

กำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังเกือบตกชั้น

คุณภาพปรับปรุงด้วยผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิลและซีเมนต์

Unconfined Compressive Strength and Microstructure of

Marginal Lateritic Soil Improved by Recycled Asphalt

Pavement (RAP) and Cement

จิระยุทธ สืบสุข* เบญจพล ขุนวิเศษ อนิรุทธิ์ สุขแสน เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ คมกร ไชยเดชาธร
ศูนย์วิจัยเพื่อความก้าวหน้าด้านวิศวกรรมโยธาและวัสดุก่อสร้าง สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* Corresponding Author, E-mail: jirayut.su@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงดินเกือบตกชั้นคุณภาพด้วยการผสมผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP) และซีเมนต์ ดินที่ถูกปรับปรุงนี้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ การศึกษาทำโดยทดสอบการรับแรงอัดแกนเดียวและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมภายใต้สัดส่วนผสมต่างๆ จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นแล้วกำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าดินผสม RAP จะถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์ แต่การลดลงอย่างมากของกำลังอัดแกนเดียวสามารถพบได้อย่างชัดเจนกับตัวอย่างที่มีปริมาณ RAP มากกว่าร้อยละ 50 ของแอสฟัลต์ใน RAP ขีดขวางผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในการเกาะยึดกับมวลดิน

คำสำคัญ : ดินลูกรังเกือบตกชั้นคุณภาพ, ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล, ซีเมนต์, กำลังอัดแกนเดียว, โครงสร้างจุลภาค

Abstract

This research presents the marginal lateritic soil improved by mixing with recycled asphalt pavement (RAP) and cement. The improved soils have been studied for using as soil-cement base course. The studies were performed by the unconfined compression test and microstructure analysis on the mix materials under different proportions. Based on the experiment result, it was seen that as increasing in RAP content, the unconfined compressive strength (q_u) tends to decrease significantly. Although the soil-RAP mixtures were treated by cement, the large reductions in q_u have been clearly seen for the samples with RAP content higher than 50%. The asphalt binder in RAP obstructs the hydration product for attaching with soil aggregates.

Keywords : Marginal lateritic soil, Recycled asphalt pavement, Cement, Unconfined compressive strength, Microstructure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

การซ่อมแซมถนนผิวทางแอสฟัลต์หรือการรื้อเพื่อทำผิวทางใหม่ทำโดยการรื้อผิวทางเก่าที่หมดอายุหรือชำรุดจนถึงชั้นวัสดุชั้นพื้นทางเก่าออกก่อนที่จะซ่อมแซมโดยแทนที่ชั้นพื้นทางด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เก่านำกลับมาใช้ใหม่บางส่วนโดยทำการบดอัดผสมกับชั้นพื้นทางเดิมเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลัง วิธีนี้เรียกว่า “การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้งานใหม่ (Pavement Recycling)” [1] ผิวทางแอสฟัลต์ที่ถูกรื้อถอนออกจากรoadงานบางส่วนถูกนำกลับไปใช้ในการผลิตผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ แต่ส่วนที่เหลือจะนำไปกองไว้ในสถานที่เก็บเป็นขยะที่ไม่ได้ใช้งาน ในแต่ละปีมีการเพิ่มขึ้นของขยะผิวทางแอสฟัลต์จากการซ่อมแซมถนนเป็นจำนวนมาก

ผิวทางแอสฟัลต์จากการซ่อมถนนลาดขางดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในงานวิศวกรรมได้ โดยเรียกว่า “Recycled asphalt pavement” หรือ RAP [2] การนำ RAP มาใช้ในงานวิศวกรรมโดยตรงอาจประสบปัญหาการใช้เนื่องจาก RAP บดอัดได้ไม่ดีและมีกำลังอัดต่ำแม้จะปรับปรุงด้วยซีเมนต์แล้วก็ตาม [3-5] เนื่องจากขนาดผลไม่ดีและยางแอสฟัลต์ที่มีอยู่ในส่วนผสม อย่างไรก็ตาม ข้อดีของ RAP คือ มีวัสดุคัดเลือกชั้นดี เช่น หินคลุก เป็นส่วนผสมหลัก เมื่อนำมาผสมกับวัสดุในท้องที่ เช่น ดินลูกรัง ซึ่งมักเป็นวัสดุที่มีปัญหาการใช้งานสำหรับเป็นวัสดุชั้นพื้นทางเนื่องจากมีส่วนละเอียดค่อนข้างสูง วัสดุผสมระหว่างดินลูกรังและ RAP จะมีขนาดผลที่ดีขึ้นเป็นไปตามคุณสมบัติวัสดุคัดเลือกของกรมทางหลวงที่จะใช้งาน เป็นชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ได้ [6] ดังนั้น บทความนี้ศึกษาผลของปริมาณ RAP ต่อขนาดผลและการบดอัด ตลอดจนผลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรังคกชั้นคุณภาพปรับปรุงด้วย RAP และซีเมนต์ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของวัสดุผสมและกลไกการพัฒนาำลังอัดที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบใช้งานวัสดุรีไซเคิลชนิดนี้ได้เป็นอย่างดีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการทดสอบ

2.1 การเตรียมวัสดุ

ดินตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นดินลูกรังจากบ่อขุดเพื่อให้เห็นที่มีลักษณะที่เหมือนกัน และมีการปนเปื้อนน้อยที่สุด นำตัวอย่างดินไปผึ่งให้แห้งใช้ค้อนยางทุบดินที่จับตัวเป็นก้อนให้แตกตัวออกจากกันเพื่อให้มีขนาดเหมาะสมในการทดสอบ จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 วัสดุ RAP ที่ใช้ได้จากกรรอกซ่อมแซมถนนทางหลวงในเขตจังหวัดนครราชสีมา วัสดุถูกย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว ซีเมนต์ที่ใช้เป็นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 สมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ [7] พิกัดเหลวและพิกัดพลาสติก [8] การกระจายขนาดผล และการจำแนกชนิดดิน [9]

2.2 การทดสอบการบดอัด

การทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินลูกรังผสม RAP ทำที่อัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP เท่ากับ 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 ตามลำดับ โดยวิธีสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test)

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยเตรียมที่หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสม จากนั้นห่อก้อนตัวอย่างด้วยพลาสติกเพื่อรักษาความชื้นและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทำตามมาตรฐาน ASTM D5102 [10] เมื่อก้อนตัวอย่างวิบัตินำชิ้นตัวอย่างบางก้อนไปทำการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาค

2.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ชิ้นส่วนวัสดุจากการทดสอบกำลังอัดถูกนำมาผ่านกระบวนการ Freeze dry ด้วยไนโตรเจนเหลว และทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 4 มิลลิเมตร ก้อนตัวอย่างถูกนำไปติดตั้งบนแท่งติดตัวอย่าง หลังจากนั้น

นำเข้าสู่กระบวนการเคลือบด้วยเครื่อง Iron sputtering device แล้วจึงนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ดินลูกรังที่นำมาศึกษาพบว่ามีปริมาณทรายร้อยละ 75 เปอร์เซนต์ และดินส่วนละเอียดร้อยละ 25 ดินส่วนละเอียดมีขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 21.8 เปอร์เซนต์ และ 5 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ซึ่งดินดังกล่าวจัดเป็นดินที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับชั้นพื้นทางดินซีเมนต์พอดิ [11] ดินมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 จำแนกดินตามระบบ Unified soil classified system (USCS) เป็นทรายปนดินเหนียว (SC) วัสดุ RAP มีปริมาณกรวดร้อยละ 60 ทรายร้อยละ 40 และไม่มีส่วนละเอียด ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ปริมาณยาง (Asphalt binder) ประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก RAP ถูกจำแนกตามระบบ USCS เป็นกรวดที่มีขนาดละเอียด (GP)

การบดอัดของดินลูกรังที่พลังงานสูงกว่ามาตรฐานหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดของดินลูกรังมีค่าเท่ากับ 21.25 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ร้อยละ 7.4 ส่วนกราฟการบดอัดของ RAP มีค่าน้ำหนักดินแห้งสูงสุดและ OMC เท่ากับ 17.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร และร้อยละ 6.2 เปอร์เซนต์ตามลำดับ หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดของดินลูกรังสูงกว่า RAP ชัดเจนเนื่องจาก RAP มีขนาดละเอียดและขนาดละเอียดใหญ่กว่า การบดอัดดินลูกรังผสม RAP ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ มีผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและ OMC ของแต่ละสัดส่วนแตกต่างกัน ความสามารถในการบดอัดที่แตกต่างกันเกิดจากการกระจายขนาดละเอียดของอัตราส่วนต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน เมื่อปริมาณดินลูกรังในส่วนผสมมากขึ้น หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น สัดส่วนของ RAP ในส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 50 ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมากนัก แต่เมื่อปริมาณ RAP มีสัดส่วนเกินกว่าร้อยละ 50 หน่วยน้ำหนักแห้งลดลงอย่างชัดเจน อัตราส่วนของดินลูกรังต่อ RAP ที่

ตารางที่ 1 ตารางจำแนกอัตราส่วนดินลูกรังต่อ RAP หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด OMC และชนิดของดินตามระบบ USCS

Soil:RAP Ratio	Maximum dry density $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	Optimum moisture content (%)	Soil type (USCS)
0:100	17.60	6.2	GP
30:70	20.85	8.3	SW-SC
50 : 50	21.85	6.5	SC
70 : 30	21.58	6.4	SC
100 : 0	21.25	7.4	SC

OMC สำหรับแต่ละสัดส่วนและชนิดของดินจำแนกตามระบบ USCS แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อสัดส่วน RAP มีค่าระหว่างร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 50 วัสดุผสมถูกจำแนกเป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) แต่เมื่อสัดส่วน RAP มีค่าเท่ากับร้อยละ 70 วัสดุจะถูกจำแนกเป็นทรายที่มีดินเหนียวปนและมีขนาดละเอียด (SW-SC) แต่เมื่อสัดส่วน RAP เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 100 วัสดุจัดเป็นกรวดที่มีขนาดละเอียด (GP)

พฤติกรรมการรับแรงอัดแกนเดียวของดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยซีเมนต์คล้ายกับผลการทดสอบวัสดุเปราะ ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังผสม RAP ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 1 3 และ 5 ที่อายุบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 1 จากรูปพบว่าดินลูกรังบดอัดผสมด้วยซีเมนต์มีความเครียดที่จุดวิบัติต่ำ มีความแข็งแรงสูง โดยในบางตัวอย่างที่มีกำลังสูงและไม่แสดงช่วงอ่อนลง แตกหักทันทีหลังผ่านกำลังอัดประลัย ตัวอย่างที่มี RAP ในสัดส่วนผสมแสดงกำลังอัดและความแข็งแรงลดลง แต่ความเครียดที่จุดวิบัติเพิ่มสูงขึ้นกว่าดินลูกรังปกติ ตัวอย่างที่มีปริมาณ RAP ในสัดส่วนผสมมากมีความเครียดที่จุดแตกหักสูงแต่กำลังอัดต่ำ

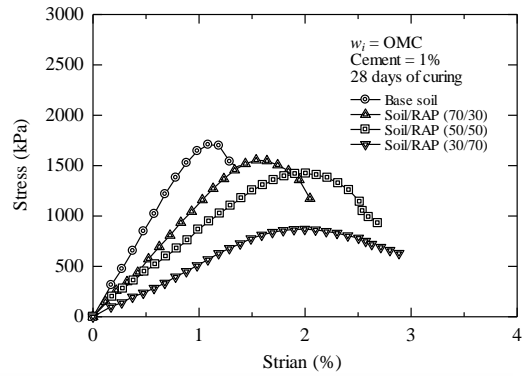
ผลของปริมาณ RAP ต่อกำลังอัดสามารถอธิบายได้จากการพิจารณากำลังอัดแกนเดียวเทียบกับปริมาณยางแอสฟัลต์ (Asphalt binder) ในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ RAP ดังรูปที่ 2 โดยที่ปริมาณยางแอสฟัลต์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$AS = \frac{W_{as}}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

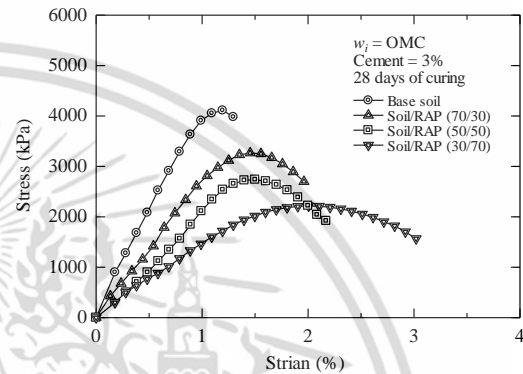
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ W_{as} คือ น้ำหนักของยางแอสฟัลต์ W_s คือ น้ำหนักดินแห้ง ปริมาณยางแอสฟัลต์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัดแกนเดียว สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณยางแอสฟัลต์สูงกว่าร้อยละ 3.5 หรืออัตราส่วนดินต่อ RAP ที่ 50:50 การลดลงของกำลังอัดแกนเดียวเกิดอย่างชัดเจน โดยเกิดที่ปริมาณ RAP เท่ากันสำหรับทุกปริมาณซีเมนต์ (ดูรูปที่ 2)

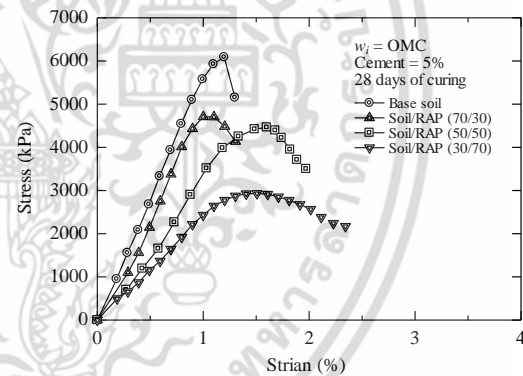
ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่ 3.5 เปอร์เซ็นต์ถูกพิจารณาเป็นจุด Fixation ของวัสดุผสมระหว่างดินลูกรัง RAP และซีเมนต์ โซนปริมาณ RAP ด้านซ้ายของจุด Fixation เป็นโซนที่กำลังเปลี่ยนแปลงน้อย (Inert zone) ส่วนโซนปริมาณ RAP ด้านขวาเรียกว่า Deterioration zone การออกแบบส่วนผสมที่มีปริมาณ RAP ในส่วนผสมด้านขวาของจุด Fixation กำลังอัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างมากสำหรับทุก ๆ ปริมาณซีเมนต์ การลดลงของกำลังอัดแกนเดียวเมื่อปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นไม่สามารถอธิบายได้จากการพิจารณาเพียงผลการทดสอบทางกล ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโดย SEM ของดิน RAP และวัสดุผสมถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายแรงยึดเหนี่ยวจากผลของการปรับปรุงด้วยซีเมนต์ที่ลดลงจากผลของการเพิ่มปริมาณ RAP ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง และ RAP ก่อนผสม แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ดินลูกรังมีพื้นผิวอนุภาคที่เรียบและมีลักษณะเป็นชั้นที่ต่อเนื่องกัน ส่วน RAP มีลักษณะพื้นผิวก่อนข้างขรุขระ และมีอนุภาคเล็ก ๆ ลักษณะทรงเหลี่ยมอยู่ที่บริเวณพื้นผิวโดยรอบ เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจุลภาคของวัสดุผสมดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 สำหรับตัวอย่างที่ผสม RAP และ ไม่ผสม RAP ตามลำดับ ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากันคือร้อยละ 1 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ไม่ผสม RAP ผลัดกันที่จากไฮดรเจนปิดโพรงของอนุภาคดินได้แน่นกว่าตัวอย่างที่ผสม RAP อย่างไรก็ตามปริมาณผลัดกันที่จากไฮดรเจนยังมีน้อยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 5 ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตัวอย่างที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 โพรงที่อนุภาคของวัสดุมีน้อยจึงส่งผลต่อกำลังอัดที่สูงกว่าปริมาณซีเมนต์ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามจากภาพถ่าย SEM ยังไม่สามารถแยกผลัดกันที่ไฮดรเจนซึ่งเป็นวัสดุประสานเพิ่มกำลังอัดกับยางแอสฟัลต์ได้



(a) ปริมาณซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์

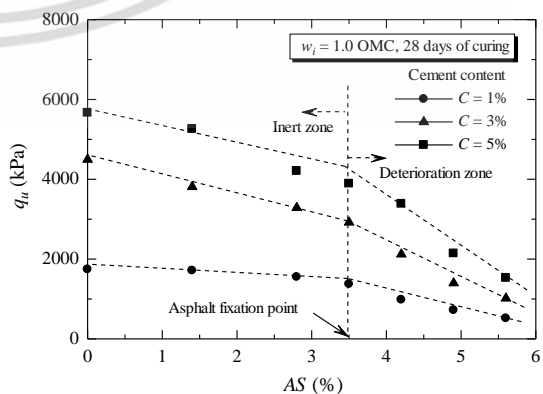


(b) ปริมาณซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์



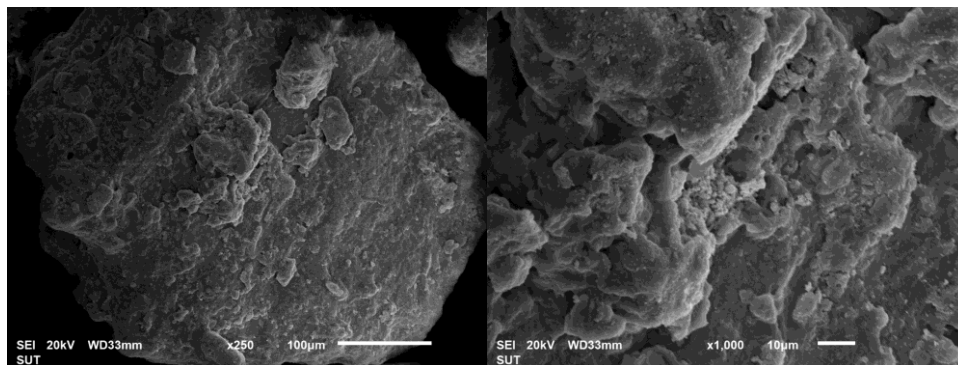
(c) ปริมาณซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 1 พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุผสม

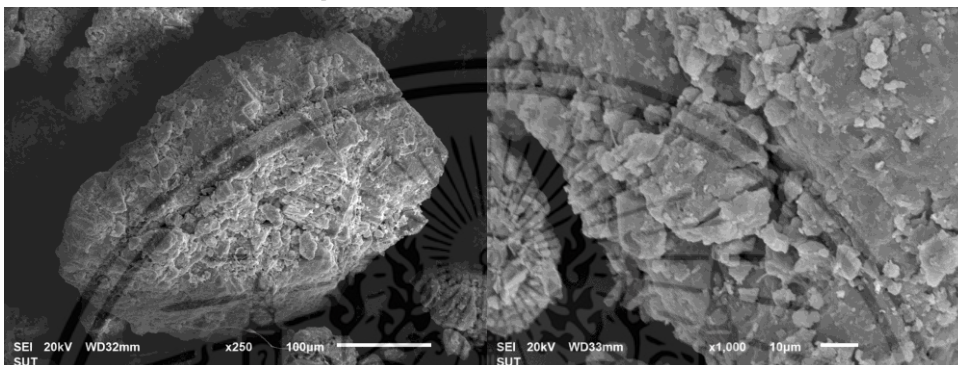


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณแอสฟัลต์

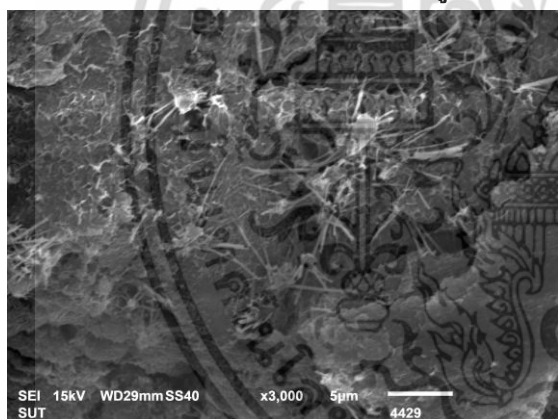
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



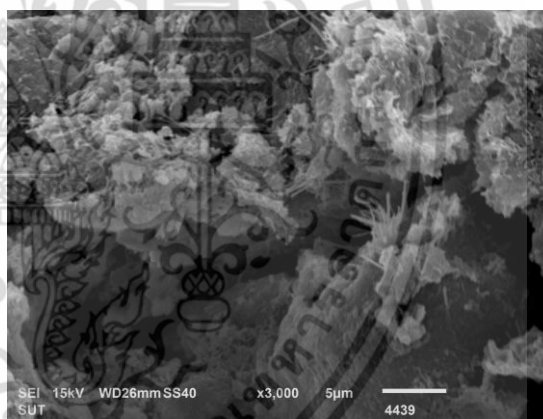
รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง



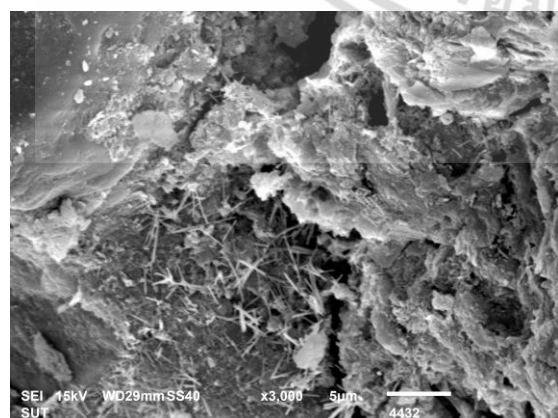
รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของ RAP



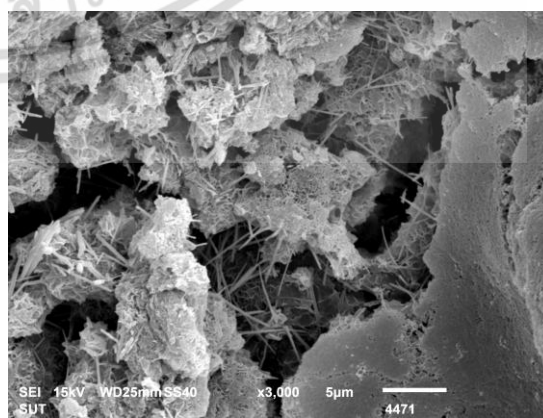
รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ร้อยละ 1



รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรังผสม RAP (50:50) และซีเมนต์ร้อยละ 1



รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรังผสมซีเมนต์ร้อยละ 5



รูปที่ 8 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรังผสม RAP (50:50) และซีเมนต์ 5 เปอร์เซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุป

ปริมาณซีเมนต์ส่งผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดและปริมาณผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนอย่างชัดเจน ปริมาณยางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัดแกนเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างที่มีปริมาณยางแอสฟัลต์สูงกว่าร้อยละ 3.5 หรือคิดต่อ RAP ที่ 50:50 มีการลดลงของกำลังอัดอย่างมาก ปริมาณซีเมนต์สูงผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนแทรกช่องว่างอนุภาคของวัสดุได้มากกว่าปริมาณซีเมนต์ต่ำ การลดลงของกำลังอัดจากผลของ RAP เกิดจากปริมาณยางแอสฟัลต์ที่เพิ่มส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนที่ปัดโพรงดินกับผิวอนุภาค RAP เกิดได้ไม่สมบูรณ์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of highway, "Standard No. DH-S 213/2000, Pavement recycling," Thailand, 2000.
- [2] P.J. Cosentino, E.H. Kalajian, C.H. Shieh, W.J.K. Mathurin, F.A. Gomez, E.D. Cleary, and A. Treeratrakoon, "Developing Specifications for Using Recycled Asphalt Pavement as Base, Subbase or General Fill Materials, Phase II, Rep. No. FL/DOT/RMC/06650-7754," Florida Institute of Technology, 2003.
- [4] A.J. Puppala, L.R. Hoyos, and A.K. Potturi, "Resilient Moduli Response of Moderately Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates," Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 990-998, 2011.
- [5] A.J. Puppala, S. Saride, and R. Williammee, "Sustainable Reuse of Limestone Quarry Fines and RAP in Pavement Base/Subbase layers," Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 418-429, 2012.
- [6] R. Taha, A. Ali, A. Basma, and O. Al-Turk, "Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases," Transportation Research Record 1652, Washington, DC, pp. 264-269, 1999.
- [7] ASTM, "ASTM D254-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer," ASTM International, West Conshohocken, PA., 2014.
- [8] ASTM, "ASTM D4318-10e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," ASTM International, West Conshohocken, PA., 2010.
- [9] ASTM, "ASTM D422-63(2007), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils," ASTM International, West Conshohocken, PA., 2007.
- [10] ASTM D5102-09, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA., 2009.
- [11] Department of highway, "Standard No. DH-S 204/2556, Soil cement base," Thailand, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้