



การประเมินความเข้ากันได้ระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชันกับวัสดุหิน คัดเลือกเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพพาราสเลอรีซีล A Compatibility Evaluation of Asphalt Emulsion- Selected Aggregate to Develop Performance of Para Slurry Seal

ธน น บัวหลวง* และ พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม

Thanon Bualuang* and Peerapong Jitsangiam

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Department of Civil Engineering, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

*E-mail: thnon.bualuang@gmail.com, Telephone Number: 053-944156

บทคัดย่อ

การฉาบผิวถนนด้วยวัสดุพาราสเลอรีซีล (Para slurry seal) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผิวทางได้รับความนิยมนำมาใช้ในประเทศไทยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา แต่ยังมีปัญหาเรื่องแหล่งหินมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับการทำวัสดุพาราสเลอรีซีลมีอยู่อย่างจำกัดเนื่องจากปัญหาความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างหินมวลรวมทั่วไปกับวัสดุเชื่อมประสานแอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับการทำวัสดุพาราสเลอรีซีล บทความได้นำเสนอถึงวิธีการประเมินความเข้ากันได้ระหว่างหินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) สำหรับงานพาราสเลอรีซีลเพื่อนำมาเป็นแนวทางการคัดเลือกวัสดุผสมที่มีความจำกัดในงานฉาบผิวทางประเภทนี้ให้มีประสิทธิภาพ โดยประเมินค่าความเป็นกรดเบสของวัสดุหินมวลรวมที่ผสมในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชันร่วมกับการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าที่ผิวของหินมวลรวมเพื่อวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพในการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ที่เป็นประจุบวก แล้วนำมาออกแบบส่วนผสมพาราสเลอรีซีลเพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ระหว่างส่วนผสมนี้โดยพิจารณาความต้านทานแรงบิดและการขัดผิวซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างหินจากโรงโม่บริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยที่ยังไม่ได้รับการรับรองในการใช้งานฉาบผิวแบบพาราสเลอรีซีล จำนวน 3 ตัวอย่าง พบว่าแหล่งหินชนิด A และ B ซึ่งเป็นหินปูนที่มีปริมาณ CaO สูง มีค่า pH ของส่วนผสมกับสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) เข้าใกล้สู่ความเป็นกลางและมีค่าศักย์ไฟฟ้าผิวของหินมวลรวมเข้าใกล้สู่ความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮดรอกลอร์ริก ส่วนตัวอย่างหินชนิด C ซึ่งเป็นหินบะซอลต์พบว่ามีค่า pH ในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นกรดอ่อนและมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวในการทดสอบมีค่าเป็นบวก แล้วนำตัวอย่างหินทั้งสามมาออกแบบเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพพาราสเลอรีซีลพบว่าตัวอย่างหินชนิด B มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่เข้าใกล้สู่ความเป็นกลางมากที่สุด จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุลบของหินและประจุบวกของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ได้ดีจึงทำให้การยึดเกาะระหว่างหินมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชันแน่น ส่วนตัวอย่างหินชนิด C พบว่าตัวอย่างพาราสเลอรีซีลไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีน้ำหนักที่สูญเสียและได้กำลังรับแรงบิดไม่เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบ

ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเช่นกัน จึงไม่เหมาะที่จะทำไปใช้ในงานฉาบผิวชนิดนี้ ดังนั้นแนวทางการคัดเลือกหินในงานวิจัยนี้ที่คำนึงถึงความเข้ากันได้ของวัสดุพาราสเลอรีซีลสามารถนำมาเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพงานพาราสเลอรีซีลที่มีคุณภาพได้

ABSTRACT

The road pavement surface dressing technique using Para slurry seal to improve such surface quality has gained popularity for Thailand road pavement for the last ten years. However, suitable aggregates to produce Para slurry seal material are very limited because of a compatibility problem between general aggregates and an asphalt emulsion binder. This paper aims to demonstrate an evaluation of the compatibility between aggregate and cationic asphalt emulsion CSS-1h(EMA) which is an asphalt emulsion binder of Para slurry seal. This could be an alternative method of aggregate selection for using in producing Para slurry seal. A series of pH tests in conjunction with Zeta-potential analyses were used to basically evaluate the potential use of aggregate in Para slurry seal mixing and design processes. The study aggregates of A, B, and C, which were not in the recommendation list for using in Para slurry seal, were sourced from active quarries in the northern region of Thailand as a study area. Based on the petrographic analyses, the aggregates of A and B were classified as Limestone, but C could be geologically grouped as Basalt. Results of pH tests in conjunction with Zeta-potential analyses on A, B, and C aggregates were that aggregates of A and B which had a high portion of CaO while mixing with CSS-1h(EMA) exhibit a neutral pH value, but aggregate C was prone to have a negative pH value of acid with a minus Zeta-potential value. When considering the performance of torsion (cohesion) and wearing resistance after mix design processes, Para slurry seal produced from aggregates of A and B could demonstrate much higher torsion and wearing resistance than those of Para slurry seal produced from aggregate C. Furthermore, torsion and wearing resistance of Para slurry seal produced from aggregate B complies with the specifications of Para slurry seal of Department of Highway, Thailand. It was, therefore, concluded that the basic evaluation process of pH tests in conjunction with Zeta potential analyses could be simply used to examine the compatibility between general aggregates and CSS-1h (EMA). That was greatly beneficial to Para slurry seal construction in Thailand in the way that more aggregate sources could be more effectively and wider selected.

1. บทนำ

ผิวทางแบบพาราสเลอรีซีล (Para Slurry Seal) เป็นวัสดุฉาบผิวทางเพื่อซ่อมแซมและยกระดับการให้บริการ (Level of Service) ของถนนที่ใช้งานมาได้ระยะหนึ่งและมีการเสื่อมสภาพของผิวทาง โดยวัสดุผิวทางแบบพาราสเลอรีซีลนี้ประกอบด้วยส่วนผสมระหว่างหินมวลรวม (Aggregate) ที่มีขนาดคละมาตรฐานกับโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชัน (Polymer Modified Asphalt Emulsion) ชนิด CSS-1h(EMA) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา โดยทำการผสมกับน้ำและปูนซีเมนต์หรือสารผสมเพิ่มอื่นๆตามความจำเป็น โดยผิวทางที่ได้รับการฉาบหน้าด้วยพาราสเลอรีซีลนี้พบว่าผิวทางมีคุณสมบัติดีขึ้นอย่างมีอย่างมีนัยสำคัญในด้านความต้านทานการลื่นไถลที่สูงขึ้นเนื่องด้วยคุณสมบัติเสริมจากการผสมยางพารา

ที่ทำให้แอสฟัลต์มีความคงทนและความยืดหยุ่นสูงอีกทั้งยังเพิ่มกำลังรับแรงดึงให้วัสดุผสมทั้งนี้จะมีส่งผลให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีและนานมากขึ้นเมื่อเทียบกับเทคนิคการฉาบผิวทางด้วยวัสดุอื่นๆ เช่นสเลอรีซีล (Slurry seal) หรือแคปซีล (Cape seal) ทั่วไป ซึ่ง Kintali Sai และ Nanda Kishore [1] ได้ศึกษาผลของยางพาราที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) กับยางพาราพบว่าเมื่อผสมยางพาราลงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้จุดอ่อนตัวของวัสดุผสมดังกล่าวมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ปกติ โดยผลการศึกษานี้ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Colin Ruggles [2] ที่ได้หาคุณสมบัติการคืนตัวและการยุบตัวของถนนที่ประเมินเทียบเคียงเอาจากค่าเพเนตรชัน (Penetration) ของวัสดุ

แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) มีค่าต่ำกว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดปกติ ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทาน การยุบตัวที่ต่ำกว่า ค่าความต้านทานการฉีกฉีกสูงกว่า เกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัย ข้อได้เปรียบประการสำคัญ ที่ทำให้การฉาบผิวด้วยพาราสเลอริซิดได้รับความนิยม คือ สามารถเปิดให้รองรับการจราจรได้อย่างรวดเร็วภายใน เวลา 1-2 ชั่วโมง ภายหลังจากการก่อสร้างฉาบผิวแล้ว เสร็จ ทำให้การซ่อมแซมถนนไม่ส่งผลกระทบต่อและเป็น อุปสรรคในการสัญจรเหมือนการก่อสร้างและซ่อมแซมผิว ทางด้วยเทคนิคอื่นๆ รูปที่ 1 แสดงการฉาบผิวด้วยพาราส- เลอริซิดและผิวทางพาราสเลอริซิดหลังก่อสร้างเสร็จ



รูปที่ 1 งานก่อสร้างพาราสเลอริซิด

อย่างไรก็ตามในสถานการณ์ปัจจุบันแม้ว่าผิวทาง แบบพาราสเลอริซิด ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลาย แต่ยังคงพบว่ามี ข้อจำกัดที่ส่งผลต่อการเป็นอุปสรรคในการก่อสร้างผิวทาง แบบพาราสเลอริซิดของประเทศไทย โดยหินมวลรวม ขนาดคละมาตรฐานตามข้อกำหนดการก่อสร้างผิวทาง แบบสเลอริซิด [3] ต้องผ่านการคัดเลือกแหล่งหินที่ได้รับการยอมรับเพื่อให้มีความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) กับ โพลีเมอร์ โมดิฟายด์ แอสฟัลต์ อิมัลชัน ชนิด CSS-1h(EMA) ที่ผ่านการรับรอง มาตรฐาน โดยแหล่งหินที่ได้รับการแนะนำจากกรม ทางหลวงว่าสามารถใช้ได้กับโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ อิมัลชัน ชนิด CSS-1h(EMA) ตามมาตรฐานของกรม ทางหลวงมีจำนวน 25 แห่งทั่วประเทศ [4] โดยข้อจำกัดนี้ ได้กลายเป็นอุปสรรคที่สำคัญก่อสร้างผิวทางแบบพาราส-

เลอริซิดของประเทศไทยในปัจจุบัน ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่าย ในการขนส่งหินมวลรวมมาตรฐานไปสู่สถานที่ก่อสร้างที่ ไกลจากแหล่งหินที่ได้รับการรับรอง ทำให้ต้นทุนในการ ก่อสร้างสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาถึงการหาแนวทางในการนำแหล่งหินอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ในรายการแนะนำของกรมทางหลวงมาใช้เป็น หินมวลรวมสำหรับการก่อสร้างผิวทางแบบพาราสเลอริ ซิด โดยได้คัดเลือกแหล่งหินที่ไม่ได้ถูกระบุให้เป็นแหล่ง หินที่สามารถใช้ได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) ของกรมทางหลวงมาเป็นหินต้นแบบของการ ดำเนินงานวิจัยและโครงการนี้ได้ศึกษาถึงกระบวนการใน การคัดเลือกแหล่งหินจากการประเมินสภาพความ เหมาะสมอย่างง่าย โดยจะสามารถประเมินถึงความเข้ากันได้ ระหว่างหินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) และนำหินต้นแบบมาประเมินความเข้ากันได้แล้ว นำไปออกแบบส่วนผสมพาราสเลอริซิดเพื่อตรวจสอบ คุณภาพให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง [5]

1.1 วัตถุประสงค์

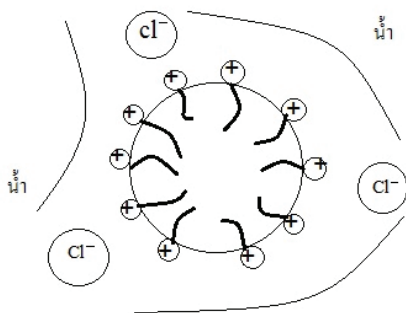
1.1.1 ประเมินถึงความเข้ากันได้ของวัสดุหินมวลรวมที่ ได้รับการคัดเลือกกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) เพื่อให้ได้แนวทางการคัดเลือกหินอย่างง่ายและ อยู่บนพื้นฐานของความเข้ากันได้ระหว่างหินมวลรวมกับ แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA)

1.1.2 ประเมินประสิทธิภาพด้วยการทดสอบกำลังแรงบิด และความต้านทานการขัดผิวของพาราสเลอริซิดที่ใช้ หินมวลรวมที่ได้รับการคัดเลือกตามวิธีการข้อ 1.1.1

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

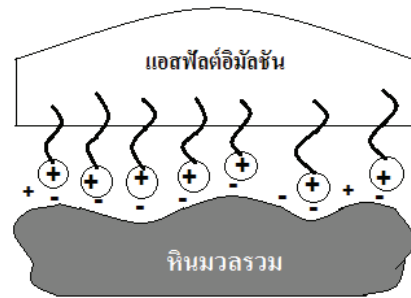
ความเข้าได้กันระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชันกับหินมวล รวมตามหลักการพื้นฐานของการออกแบบส่วนผสม พาราสเลอริซิดขึ้นอยู่กับความสามารถในการดึงดูดเคลือบ ระหว่างวัสดุที่ใช้ผสมในงานผิวทาง โดยโพลีเมอร์ โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) ที่มี สารละลายกรดไฮดรอกลอริกเป็นส่วนผสม ได้มีการนำ ส่วนที่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) จับตัวกับขั้วลบของ

โมเลกุลน้ำ (OH^-) ทำให้ผิวโดยรอบของแอสฟัลต์ถูกเคลือบด้วยประจุบวกของน้ำ [6] ดังรูปที่ 2 จึงเปลี่ยนสภาพแอสฟัลต์ให้มีอำนาจทางไฟฟ้าที่ผิวเป็นบวกตามประจุบวกของน้ำหลังจากการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนของสารละลายกรดไฮดรอกลอริก จึงทำให้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะจับกับหินมวลรวมที่มีสภาพประจุไฟฟ้าที่ผิวเป็นประจุลบ



รูปที่ 2 ภาพแสดงถึงสารละลายไฮดรอกลอริกที่จับกับโมเลกุลของน้ำและแอสฟัลต์

การประเมินถึงคุณภาพพาราสเลอร์ซีล ซึ่งใช้แอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกต้องคำนึงถึงเสถียรภาพในการแลกเปลี่ยนประจุกับหินมวลรวมที่เป็นประจุลบให้ได้มาซึ่งความเป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างแอสฟัลต์กับหินที่แข็งแรง สามารถยึดเกาะเคลือบผิวของหินมวลรวมที่เป็นลักษณะแผ่นฟิล์ม [7] ดังแสดงในรูปที่ 3 จากหลักการพื้นฐานนี้หากสามารถหาหินแหล่งที่มีประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมกับโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันก็สามารถทำให้เกิดการเข้ากันได้และการดูดซับระหว่างแอสฟัลต์กับหินซึ่งจะได้ออกมาเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบส่วนผสมพาราสเลอร์ซีลเพื่อเพิ่มศักยภาพด้านความปลอดภัยและความทนทานในการใช้งาน



รูปที่ 3 การจำลองแอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกจับตัวกับผิวของหินประจุลบ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุผสมพาราสเลอร์ซีล

วัสดุหินมวลรวมที่ใช้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้นำหินในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ซึ่งไม่ได้เป็นแหล่งหินที่ได้รับการยืนยันจากรายงานของกรมทางหลวงตามหัวข้อที่ 1 ในงานฉาบผิวชนิดพาราสเลอร์ซีล โดยได้ทำการคัดเลือกจากโรงโม่ที่ผลิตหินมวลรวมสำหรับการก่อสร้าง 3 แห่ง โดยกำหนดให้เป็น มวลรวม A, B, และ C ร่วมกับหินจากโรงโม่สุวรรณซึ่งเป็น 1 ใน 25 แหล่งหินที่ได้รับการรับรองในการใช้งานพาราสเลอร์ซีลตามรายงานของกรมทางหลวงเพื่อนำมาอ้างอิงผลการทดสอบส่วนแอสฟัลต์อิมัลชันในงานวิจัยครั้งนี้เป็น โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) ซึ่งสามารถรองรับการผลิตเพื่อใช้งานฉาบผิวประเภทพาราสเลอร์ซีลได้จริงตามมาตรฐานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันที่กรมทางหลวงใช้ในการอ้างอิง [8]

3.2 การประเมินความเข้ากันได้ของพาราสเลอร์ซีล

การประเมินความเข้ากันได้เชิงการแลกเปลี่ยนประจุของวัสดุผสมสามารถประเมินได้จากทดสอบหาค่ากรดเบสโดยนำตัวอย่างหินมวลรวมที่มีขนาดเท่ากับช่องเปิดตามตะแกรงมาตรฐาน ASTM D3910 [9] จำนวน 25 กรัม ผสมกับสารละลายน้ำกลั่น ($\text{pH}=6.89$) สารละลายกรดไฮดรอกลอริก ความเข้มข้น 0.03 โมล ($\text{pH}=1.58$) และสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h(EMA) ($\text{pH}=2.86$) ปริมาณ 300 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

แล้ววัดค่า pH ด้วยเครื่องมือวัดค่าแบบอัตโนมัติตามลักษณะดังรูปที่ 4 อ่านค่า pH ที่เกิดขึ้น เมื่อได้ค่า pH ของหินเป็นเบสสามารถทราบได้ว่ามีแนวโน้มเป็นประจุลบจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ส่วนหินที่มีค่า pH สกภาพเป็นกรดสามารถทราบได้ว่ามีแนวโน้มเป็นประจุบวกจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) การประเมินความเสถียรในการแลกเปลี่ยนประจุซึ่งจะมีความเข้ากันได้ดีเมื่อค่า pH ที่ได้เข้าสู่ความเป็นกลางที่ถือว่ามีความเป็นกลางทางไฟฟ้า



รูปที่ 4 เครื่องมือวัดการทดสอบกรดเบส

การประเมินประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุหินสามารถอธิบายโดยความต่างศักย์ของประจุไฟฟ้าที่ผิวและประจุในสารละลายที่อยู่ล้อมรอบซึ่ง Hefer and Little [10] กล่าวว่าประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุมวลรวมสามารถประมาณค่าประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการทดสอบศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential) โดยประจุในหินมวลรวมจะถูกขับไล่ให้แยกออกจากกันด้วยสารละลายที่ผสมทำให้ที่ผิวของวัสดุหินเกิดอำนาจทางไฟฟ้า จึงสามารถทราบถึงประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุหินที่ชัดเจน โดยงานวิจัยนี้ทดสอบหาประจุไฟฟ้าของวัสดุหินด้วยการใช้สารละลายน้ำและประเมินเสถียรภาพความเข้ากันได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกด้วยสารละลายกรดไฮดรอกลอริก ความเข้มข้น 0.03 โมล วัดจากตัวอย่างที่ได้หลังการทดสอบค่า pH ซึ่งจะใช้วัสดุหินที่มีขนาดละเอียดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 กับเบอร์ 16 (ขนาดเม็ดหินระหว่าง 1.18-2.36 มิลลิเมตร) และตัวอย่างขนาดละเอียดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 กับเบอร์ 50 (ขนาดเม็ดหินระหว่าง 0.30-0.60 มิลลิเมตร)

ทดสอบเพื่อวิเคราะห์ถึงขนาดหินมวลรวมที่มีผลต่อค่าประจุไฟฟ้าที่ผิวมีการแลกเปลี่ยนประจุกันได้ดีเมื่อสามารถวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้เข้าใกล้ 0 mV เนื่องจากไม่เกิดการเหนี่ยวนำของประจุไฟฟ้าในส่วนผสม

3.3 การประเมินคุณภาพพาราสเลอรีซีล

การประเมินคุณภาพพาราสเลอรีซีลในงานวิจัยนี้ใช้ขนาดมาตรฐานแบบประเภทที่ 3 ที่มีขนาดละเอียดใหญ่ที่สุดตามมาตรฐานของ ASTM D3910 ดังแสดงในตารางที่ 1 เหมาะสำหรับการใช้ในการซ่อมหรือปรับปรุงผิวทางเดิมที่แตกร้าวและหลุดร่อน นำมาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งและน้ำปริมาณ 12% ,1% และ 8% โดยน้ำหนักของหินมวลรวมแห้งที่ใช้ตามลำดับ สร้างเป็นตัวอย่างพาราสเลอรีซีลสำหรับใช้ทดสอบประสิทธิภาพตามรายงานการทดสอบสเลอรีซีลของกรมทางหลวงและ International Slurry Surfacing Association (ISSA) [11] ด้วยวิธีการประเมินกำลังรับแรงบิดตามมาตรฐาน ISSA TB139 [12] ที่วัดค่าในช่วงเวลาที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที และความต้านทานการขัดผิวตามมาตรฐาน ISSA TB100 [13] จึงสามารถตรวจสอบถึงความเข้ากันได้ของหินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) มีผลต่อคุณภาพของงานสเลอรีซีลในรูปแบบการใช้งานจริงอย่างไร เพื่อเป็นแนวทางในการคัดเลือกแหล่งหินที่มีประโยชน์ได้ในอนาคตเพื่อให้ได้พาราสเลอรีซีลที่มีคุณภาพและผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ โดยค่ากำลังรับแรงบิดจะต้องไม่น้อยกว่า 12 kg-cm. เมื่อผ่านไป 30 นาทีและ 20 kg-cm. เมื่อผ่านไป 120 นาที และน้ำหนักที่สูญเสียหลังการทดสอบการขัดผิวไม่เกิน 800 กรัมต่อตารางเมตรจึงถือว่าตัวอย่างพาราสเลอรีซีลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 1 ขนาดคละที่ใช้ในงานสเลอรี่ซีลแต่ละประเภท

ขนาด ตะแกรง	ร้อยละที่ผ่านตะแกรง (%)		
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3
3 ส่วน 8 นิ้ว	100	100	100
เบอร์ 4	100	90-100	70-90
เบอร์ 8	90-100	65-90	45-70
เบอร์ 16	65-90	45-70	28-50
เบอร์ 30	40-65	30-50	19-34
เบอร์ 50	25-42	18-30	12-25
เบอร์ 100	15-30	10-21	7-18
เบอร์ 200	10-20	5-15	5-15

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์วัสดุผสมพาราสเลอรี่ซีล

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้นำแหล่งหินที่ไม่เคยใช้ในงานพาราสเลอรี่ซีลมาก่อน 3 แหล่งในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยได้ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางธรณีวิทยาด้วยวิธีวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) แสดงผลดังตารางที่ 2 พบว่าหินชนิด A , B และหินจากโรงโม่สุวรรณมีลักษณะทางธรณีวิทยาของแร่หินเป็นหินปูนเนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaO) ที่เป็นธาตุองค์ประกอบหลักปริมาณสูง ส่วนหินชนิด C มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินบะซอลต์ [14] สำหรับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพของแอสฟัลต์แสดงผลดังตารางที่ 3 พบว่าแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาพาราธรรมชาติ 5% ได้คุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่หินด้วยวิธี XRF

%ธาตุ	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด C	สุวรรณ
K ₂ O	0.00	0.71	0.79	0.25
CaO	98.10	99.29	17.14	93.19
SiO ₂	1.38	0.00	34.05	0.00

ตารางที่ 2 (ต่อ) การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่หินด้วยวิธี XRF

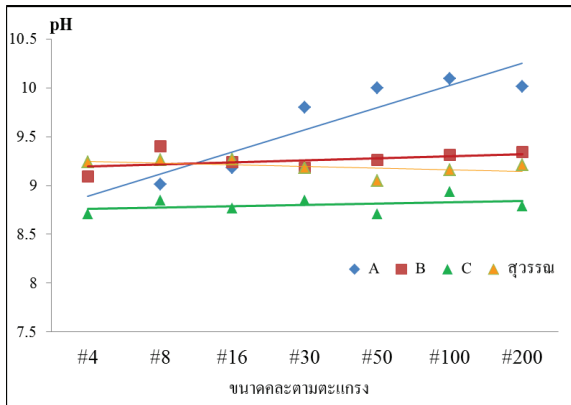
%ธาตุ	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด C	สุวรรณ
Fe ₂ O ₃	0.52	0.00	33.16	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	9.63	1.05
TiO ₂	0.00	0.00	4.65	0.14
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	4.58

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแอสฟัลต์ CSS-1h (EMA)

Tests	Result	Spec.	
		Min	Max
Viscosity 25°C, SSF	28	20	100
Settlement 7days, %	2.4	-	15
Storage 24 hrs., %	1.2	-	1.5
Sieve, %	0.00	-	0.1
Particle charge	Positive	Positive	
Asphalt Content by Evaporation, %	67.3	60	-
Solid Polymer, %	4.0	3.5	-
Softening Point, °C	61.7	60	-
Elastic Recovery at 25°C, %	64	30	-
Penetration at 25°C	65	40	100
Ductility at 25°C, cm.	95	40	-
Solubility, %	99.34	97.5	-

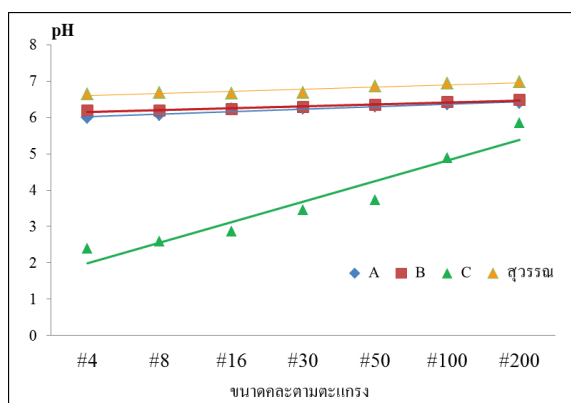
4.2 ผลการประเมินความเข้ากันได้ของพาราสเลอรี่ซีล

การประเมินความเป็นสภาพกรดเบสของหินมวลรวมด้วยการใช้น้ำเป็นสารละลายเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มทางประจุไฟฟ้าที่ผิวของหินมวลรวม ดังแสดงผลในรูปที่ 5 พบว่าหินชนิด A มีค่า pH อยู่ในช่วง 9-10 โดยค่า pH จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของหินมวลรวมมากขึ้น หินชนิด B มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 9.2 และหินชนิด C มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 8.8 ทำให้ทราบว่าหินทั้งสามแหล่งนี้มีแนวโน้มที่เป็นหินประจุลบเนื่องจากมีความเป็นเบส โดยเมื่อเทียบกับค่า pH ของหินจากโรงโม่สุวรรณที่ใช้อ้างอิงที่มี pH เฉลี่ยเท่ากับ 9.2 จึงประเมินผลในเบื้องต้นได้ว่าสามารถนำผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่มีความเป็นกรดได้



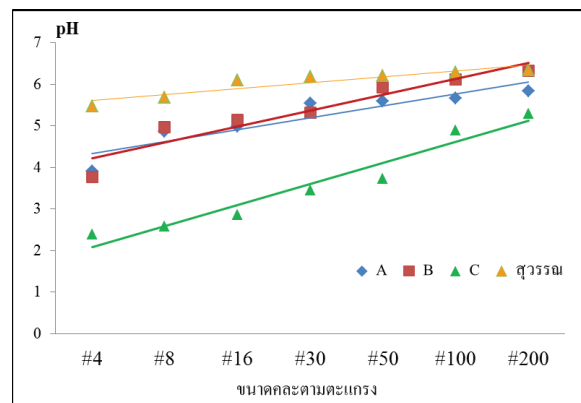
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ค่า pH ของหินแต่ละแหล่งในสารละลายน้ำกลั่น

การประเมินความเข้ากันได้ระหว่างหินกับสารละลายกรดไฮดรอกลอริกดังแสดงผลในรูปที่ 6 ว่าหินชนิด A มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.2 และหินชนิด B มีค่า pH เท่ากับ 6.3 โดยถือว่าหินทั้งสองนี้มีค่า pH ที่เข้าสู่ความเป็นกลางซึ่งมีลักษณะกราฟผลการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกับหินจากโรงโม่สุวรรณที่มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.8 ส่วนหินชนิด C พบว่าได้ค่า pH อยู่ในช่วง 2-5 โดยแปรตามขนาดผลขนาดต่างๆ ซึ่งถือเป็นกรดอ่อนที่ไม่มีความเป็นกลางทางสภาพกรดเบส แสดงถึงศักยภาพในการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินและสารละลายของหินชนิด C และอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการพาราเซลเลอร์ซีลได้เมื่อเทียบผลการทดสอบของหินจากโรงโม่สุวรรณ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ค่า pH ของหินแต่ละแหล่งในสารละลายกรดไฮดรอกลอริก

สำหรับการประเมินถึงความเข้ากันได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) พบว่าขนาดผลของหินมวลรวมมีผลต่อค่า pH โดยตัวอย่างหินชนิด A มีค่า pH ในช่วง 4.0-5.8 และตัวอย่างหินชนิด B มีค่า pH ในช่วง 4.0-6.3 เมื่อค่า pH จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของหินมวลรวมมากขึ้น ส่วนตัวอย่างหินชนิด C อยู่ในช่วง pH 2.4-5.3 ซึ่งในเบื้องต้นจึงสามารถคาดการณ์ลักษณะความเข้ากันได้ของส่วนผสมว่าแหล่งหินชนิด A และ B เมื่อเทียบกับตัวอย่างหินชนิด C เนื่องจากมีลักษณะกราฟผลการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกับหินจากโรงโม่สุวรรณที่มีค่า pH ในช่วง 5.5-6.4

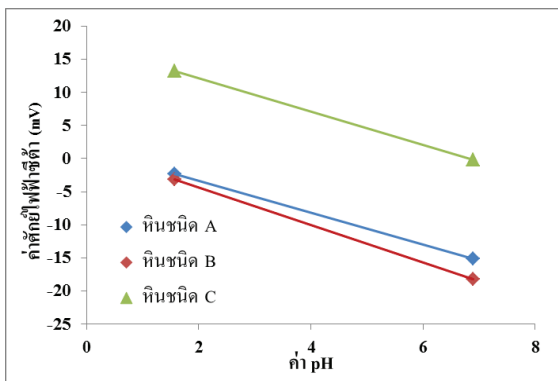


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ค่า pH ของหินแต่ละแหล่งในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-h (EMA)

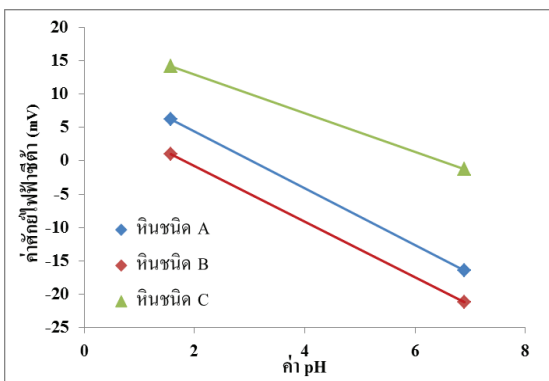
การประเมินสภาพทางไฟฟ้าที่ผิวของหินมวลรวมที่ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 พบว่าตัวอย่างหินชนิด A และ B มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุหินเป็นลบในน้ำที่เป็นตัวทำละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดไฮดรอกลอริกเป็นตัวทำละลายเพื่อประเมินความเข้ากันระหว่างหินที่เป็นประจุลบกับประจุบวกของไฮดรอกไซด์ไอออนพบว่าตัวอย่างหินชนิด A มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเท่ากับ -2.31 mV ตัวอย่างหินชนิด B มีค่าเท่ากับ -3.2 mV สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดผลอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 กับเบอร์ 16 ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงที่เป็นกลางทางไฟฟ้า 0 mV แต่สำหรับตัวอย่างหินชนิด C มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเท่ากับ 13.2 mV ซึ่งถือว่ามีความเข้ากันได้ไม่ดีกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่เป็นประจุบวก

เนื่องจากเกิดการแสดงอำนาจทางไฟฟ้าหลังจากการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินมวลรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความเป็นกรดเบสของหินชนิด C ที่มีสภาพเป็นกรดในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) นี้

พื้นที่ผิวของหินมวลรวมมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของหินเพิ่มขึ้นตามขนาดคละที่เล็กลงส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวลดลง โดยตัวอย่างหินชนิด B สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินที่มีขนาดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 และเบอร์ 16 ได้เท่ากับ -18.2 mV และได้ค่าเท่ากับ -21.2 mV สำหรับตัวอย่างหินที่มีขนาดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 และเบอร์ 50 ซึ่งมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับตัวอย่างหินชนิด B และหินชนิด C



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของขนาดคละอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 กับเบอร์ 16



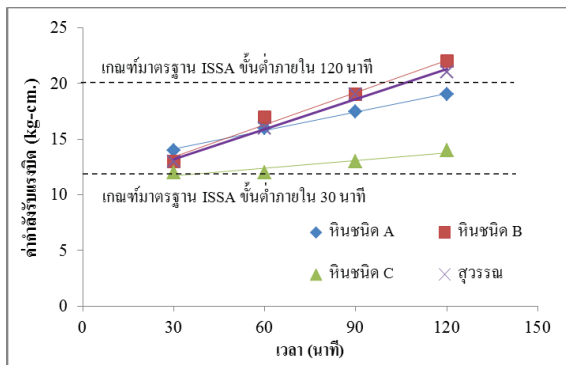
รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของขนาดคละอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 กับเบอร์ 50

การประเมินความเสถียรเชิงการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินมวลรวมและไฮดรอกไซด์ไอออน พบว่าหินชนิด B ที่มีขนาดของหินอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 และเบอร์ 50 มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 mV ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งถือว่ามีความเข้ากันได้ดีที่สุดในหินที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเข้าใกล้ความเป็นกลางทางไฟฟ้ามากที่สุด เหตุผลเนื่องมาจากหินชนิด B นี้มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักมากที่สุด จึงเกิดการจับตัวกันได้ดีกับไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายกรดไฮดรอกลอรริกซึ่งเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) โดยหินชนิด A มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบของหินชนิด B เนื่องจากมีองค์ประกอบทางธรณีวิทยาของหินมวลรวมที่คล้ายคลึงกัน แต่สำหรับหินชนิด C มีการแลกเปลี่ยนประจุไม่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวในสารละลายกรดเท่ากับ 14.2 mV ซึ่งมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก จึงสามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่าหินชนิด C นี้ไม่สามารถนำมาใช้ในงานพาราสเลอริซัลต์ที่มีคุณภาพได้

4.3 ผลการประเมินคุณภาพพาราสเลอริซัลต์

การประเมินประสิทธิภาพพาราสเลอริซัลต์เมื่อพิจารณาถึงความเข้ากันได้ของหินมวลรวมที่ใช้ซึ่งถูกควบคุมขนาดคละของตัวอย่างหินทั้งสามแหล่งให้เหมือนกันโดยจะอยู่ในช่วงระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของขนาดคละที่ใช้ในงานสเลอริซัลต์ประเภทที่สามดังที่แสดงในตารางที่ 1 ผสมเป็นตัวอย่างพาราสเลอริซัลต์ตามหัวข้อที่ 3.2 ได้ผลการทดสอบกำลังรับแรงบด ดังรูปที่ 10 พบว่าตัวอย่างพาราสเลอริซัลต์ที่ใช้หินชนิด B มีค่ากำลังรับแรงบดสูงที่สุด (13 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 22 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) สอดคล้องกับปัจจัยความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุหินและแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) มีความเข้ากันได้ดีที่สุดในหินเมื่อพิจารณาถึงค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงบดของหินชนิด A และ C มีค่าเข้าใกล้ความเป็นกลางจึงทำให้เกิดความเสถียรในการแลกเปลี่ยนประจุส่งผลให้หินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันมีการจับตัวกันได้ดีจนได้ค่ากำลังรับแรงบดสูง รองลงมาเป็นตัวอย่าง

พาราเซลเลอร์ซีลที่ใช้หินจากโรงโม่สุวรรณ (13 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 21 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) และ หินชนิด A (14 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 19 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) ตามลำดับ ซึ่งหินปูนทั้งสามแหล่งนี้มีผลใกล้เคียงกันเนื่องจากมีความสัมพันธ์กรดเบสและองค์ประกอบของแร่คล้ายคลึงกัน ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด C (12 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 14 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) มีค่าน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับสภาพความเป็นกรดเบสของตัวอย่างหินที่เป็นกรดอ่อนและมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ทำให้หินมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชันมีการจับตัวกันและการยึดเกาะระหว่างวัสดุผสมไม่ดีพอส่งผลให้มีค่ากำลังแรงบิดน้อย



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงบิดของตัวอย่าง ณ เวลาการเซตตัวต่าง ๆ

ความต้านทานการขัดผิวของพาราเซลเลอร์ซีลที่ทดสอบตามมาตรฐาน ISSA TB100 ดังแสดงผลในตารางที่ 4 พบว่าตัวอย่างที่ใช้หินชนิด B ได้ค่าน้ำหนักการสูญเสียหลังการขัดผิวน้อยที่สุดซึ่งถือว่ามีความทนทานการขัดผิวจนทำให้น้ำหนักของตัวอย่างหลุดร่อนน้อย ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด C ได้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการทดสอบมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากหินชนิด C มีความเข้ากันได้ไม่ดีกับแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) ทำให้มีการจับกันของวัสดุไม่ดีจึงหลุดได้ง่ายเมื่อเกิดการขัดผิวของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลความต้านทานการขัดผิวพาราเซลเลอร์ซีล

ตัวอย่างแหล่งหิน	น้ำหนักสูญเสีย (กรัม/ตร.ม.)
หินชนิด A	405.40
หินชนิด B	388.22
หินชนิด C	1133.57

เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางธรณีวิทยาของหินมวลรวมที่ใช้ในการผสมตัวอย่างพาราเซลเลอร์ซีลพบว่าหินชนิด B ซึ่งเป็นหินปูนที่มีปริมาณ CaO สูงที่สุดที่ 99.29% ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่างที่ใช้หินชนิด A ที่มีปริมาณ CaO อยู่ที่ 98.10% ได้ค่ากำลังรับแรงบิดใกล้เคียงกันแต่เนื่องด้วยปริมาณ CaO ที่น้อยกว่า ทำให้เกิดเป็นประจุลบของหินมวลรวมน้อยลงจึงเกิดปฏิกิริยากับแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) ที่มีส่วนผสมของกรดไฮดรอกลอริก ทำให้วัสดุมวลรวมยึดเกาะน้อยกว่าจึงทำให้น้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดผิวมากกว่าหินชนิด B

การประเมินผลตามเกณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างพาราเซลเลอร์ซีลที่ใช้หินชนิด B ผ่านเกณฑ์ในการทดสอบมาตรฐานตามหัวข้อที่ 3.2 สามารถรองรับการใช้งานได้จริง ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด A ไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องจากค่ากำลังรับแรงบิดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตามการควบคุมขนาดคละของหินมวลรวมและปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ในขอบเขตงานวิจัยนี้ ซึ่งถ้าหากมีการปรับอัตราส่วนของขนาดคละให้มีมวลละเอียดมากขึ้นหรือเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็จะสามารถทำให้แหล่งหินชนิด B มีแนวโน้มที่จะผ่านเกณฑ์และสามารถเป็นวัสดุหินทางเลือกให้มีคุณภาพได้ ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด C ไม่ผ่านมาตรฐาน จึงไม่มีความเหมาะสมที่นำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทางแบบพาราเซลเลอร์ซีลได้ ซึ่งถือว่าผลการประเมินประสิทธิภาพสอดคล้องการหลักการเข้ากันได้ระหว่างหินมวลรวมกับแอสฟัลต์มีผลต่อประสิทธิภาพของพาราเซลเลอร์ซีล

5. สรุปผลและวิเคราะห์ผลดำเนินงานวิจัย

1. ความเข้ากันได้ระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชันและหินมวลรวมสามารถพิจารณาได้จากค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินซึ่งมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของหิน โดยพบว่าแหล่งหินที่มีปริมาณ CaO มากทำให้ได้ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเป็นลบมากขึ้น ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการตรวจสอบเบื้องต้นว่าวัสดุหินตัวอย่างมีความสามารถในการเข้ากันได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA)

2. ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินโดยใช้สารละลายกรดสามารถนำมาเป็นแนวทางการประเมินความเข้ากันได้ของพาราสเลอรีซีล โดยหินที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเข้าใกล้ความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนประจุกันได้ดีระหว่างอนุภาคของหินและประจุของแอสฟัลต์อิมัลชัน

3. ขนาดของวัสดุหินมีผลต่อความเข้ากันได้ของวัสดุพาราสเลอรีซีล เมื่อพื้นที่ผิวของวัสดุหินเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่เป็นประจุบวก

ได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่ความเป็นกลางทางไฟฟ้าและมีความเสถียรจับตัวกันระหว่างอนุภาคของส่วนผสม

4. การเลือกวัสดุหินโดยใช้การตรวจสอบการหาค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมมีความจำเป็นต่อประสิทธิภาพพาราสเลอรีซีล โดยตัวอย่างที่ใช้หินที่มีความเป็นกรดเบสและค่าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นกลางจะได้ประสิทธิภาพของพาราสเลอรีซีลที่ดี เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดประจุบวกที่เหมาะสม

5. แนวทางการคัดเลือกหินในงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์ความเหมาะสมของหินเพื่อนำมาเป็นแหล่งหินทางเลือกในงานพาราสเลอรีซีล ซึ่งถ้ามีการพิจารณาขนาดและปริมาณสารผสมเพิ่มที่เปลี่ยนไปก็สามารถนำมาเป็นแนวทางศึกษาที่มีประโยชน์ได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sai, K., Kishore, N. A Study on Effect of Addition of Natural Rubber on the Properties of Bitumen & Bituminous Mixes. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 2015; 2(01).
- [2] Ruggles, C. The Use of Natural Rubber Latex in Modified Asphalt Road Binders in the UK. Annual General Meeting. Las Vegas, USA, 2005.
- [3] รายงานมาตรฐานการฉาบผิวทางแบบสเลอรีซีล (SLURRY SEAL). มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท. 2545; 232: 97-104.
- [4] สุรพล เกตุแก้ว. การทำงานพาราสเลอรีซีลอย่างมีคุณภาพ. บริษัท ทีพีโก้ แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน), 2556.
- [5] มาตรฐานวิธีการฉาบผิวทางแบบพาราสเลอรีซีล (Para Slurry Seal). มาตรฐานงานทางกรมทางหลวง, ทล.-ม. 415/2546.
- [6] Polymer Modified Asphalt Emulsions Composition, Uses, and Specifications for Surface Treatments. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2012, FHWA-CFL/TD-12-004.
- [7] Keven Heitschmidt, K. Understanding the differences in emulsions and the manufacturing process. Benton County Preservation Round Table. Albina Asphalt, 2016.
- [8] Specification for Elastomeric Modified Asphalt Emulsion. มาตรฐานกรมทางหลวง. สำนักงานมาตรฐานและประเมินผล กรมทางหลวง, 2538; 405.
- [9] ASTM D 3910, Standard Practice for Design, Testing and Construction of Slurry Seal. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book of ASTM Standards, 1999; 04(02-03), 14(02).

- [10] Hefer, A. and Little, D. Adhesion in Bitumen Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond. Texas Transportation Institute, College Station, Texas, USA, 2005.
- [11] Recommended Performance Guideline for Emulsified Asphalt Slurry Seal A105. International Slurry Surfacing Association. *Annual Report, 2010*.
- [12] Test Method to Determine Set and Cure Development of Slurry Surfacing Systems by Cohesion Tester. ISSA TB139, INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION TECHNICAL BULLETIN, 2017.
- [13] Laboratory Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfacing Systems. ISSA TB100, INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION TECHNICAL BULLETIN, 2017.
- [14] การศึกษาวิทยาหินและสีถาวรของตัวอย่างหินเปียะกิง สีลาแม่ทะ สีลาสามยอด หุ่นสีลา และชัยพัฒนา. ภาควิชา ธรณีวิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2560; 1-18.