุงร้อยละ ๓-๕ เนื่องจากปูนขาวช่วยเพิ่มความเป็นด่างในระบบ ทำให้เกิดการละลายของซิลิกาและอะลูมินาในมวลวัสดุรวม และเกิดปฏิกิริยาพอซโซลานิกในระยะต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ในปริมาณวัสดุปรับปรุงเพิ่มขึ้นหรือที่อายุบ่มนานขึ้น OPC type 1 กลับให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากปูนขาวไม่สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่ให้ กำลังได้โดยตรงเหมือนปูนซีเมนต์ แต่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดภาวะด่างสูงเพื่อกระตุ้นการละลายของซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) ที่มีอยู่ในวัสดุรวม แล้วทำปฏิกิริยาพอซโซลานิก เกิดเป็น CSH และ CAH ที่ช่วย เสริมกำลังให้แก้วสด (Zhang et al., 2020) อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ RAP อนุภาคมวลรวมถูกเคลือบด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งจำกัดการละลายของ Si และ Al ส่งผลให้ศักยภาพของปูนขาวในการพัฒนากำลังลดลงเมื่อ เทียบกับการใช้ OPC type 1 ส่วนการใช้ OPC type 1+FA [ภาพที่ ๑ (ง)] ในปริมาณร้อยละ ๓-๕ ให้ค่า UCS ในช่วงที่สูงกว่า OPC type 1 เล็กน้อย เนื่องจาก FA ช่วยลดความพรุนของโครงสร้างโดยรวมและทำ ปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดในช่วงต้นได้บางส่วน ซึ่งส่งผลเชิงบวกต่อกำลังในช่วงต้นในของส่วนผสมที่ใช้วัสดุ ปรับปรุงต่ำ (Hoy et al., 2016) อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณวัสดุปรับปรุงสูงขึ้นหรือที่อายุบ่มนานขึ้น OPC type 1 ให้ค่า UCS สูงกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจาก FA เป็นวัสดุพอซโซลานิกที่ต้องอาศัย $Ca(OH)_2$ จาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า จึงให้ค่า UCS ในระยะต้นต่ำกว่าและ พัฒนา UCS ในระยะยาวช้ากว่า OPC type 1 (Horpibulsuk et al., 2017) การใช้ OPC type 1+CSS-1h [ภาพที่ ๑ (จ)] ในปริมาณร้อยละ ๓-๕ ที่อายุบ่ม ๗ วัน ให้ค่า UCS ใกล้เคียงกับ OPC type 1 ซึ่งแสดงถึง ความสามารถของ CSS-1h ในการเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาค RAP ได้ดีในระยะต้น เนื่องจากฟิล์มของ อิมัลชันสามารถแทรกซึมและลดช่องว่างอากาศภายในโครงสร้างของส่วนผสม (Bualuang et al., 2021) อย่างไรก็ตาม ปริมาณวัสดุปรับปรุงที่เพิ่มขึ้นหรือที่มีอายุบ่มนานขึ้น OPC type 1 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าอย่าง ชัดเจน เนื่องจากอิมัลชันไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเพิ่มเติมเหมือนปูนซีเมนต์ และเมื่อบ่มนานขึ้น ผลของ การเคลือบผิวอนุภาคของ CSS-1h อาจทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ถูกจำกัด ส่งผลให้การ พัฒนากำลังอัดโดยรวมต่ำกว่า OPC type 1 (Bualuang et al., 2021)



ภาพที่ ๑ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุปรับปรุงคุณภาพกับค่า UCS ที่อายุบ่ม ๗, ๑๔ และ ๒๘ วัน (ก) OPC type 1, (ข) HC, (ค) OPC type 1+L, (ง) OPC type 1+FA และ (จ) OPC type 1+CSS-1h

ต้นทุนของวัสดุปรับปรุงแต่ละประเภทคำนวณที่ปริมาณวัสดุปรับปรุง ซึ่งให้ค่า UCS ที่อายุบ่ม ๗ วัน เท่ากับ ๑๗.๕ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามมาตรฐาน มทข. ๒๔๔-๒๕๖๗ โดยใช้วิธี Interpolate ในช่วง ปริมาณวัสดุปรับปรุงที่ให้ค่า UCS ต่ำและสูงกว่าค่ามาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ทำให้ได้ปริมาณวัสดุ ปรับปรุงคุณภาพสำหรับการคำนวณต้นทุนเท่ากับ ร้อยละ ๕.๔, ๕.๔, ๔.๖ และ ๕.๕ สำหรับวัสดุปรับปรุง ประเภท OPC type 1, HC, OPC type 1+L, OPC type 1+FA และ OPC type 1+CSS-1h ตามลำดับ

ต้นทุนของการปรับปรุง RAP ด้วยวัสดุปรับปรุงทั้ง ๕ ประเภท สำหรับการปรับปรุง RAP ปริมาณ ๑,๐๐๐ กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ ๒



ภาพที่ ๒ ต้นทุนของวัสดุปรับปรุงคุณภาพสำหรับการปรับปรุง RAP ปริมาณ ๑,๐๐๐ กิโลกรัม

การใช้ OPC type 1, HC, OPC type 1+FA, OPC type 1+L และ OPC type 1+CSS-1h ให้ต้นทุน ๑๖๐, ๑๓๒, ๑๓๖.๔๖, ๓๘๘ และ ๘๓๖ บาท ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม พบว่าทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุง RAP เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง คือการใช้ HC หรือ OPC type 1+FA เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่าวิธีมาตรฐาน OPC type 1 อย่างชัดเจน ส่วนการใช้ OPC type 1+L หรือ OPC type 1+CSS-1h ไม่คุ้มค่าด้านต้นทุนวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่ได้

บทสรุป

ค่า UCS ของ RAP เพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุปรับปรุงและอายุบ่ม โดยที่ OPC Type 1 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ขณะที่ HC และ OPC Type 1+FA ให้กำลังใกล้เคียงแต่มีต้นทุนต่ำกว่า (๑๓๒ บาท และ ๑๓๖.๔๖ บาท ต่อการปรับปรุง RAP ปริมาณ ๑,๐๐๐ กิโลกรัม) เมื่อเทียบกับ OPC Type 1 (๑๖๐ บาท) ส่วน OPC Type 1+L และ OPC Type 1+CSS-1h มีต้นทุนสูงแต่ไม่เพิ่มกำลังอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น HC และ OPC Type 1+FA จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุง RAP เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ทั้งด้านกำลังและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- Arulrajah, A., Piratheepan, J., & Disfani, M. M. (2014). Reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate blends in pavement subbases: Laboratory and field evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 349–357.
- Bualuang, T., Jitsangiam, P., Suwan, T., Rattanasak, U., Tangchirapat, W., & Thongmunee, S. (2021). Influence of asphalt emulsion inclusion on fly ash/hydrated lime alkali-activated material. *Materials*, 14(22), 7017.
- Debbarma, S., Ransinchung RN, G., & Singh, S. (2021). Suitability of various supplementary cementitious admixtures for RAP inclusive RCCP mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(12), 1568-1581.
- Divya, S., Saranya, R., & Praveenkumar, S. (2024). Pozzolanic attributes of hydraulic cement paste hybridized with agricultural by-product and nano-carbon. *Construction and Building Materials*, 411, 134119.
- Horpibulsuk, S., Hoy, M., Witchayaphong, P., Rachan, R., & Arulrajah, A. (2017). Recycled asphalt pavement - Fly ash geopolymer as a sustainable stabilized pavement material. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., & Arulrajah, A. (2016). Recycled asphalt pavement – fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. *Science of the Total Environment*, 573, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.078>
- Suddeepong, A., Intra, A., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Arulrajah, A., & Shen, J. S. (2018). Durability against wetting-drying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock. *Soils and Foundations*, 58(2), 333–343.
- Zhang, D., Zhao, J., Wang, D., Wang, Y., & Ma, X. (2020). Influence of pozzolanic materials on the properties of natural hydraulic lime based mortars. *Construction and Building Materials*, 244, 118360.