

อิทธิพลของค่า CBR ในวัสดุคั่นทางต่อการปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล

Influence of CBR value in embankment materials on the improvement of recycled asphalt concrete pavement

ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ^{1*} วีรพร พงศ์ติณบุตร² ต่อย่างค์ ดุ้ยวงศ์³ และ มนูญชัย นาอู่⁴

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

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

³torwongjoke@gmail.com, ⁴manachainaui2543@gmail.com

บทคัดย่อ

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่รื้อออกด้วยวิธีขุดไสหรือการขุดถือเป็นผลพลอยได้ที่ไม่มีต้นทุนและมักจะถูกนำมาทำปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยการผสมหินคลุกและซีเมนต์หรือสารผสมประเภทโพลีเมอร์ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า “การปรับปรุงชั้นทางเดิมในที่” ต้นทุนของค่าวัสดุและขั้นตอนจะลดลงอย่างมากหากสามารถจัดการใช้ซีเมนต์หรือสารผสมประเภทโพลีเมอร์ออกไปได้ สำหรับงานทางนั้น ถนนจะประกอบไปด้วยโครงสร้างทางหลายประเภทซึ่งในแต่ละชั้นใช้ค่า CBR ของวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาอิทธิพลของค่า CBR ในดินที่จะนำมาผสมต่อการปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า การศึกษาจะนำดินที่ใช้ในงานทางซึ่งมีขนาดคละและค่า CBR แตกต่างกันไปมาผสมกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าในหลายอัตราส่วนเพื่อนำไปทดสอบการบดอัด, หาค่า CBR และหาจุดที่ส่วนผสมดีที่สุด จากผลการศึกษาพบว่าดินที่ใส่เข้าไปทำให้ Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) บดอัดได้ดีขึ้นและมีค่า CBR สูงขึ้น ค่า CBR สูงสุดของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นตามค่า CBR ของดินที่ใส่เข้าไปทั้งนี้จะไม่เกินค่า CBR สูงสุดของดินที่นำมาผสมและจะคงที่แม้จะเพิ่มปริมาณดินเข้าไป ในกรณีที่วัสดุผสมถูกทดสอบในสถานะแช่น้ำพบว่าค่า CBR สูงขึ้นและมีการบวมตัวลดลงเมื่อเทียบกับการไม่ผสมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าสามารถไปแทนที่เนื้อดินทำให้ต้นทุนลดลง นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์ความคุ้มค่าในการที่จะเอาผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าไปใช้ในโครงสร้างถนนที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า โครงสร้างถนน การวิเคราะห์ความคุ้มค่า ค่า CBR การบวมตัว

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

Abstract

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is the by-product of removing old asphalt concrete pavements through milling or excavation and broadly improves the engineering properties by mixing RAP with crushed rock and cement or polymer called “pavement in-place recycling”. The cost of raw materials can be significantly decreased and the mixing process easier if cement or polymer is neglected. A road structure typically consists of multiple layers which the California Bearing Ratio (CBR) of the soil in each layer is different. This research studies the influence of CBR value in soils to improve the engineering properties of RAP. A different type of soil especially for road embankment includes gradation and CBR mixed with RAP in several ratios by weight were compacted and the CBR values evaluated to determine the appropriate mixing proportion. Based on the test results, native soil is found to improve the strength of RAP by densification and the maximum CBR of mixed material increased due to larger amounts of CBR in the native soil. However, the maximum CBR of mixed material after the appropriate mix proportion point is constant and cannot exceed the native soil. While ARP increases the CBR, it also reduces the percent of swelling for soaked condition. The cost of raw materials is reduced because RAP performs a rigid body filled soil mass up to increase volume. Finally, this research also presents a cost-benefit analysis in which the cost of different layers of road structure are compared.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement, Road structure, Cost-benefit analysis, CBR, Swelling

1. ที่มาและความสำคัญ

โดยทั่วไปผิวทางแบบยืดหยุ่นหรืออ่อนตัว (Flexible Pavement) ซึ่งมักใช้แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุผิวทางนั้นมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้มากกว่าผิวทางแบบแกร่งตัว (Rigid Pavement) โดยใช้คอนกรีตเป็นวัสดุผิวทางซึ่งเกิดการความแตกต่างของพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นพื้นทาง Mohod และ Kadam ในปี 2016 [1] ดังนั้นจึงมีผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องรื้อออกเป็นจำนวนมาก วิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันคือการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) โดยการนำเอาวัสดุชั้นทางเดิมที่ได้จากการชุบไส (Milling Drum) ให้ร่วนมาปรับปรุงคุณภาพไม่ว่าจะเป็นขนาดคละ ความสามารถในการรับกำลังหรือคุณสมบัติอื่น ๆ ตามข้อกำหนด ทั้งนี้จะใช้วิธีการเติมดินเข้าไปเพียงอย่างเดียวเพื่อปรับปรุงขนาดคละหรือจะเติมวัสดุผสมเช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และเถ้าลอย เป็นต้น ลงไปเพื่อปรับปรุงกำลังผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่นี้เรียกว่า Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) เพื่อลดต้นทุนค่าวัสดุในชั้นพื้นทางและยังเป็นการจัดการกับวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์ [2] และ [3]

การกำหนดวัสดุถมโดยส่วนใหญ่จะพิจารณาค่า CBR เป็นหลัก (California Bearing Ratio) โดยเฉพาะงานทาง [4] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่า CBR ของดินนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นพรัตน์ ท่วมประดิษฐ์ และประทีป ดวง-เดือน ในปี 2543 [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดินต่อค่า CBR ในดินประเภท SP, GP, SC และ GC ตามมาตรฐาน Unified Soil Classification พบว่าดินทุกประเภทที่กล่าวมาจะมีค่า CBR เพิ่มขึ้นตามค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในการบดอัด สยาม ยิ้มศิริ [6] พบว่าดินที่ไม่มีส่วนผสมของกรวด (เม็ดโตกว่าตะแกรงเบอร์ 4) มีแนวโน้มที่ค่า CBR ทั้งแบบแช่น้ำ และไม่แช่น้ำสูงกว่าดินที่มีส่วนผสมของกรวด ซึ่งพบทั้งในดินที่บดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor test) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test) หรือสรุปได้ว่าค่า CBR จะไม่เพิ่มขึ้นตามค่ามุมเสียดทานภายในของดิน (Internal friction angle) เสมอไป เนื่องจากดินที่มีส่วนผสมของกรวดในปริมาณที่มากถึงแม้จะมีแนวโน้มทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในของดินสูงขึ้นแต่ไม่สามารถทำให้ค่าการรับน้ำหนักของดินสูงขึ้นในการทดสอบ CBR เพราะยังต้องอาศัยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress) ซึ่งการทดสอบ CBR เป็นค่าคงที่

ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ และคณะ 2566 [3] ได้ทดลองนำ RAP ซึ่งมีกรวดผสมมากถึง 49 เปอร์เซ็นต์ มาทดสอบหาค่า CBR พบว่ามีค่าต่ำมากไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุถมได้ สาเหตุส่วนหนึ่งเป็นเพราะเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น นอกจากนั้นยังได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลผสมดินลูกรัง พบว่าวัสดุผสมที่มีค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างดินลูกรังกับ RAP เมื่อได้รับความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส [7] ค่า CBR จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบในอุณหภูมิห้องถึง 2 เท่า ดังนั้นวัสดุผสมดังกล่าวจึงไม่มีปัญหาในประเด็นด้านผลกระทบของความร้อนต่อค่าความสามารถในการรับกำลัง แต่เมื่อพิจารณาค่า CBR ที่อุณหภูมิห้องหลังจากผสมดินลูกรังมากกว่าจุดมีค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ดังแสดงตรงจุด D ในรูปที่ 3 ค่า CBR กลับไม่เพิ่มขึ้นอีกตามปริมาณดินลูกรังโดยมีค่าใกล้เคียงกับกับค่า CBR ของดินลูกรังที่นำมาผสม ซึ่งในประเด็นนี้ได้มีการเขียนข้อเสนอแนะเอาไว้คือ หากนำดินตามธรรมชาติที่มีค่า CBR ที่แตกต่างกันออกไปมาผสมกับ RAP แล้ว ค่าสูงสุดของค่า CBR จะเป็นอย่างไร จะยังมีค่าคงที่หลังจาก CBR เข้าสู่จุดสูงสุดหรือไม่

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาอิทธิพลของค่า CBR ในดินที่นำมาผสมกับ RAP ต่อการปรับปรุงคุณภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณค่า CBR สูงสุดของวัสดุผสมระหว่างดินธรรมชาติที่มีต้นทุนกับ RAP ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือจากจากหรือผิวทางเก่าที่ต้องใช้พื้นที่กองเก็บจำนวนมากและยังถือว่าเป็นต้นทุนอย่างหนึ่งเมื่อไม่สามารถนำพื้นที่นั้นมาใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งยังเป็นทัศนียภาพที่ไม่สวยงาม

2. วิธีดำเนินงานวิจัยและขอบเขต

การบดอัดดินจะใช้แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) และการศึกษาการรับกำลังจะทดสอบด้วยการทดลอง CBR แบบไม่แช่น้ำเพื่อหาอัตรา

ส่วนผสมที่เหมาะสมในด้านต้นทุน (จุด A, B, C และ D ในรูปที่ 3) ของวัสดุผสมโดยดินที่นำมาผสมกับ RAP มีค่า CBR แตกต่างกันไปจากนั้นจะนำอัตราส่วนผสมดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบ CBR แบบแช่น้ำเพื่อดูผลกระทบของปริมาณน้ำในมวลดินในด้านการรับกำลังและการบวมตัว (Swelling) การทดสอบจะมีการทำซ้ำเพิ่มอีก 1 ตัวอย่างซึ่งถ้าผลที่ออกมาผิดพลาดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ผลที่แสดงในงานวิจัยนี้จะเป็นผลเฉลี่ยของการทดสอบ 2 ตัวอย่าง แต่หากผลทั้ง 2 ต่างกันมากก็จะทำการทดสอบใหม่โดยจะเลือก 2 ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันมาเฉลี่ยเป็นผลที่แสดง วัสดุที่นำมาใช้จะผ่านการทดสอบเพื่อหาขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแบบประเภทออกได้ดังต่อไปนี้

2.1 หินคลุก โดยหินคลุกที่นำมาใช้ได้มาจากโรงโม่หินในจังหวัดชลบุรี จากการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรง (Sieve Analysis) แล้วนำผลที่ได้ไปจำแนกประเภทดินด้วยระบบ Unified Soil Classification System (USCS) พบว่าเป็นดินชนิด GW โดยมีทรายผสมมากถึง 43 เปอร์เซ็นต์ (Well- Graded Gravel with Sand) เมื่อนำหินคลุกนี้มาทดสอบค่าความแน่นแห้งสูงสุด พบว่าที่ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum Dry Unit Weight) ที่ 22.40 kN/m^3 และมีปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Water Content, OWC) เท่ากับ 5.9 เปอร์เซ็นต์ การทดสอบค่า CBR ได้ผลการทดสอบที่ 88 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทางพบว่าหินคลุกนี้สามารถนำมาใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Base) [4]

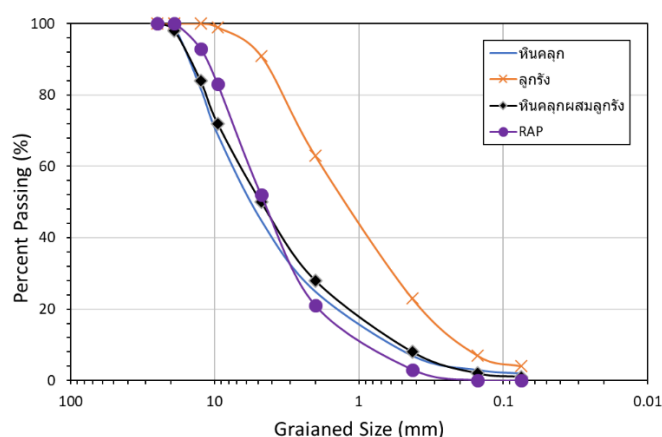
2.2 ดินลูกรัง ดินที่ใช้นำมาจากบ่อยืมในจังหวัดชลบุรีเช่นกัน จากการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรงแล้วนำผลที่ได้ไปจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินชนิด SW โดยมีกรวดผสมอยู่ 9 เปอร์เซ็นต์ (Well- Graded Sand) มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ 19.20 kN/m^3 และมี OWC เท่ากับ 10.50 เปอร์เซ็นต์ การทดสอบค่า CBR ได้ผลการทดสอบที่ 43 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาตามข้อกำหนดของมาตรฐานงานทางพบว่าหินคลุกนี้สามารถนำมาใช้เป็นชั้นวัสดุรองพื้นทาง (Subbase) [4]

2.3 แอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ได้จากการชุบไส สำหรับ RAP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากโครงการซ่อมแซมปรับปรุงพื้นผิวทางขับ (Taxiway) ทางขับเข้าสู่หลุมจอด (Taxilane) สนามบินสุวรรณภูมิ จากการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรงแล้วนำผลที่ได้ไปจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินชนิด SW โดยมีกรวดผสมอยู่ 48 เปอร์เซ็นต์ (Well- Graded Sand with Gravel) จากการทดลองเทน้ำลงไปพบว่าน้ำไหลซึมออกทางด้านล่างทันทีจึงไม่สามารถทดสอบเพื่อหาค่า OWC ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทุก ๆ การทดสอบที่ใช้ RAP นั้นหมายถึง RAP ที่ผ่านการตากแห้งในที่ร่มด้วยอุณหภูมิห้องอย่างน้อย 3 วัน แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว ผลการทดสอบค่า CBR ตัว RAP ที่อุณหภูมิห้องนั้นมีค่าต่ำมากเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นในอากาศ (Air-Dry Unit Weight) ที่ 17.95 kN/m^3 ซึ่งถือว่าอยู่ในสถานะแน่นปานกลาง (Medium Dense Sand) แม้ว่าจะผ่านการบดอัดมาแล้วก็ตาม นั่นหมายความว่า การบดอัดด้วยการกระแทกด้วยค้อนเป็นชั้น ๆ นั้นไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทำให้เนื้อ RAP นี้แน่นได้ เนื่องจากผิวของ RAP มียางมะตอยเคลือบอยู่ทำให้ตัวเม็ดหินติดกันเป็นก้อนไม่สามารถขยับตัวเพื่อปรับโครงสร้างภายในหลังจากได้รับพลังงานจากการบดอัด และน้ำก็ไม่สามารถช่วยเข้าไปหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างเม็ดหินได้ ซึ่งผลดังกล่าวก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ และคณะ 2566 [3]

2.4 เนื่องจากต้องการค่า CBR ที่แตกต่างกันในพื้นที่ฐานที่จะนำมาผสมกับ RAP งานวิจัยนี้จึงทดลองเอาหินคลุกผสมกับดินลูกรังในหลายอัตราส่วนแล้วนำไปทดสอบหาค่า CBR ที่ต้องการพบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างหินคลุกต่อดินลูกรังที่ 9:1 มีความเหมาะสมที่จะใช้โดยมีคุณสมบัติพื้นฐานดังต่อไปนี้ จากการวิเคราะห์ขนาดคละด้วยตะแกรงแล้วนำผลที่ได้ไปจำแนกประเภทดินด้วยระบบ USCS พบว่าเป็นดินชนิด GP โดยมีทรายผสมอยู่ 49 เปอร์เซ็นต์ (Poorly- Graded Gravel with Sand) มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ 22.20 kN/m^3 และมี OWC เท่ากับ 5.99 เปอร์เซ็นต์ การทดสอบค่า CBR ได้ผลการทดสอบที่ 73 เปอร์เซ็นต์

3. การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบจะเริ่มการนำเอา RAP นำมาผสมกับดินที่เตรียมไว้ซึ่งอธิบายคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมแล้วในหัวข้อที่ 2 ประกอบด้วย หินคลุก หินคลุกผสมดินลูกรัง และดินลูกรัง ซึ่งมีค่า CBR แตกต่างกันตามอัตราส่วนที่ต้องการ ดินที่ใช้จะต้องผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว ทิ้งไว้ให้เย็นตัวแล้วเก็บในภาชนะปิดมิดชิดซึ่งขั้นตอนนี้จะทำในปริมาณที่เหมาะสมกับการทดลองครั้งนั้น ๆ การใส่น้ำจะใช้ปริมาณน้ำที่ OMC ของดินชนิดนั้น ๆ โดยการคลุกดินให้เข้ากับน้ำก่อนจากนั้นจึงนำไปผสมกับ RAP คลุกเคล้าให้ส่วนผสมเข้ากันดีแล้วใช้ผ้าชื้นคลุมไว้โดยไม่ให้ผ้าสัมผัสกับดินเพื่อเตรียมการบดอัด อัตราส่วนผสมจะเริ่มจากน้ำหนักดิน (แห้งในเตาอบ) ต่อน้ำหนัก RAP (ชื้นในอากาศ) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ไปจนถึง 14 ขึ้นอยู่กับชนิดดินและผลการทดสอบค่า CBR



รูปที่ 1 ขนาดคละของดิน และ RAP

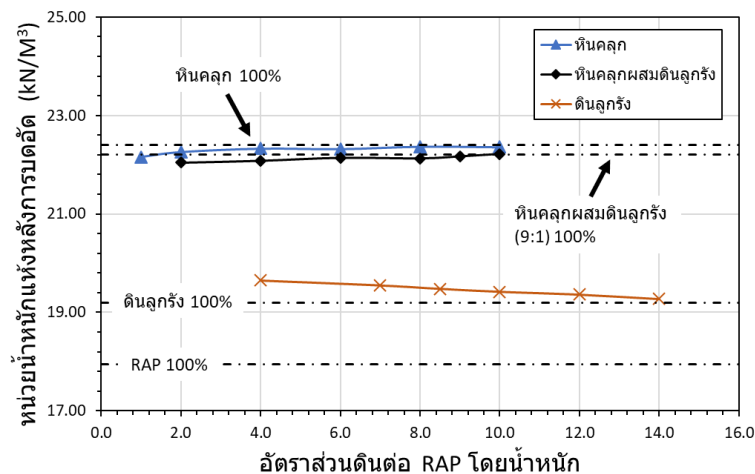
นำวัสดุผสมที่ได้เตรียมไว้แล้วในตอนต้นมาบดอัดซึ่งผลการทดสอบเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2 พบว่าหินคลุกและหินคลุกผสมดินลูกรังจะมีหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณ RAP ที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตัวหินคลุก (22.40 kN/m^3) และหินคลุกผสมดินลูกรัง (22.20 kN/m^3) มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งหลังบดอัดมากกว่า RAP (17.95 kN/m^3) อีกทั้งวัสดุทั้งสามมีความถ่วงจำเพาะไม่ต่างกันมากเพราะวัสดุส่วนใหญ่ย่อยมาจากหิน เมื่อมองโดยรวมแล้วจึงเป็นวัสดุพื้นฐานเดียวกันแต่ที่หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นนั้นเป็นเพราะปริมาณยางมะตอยที่เบาว่าลดลงตาม RAP เมื่อพิจารณาที่จุดเริ่มต้นที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 2 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งหลังบดอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ

RAP เนื่องจากหินคลุกและดินลูกรังจะเข้าไปแทรกตัวภายใน RAP ทำให้ตัวเม็ด RAP ไม่ยึดติดกันและสามารถปรับโครงสร้างไปตามหินคลุกและดินลูกรังได้จึงทำให้การบดอัดมีประสิทธิภาพดีมากขึ้น

ส่วนในดินลูกรังพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักหลังบดอัดเพิ่มขึ้น 15 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ RAP ที่ค่าอัตราส่วนผสมเท่ากับ 4 ซึ่งก็เป็นเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาในตอนต้นคือหน่วยน้ำหนักแห้งหลังบดอัดของดินลูกรังมากกว่า RAP และที่ดินลูกรังเข้าไปแทรกตัวภายใน RAP ทำให้การบดอัดดีขึ้น อย่างไรก็ตามหน่วยน้ำหนักแห้งกลับลดลงเมื่อปริมาณ RAP ลดลงซึ่งไม่ใช่ประเด็นในเรื่องของความสามารถในการปรับโครงสร้างภายในหลังรับพลังงานบดอัด แต่เนื่องจากดินลูกรังมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า RAP ซึ่งพื้นฐานคือหิน ดังนั้นเมื่อ RAP ลดลง ทำให้ปริมาณหินที่ถูกดินลูกรังหุ้มก็จะน้อยลงลงไปด้วย ผลทดสอบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลของ ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ และคณะ 2566 [3] ซึ่งก็ใช้ดินลูกรังผสมกับ RAP เช่นกันแต่ค่าความหนาแน่นแห้งหลังการบดอัดกลับเพิ่มขึ้นเมื่อ RAP ลดลง ผลจึงไม่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ นั่นเป็นเพราะดินลูกรังที่ใช้มาจากแหล่งที่ต่างกันและมีผลการจำแนกประเภทดินที่ต่างกันอย่างเช่นกัน ในงานวิจัยของ ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ และคณะ 2566 [3] ผลการจำแนกดินลูกรังได้เป็นดินชนิด Poorly Graded Gravel with Sand (GP) ซึ่งมีกรวดเป็นส่วนผสมหลักและสอดคล้องกับผลทดสอบการบดอัดในหินคลุกและหินคลุกผสมดินลูกรังผสม RAP ในงานวิจัยนี้ แต่ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้จำแนกประเภทดินออกมาได้เป็นดินชนิด Well- Graded Sand (SW) ซึ่งมีส่วนผสมของทรายเป็นหลักมีกรวดเป็นส่วนผสมรอง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการบดอัดและซีปียาร์ของดินผสมในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของดินพื้นฐาน	อัตราส่วนผสม (ดิน:RAP) โดยน้ำหนัก	หน่วยน้ำหนักแห้ง (kN/M ³)	CBR (%)
หินคลุก	1:1	22.16	25
	2:1	22.26	43
	4:1	22.33	60
	6:1	22.32	79
	8:1	22.37	87
	10:1	22.36	86
หินคลุกผสมดิน ลูกรัง	2:1	22.04	43
	4:1	22.08	49
	6:1	22.14	57
	8:1	22.13	73
	9:1	22.17	72
	10:1	22.22	75
ดินลูกรัง	4:1	19.65	26
	7:1	19.55	31
	8.5:1	19.48	35
	10:1	19.42	39
	12:1	19.36	43
	14:1	19.27	43



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับอัตราส่วนน้ำหนักดินพื้นฐานต่อ RAP

ผลการทดสอบค่า CBR แบบไม่แช่น้ำแสดงในรูปที่ 3 พบว่าค่า CBR ของทั้ง 3 ตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินพื้นฐานที่ใส่เข้าไปโดยมีค่า CBR สูงสุดไม่เกินค่าของดินชนิดนั้น ๆ ที่นำมาผสมกับ RAP สอดคล้องกับผลของ ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ และคณะ 2566 [3] ที่แสดงตรงจุด D ในรูปที่ 3 โดยเมื่อส่วนผสมถึงจุด A, B และ C ค่า CBR จะคงที่ซึ่งก็คือจุดที่ค่าอัตราส่วนผสมเหมาะสมที่สุดทั้งในด้านกำลังและต้นทุน ยกตัวอย่างในกรณีหินคลุกที่มีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่เหมาะสมคือ ใช้หินคลุก 8 ส่วนต่อ RAP 1 ส่วน ดังนั้นจะสามารถผสม RAP เข้าไปแทนที่หินคลุก 11.1 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักวัสดุผสมทั้งหมดจะทำให้วัสดุผสมมีค่า CBR เท่ากับหินคลุก ทำให้ต้นทุนการก่อสร้างลดลงทั้งด้านค่าวัสดุและค่าขนส่ง ส่วนในด้านสิ่งแวดล้อมก็ลดการระเบิดหินใหม่ขึ้นมาใช้ ลดพลังงานที่ใช้ในการขนส่งเพื่อย่อยหิน และลดปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการระเบิดและย่อยหินซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในปัจจุบัน ในด้านการบริหารพื้นที่ก็ไม่ต้องสำรวจหรือจัดหาพื้นที่กองเก็บ RAP

จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมที่จุด A, B และ C พบว่าเมื่อดินที่นำมาผสมกับ RAP มีขนาดละเอียดใหญ่กว่านอกจากจะได้ค่า CBR ที่สูงกว่ายังมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ที่รวดเร็วอีกด้วย และจากการเปรียบเทียบดังกล่าวยังพบอีกว่า การใช้ดินที่มีขนาดละเอียดใหญ่กว่ายังมีแนวโน้มที่จะใช้ปริมาณ RAP ได้มากกว่าเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่ดีที่สุด ดังนั้นหากมีโครงการก่อสร้างถนนที่ต้องรื้อผิวแอสฟัลต์คอนกรีตออกด้วยวิธีชุดไส การนำเอา RAP ไปผสมกับหินคลุกซึ่งใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Base) นั้นเป็นทางเลือกที่ดีกว่านำไปผสมกับดินลูกรังเพื่อทำชั้นรองพื้นทาง (Subbase) เพราะ RAP สามารถเข้าไปใช้แทนหินคลุกได้ 11.1 เปอร์เซ็นต์ แต่ในดินลูกรังใช้แทนได้เพียง 7.7 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการเลือกผสมในหินคลุกจะสามารถประหยัดต้นทุนได้ทั้งในเรื่องปริมาณการแทนที่และราคาค่าวัสดุเนื่องจากหินคลุกมีราคาสูงกว่าดินลูกรังกว่า 200 เปอร์เซ็นต์

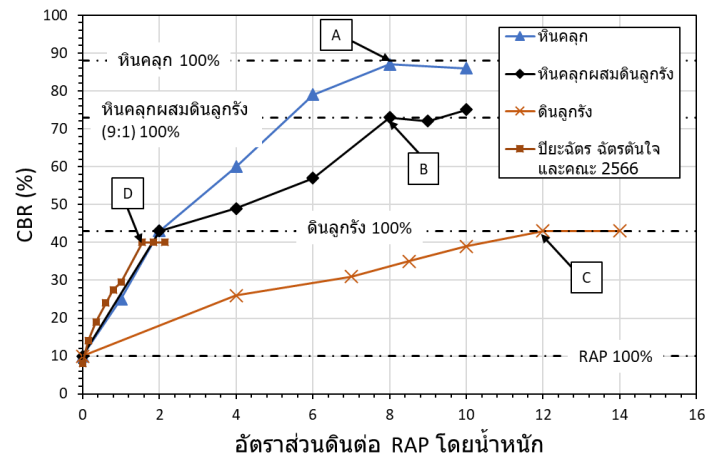
จากรูปที่ 3 เมื่อนำผลการศึกษานี้เปรียบเทียบกับ ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ และคณะ 2566 [3] ซึ่งใช้ดินลูกรัง (ชนิด ก) ผสมกับ RAP เช่นกัน พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ CBR กลับใกล้เคียงกับผลการทดสอบในหินคลุกและหินคลุกผสมลูกรัง ทำให้เส้นกราฟพุ่งเขาสู่จุดสูงสุดอย่างรวดเร็วไปเท่ากับค่า CBR สูงสุดของดินลูกรังที่นำมาผสม แตกต่างจากการใช้ดินลูกรังในงานวิจัยนี้ (ชนิด ข) เป็นอย่างมาก นั้นเป็นเพราะดิน

ลูกรังทั้งสองถึงแม้จะมีค่า CBR ใกล้เคียงกันมาก แต่การจำแนกประเภทดินนั้นแตกต่างกันทำให้ได้ผลทดสอบที่แตกต่างกันเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ดินลูกรังชนิด ข มีส่วนผสมของทรายเป็นหลัก แต่ดินลูกรังชนิด ก กลับมีส่วนผสมของกรวดเป็นหลักดังที่วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 2

ในโครงการก่อสร้างถนน หากโครงการใช้ดินลูกรังชนิด ก ทำชั้นรองพื้นทางจะสามารถใช้ RAP ทดแทนดินลูกรังได้ถึง 39.2 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักวัสดุผสมทั้งหมดซึ่งหากเทียบกับหินคลุกชนิดที่ RAP ทดแทนได้เพียง 11.1 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณดินถม 1 ลูกบาศก์เมตร การนำเอา RAP ไปผสมกับดินลูกรังชนิด ก จะประหยัดต้นทุนได้ 15.68 บาท แต่ถ้าผสมหินคลุกจะประหยัดต้นทุนได้ 14.99 บาท เมื่อคิดราคาหินคลุกที่ 135 บาทต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรและ 40 บาทสำหรับดินลูกรัง ดังนั้นการเลือกที่จะนำ RAP ไปผสมกับวัสดุได้นั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า CBR เสมอไปแต่จะต้องมีการเปรียบเทียบต้นทุนความคุ้มค่าก่อนเสมอ ทั้งนี้ราคาค่าวัสดุในแต่ละพื้นที่นั้นแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ปริมาณดินที่เหมาะสมพบว่ายังต้องใช้ปริมาณดินที่จะเข้ามาผสมกับ RAP ที่มากเพื่อให้ได้ค่า CBR ของวัสดุผสมที่มีกำลังเทียบเท่ากัน อย่างไรก็ตามหากต้องการใช้ RAP ในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อลดต้นทุนค่าวัสดุลงนั้นยังสามารถทำได้ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีหินคลุกที่มีอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 8:1 มีค่า CBR ที่ 88 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมากกว่ามาตรฐานพื้นทางทั่วไปที่มักจะกำหนดที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นยังสามารถลดอัตราส่วนผสมลงมาได้เป็น 6.2:1 ซึ่งมีค่า CBR ที่ 82 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณ RAP เข้าไปได้เป็น 16.1 เปอร์เซ็นต์เพิ่มจากเดิม 4.7 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดต้นทุนได้เป็น 21.73 บาท ในการถมดิน 1 ลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ราคาค่าวัสดุที่นำมาคำนวณนั้นเป็นข้อมูลเบื้องต้นจากอินเทอร์เน็ตเพื่อใช้ในการยกตัวอย่างวิธีการพิจารณาต้นทุนเท่านั้น การนำไปใช้จริงจะต้องอ้างอิงราคาจริงซึ่งแต่ละพื้นที่นั้นไม่เท่ากัน

คุณสมบัติอีกประการที่ต้องนำมาคำนึงถึงการคัดเลือกวัสดุพื้นทางหรือดินถมคือค่า CBR แบบแช่น้ำและค่าการบวมตัว เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีโอกาสที่จะโดนน้ำทั้งน้ำที่มีจากบนดินและใต้ดิน หากดินที่มาทำชั้นทางมีความอ่อนไหวต่อค่าความชื้นสูงจะทำให้ผิวทางหรือโครงสร้างที่อยู่ด้านบนของชั้นดินถมไม่มีเสถียรภาพและอาจเกิดการวิบัติได้ ส่วนการบวมตัวนั้นจะส่งผลกระทบอย่างมากในเรื่องการแตกร้าว โดยเฉพาะกับโครงสร้างที่มีความแข็งแรง (Rigid Structure) ในงานวิจัยที่ได้เลือกอัตราส่วนผสมที่จุด A B และ C ในรูปที่ 3 นำไปบดอัดแล้วทดสอบค่า CBR แบบแช่น้ำและค่าการบวมตัวซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่า CBR แบบแช่น้ำมีแนวโน้มจะสูงขึ้นในดินที่มี RAP ผสม ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้จะลดลงตามปริมาณกรวดที่อยู่ในดินพื้นฐานเดิมที่นำมาผสม ทั้งหมดนี้เนื่องจากกรวดเดิมที่มีอยู่ในดินและกรวดใหม่ที่เพิ่มขึ้นจากการผสม RAP ไม่มีความอ่อนไหวในด้านกำลังต่อค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังพบว่า RAP มีส่วนช่วยทำให้ค่าการบวมตัวลดลง และค่าการลดลงนี้จะลดลงตามปริมาณกรวดที่อยู่ในดินพื้นฐานเดิมที่นำมาผสมเนื่องจากกรวดเดิมที่มีอยู่ในดินและกรวดใหม่ที่เพิ่มขึ้นจากการผสม RAP มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3 ผลการทดสอบ CBR โดยดินที่นำมาผสมกับ RAP ที่มีค่า CBR แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่า CBR แบบแช่น้ำและการบวมตัว

ชนิดของดิน	อัตราส่วนผสม (ดิน:RAP) โดย น้ำหนัก	CBR (%) ไม่แช่น้ำ	CBR (%) แช่น้ำ	ความแตกต่างของค่า CBR แบบแช่น้ำ ระหว่าง ผสมกับไม่ผสม RAP (%)	Swell (%)	ความแตกต่างของค่า Swell ระหว่างผสม กับไม่ผสม RAP (%)
หินคลุกผสม RAP	(8:1)	87	88	0	0.15	-0.02
หินคลุก	(1:0)	88	88		0.17	
หินคลุกผสมดินลูกรังผสม RAP	(8:1)	73	72	+2	0.28	-0.03
หินคลุกผสมดินลูกรัง	(1:0)	73	70		0.31	
ดินลูกรังผสม RAP	(12:1)	43	42	+3	1.12	-0.04
ดินลูกรัง	(1:0)	43	39		1.16	

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ต้องการทราบถึงอิทธิพลของค่า CBR ในดินที่นำมาผสมกับ RAP ทั้งในด้านกำลังและการบวมตัวเมื่อวัสดุผสมนี้สัมผัสกับน้ำที่ถือได้ว่าเป็นจุดอ่อนที่สำคัญของดิน นอกจากนั้นยังเสนอแนวทางการตัดสินใจเพื่อเอา RAP ไปใช้ให้เกิดประสิทธิภาพทั้งในด้านวิศวกรรมและความคุ้มค่าให้ด้านต้นทุน ค่า CBR ของดินที่นำมาผสมกับ RAP ไม่มีผลต่อค่า CBR สูงสุดของวัสดุผสมเพราะไม่สามารถทำให้ค่า CBR มีค่ามากกว่าดินพื้นฐานที่นำมาผสมได้ การเลือกอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดนั้นสามารถหาได้จากจุดหักของกราฟ ในความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอัตราส่วนผสม หากผสมดินพื้นฐานในปริมาณที่น้อยกว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดก็จะส่งผลให้ได้ค่า CBR ที่ต่ำลง แต่หากผสมดินพื้นฐานในปริมาณที่มากกว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดก็จะทำให้สิ้นเปลืองต้นทุน ส่วนการเลือกใช้ RAP ไปผสมกับชั้นทางประเภทไหนให้คุ้มค่านั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า CBR ที่ต้องการ แต่จะต้องใช้การวิเคราะห์ต้นทุนตามอัตราส่วนที่ RAP จะสามารถแทนที่ดินธรรมชาติได้ RAP ที่นำมาผสมในดินนั้นมีแนวโน้มในการเพิ่มค่า CBR แบบแช่น้ำเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ผสม RAP และยังช่วยในการลดการบวมตัว อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้เพียงแต่ทำให้เชื่อมั่นได้ว่า RAP จะไม่เข้าไปทำให้ความสามารถในวัสดุเดิมที่ต้องการนำมาใช้มีกำลังลดลงเมื่อต้องสัมผัสกับน้ำโดยตรง การผสม RAP เข้าไปในดิน

ไม่ถือว่าเป็นการปรับปรุงดินแต่เป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดการทำลายสิ่งแวดล้อม แต่การผสมดินเข้าไปใน RAP ถือเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้กับ RAP ดินที่มีขนาดละเอียดที่หยาบกว่าสามารถเพิ่มอัตราการพัฒนาค่า CBR ได้ดีกว่าดินที่มีขนาดละเอียดแต่ก็ไม่ส่งผลถึงค่า CBR สูงสุดของวัสดุผสม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohod, M. V. and Kadam, K. N. (2016) A comparative study on rigid and flexible pavement: A review. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 13(3), 84-88.
- [2] กรมทางหลวง. (2543). มาตรฐานที่ ทล.-ม.213/2543. การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling).
- [3] ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ, วีรพร พงศ์ติณบุตร, ภาวิณี แคมวงศ์ และ สุวิจักขณ์ เอมจิตต์. (2566). ผลกระทบของอุณหภูมิต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลผสมดินลูกรัง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์, 5(3), 5-13.
- [4] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2557) มาตรฐานงานทาง.
- [5] นพรัตน์ ท่วมประดิษฐ์ และ ประทีป ดวงเดือน. (2543). อิทธิพลของการบดอัดซ้ำต่อคุณสมบัติของดินลูกรังในการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6
- [6] สยาม ยิ้มศิริ. (2561). คุณสมบัติการบดอัดของดินที่มีอนุภาคใหญ่ปน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา
- [7] พงศา ไวยากรณ, จิระยุทธ สืบสุข, อนิรุติ สุขแสน, อัครเดช ศิริพันธุ์ และ หวังแก้ว บุญสวน. (2560). การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพฤติกรรมทางกลของชั้นพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ภายใต้การใช้งานในภูมิภาคเขตร้อน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 22