เมงลิม ฮอย : วัสดุเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์คาร์บอนต่ำสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทาง (A NOVEL LOW – CARBON RECYCELD ASPHALT PAVEMENT – FLY ASH GEOPOLYMER AS A PAVEMENT MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันติ์ หอพิบูลสุข, 201 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอย (fly ash, FA) จีโอโพลิเมอร์ปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (recycled asphalt pavement, RAP) เพื่อใช้เป็นวัสดุผิวทางที่ยั่งยืน การศึกษาประกอบด้วยงานทดสอบด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม 3 ส่วน เพื่อให้ครอบคลุมความต้องการสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง (base) และชั้นรองพื้นทาง (subbase) การทดสอบในส่วนแรกเป็นการศึกษาการพัฒนากำลังของ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์ การสังเคราะห์ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารกระตุ้น ส่วนผสม RAP-FA เตรียมขึ้นจากการผสม RAP, FA และน้ำ เพื่อใช้เป็นวัสดุควบคุมในการศึกษาอิทธิพลของสารกระตุ้นต่อกำลังของ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์ การทดสอบในส่วนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของวัฏจักรเปียกสลับแห้ง (wetting-drying cycles : w-d cycle) ต่อกำลังและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์และส่วนผสม RAP-FA กำลังของส่วนผสม RAP-FA และ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์ตรวจวัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดแรงเดียว ผลการทดสอบ X-ray diffraction (XRD) และ scanning electron microscopy (SEM) ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสม RAP-FA และ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์ ที่วัฏจักรเปียกสลับแห้งต่าง ๆ การทดสอบในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ผลทดสอบที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานสากลเพื่อยืนยันความเสี่ยงต่อการใช้ส่วนผสม RAP-FA และ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุงานทาง ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแสดงให้เห็นว่าส่วนผสม RAP-FA สามารถใช้เป็นวัสดุงานทางได้ เนื่องจากมีกำลังอัดเพียงพอตามความต้องการของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง กำลังอัดของส่วนผสม RAP-FA เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกริยาทางเคมีระหว่างแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีปริมาณมากใน RAP และซิลิกาและอลูมินาที่มีปริมาณมากใน FA ก่อให้เกิดแคลเซียม-อลูมิเนต-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium Aluminate Silicate Hydrate, C-A-S-H) (ดังที่พบได้จากผลทดสอบ XRD และ SEM) ผลจาก XRD และ SEM ในช่วง 7 วันแรกของการบ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการใช้เฉพาะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์ให้ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น (N-A-S-H) ในปริมาณต่ำ ด้วยเหตุนี้ RAP-FA จิโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $NaOH/Na_2SiO_3$ = 100:0 จึงมีกำลังอัดต่ำกว่า

ส่วนผสม RAP-FA การเพิ่มอายุบ่มและอุณหภูมิในการบ่มทำให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายซิลิกาและอลูมินาจาก FA ในการทำปฏิกิริยาจิโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้มากส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ซิลิกาที่ความพร้อมในการทำปฏิกิริยาในโซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาจาก FA และสร้างเจล N-A-S-H ร่วมกับกับ C-S-H และ C-A-H ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของ RAP กับ FA ดังนั้น กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของ $NaOH/Na_2SiO_3$ ทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้องและที่ 40 องศาเซลเซียส ผลการทดลองความคงทนแสดงให้เห็นว่า UCS ของส่วนผสม RAP-FA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนวัฏจักรเปียกแห้งเพิ่มขึ้น จนถึงวัฏจักรที่ 6 ผลการวิเคราะห์ XRD และ SEM แสดงให้เห็นว่าการเปียกสลับแห้งในช่วง 6 วัฏจักรแรกช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมใน RAP และซิลิกาและอลูมินาในเถ้าลอย ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ C-A-S-H ในขณะที่ การแตกร้าวในระดับมหภาคและจุลภาคเกิดขึ้นเมื่อวัฏจักรการเปียกสลับแห้งมากกว่า 6 และส่งผลให้กำลังอัดของ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์ลดลง RAP-FA จีโอโพลิเมอร์มีความคงทนมากขึ้นตามปริมาณ NaOH ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการเชื่อมโยงของโครงสร้างอลูมิโน-ซิลิเกตโพลิเมอร์ที่มีความเสถียรสูง ผลทดสอบ TCLP แสดงให้เห็นว่าส่วนผสม RAP-FA และ RAP-FA จิโอโพลิเมอร์สามารถใช้เป็นวัสดุงานทางที่ปราศจากความเสี่ยงด้านสภาพแวดล้อมนอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์ยังช่วยลดการชะละลายโลหะหนักที่มีอยู่ใน RAP และ FA (RAP-FA) งานวิจัยจึงยืนยันความเป็นไปได้ในการใช้ส่วนผสม RAP-FA และ RAP-FA จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุงานทาง (ทางเลือกหนึ่ง) และยังเป็นการส่งเสริมการประยุกต์ใช้วัสดุรีไซเคิลในงานก่อสร้างถนนที่ยั่งยืน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา

ปีการศึกษา 2559 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

MENGLIM HOY : A NOVEL LOW – CARBON RECYCELD ASPHALT PAVEMENT – FLY ASH GEOPOLYMER AS A PAVEMENT MATERIAL. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 201 PP.

SRENGTH/FLY ASH GEOPOLYMER/RECYCLED ASPHALT PAVEMENT/ MICROSTRUCTURE/HEAVY METALS/DURABILITY

This thesis studies the feasibility of using fly ash (FA) geopolymer to stabilize recycled asphalt pavement (RAP) to be a pavement material. Liquid alkaline activator (L), a mixture NaOH and Na_2SiO_3 was used to synthesis RAP-FA geopolymer, while RAP-FA blend, a mixture of RAP, FA, and water, was prepared as a control material. The investigation consists of three main laboratory engineering programs to cover requirements for the base/subbase material. First, the strength development of these materials was investigated. Second, a durability against wetting-drying (w-d) cycles of these materials was studied. The strength characteristic of these materials was determined by unconfined compression strength (UCS) test. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analyses is used to analyze the UCS and microstructural changes of these materials. Finally, the leachability of the heavy metals is measured by Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) to verify the risk of using the stabilized pavement materials. The UCS results show that RAP-FA blend can be used as a base course material as its UCS meets the strength requirement specified by road authorities, Thailand. The UCS of RAP-FA blend increases with time because the reaction between high calcium in RAP and the silica

and alumina in FA form Calcium Aluminate Silicate Hydrate (C-A-S-H). At 7 days and room temperature curing, XRD and SEM analyses show that low geopolymerization products in RAP-FA geopolymer are detected when only NaOH is used as L, hence its UCS is lower than of RAP-FA blend. With increasing curing time and temperature, NaOH solution dissolves more silica and alumina from FA in the geopolymerization reaction, hence the UCS development. The highly soluble silica from Na_2SiO_3 incorporates with leached silica and alumina from FA into a N-A-S-H gel and co-exists with C-A-S-H, hence the UCS values of RAP-FA geopolymer increase with decreasing $NaOH/Na_2SiO_3$ ratio. The durability test results show the UCS of these materials increase with increasing the number of w-d cycles (C), reaching its peak at 6 w-d cycles. The microstructural analyses indicate the increased UCS of these materials is due to stimulation of the chemical reaction during w-d cycles leading to generate more C-A-S-H and N-A-S-H. The macro- and micro-cracks when $C > 6$ cause strength reduction of these materials. A better durability performance is observed when RAP-FA geopolymers are prepared with higher NaOH content that can be attributed to formation of a stable cross-linked alumino-silicate polymer structure. TCLP results demonstrated that there is no environmental risk for both RAP-FA blends and RAP-FA geopolymers in road construction. Moreover, the geopolymer binder reduces the leaching of heavy metal in RAP-FA mixture. This research study confirms the viability of using RAP-FA blends and RAP-FA geopolymers as an alternative stabilized pavement material.

School of Civil Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____