



สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

โครงการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง

รายงานขั้นสุดท้าย
(Final Report)



สถาบันการขนส่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกฎาคม 2562

คำสงวนสิทธิ์

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ได้ว่าจ้าง สถาบันการขนส่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นที่ปรึกษาในการดำเนินงาน โครงการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง อ้างอิงสัญญาจ้างที่ปรึกษา เลขที่ สจ.2/2562 โดยมีวัตถุประสงค์ (1) เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรม ของส่วนผสมยางพาราในห้องปฏิบัติการและจำลองสภาพการใช้งาน และ (2) เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสม ด้านวิศวกรรม และความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำผลผลิตไปใช้ประโยชน์ในงานทาง ในการนี้ จึงขอประกาศแนวทางในการคุ้มครองสิทธิ์ ดังนี้ ผลการศึกษาที่ได้จากโครงการอยู่ภายใต้ขอบเขตและเงื่อนไข ของการศึกษานี้เท่านั้น โดยอ้างอิงตาม ชนิดของวัสดุ มาตรฐาน จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ วิธีการทดสอบ สัดส่วนของส่วนผสมต่างๆ รวมถึงแหล่งที่มาของวัสดุ ตามที่ได้ระบุไว้ในรายงานฉบับนี้เท่านั้น



สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1-1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1-1
1.3 ขอบเขตของงาน	1-2
1.3.1. งานทบทวนวรรณกรรม.....	1-2
1.3.2 งานคัดเลือกวัสดุ.....	1-2
1.3.3 งานเก็บตัวอย่างเพื่อออกแบบสูตรส่วนผสม.....	1-2
1.3.4 งานเก็บตัวอย่างเพื่อออกแบบสูตรส่วนผสม.....	1-3
1.3.5 งานทดสอบเพื่อจำลองสภาพการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบดังต่อไปนี้.....	1-4
1.3.6 วิเคราะห์ความเหมาะสมด้านวิศวกรรมและความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำผลผลิตในข้อ 1.3.5 ไปใช้ประโยชน์ในงานทาง	1-4
1.3.7 จัดทำ (ร่าง)ข้อกำหนดพิเศษและ (ร่าง)ข้อเสนอทางเทคนิค ในการประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง	1-4
1.4 เนื้อหารายงานตาม TOR.....	1-5
บทที่ 2 การดำเนินโครงการ.....	2-1
2.1 การทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	2-1
2.2 การออกแบบส่วนผสมผลิตภัณฑ์ยางพารา	2-10
2.2.1 การคัดเลือกวัสดุที่ใช้ในโครงการ	2-10
2.2.1.1 งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น.....	2-10
2.2.1.2 งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง.....	2-14
2.2.1.3 งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง	2-15
2.3 งานออกแบบสูตรส่วนผสมผลิตภัณฑ์ยางพารา	2-17
2.3.1 งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น.....	2-17
2.3.2 งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง.....	2-20
2.3.3 งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง.....	2-22
2.4 งานทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ	2-26
2.4.1 งานวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น.....	2-26
2.4.1.1 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม	2-26
2.4.1.2 การทดสอบ Tensile Strength Ratio	2-30



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 งานวัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง	2-32
2.4.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน	2-32
2.4.3 งานการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง	2-36
2.4.3.1 การทดสอบ Unconsolidated Undrained (UU) Triaxial test.....	2-36
2.4.3.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	2-40
2.4.4 การคัดเลือกวัสดุสำหรับงานจำลองสภาพการใช้งาน	2-41
2.5 งานจำลองสภาพการใช้งาน	2-55
2.5.1 งานจำลองสภาพการใช้งานของวัสดุที่ปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น.....	2-55
2.5.2 งานจำลองสภาพการใช้งานของวัสดุที่อุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง.....	2-59
2.5.3 งานจำลองการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง.....	2-62
บทที่ 3 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล.....	3-1
3.1 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุจากการจำลองสภาพการใช้งาน.....	3-1
3.2 ผลวิเคราะห์ความเหมาะสมทางวิศวกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	3-6
3.3 สรุปผลการศึกษา.....	3-10
ภาคผนวก ก.....	ก-1



สารบัญญักรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2-1	หินปูนจากโรงโม่บ้านศิลา สุโขทัย	2-12
2-2	วัสดุมวลรวม Recycled Asphalt Aggregate (RAP).....	2-13
2-3	ยางพาราสเตรหว่างการเก็บเกี่ยว	2-15
2-4	สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ NP9.....	2-15
2-5	วัสดุหล่อทาง (หินปลายตะแกรง) ที่ใช้ในโครงการ	2-16
2-6	การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2h	2-17
2-7	ขั้นตอนการผสมน้ำยางพาราเข้มข้นกับ Asphalt Emulsion	2-18
2-8	นำส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชันและยางพารา ลงปั่นด้วยเครื่อง Colloid Mill Machine	2-18
2-9	การจับตัวเป็นก้อนของยางพาราเมื่อผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h	2-19
2-10	ผสม CSS-1 กับน้ำยางพาราเข้มข้น ด้วยเครื่อง Colloid Mill Machine.....	2-19
2-11	การเตรียมตัวอย่าง Joint Sealant ด้วยเครื่อง High Shear.....	2-20
2-12	การเทยางพาราลงผสมกับ Joint Sealant	2-21
2-13	ตัวอย่างที่ผสมเข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว	2-21
2-14	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดของวัสดุทดสอบ	2-22
2-15	แสดงการเตรียมตัวอย่างและการบ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ก่อนการทดสอบ UCS	2-23
2-16	แสดงภาพการผสมส่วนผสมและการทดสอบ UCS ของดินซีเมนต์ผสมยางพารา.....	2-25
2-17	การเตรียมวัสดุมวลรวม กับวัสดุเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน.....	2-26
2-18	ขั้นตอนการเทวัสดุส่วนผสมเข้าแบบ (mold).....	2-27
2-19	ขั้นตอนการนำแบบ Mold เข้าเครื่องบดอัด Marshall compaction	2-27
2-20	ก้อนตัวอย่างหลังจากเข้าเครื่องบดอัด Marshall compaction	2-28
2-21	ขั้นตอนการนำก้อนตัวอย่างแช่ในอ่างปรับอุณหภูมิ (water bath) ที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	2-28
2-22	ขั้นตอนการนำก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม	2-29
2-23	ก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและอ่านค่าแรงสูงสุด.....	2-29
2-24	จัดกลุ่มก้อนตัวอย่างก่อนการทดสอบ.....	2-30
2-25	ขั้นตอนการนำก้อนตัวอย่างแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง.....	2-31
2-26	อุปกรณ์สำหรับทดสอบ Direct Shear	2-26
2-27	นำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเข้าเตาอบ	2-33
2-28	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุยารอยต่อชนิดเทอร์ออน	2-33



สารบัญญักรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2-29	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต 2-33
2-30	ขั้นตอนการติดตั้งวัสดุรอยต่อ..... 2-34
2-31	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต 2-34
2-32	ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ Direct Shear 2-35
2-33	ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนขั้นตอนจากมาตรฐาน ASTM D3080 2-35
2-34	การวัดด้วยแรงเฉือนของก้อนตัวอย่างหลังการทดสอบ 2-35
2-35	แสดงภาพ Mould ที่ใช้ในการบดอัดและตัวอย่างดินหลังการบดอัด 2-37
2-36	ขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ UU Triaxial Test..... 2-37
2-37	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ UU Triaxial Test..... 2-38
2-38	การทดสอบ Permeability Test 2-41
2-39	ค่า IDT เฉลี่ยของก้อนตัวอย่างที่เตรียมด้วยวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่างๆ 2-42
2-40	ยางมะตอยน้ำผสมยางพาราจับตัวเป็นเส้นใยเมื่อผสมกับหินปูน..... 2-43
2-41	ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเคลือบหินและก้นน้ำของ CMS-2h และ CMS-2h ผสมยางพารา... 2-44
2-42	อนุภาคของยางพาราที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยางพารา..... 2-44
2-43	การทดสอบ pH ของสารลดแรงตึงผิว ยางพาราเข้มข้น และยางพาราเข้มข้นผสมสารลดแรงตึงผิว . 2-45
2-44	การทดสอบสภาพความเป็นกรดต่างของ CMS-2h และ CMS-2h ผสมยางพารา..... 2-45
2-45	แสดงผลการทดสอบ XRD ของวัสดุที่มีโครงสร้างจัดเรียงตัวแบบ (a) ผลึก (Crystal) และ (b) แบบอสัณฐาน (Amorphous)..... 2-47
2-46	ภาพถ่าย SEM ของ Polymer Modified Asphalt Emulsion ที่มีอนุภาคของ Polyvinyl Acetate เกาะติดกับยางมะตอยน้ำ โดย Polymer ที่ใช้อยู่ในรูปแบบของแข็ง (Solid) จึงเห็นการเกาะติดของอนุภาค Polymer บนพื้นผิวแอสฟัลต์ 2-47
2-47	ภาพถ่าย SEM ของ Asphalt ก่อน (บน) และหลัง (ล่าง) จากการปรับปรุงคุณภาพ (modify) ด้วย polymer ประเภท Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) หรือ Synthetic Rubber ซึ่งภาพถ่ายแบบ SEM แสดงให้เห็นถึงการกลายเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมเท่านั้น..... 2-48
2-48	ภาพถ่าย Fluorescent ของ Polymer Modified Asphalt ที่ใช้ Polymer ประเภท Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) ณ อัตราส่วนผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่า การเพิ่มอัตราส่วน polymer ส่งผลให้ส่วนผสมเปลี่ยนจากการแขวนลอยของ polymer ในแอสฟัลต์ เป็นการแขวนลอยของแอสฟัลต์ในโพลีเมอร์ 2-48
2-49	กำลังรับแรงเฉือนตรงของวัสดุอุดรอยต่อตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 (ยางพาราร้อยละ 0) และที่มีส่วนผสมของยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ..... 2-50





สารบัญญักรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2-50	ค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่วัสดุอุดรอยต่อตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 (ยางพาราร้อยละ 0) และที่มีส่วนผสมของยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ รับแรงเฉือนได้สูงสุด.....	2-50
2-51	Undrained Shear Strength ของส่วนผสมที่ Confining Pressure ต่างๆ.....	2-52
2-52	ลักษณะของเนื้อยางพาราที่จับตัวอยู่ในเนื้อดินซีเมนต์ (ตัวอย่าง UU Triaxial Test)	2-53
2-53	ค่า Permeability ของก้อนตัวอย่างที่วัดได้จากการประยุกต์ใช้เครื่อง Triaxial Test	2-53
2-54	จำลองสภาพความเสียหายหลุมบ่อ (Pot Hole) บนแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีต.....	2-55
2-55	ขั้นตอนการผสมวัสดุมวลรวม RAP กับแอสฟัลต์อิมัลชัน.....	2-56
2-56	ขั้นตอนการบดอัดแผ่นตัวอย่างวัสดุมวลรวมผสมเย็น.....	2-56
2-57	ขั้นตอนการขัดแผ่นด้วยเครื่องทดสอบ Accelerated Polishing Machine for Asphalt Mixtures ..	2-57
2-58	การวัดค่าการยุบตัวของวัสดุปะซ่อมและประเมินสภาพพื้นผิว.....	2-57
2-59	จำลองสภาพความเสียหายจากรอยแตกบนแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีต.....	2-59
2-60	ขั้นตอนการเทส่วนผสมวัสดุสำหรับงานอุดซ่อมรอยแตก	2-59
2-61	ขั้นตอนการขัดแผ่นด้วยเครื่องทดสอบ Accelerated Polishing Machine for Asphalt Mixtures ..	2-60
2-62	ชุดจำลองฝนระหว่างการสอบเทียบ	2-62
2-63	การบดอัดวัสดุไหล่ทางในกระเบตทดสอบ	2-63
2-64	การบดอัดดินซีเมนต์ผสมยางพาราในกระเบตทดสอบ	2-64
2-65	ภาพแสดงการติดตั้งแผ่นยางพารารมควันปิดทับหน้าดินไหล่ทางบดอัด	2-65
2-66	ภาพแสดงกระเบตจำลองลาดคันทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน.....	2-66
2-67	ภาพแสดงกระเบตจำลองทั้ง 6 ที่รอการทดสอบ.....	2-66
2-68	ภาพแสดงการทดสอบของกระเบตจำลอง	2-67
2-69	การจำลองฝนตกในแปลงทดสอบ	2-67
2-70	การทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน.....	2-68
2-71	แสดงวิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพการลดปริมาณการกัดเซาะในแปลงทดสอบ	2-69
2-72	ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ผิวดิน (Soil Surface Infiltration).....	2-71
2-73	การเลือกตำแหน่งการทดสอบ Surface Infiltration ต่อ 1 กระเบต.....	2-71
3-1	ค่าการยุบตัวของวัสดุปะซ่อมแบบตามแนวร่องล้อ (Rutting) กับจำนวนครั้งที่ล้อวิ่งผ่าน.....	3-1
3-2	แสดงการเกิดร่องล้อ (Rutting) และการร่อนหลุด (Stripping) ของวัสดุปะซ่อม	3-1
3-3	ลักษณะพื้นผิวของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกตาม ทล.ม. 328 และส่วนผสมที่มียางพาราร้อยละ 1 หลังจากจำลองสภาพการใช้งานด้วยเครื่อง Three-Wheel Polishing Machine	3-2
3-4	น้ำหนักรินที่สูญหายไป (Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำฝนจำลองในแต่ละสัปดาห์.....	3-3





สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-5	น้ำหนักรดินที่สูญเสียสะสม (Cumulative Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อน ของน้ำฝนจำลองในแต่ละสัปดาห์..... 3-4
3-6	น้ำหนักรดินที่สูญเสียสะสม (Cumulative Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อน ของน้ำฝนจำลองในแต่ละสัปดาห์..... 3-4
3-7	Surface Infiltration rate (cm/hr) ของวัสดุในกระบะทดสอบ วัดหลังจากการจำลองฝนตก.....3-5
3-8	การวิเคราะห์ผลประโยชน์จากการนำยางพารามาประยุกต์ใช้ในงานป้องกันการชะล้าง..... 3-9
3-9	แสดงผลงานภาพรวมของโครงการ 3-19



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1	สรุปเนื้อหางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ 2-1
2-2	คุณสมบัติของ Asphalt Emulsion CMS-2h ตามมาตรฐาน มอก.371-2530..... 2-10
2-3	คุณสมบัติของน้ำยางพาราเข้มข้นชนิด HA..... 2-11
2-4	คุณสมบัติของหินปูนที่นำมาใช้ในโครงการ..... 2-12
2-5	ขนาดคละของหินปูนที่นำมาใช้ในโครงการ 2-13
2-6	ขนาดคละของวัสดุมวลรวมหินคลุกและ Recycled Asphalt Aggregate (RAP) 2-14
2-7	คุณสมบัติของวัสดุอุดรอยต่อ ตามข้อกำหนด มอก. 479-2541..... 2-14
2-8	คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ NP9..... 2-16
2-9	คุณสมบัติของวัสดุไหลทางที่ใช้ในโครงการ 2-17
2-10	ผลการทดสอบ UCS ที่อายุ 7 วันของดินซีเมนต์..... 2-23
2-11	อัตราส่วนของส่วนผสมต่างๆ ต่อตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมยางพารา 1 ก้อน 2-24
2-12	ผลการทดสอบ UCS ที่อายุ 7 วันของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมยางพารา..... 2-25
2-13	อัตราส่วนผสมผลิตภัณฑ์สำหรับงานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น..... 2-27
2-14	ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุมวลรวมประเภทหินคลุก และ RAP ด้วยวิธีการปรับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน..... 2-30
2-15	ผลการทดสอบ TSR ของวัสดุมวลรวมประเภทหินคลุก และ RAP 2-32
2-16	ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน 2-36
2-17	น้ำหนักส่วนผสมของตัวอย่างเพื่อทดสอบ Triaxial test 2-36
2-18	ผลการทดสอบ UU Triaxial Test..... 2-38
2-19	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง..... 2-39
2-20	ผลการทดสอบ Permeability Test..... 2-41
2-21	ค่าตริกความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ของตัวอย่างจากการทดสอบ UU Triaxial Test 2-51
2-22	แสดงรายการวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการคัดเลือกเพื่อไปทดสอบ ประสิทธิภาพการใช้งานเทียบกับวัสดุที่แนะนำจากมาตรฐานของกรมทางหลวง..... 2-54
2-23	ผลการวัดค่าการยุบตัว (Rutting) และสภาพพื้นผิวหลังจำลองสภาพการใช้งาน 2-58
2-24	ผลการทดสอบการเสียดทานของวัสดุอุดรอยต่อตามจำนวนรอบการขัด 2-61
2-25	ผลการจำลองฝนและคำนวณประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้างพังทลาย ของลาดคันทาง (Soil Loss Relative Efficiency: SLRE)..... 2-70
2-26	ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ผิวดิน (Soil Surface Infiltration)..... 2-73
3-1	การวิเคราะห์ต้นทุนของวัสดุแต่ละประเภท 3-7





สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3-2	วิเคราะห์ผลประโยชน์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิต.....	3-8
ก-1	ตารางราคากลางวัสดุที่ใช้ในโครงการ.....	ก-2
ก-2	น้ำหนักดินที่สูญเสียม (Cumulative Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำฝนจำลองในหนึ่งเดือน	ก-3
ก-3	วิเคราะห์ผลประโยชน์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิต.....	ก-4



1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของไทย ประเทศไทยมีการผลิตยางพารามากเป็นอันดับต้นๆ ของโลก มีจำนวนยางพาราที่ผลิตได้ประมาณ 3.5 ล้านตันต่อปี หรือประมาณหนึ่งในสามของปริมาณการผลิตของโลก เนื่องจากราคายางพารามีความผันผวนในตลาดการค้าค่อนข้างสูง จึงส่งผลกระทบต่อรายได้ของเกษตรกร และเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นประจำอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นรัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมการใช้ยางพาราในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยมีหน่วยงานภาครัฐและสถาบันต่างๆ มุ่งส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากยางพาราเพื่อเป็นการสนับสนุนและช่วยเหลือเกษตรกรในการนำวัตถุดิบยางพารามาใช้งานภายในประเทศให้มากขึ้น กระทรวงคมนาคม โดยกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท ได้มีการสนับสนุนการใช้ยางพารา โดยขยายผลการวิจัยไปสู่การปฏิบัติเพื่อประโยชน์ในกิจการงานภาครัฐ โดยผลักดันให้ใช้ยางพาราผสมยางแอสฟัลต์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับถนนลาดยาง แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีแนวทางประยุกต์ใช้ยางพาราสำหรับงานซ่อมบำรุงผิวทางในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ งานปะซ่อมผิวทาง งานอุดซ่อมรอยแตกของผิวทาง งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง เป็นต้น

ดังนั้น สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง จึงจัดทำโครงการเพื่อประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง ได้แก่ งานซ่อมบำรุงผิวทาง งานบำรุงรักษาทาง งานป้องกันแก้ไขปัญหาการเคลื่อนตัวของคันทาง งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง เป็นต้น โดยวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมยางพาราในห้องปฏิบัติการและสภาพใช้งานจริง ตลอดจนความเหมาะสมด้านวิศวกรรม และความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำผลผลิตไปใช้ประโยชน์ในงานทางต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1.2.1 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมยางพาราในห้องปฏิบัติการและจำลองสภาพการใช้งาน
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมด้านวิศวกรรมและความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำผลผลิตไปใช้ประโยชน์ในงานทาง



1.3 ขอบเขตของงาน

โครงการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง มีขอบเขตการศึกษาขอโครงการดังต่อไปนี้

1.3.1 งานทบทวนวรรณกรรม

1.3.1.1 ที่ปรึกษาจะต้องศึกษาและรวบรวมเอกสารรายงานการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ยางพาราในงานทาง รวมถึงศึกษาทบทวนข้อดีข้อจำกัดและตัวอย่างการประยุกต์ใช้ยางพาราในงานทางจากในประเทศและต่างประเทศ (ถ้ามี)

1.3.1.2 ที่ปรึกษาจะต้องศึกษาและรวบรวมมาตรฐานและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง ได้แก่ งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง เป็นต้น

1.3.2 งานคัดเลือกวัสดุ

ที่ปรึกษาจะต้องคัดเลือกชนิดของน้ำยางพารา ชนิดของสารผสมเพิ่มวัสดุผสมรวมและหรือทรายสำหรับ (1) งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น (2) งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง และ (3) งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง ทั้งนี้ที่ปรึกษาต้องนำเสนอคุณสมบัติและหรือคุณลักษณะจำเพาะของวัสดุตามที่กล่าวมาข้างต้น และต้องได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการบริหารโครงการก่อนดำเนินการต่อไป

1.3.3 งานเก็บตัวอย่างเพื่อออกแบบสูตรส่วนผสม

ที่ปรึกษาจะต้องเก็บตัวอย่างเพื่อออกแบบสูตรส่วนผสม (Job Mix Formula, JMF) ดังต่อไปนี้

1.3.3.1 ออกแบบ JMF ที่เหมาะสมระหว่างน้ำยางพารา สารผสมเพิ่ม (Admixture) กากยาง (RAP) วัสดุผสมรวม สำหรับส่วนผสมวัสดุผสมรวมผสมเย็นเพื่อใช้ปะซ่อมผิวทาง จำนวนอย่างน้อย 3 สูตร

1.3.3.2 ออกแบบ JMF ที่เหมาะสมระหว่างน้ำยางพารา สารผสมเพิ่ม (Admixture) และทราย สำหรับส่วนผสมในลักษณะชั้นเหลวเพื่อใช้อุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง จำนวนอย่างน้อย 3 สูตร

1.3.3.3 ออกแบบ JMF ที่เหมาะสมระหว่างน้ำยางพารา สารผสมเพิ่ม (Admixture) และทราย สำหรับส่วนผสมในลักษณะชั้นเหลวเพื่อใช้ลดอัตราการซึมผ่านของน้ำและอัตราการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง จำนวนอย่างน้อย 3 สูตร



1.3.4 งานเก็บตัวอย่างเพื่อออกแบบสูตรส่วนผสม

ที่ปรึกษาจะต้องทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ ดังต่อไปนี้

1.3.4.1 ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมในข้อ 1.3.3.1 และวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 407 “วัสดุผสมรวมผสมเย็นด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน (Cold Mixed Asphalt)” ดังนี้

1.3.4.1.1 ทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D6931 “Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures” หรือเทียบเท่า ของส่วนผสมในข้อ 1.3.3.1 และวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 407 จำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม

1.3.4.1.2 ทดสอบค่า Tensile Strength Ratio (TSR) ตามมาตรฐาน AGPT/T232 “Stripping Potential of Asphalt: Tensile Strength Ratio” หรือเทียบเท่า ของส่วนผสมในข้อ 1.3.3.1 และวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 407 จำนวนอย่างน้อย 3 ชุดตัวอย่างต่อส่วนผสม โดย 1 ชุดตัวอย่างประกอบด้วยตัวอย่างแบบแช่น้ำ (Soaked Sample) และไม่แช่น้ำ (Unsoaked Sample)

1.3.4.1.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบในข้อ 1.3.4.1.1 และ ข้อ 1.3.4.1.2 และเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างส่วนผสมในข้อ 1.3.3.1 กับวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 407

1.3.4.2 ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมในข้อ 1.3.3.2 และวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 328 “มาตรฐานการซ่อมรอยแยกตัวระหว่างไหล่ทางกับผิวคอนกรีตด้วยวัสดุยารอยต่อชนิดเทอร์อน” ดังนี้

1.3.4.2.1 ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยประยุกต์วิธีการทดลองจากมาตรฐาน ASTM D3080 “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions” หรือเทียบเท่า ของส่วนผสมในข้อ 1.3.3.2 และวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 328 จำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม

1.3.4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบในข้อ 1.3.4.2.1 และเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างส่วนผสมในข้อ 1.3.3.2 กับวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 328 วิเคราะห์ผลการทดสอบในข้อ 1.3.4.1.1 และ ข้อ 1.3.4.1.2 และเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างส่วนผสมในข้อ 1.3.3.1 กับวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 407



1.3.5 งานทดสอบเพื่อจำลองสภาพการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบดังต่อไปนี้

1.3.5.1 เตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 408 ขนาดแผ่นตัวอย่าง ไม่น้อยกว่า 50×50 ตร.ซม. หนาไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร จำนวนอย่างน้อย 4 แผ่น ปะซ่อมด้วยส่วนผสมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมคัดเลือกจากข้อ 1.3.4.1 จำนวนอย่างน้อย 2 แผ่น และปะซ่อมด้วยวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 407 จำนวนอย่างน้อย 2 แผ่น โดยพื้นที่ปะซ่อมต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 30×30 ตร.ซม. แล้วจำลองสภาพการใช้งานโดยชุด อุปกรณ์เร่งการขัดสีหรือเทียบเท่า

1.3.5.2 เตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 408 ขนาดแผ่นตัวอย่าง ไม่น้อยกว่า 50×50 ตร.ซม. หนาไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร จำนวนอย่างน้อย 4 แผ่น เสาะร่องขนาดไม่น้อยกว่า 5 มม. บริเวณกึ่งกลางแผ่น ออกด้วยส่วนผสมที่มีคุณสมบัติ เหมาะสมคัดเลือกจากข้อ 1.3.4.2 จำนวนอย่างน้อย 2 แผ่น และออกด้วยวัสดุตามมาตรฐาน งานทางที่ ทล.-ม. 328 จำนวนอย่างน้อย 2 แผ่น แล้วจำลองสภาพการใช้งานโดยชุดอุปกรณ์ เร่งการขัดสีหรือเทียบเท่า

1.3.5.3 เตรียมแปลงตัวอย่างจำลองลาดคันทาง ขนาดความกว้างและความยาวไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร ความลาดเอียงไม่น้อยกว่า 1.5 : 1 (H : V) พร้อมชุดอุปกรณ์จำลองสภาพฝนตกที่สามารถ ควบคุมปริมาณและระยะเวลาฝนตกได้ โดยใช้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมคัดเลือก จากข้อ 1.3.4.2 จำนวนอย่างน้อย 2 แปลง วัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 207 เสริม ด้วยแผ่นยางพาราจำนวนอย่างน้อย 2 แปลง และวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 207 จำนวนอย่างน้อย 2 แปลง ประเมินอัตราการซึมผ่านของน้ำและอัตราการชะล้างพังทลาย ของแปลงตัวอย่าง ทั้งนี้ที่ปรึกษาต้องนำเสนอรายละเอียดรูปแบบแปลงตัวอย่าง และต้อง ได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการบริหารโครงการก่อนดำเนินการ

1.3.5.4 วิเคราะห์ประเมินผลการทดสอบและเปรียบเทียบสภาพการใช้งานในข้อ 1.3.5.1 ถึง 1.3.5.3

1.3.6 วิเคราะห์ความเหมาะสมด้านวิศวกรรมและความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำผลผลิตในข้อ 1.3.5 ไปใช้ประโยชน์ในงานทาง

1.3.7 จัดทำ (ร่าง)ข้อกำหนดพิเศษและ (ร่าง)ข้อเสนอทางเทคนิคในการประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อม บำรุงผิวทางหลวง



1.4 เนื้อหารายงานตาม TOR

ที่	หัวข้อตาม TOR	หัวข้อในรายงานเบื้องต้น
1	งานทบทวนวรรณกรรม และรวบรวมข้อมูล	บทที่ 2 (ข้อ 2.1)
2	งานคัดเลือกวัสดุสำหรับออกแบบส่วนผสม	บทที่ 2 (ข้อ 2.2)
3	งานออกแบบสูตรส่วนผสม	บทที่ 2 (ข้อ 2.3)
4	งานทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ	บทที่ 2 (ข้อ 2.4)
5	งานทดสอบเพื่อจำลองสภาพการใช้งาน	บทที่ 2 (ข้อ 2.5)
6	วิเคราะห์ประเมินผลการทดสอบและเปรียบเทียบสภาพการใช้งานของวัสดุต่างๆ	บทที่ 3 (ข้อ 3.1)
7	วิเคราะห์ความเหมาะสมด้านวิศวกรรม และความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์	บทที่ 3 (ข้อ 3.2)
8	สรุปผลการศึกษา	บทที่ 3 (ข้อ 3.3)
9	ร่างรายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร (Draft Executive Summary Report)	(ร่าง) รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร
10	จัดทำ (ร่าง)ข้อกำหนดพิเศษและ (ร่าง)ข้อเสนอด้านเทคนิค	รายงาน (ร่าง) ข้อกำหนดพิเศษ และ (ร่าง) ข้อเสนอด้านเทคนิค

2.1 การทบทวนวรรณกรรมและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
ตารางที่ 2-1 สรุปเนื้อหางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราธรรมชาติผสมกับ Asphalt Binder		
Thompson (1964) Mullins (1971)	<ul style="list-style-type: none"> ● The Use of Natural Rubber in Road Surfacing Road Research Laboratory. ● Natural Rubber in Asphalt Pavements 	<p>ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติ 4 ชนิดในงานทาง คือ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ยางผงทั้งที่ผ่านการคงรูป (Vulcanized natural rubber powder) และไม่ผ่านการคงรูป (Unvulcanized natural rubber powder) ● น้ำยางที่ได้จากวิธีการปั่น (Centrifuged latex) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% ● น้ำยางที่ได้จากวิธีการระเหยน้ำ (Evaporated latex) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้ง 73% ● ยางแผ่น (Sheet rubber) จากท้องถิ่นผสมกับ Asphalt binder ชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้ <ul style="list-style-type: none"> ● แอสฟัลต์ซีเมนต์ ● คัทแบคแอสฟัลต์ ● แอสฟัลต์อีมีลชัน <p>จากผลการทดลองพบว่าการเติมน้ำยางธรรมชาติชนิดใดๆ ก็ตามในปริมาณที่ไม่เกิน 5% โดยน้ำหนัก binder สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลได้ดีขึ้น กล่าวคือทำให้มีจุดอ่อนตัวสูงขึ้น (Softening point) และค่า Penetration ลดลง ช่วยลด temperature susceptibility และส่งผลให้คุณสมบัติอื่นๆ ของ asphalt binder ดีขึ้น เช่น ความเหนียว ความหนาแน่น ความคงตัว ความยืดหยุ่น และการยึดเกาะกับวัสดุมวลรวมลดการหลุดลอก (Striping)</p>



ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
Fernando, M.J. and Nadarajah, M. (1969)	Use of Natural Rubber Latex in Road Construction (<i>Journal of Rubber Research Institute of Malaya</i>).	<p>ทำการศึกษาน้ำยางธรรมชาติ 6 ชนิด</p> <ul style="list-style-type: none">● น้ำยางสด (Field Latex) ชนิดแอมโมเนียต่ำ LA● น้ำยางสด (Field latex) ชนิดแอมโมเนียสูง HA● น้ำยางธรรมชาติที่ได้จากวิธีการปั่น (Centrifuged latex) ชนิดแอมโมเนียต่ำ LA (หรือ Concentrated Latex)● น้ำยาง Revertex● ทางน้ำยาง (Skim latex) ชนิดที่ใส่สาร Carboxy Methyl Cellulose (CMC)● ทางน้ำยาง (Skim latex) ชนิดที่ใส่สาร Hydroxy Ethyl Cellulose (HEC) <p>ใช้ปริมาณน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่อัตราส่วน 2 - 4% ผสม Asphalt binder ประเภท AC 80/100 จากการศึกษาพบว่า วิธีการผสม Asphalt binder กับ น้ำยางธรรมชาติที่เหมาะสม คือ ให้ใช้อุณหภูมิในการผสมอยู่ที่ 150-163 องศาเซลเซียส หลังจากผสม ส่วนผสมแล้ว ให้ทำการกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) จากการทดสอบคุณสมบัติส่วนผสมพบว่า Asphalt binder ที่ผสมกับน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด มีค่า Penetration ลดลง แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมแข็งขึ้น ค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น และค่าการหลุดลอกและค่าการยืดดึง (Ductility) ลดลง นอกจากนี้ งานวิจัยดังกล่าว ยังได้ศึกษารูปแบบในการผสมเพิ่มเติม โดยเติมน้ำมันก๊าด 5% โดยปริมาตร สามารถช่วยลดความหนืด (Viscosity) ในระหว่างการผสมได้ เนื่องจากการผสม Asphalt binder และน้ำยางธรรมชาติจะมีความหนืดสูงขึ้นตามปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่ได้ทำการเติมลงไป การใช้โซดาไฟ (NaOH) 0.7% (สารละลาย 10%) เป็นส่วนผสมจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผสม สามารถลดพองจากการเดือดของน้ำ ในขณะที่ทำการผสมได้</p>



ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
Turi, A.E. (1981)	Thermal Characterization of Polymeric Materials.	การศึกษาดังกล่าวเสนออุณหภูมิที่เหมาะสมในการผสม Asphalt binder กับน้ำยางธรรมชาติ พบว่าการผสม Asphalt Binder กับน้ำยางธรรมชาติต้องใช้ อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้คุณภาพของ ส่วนผสมลดลงได้ ดังนั้นอุณหภูมิในการผสม Asphalt binder กับน้ำยางธรรมชาติไม่ควรเกิน 270 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวจะส่งผลเนือยง เสื่อมสภาพ (Degradation) และที่อุณหภูมิสูงขึ้น 360 - 380 องศาเซลเซียส เนือยงจะเสียสภาพ (Breakdown) ทันที
Shell Chemical Company (1992)	Kraton Rubber: The Asphalt Modifier that bring Strength and Long Life to Surface Treatment.	การศึกษาดังกล่าว นำน้ำยางธรรมชาติผสมกับ Asphalt binder ชนิด AC-5 ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียง Asphalt binder ชนิด AC 60/70 โดยตั้งชื่อจากการศึกษาครั้งนี้ว่า “Kraton Rubber” พบว่าเมื่อทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วส่วนผสมจะมี คุณสมบัติ ดังนี้ <ul style="list-style-type: none">● เพิ่มความสามารถในการดัดงอที่อุณหภูมิต่ำ● เพิ่มความต้านทานการไหลและการเสีयरูบที่ อุณหภูมิสูง● เพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง● เพิ่มค่าจุดอ่อนตัว● ลดความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลง● เพิ่มความยืดหยุ่น● ค่า Penetration ลดลง



ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
Neir et al. (1998)	Physical and Rheological Characteristics of Liquid Natural Rubber Modified Bitumen	การศึกษาดังกล่าวใช้ยางแผ่นรมควัน ละลายแผ่นยางลงใน Fluxing oil เพื่อให้อยู่ในรูปของเหลว (Liquid Natural Rubber: LNR) แล้วนำไปผสมกับ Asphalt binder ชนิด AC 80/100 และ Asphalt แบบเป่า (Air blown) เกรด 5 ในอัตราส่วน 5% 10% และ 30% พบว่าเมื่อผสม LNR ลงใน Asphalt ทั้งสองชนิด ค่าการยึดติดจะลดลงเมื่อปริมาณ LNR เพิ่มขึ้น ยกเว้น Asphalt ชนิด Air blown โดยค่าจุดอ่อนตัวและค่า Penetration เพิ่มขึ้นตามปริมาณ LNR นอกจากนี้การเพิ่ม LNR ลงไปใน Asphalt ทำให้ค่า Shear strength เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น และต้านทานการไหลได้ดี นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนของ LNR ที่เหมาะสมต้องไม่เกิน 20% เนื่องจากจะส่งผลต่อความหนืดของส่วนผสม
การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน		
Malithong S. and Thongpin C. (2010)	The modification of asphalt emulsion using pre-vulcanized natural rubber latex for highway application.	ได้ทำการประยุกต์ใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน (ยางน้ำ) ผสมกับน้ำยางพาราโดยผ่านกระบวนการ Pre-vulcanized สำหรับ Asphalt binder ที่ใช้ทำยางน้ำคือ AC 60/70 น้ำยางพาราที่ใช้เป็นชนิดแอมโมเนียสูง HA และยางแห้ง DRC ที่ 60% ทำการเตรียมตัวอย่างโดยใส่ส่วนผสมที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ทั้งหมดลงในเครื่องผสม กวนต่อเนื่องที่ 1,800 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมยางพาราทั้ง 2 ชนิด คือ ยางพาราธรรมชาติ (NR) และ Pre-vulcanized NR (PVNR) ปริมาณ 7.5 กรัม โดยผสมสารผสมเพิ่มตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังนี้ ZnO (50%), ZDEC (50%), ZMBT (50%) และ S (50%) หลังจากนั้น ทำการทดสอบหาคคุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันผสมน้ำยางธรรมชาติและสารผสมเพิ่ม ได้แก่ การหาค่า Penetration และ Softening point จากการทดสอบเปรียบเทียบพบว่า DRC 3% ในอัตราส่วนผสมที่ผสมด้วยสารผสมเพิ่มผ่านมาตรฐานตาม มอก. 2571-2547 ของกรมทางหลวง นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนผสมที่ DRC 5% มีคุณสมบัติที่ดี แต่พบ





ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
		ปัญหาในขั้นตอนกระบวนการผสม นอกจากนี้ยังพบว่า สารผสมเพิ่มช่วยปรับปรุงคุณสมบัติ Penetration และ Softening ของส่วนผสมให้ดียิ่งขึ้น
Shafii, J. and Shaffie E. (2013)	Physical properties of asphalt emulsion modified with natural rubber latex.	<p>ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของการประยุกต์ใช้น้ำยางพาราผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยใช้อัตราส่วนผสมของน้ำยางพาราตั้งแต่ 1 – 12% ในขั้นการผสม ใช้เวลาในการผสม 5 นาที ความเร็วรอบผสมอยู่ที่ 250 รอบต่อนาที</p> <p>การศึกษาพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none">• คุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์อิมัลชันที่ผสมกับน้ำยางพารามีค่า Softening และ Penetration เพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น• ค่าจุดอ่อนตัวสูงสุดอยู่ที่แอสฟัลต์อิมัลชันผสมด้วยน้ำยางพาราในอัตราส่วนผสม 7%• การผสมแอสฟัลต์อิมัลชันด้วยปริมาณน้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเหนียว (Ductility) ของส่วนผสมสูงขึ้น• การผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนผสมที่มากกว่า 7% จะทำให้จุดอ่อนตัวของส่วนผสมลดลง และทำให้ค่า Ductility เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น• ภาพรวมของการทดสอบ Ductility พบความแปรปรวนในช่วงการเพิ่มปริมาณเนื้อยางพาราตั้งแต่ 9% ขึ้นไป• ค่า Penetration ต่ำสุดที่ 84 เมื่อใช้น้ำยางพารา 7% งานวิจัยนี้สรุปว่า อัตราส่วนผสมของยางพาราที่เหมาะสมในการผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันอยู่ที่ 7%



ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น		
ธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ์ (2552)	การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น	ศึกษาการนำวัสดุผิวทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (RAP) โดยใช้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็นเป็น binder ซึ่งแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้เป็นชนิด CMS-2 และ CSS-1 การศึกษานี้ได้ทำการออกแบบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง ยางพารา: แอสฟัลต์อิมัลชัน ในอัตราส่วนผสมดังนี้ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 แล้วนำส่วนผสมมาทดสอบหาค่าความต้านทานการรับแรงอัด ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม และค่าโมดูลัสคืนตัว จากผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมที่ต้านทานแรงอัดได้ดีที่สุดของวัสดุผสมที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 และ CSS-1 คือ 50:50, 25:75 ตามลำดับ การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อมของวัสดุผสมรวมแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2 ที่อัตราส่วนผสม 100:0 และแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ที่อัตราส่วนผสม 75:25 ต้านทานแรงดึงทางอ้อมได้ดีที่สุด ค่าโมดูลัสคืนตัวจากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่แช่น้ำจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าตัวอย่างไม่แช่น้ำ การศึกษานี้พบว่า ที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน ส่วนผสมที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 มีกำลังของวัสดุสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2
Kamal, K. and Juraidah A. (2017)	Evaluation of Cold In-Place Recycling Mix using Polymer Modified Asphalt Emulsion.	ทำการศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรีไซเคิลแบบเย็นในที่ (CIPR) โดยใช้โพลีเมอร์ดัดแปลงแอสฟัลต์อิมัลชัน (PMAE) แอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำยางพารา (NRL) เป็นส่วนผสม และ RAP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนผสมดังนี้คือ 0%, 25%, 50% และ 75% ต่อวัสดุผสมรวมคัตเกรด จากผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างที่ใช้ RAP เป็นส่วนผสม 50% ให้ผลการทดสอบดีที่สุด โดยได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (ITS) และการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (UCS) พบว่ากำลังอัดต่ำสุดของ CIPR ที่ได้คือ 0.7 MPa



ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอุดซ่อมสำหรับงานทาง		
Lin, D. F., D. H. Chen, and H. L. Lou. (2002)	Effectiveness of Preventative Maintenance Treatments Using SPS-3 Data.	ศึกษาเปรียบเทียบการซ่อมผิวทาง ประเมินค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าพบว่า การใช้วัสดุอุดซ่อมให้ความคุ้มค่ากว่าการซ่อมแซมผิวทางแบบอื่น
Smith, Kelly L. et al (1991)	Innovative Materials Development and Testing.	ศึกษาเปรียบเทียบวัสดุอุดรอยแตกชนิดเทอร์อันและเทเย็นพบว่าวัสดุอุดรอยแตกชนิดเทอร์อันมีความทนทานโดยเฉลี่ย 4.3 ปี ในขณะที่วัสดุอุดรอยต่อชนิดเทเย็นมีอายุการใช้งานเฉลี่ยเพียง 1-2 ปี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวัสดุอุดรอยต่อชนิดเทอร์อันให้ความคุ้มค่ากว่าวัสดุอุดรอยต่อชนิดเทเย็น
Masson et al (2002)	Analysis of Bituminous Crack Sealants by Physico-Chemical Methods and Its Relationship to Field Performance	ศึกษาเปรียบเทียบสารปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุอุดซ่อมสำหรับงานทาง พบว่าการผสมสารผสมเพิ่มช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความทนทานให้กับวัสดุอุดซ่อม โดยสารปรับปรุงคุณสมบัติที่นิยมใช้ได้แก่สารที่ช่วยยืดอายุการใช้งาน สารลดความหนืด และสารเพิ่มความแข็งแรง เป็นต้น
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน		
มนตรี เดชาสกุลสม และกฤษฎา ยุธานนท์ (2546)	การประยุกต์ใช้หญ้าแฝกในการแก้ไขปัญหการชะล้างพังทลายของผิวหน้าเชิงลาด	การศึกษาพบว่า หญ้าแฝกสามารถใช้ป้องกันการกัดเซาะและป้องกันการพังทลายของลาดดินทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การใช้หญ้าแฝกจะประสบผลสำเร็จให้ผลดีมีอัตราการรอดตายสูง ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาที่ทำการปลูก ซึ่งต้องเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปลูก คือ ช่วงต้นฤดูฝน (พ.ค. - มิ.ย.) หรือสามารถปลูกได้ในช่วงเวลาตลอดฤดูฝน
กิตติคุณและสุเชษฐ์ (2561)	การตรวจวัดการกัดเซาะหน้าดินระยะสั้นจากคันดินทดสอบที่ปรับปรุงด้วยวัสดุซีเมนต์ใยสังเคราะห์และหญ้าแฝกภายใต้การกระทำของน้ำฝน	การศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะในภาคสนามบนตัวอย่างดินที่มีการเสริมกำลังเพื่อควบคุมการกัดเซาะโดยนักวิจัยในอดีต มีการนำวัสดุหลากหลายชนิดมาใช้ เช่น <ul style="list-style-type: none">• Lenka (2004) ได้นำเสนอผลการตรวจวัดการกัดเซาะบนลาดผาที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยสังเคราะห์ที่ทำจากไยมะพร้าว• Tanchaisawat et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการควบคุมการกัดเซาะด้วยผักตบชวาซึ่งเป็นเส้น





ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
		<p>ใยสังเคราะห์แบบชั่วคราวผสมผสานกับการปลูกหญ้าลูซี่</p> <ul style="list-style-type: none"> Alvarez-Mozos et al. (2014) ได้ศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะและการป้องกันการกัดเซาะของวัสดุในระยะยาว Donjandee et al. (2010) ที่ได้ทำการศึกษาการควบคุมการกัดเซาะภาคสนามของคันดินที่ปลูกในระยะห่างระหว่างการปลูกต่างกัน พร้อมทั้งเสนอสมการทำนายการกัดเซาะและเปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดจากภาคสนาม กิตติคุณและสุเชษฐ์ (2561) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหญ้าแฝก วัสดุซีเมนต์ใยสังเคราะห์ (GCMM) และวัสดุซีเมนต์ใยสังเคราะห์ร่วมกับหญ้าแฝก <p>การศึกษานี้ได้แนะนำให้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุป้องกันการกัดเซาะของลาดดินโดยเปรียบเทียบปริมาณดินที่ถูกกัดเซาะในแปลงทดลองที่มีการปรับปรุงกับปริมาณของดินที่ถูกกัดเซาะในแปลงทดลองที่ไม่มีการปรับปรุง</p>
<p>งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินผสมยางพารา</p>		
<p>พีรวัฒน์ (2018)</p>	<p>ประยุกต์ใช้น้ำยางพาราและดินซีเมนต์พัฒนาสระน้ำต้านภัยแล้ง (<i>Engineering Journal, Chiang Mai University</i>)</p>	<p>การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราชนิดแอมโมเนียสูง และน้ำยางพาราพีรวัลคาไนซ์ การศึกษาพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> ดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราพีรวัลคาไนซ์มีคุณสมบัติทางกล เช่นการรับแรงอัด แรงดึง แรงดัด และการดูดซึมน้ำดีกว่าดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราชนิดแอมโมเนียสูง โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสม คือ ปูนซีเมนต์:ดินลูกรัง:น้ำ เท่ากับ 2:5:1 และใช้น้ำยางพารา 7.5% ของน้ำหนักน้ำ คุณสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ผสมยางพารามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางพาราที่ใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น



ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/รายงาน/หนังสือ)	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานโครงการ
		<ul style="list-style-type: none"> • ดินซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางพาราในปริมาณที่มากกว่า 15% ของปริมาณน้ำ ควรใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผสมเพื่อให้เนื้อยางไม่จับตัวเป็นก้อน • ปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ผสมดินซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 5% - 15% ของปริมาณน้ำที่ใช้ผสม
เอกพิสิษฐ์ ปิติวัฒน์ และรัฐภูมิ (2016)	การศึกษาความต้านทานต่อการชะล้างด้วยฝนของวัสดุฉาบภายนอกด้วยดินผสมยางพาราสำหรับผนังบ้านดินภายใต้การจำลองสภาพอากาศแบบเร่ง (Academic Journal, Uttaradit Rajabhat University)	<p>ศึกษาความต้านทานต่อการชะล้างด้วยฝนของวัสดุฉาบภายนอกที่ทำมาจากดินผสมยางพารา ภายใต้การจำลองสภาพอากาศแบบเร่ง และเปรียบเทียบกับดินฉาบภายนอกสูตรดั้งเดิม โดยวัสดุฉาบมีส่วนผสมคือ ดินเหนียวผสม pre-vulcanized rubber 10% และ Sodium Silicate 3% พบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • วัสดุฉาบภายนอกด้วยดินผสมยางพารามีความต้านทานต่อการชะล้างด้วยฝนสูงกว่าดินฉาบภายนอกสูตรดั้งเดิมอยู่มาก • การจำลองการกัดกร่อนด้วยวัฏจักรเปียกสลับแห้ง เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น
Pinwiset, K., Raksuntorn, W. and Witchayangkoon, B. (2018)	An Investigation and Test of Natural Rubber Latex Soil Cement Road (International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Science & Technologies)	<p>ทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ของดินซีเมนต์ผสมยางพารา โดยใช้ดินจากอุบลราชธานี ผสมกับซีเมนต์ที่ 4% - 8% น้ำยางพาราเข้มข้น (DRC 60%) ที่ 0% - 10% และ Surfactant 2% จากการศึกษาพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • UCS ของวัสดุที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีความแปรปรวนสูง • พบค่า UCS ที่อายุ 7 วัน สูงสุดเมื่อใช้ cement 8%, ยางพารา 10% และ surfactant 2% (2.16 MPa) • ค่า UCS ที่อายุ 7 วัน เมื่อใช้ cement 8% อยู่ที่ 1.82 MPa



2.2 การออกแบบส่วนผสมผลิตภัณฑ์ยางพารา

2.2.1 การคัดเลือกวัสดุที่ใช้ในโครงการ

ที่ปรึกษา ได้ดำเนินการคัดเลือกวัสดุผสมรวมและยางพาราที่จะนำมาใช้ผสมรวมกับวัสดุงานทาง สำหรับงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง แบ่งตามประเภทของผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

2.2.1.1 งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น ประกอบด้วย

1. แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS – 2h

แอสฟัลต์อิมัลชัน มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.371-2530 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติของ Asphalt Emulsion CMS-2h ตามมาตรฐาน มอก.371-2530

แอสฟัลต์อิมัลชัน	หน่วย	วิธีการทดลอง	CMS-2h
ความหนืดเซย์โบลต์ฟูรอล ที่ 50°C	วินาที	ASTM D 7496	305
การแยกชั้นหลังจากเวลา 5 วัน (ไม่เกิน)	% โดย	ASTM D 6930	0.8
เสถียรภาพต่อการเก็บ ภายใน 24 ชั่วโมง (ไม่เกิน)	% โดย	ASTM D 6930	0.0
ปริมาณค้ำบนแรง 850 ไมครอน (20 เมช) (ไม่เกิน)	% โดย น้ำหนัก	ASTM D 6933	0.00
ประจุของอนุภาคแอสฟัลต์	-	ASTM D 7402	บวก
ความสามารถในการเคลือบหินและกันน้ำ (ไม่น้อยกว่า)	-	ASTM D 244	93
หินแห้ง	-		
หินเปียก	-		85

2. ยางพาราชนิดเข้มข้น (Concentrated Latex) เป็นยางพาราที่มีเนื้อยางตามธรรมชาติอยู่มาก (Dry Rubber Content - DRC ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณของเหลว) สำหรับยางพาราเข้มข้นที่ใช้ในโครงการเป็นชนิด High Ammonia (HA) content ซึ่งจะทำให้ยางพาราสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานกว่า 1 ปี มีคุณสมบัติตามตารางที่ 2-3

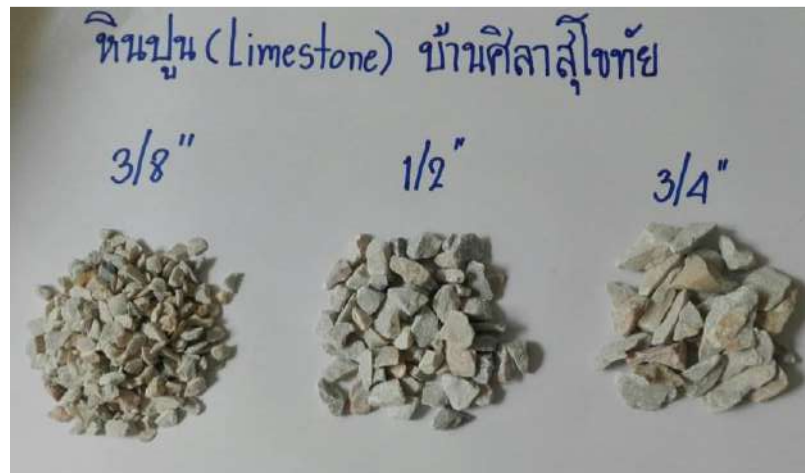


ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติของน้ำยางพาราเข้มข้นชนิด HA

Parameters	Unit	Spec	Tested results	Method
Total solids content (TSC)	% by mass	61.00 min	61.68	ISO 124:2014
Dry rubber content (DRC)	% by mass	60.00 min	60.10	W-CBI-QCU-04 Based on ISO 126:2005
pH value at 25.6°C	-	11 max	10.49	ISO 976:2013
KOH no.	% by mass	0.70 max	0.65	ISO 127:2012
Alkalinity (as ammonia on total weight)	% by mass	0.65-0.75	0.69	ISO 125:2011
*Non rubber content (NRC)	% by mass	1.70 max	1.58	W-CBI-QCU-20
*Alkalinity (as ammonia on water phase)	% by mass	-	1.80	W-CBI-QCU-07
*Volatile Fatty acid number (VFA no.)	-	0.05 max	0.0281	W-CBI-QCU-06 Based on ISO 506:1992
*Mechanical stability time (MST) at 55% TSC	Sec.	650 min	760 (14 ม.ค. 2562)	ISO 35:2004
*Specific gravity at 25°C (SG)	-	0.94 min	0.9452	W-CBI-QCU-48 Based on ISO 705:1994
*Magnesium content (Mg)	ppm	40 max	24	W-CBI-QCU-46 Based on ISO 11852:2011
*Viscosity at 60% TSC spindle no. 1 At 60 rpm	cps.	-	82.5	W-HO-QCU-08 Based on ISO 1652:2011
*Coagulum content, 80mesh	ppm	-	30	W-CBI-QCU-47 Based on ISO 706:2004



3. มวลรวมหินคลุก ที่มีคุณสมบัติและขนาดคละตาม ทล.-ม. 407 นำมาจากโรงโม่บ้านศิลา สุโขทัย (รูปที่ 2-1) เป็นหินปูนซึ่งมีคุณสมบัติและขนาดคละตามแสดงไว้ในตารางที่ 2-4 และ ตารางที่ 2-5 ตามลำดับ เมื่อนำหินคลุกคัดเกรดมาผสมที่อัตราส่วนผสม 20:40:25:15 (Bin 1: Bin 2: Bin 3: Bin 4) แล้ว จะมีขนาดคละตามตารางที่ 2-5 ผ่านขนาดมาตรฐานตาม ทล.-ม. 407



รูปที่ 2-1 หินปูนจากโรงโม่บ้านศิลา สุโขทัย

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของหินปูนที่นำมาใช้ในโครงการ

คุณสมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	ผลการทดสอบ
คุณสมบัติที่ต้องการตาม ทล.ม. 407		
Gradation (Sieve)	ทล.-ท. 204/2516 ทล.-ท. 205/2517	เกรด 1
วิธีหาความสึกหของ Coarse Aggregate (ไม่เกินร้อยละ 40)	ทล.-ท. 202/2515	23.4
วิธีการหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม (ไม่เกินร้อยละ 9)	ทล.-ท. 213/2531	Coarse Aggregate 0.2 Fine Aggregate 1.4



ตารางที่ 2-5 ขนาดคละของหินปูนที่นำมาใช้ในโครงการ

ขนาด ตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรง				
	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Combined (20:40:25:15)
1"				100	100
3/4"			100	99.3	99.9
1/2"		100	100	44.7	91.7
3/8"	100	100	78	6.7	80.5
#4	100	41.0	1.0	0.7	36.8
#8	100	2.5	0.0	0.7	21.1
#16	82.7	-	-	-	16.5
#30	64.3	-	-	-	12.9
#50	46.7	-	-	-	9.3
#100	35.5	-	-	-	7.1
#200	7.9	-	-	-	1.6

4. มวลรวม Recycled Asphalt Concrete (RAP) จากสายทางเดียวกัน ขุดลอกมาไม่เกิน 2 ปี (รูปที่ 2-2) และมีขนาดคละดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-6 ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 407



รูปที่ 2-2 วัสดุมวลรวม Recycled Asphalt Aggregate (RAP)



ตารางที่ 2-6 ขนาดคละของวัสดุรวมหินคลุกและ Recycled Asphalt Aggregate (RAP)

ขนาด ตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรง		
	มวลรวมหินคลุก (20:40:25:15)	มวลรวม RAP	เกรด 1 (ทล.-ม. 407)
1"	100	100	100
3/4"	99.9	98.8	90-100
3/8"	80.5	79.3	60-80
#4	36.8	39.4	35-65
#8	21.1	21.7	20-50
#50	9.3	3.3	3-20
#200	1.6	0.6	0-2

2.2.1.2 งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

- วัสดุอุดรอยต่อชนิดเทอร์รอน (Joint Sealant) มีคุณสมบัติตาม มอก. 479 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 คุณสมบัติของวัสดุอุดรอยต่อ ตามข้อกำหนด มอก. 479-2541

คุณสมบัติ (ASTM D6690)	ข้อกำหนด มอก. 479-2541
ความแข็งอ่อน @ 25°C, 0.1 mm.	90 max
อุณหภูมิเทของผลิตภัณฑ์ °C	ต่ำกว่าอุณหภูมิปลอดภัย ในการหลอม 11 °C min
อุณหภูมิปลอดภัยในการหลอม °C	-
การไหลตัว @ 60°C, 5 Hr, mm.	5 max
แรงยึดเกาะ	ผ่าน
จุดวาบไฟ °C	-
ความถ่วงจำเพาะ	-

ASTM D6690 – Standard Specification for Joint and Crack Sealants, Hot Applied, for Concrete and Asphalt Pavements

- ยางพาราชนิดเข้มข้น (รายละเอียดดูข้อ 2.2.1.1 (2))



2.2.1.3 งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

1. ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตาม มอก. 15 ประเภทที่ 1
2. ยางพาราชนิดเข้มข้น (รายละเอียดดูข้อ 2.2.1.1 (2))
3. ยางพาราสด (Natural Latex) โดยยางพาราที่นำมาใช้จะต้องมีอายุไม่เกิน 5-6 ชั่วโมง หลังการเก็บเกี่ยว (รูปที่ 2-3)



รูปที่ 2-3 ยางพาราสดระหว่างการเก็บเกี่ยว

4. สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชนิดไม่มีประจุ NP9 (Nonylphenol Ethoxylate 9 MOLES) ของเวซกิจ เคมีภัณฑ์ (รูปที่ 2-4) และมีคุณสมบัติต่างๆ ตามตารางที่ 2-8



รูปที่ 2-4 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ NP9



ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ NP9

Item	Unit	Specification	Result
Appearance		Pale yellow liquid	Pale yellow liquid
Actives	wt%	100	100
Cloud Point		54	54
pH		5 - 8	7.2
Colour	Pt-Co	Max 60	30
Viscosity at 25 °C	cP	243	243
Density at 25 °C	g/mL	1.055	1.055

5. วัสดุไหล่ทาง ตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 207 “มาตรฐานไหล่ทางวัสดุผสมรวม” โดยในโครงการนี้จะใช้หินปลายตะแกรงคัดเกรด จากโรงโม่บ้านศิลา สุโขทัย (รูปที่ 2-5) มีคุณสมบัติตามตารางที่ 2-9



รูปที่ 2-5 วัสดุไหล่ทาง (หินปลายตะแกรง) ที่ใช้ในโครงการ



ตารางที่ 2-9 คุณสมบัติของวัสดุไหล่ทางที่ใช้ในโครงการ

คุณสมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	ผลการทดสอบ
คุณสมบัติที่ต้องการตาม ทล.ม. 207		
วิธีหาความสึกหรือของ Coarse Aggregate (ไม่เกินร้อยละ 60)	ทล.-ท. 202/2515	23.4
วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง	ทล.-ท. 205/2517	เกรด B-C
วิธีการทดลองหาค่า Liquid Limit (L.L.) ของดิน (ไม่เกินร้อยละ 35)	ทล.-ท. 102/2515	24.6
วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index (ระหว่างร้อยละ 4 ถึงร้อยละ 15 สำหรับวัสดุมวลรวมขนาด A ที่เป็น Non-Plastic ยอมให้ใช้ได้)	ทล.-ท. 103/2515	PL = 20.22 PI = 4.38
วิธีการทดลองหาค่า CBR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ที่ความแน่นแห้งของการบดอัด ร้อยละ 95 ของความแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลองตามวิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน	ทล.-ท. 109/2517 ทล.-ท. 108/2517	33% (OMC = 8%)

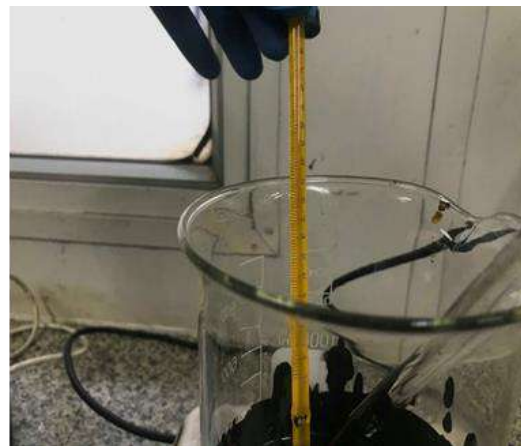
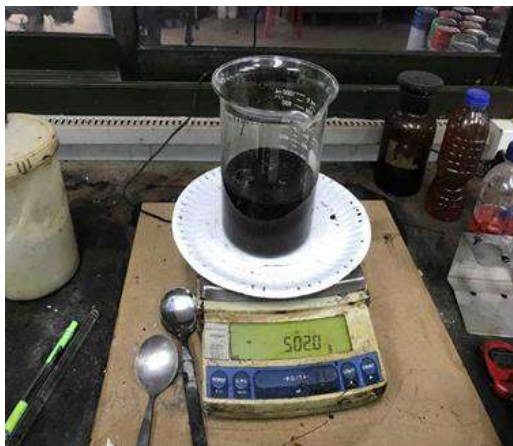
2.3 งานออกแบบสูตรส่วนผสมผลิตภัณฑ์ยางพารา

2.3.1 งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น

ส่วนผสม 3 สูตร ประกอบด้วย Asphalt Emulsion CMS – 2h ผสมยางพาราเข้มข้นร้อยละ 1, 3 และ 5

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุสำหรับงานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็นผสมกับน้ำยางพาราเข้มข้น

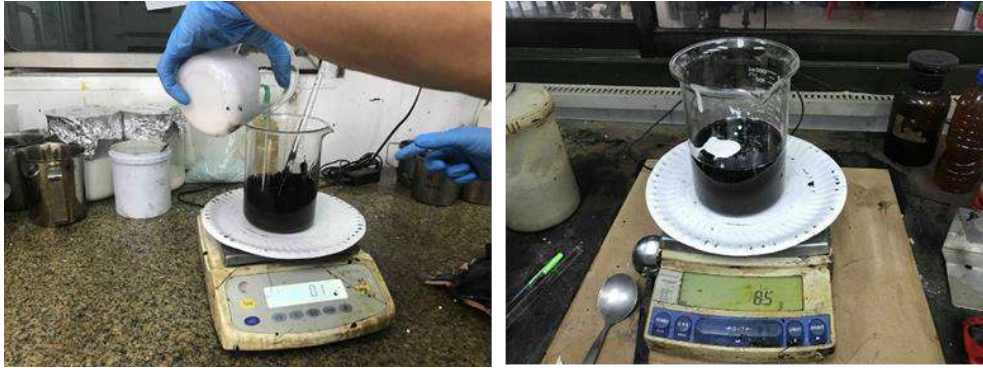
- เตรียมแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h ที่อุณหภูมิ 50 - 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2-6 การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2h



- ผสมน้ำยางพาราเข้มข้น (DRC ประมาณ 60%) โดยคำนวณให้ที่ปริมาณเนื้อยางลงผสมเท่ากับ 1%, 3% และ 5% กับสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชนิดไม่มีประจุ NP9 (Nonylphenol Ethoxylate 9 MOLES) จากนั้นนำไปผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันก่อนผสมในเครื่องผสม Colloid Mill Machine



รูปที่ 2-7 ขั้นตอนการผสมน้ำยางพาราเข้มข้นกับ Asphalt Emulsion

- ผสมส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชันและยางพาราด้วยเครื่อง Colloid Mill Machine ให้เสร็จสิ้นภายในเวลา 1 นาที และบรรจุใส่แกลลอนปิดฝาให้สนิท



รูปที่ 2-8 นำส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชันและยางพารา ลงป่นด้วยเครื่อง Colloid Mill Machine

หมายเหตุ: เนื่องจากที่ปรึกษาได้ทำการทดลองที่หลากหลายระหว่างการออกแบบส่วนผสม ข้อมูลต่อไปนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ในอนาคต



- จากการทดลองนำแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h ผสมกับน้ำยางพาราเข้มข้นปริมาณเนื้อยางแห้งที่ 1%, 3% และ 5% โดยไม่ใส่สารผสมเพิ่มพบว่า เนื้อยางพาราไม่สามารถรวมตัวกับแอสฟัลต์อิมัลชันได้ ซึ่งจากการกวนส่วนผสมด้วยแท่งแก้วคนสารและจากการผสมด้วยเครื่อง Colloid Mill Machine พบว่ามีการจับตัวเป็นก้อนของยางพารา ดังแสดงใน (รูปที่ 2-9)



รูปที่ 2-9 การจับตัวเป็นก้อนของยางพาราเมื่อผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h

- เมื่อพบปัญหาของการผสมน้ำยางพาราเข้มข้นกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h ที่ปรึกษาจึงได้ทดลองนำแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 (Slow Setting) มาทดลองผสมกับน้ำยางพาราเข้มข้น โดยไม่ใส่สารผสมเพิ่ม พบว่าแอสฟัลต์อิมัลชันกับน้ำยางพาราเข้มข้นสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและไม่จับตัวเป็นก้อนเมื่อผสมด้วย Colloid Mill Machine (รูปที่ 2-10)



รูปที่ 2-10 ผสม CSS-1 กับน้ำยางพาราเข้มข้น ด้วยเครื่อง Colloid Mill Machine

2.3.2 งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

ส่วนผสม 3 สูตร ประกอบด้วย วัสดุยารอยต่อชนิดเทอร์ออน ผสมยางพาราเข้มข้นที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุยารอยต่อชนิดเทอร์ออน (Joint Sealant) ผสมกับน้ำยางพาราเข้มข้น

- นำ Joint Sealant ผสมกับน้ำยางพาราเข้มข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia: HA) ที่ได้จากการปั่นให้มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% ตามมาตรฐาน มอก. 980-2533 (ตารางที่ 2-3)
- ให้ความร้อน Joint Sealant โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 150 - 170 °C
- ปริมาณวัสดุ Joint Sealant ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแต่ละครั้ง ควรอยู่ที่ระดับ 2 ใน 3 ส่วนของถังผสม เนื่องจากระหว่างการผสมจะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Joint Sealant และน้ำยางพาราเข้มข้นขึ้น
- ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง (High Shear Rate Mechanical Mixer) ที่อุณหภูมิ 140 °C ด้วยความเร็วรอบ 3,500 - 5,000 รอบต่อนาที เครื่องผสมจะมีลักษณะเป็นใบพัดคู่เพื่อใช้กวนและเฉือนอนุภาคของวัสดุผสม จากนั้นจะตีย้อนกลับขึ้นมาที่ผิวหน้าและหมุนวนกลับเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน (รูปที่ 2-11)



รูปที่ 2-11 การเตรียมตัวอย่าง Joint Sealant ด้วยเครื่อง High Shear

- ผสมน้ำยางพาราเข้มข้นที่ได้คำนวณปริมาณ โดยให้มีปริมาณเนื้อยาง (Dry Rubber Content, DRC) ที่ 1%, 3% และ 5% ลงในวัสดุ Joint Sealant เทลงผสมอย่างช้าๆ ปริมาณ 2 - 3 มิลลิลิตร ต่อนาที (รูปที่ 2-12)
- ทำการกวนส่วนผสมตลอดช่วงเวลากการผสมและรักษาระดับอุณหภูมิที่ใช้ผสมให้คงที่ เนื่องจากจะมีความร้อนเกิดขึ้นจากการปั่นของวัสดุผสมหากอุณหภูมิสูงเกินไประหว่างการกวนส่วนผสม



- ถ้าอุณหภูมิเกิดสูงขึ้นระหว่างการผสม ให้ทำการลดความเร็วรอบของใบพัด ข้อควรระวังในการเติมน้ำยางเข้มข้น คือ ในน้ำยางเข้มข้น (DRC 60%) จะมีปริมาณน้ำสูงถึง 40% และอุณหภูมิสำหรับการผสมจะมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงอาจทำให้เกิดฟองขึ้นระหว่างการผสม (วิธีสังเกต: ถ้าหยดน้ำยางพาราเร็วเกินไปส่วนผสม Joint Sealant กับยางพาราจะป็นขึ้นบนก้านใบพัด)



รูปที่ 2-12 การเทยางพาราลงผสมกับ Joint Sealant

- เมื่อผสมน้ำยางพาราเข้มข้นจนหมดแล้ว ทำการกวนส่วนผสมต่อไปอีกไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง โดยลดความเร็วใบพัดให้อยู่ระหว่าง 3,500 - 4,500 รอบต่อนาที เพื่อให้ส่วนผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างใส่ลงภาชนะปิด เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการต่อไป (รูปที่ 2-13)



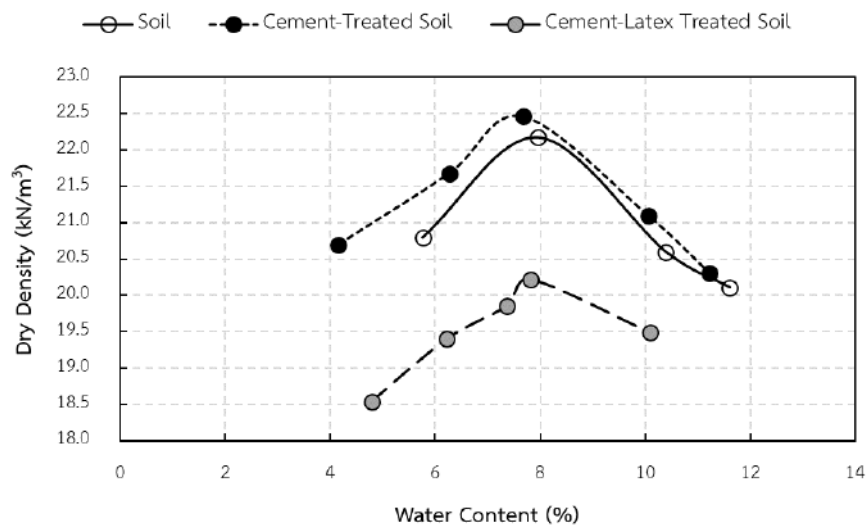
รูปที่ 2-13 ตัวอย่างที่ผสมเข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว



2.3.3 งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. วัสดุไหล่ทาง ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม. 207 ได้ถูกนำมาทดสอบตามมาตรฐาน ทล.-ท. 108 “วิธีการทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” เพื่อหาค่า Optimum Moisture Content (OMC) ที่เหมาะสมในการบดอัดวัสดุให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density: MDD) ผลการทดลองแสดงได้โดยรูปที่ 2-14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า OMC ของวัสดุไหล่ทางอยู่ที่ 8% และ MDD เท่ากับ 22.16 kN/m^3 (2.26 g/cm^3)



รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดของวัสดุทดสอบ

2. วัสดุดินซีเมนต์ (ดินไหล่ทางผสมซีเมนต์) ได้รับการออกแบบโดยอ้างอิงวิธีการหาปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจาก ทล.-ม. 206 “มาตรฐานรองพื้นทางซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)” เมื่อนำดินไหล่ทางมาผสมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่น้ำหนักเท่ากับ 2% 3% และ 4% ต่อน้ำหนักดินแห้ง กับน้ำที่น้ำหนัก 8% ของน้ำหนักดินกับซีเมนต์ บดอัดตัวอย่างเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ ทล.-ท. 108 ทำการบ่มไว้ 7 วัน และนำมาทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 105 “วิธีการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดิน”

รูปที่ 2-15 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการบ่มตัวอย่างที่บดอัดเสร็จแล้ว ตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 2-15 แสดงการเตรียมตัวอย่างและการบ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ก่อนการทดสอบ UCS

เมื่อตัวอย่างได้รับการบ่มครบ 7 วัน นำตัวอย่างลงแช่น้ำไว้ 2 ชั่วโมงแล้วจึงทดสอบ UCS ตามที่มาตรฐาน ทล.-ท. 105 กำหนด ตารางที่ 2-10 แสดงค่า UCS เฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง ของดินซีเมนต์ที่ได้รับการบ่มไว้ 7 วัน

ตารางที่ 2-10 ผลการทดสอบ UCS ที่อายุ 7 วันของดินซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ (%)	UCS เฉลี่ยที่อายุ 7 วัน (MPa)
0	0.14 (ทดสอบทันทีหลังจากบดอัด)
2	1.36
3	1.96
4	2.01

ซึ่งตารางที่ 2-10 แสดงให้เห็นว่าปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 2% ต่อน้ำหนักของดินแห้ง ซึ่งจะทำให้ค่า UCS ที่ 7 วันไม่ต่ำกว่า 0.689 MPa ตามที่ระบุไว้ใน ทล.-ม. 206

อย่างไรก็ดี ที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบ Compaction Test สูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Water Content และ Dry Density ของดินซีเมนต์ที่บดอัดดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-14 ซึ่งจะเห็นได้ว่า OMC และ MDD ของดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 7.7% และ 22.5 kN/m³ ตามลำดับ



3. วัสดุดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น (ดินไหล่ทางผสมซีเมนต์และน้ำยางพาราเข้มข้น) ออกแบบส่วนผสมโดยอ้างอิงปริมาณซีเมนต์จากส่วนผสมของดินซีเมนต์ (ซีเมนต์ 2% ต่อ น้ำหนักดินแห้ง) ส่วนน้ำยางพาราที่นำมาใช้เป็นยางพาราเข้มข้น (Concentrated Latex) เป็นชนิด High Ammonia (HA) ทำให้สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน มีอัตราส่วนเนื้อยาง (DRC) อยู่ที่ 60% ซึ่งต้องนำมาผสมกับน้ำและสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชนิดไม่มีประจุ

อัตราส่วนผสมของน้ำ สารลดแรงตึงผิวและยางพาราได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-11 หลังจากนำสารลดแรงตึงผิวผสมกับน้ำเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำยางพาราเข้มข้นผสมกับน้ำและ สารลดแรงตึงผิวให้เข้าก่อนที่จะนำไปผสมกับดิน (รูปที่ 2-16) โดยน้ำหนักของส่วนที่เป็น สารละลายทั้งหมดเท่ากับ 8% ของน้ำหนักดินซีเมนต์แห้งหรือที่ OMC

จากตารางที่ 2-11 จะเห็นได้ว่า ยางพาราเข้มข้น 122 กรัม ถูกใช้เตรียมตัวอย่างโดย ผสมกับดินซีเมนต์แห้ง 3,060 กรัม เมื่อยางพาราเข้มข้นมีเนื้อยาง (Dry Rubber Content: DRC) อยู่ 60% เนื้อยางที่ใช้ผสมทั้งหมดต่อตัวอย่าง 1 ก้อน จะเท่ากับ 73.2 กรัม (2.4% ของดินซีเมนต์)

ตารางที่ 2-11 อัตราส่วนของส่วนผสมต่างๆ ต่อตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมยางพารา 1 ก้อน

อัตราส่วน	ดินไหล่ทาง	ซีเมนต์	น้ำ	สารลดแรงตึงผิว	ยางพารา
น้ำหนัก (กรัม)	3,000	60	119	3 (5% ซีเมนต์)	122
ร้อยละ (%)	-	2 (นน. ดินแห้ง)	-	4 (นน. ดินซีเมนต์)	4 (นน. ดินซีเมนต์)

สำหรับตัวอย่างที่ขึ้นรูปแล้ว จะถูกนำไปบ่มไว้เป็นเวลา 7 วัน จึงนำมาทดสอบ UCS เช่นเดียวกันกับตัวอย่างดินซีเมนต์ ด้วยวิธีการและรายละเอียดการทดสอบที่กล่าวไปแล้วข้างต้น สำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมยางพารา ที่ปรึกษาได้ทำการทดสอบ Compaction Test สูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 108 เพิ่มเติม (รูปที่ 2-14) พบว่าค่า OMC และ MDD ของวัสดุดินซีเมนต์ผสมยางพาราอยู่ที่ 8% และ 20.2 kN/m³ ตามลำดับ



รูปที่ 2-16 แสดงภาพการผสมส่วนผสมและการทดสอบ UCS ของดินซีเมนต์ผสมยางพารา

ตารางที่ 2-12 แสดงผลการทดสอบ UCS ของดินซีเมนต์ผสมยางพาราที่อายุ 7 วันหลังการบดอัด โดยค่า UCS ที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง จากตารางที่ 2-12 แสดงให้เห็นว่าดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นมีค่า UCS ต่ำกว่า 0.689 MPa ตามที่ระบุไว้ใน ทล.-ม. 206 เล็กน้อย

ตารางที่ 2-12 ผลการทดสอบ UCS ที่อายุ 7 วันของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมยางพารา

วัสดุ	UCS เฉลี่ยที่อายุ 7 วัน (MPa)
ดินไหล่ทาง	0.14 (ทดสอบทันทีหลังจากบดอัด)
ดินผสมซีเมนต์ 2%	1.36
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด (ซีเมนต์ 2%)	0.58
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น (ซีเมนต์ 2%)	0.36

4. วัสดุดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด (ดินไหล่ทางผสมซีเมนต์และน้ำยางพาราสด) ออกแบบส่วนผสมโดยใช้วิธีการเดียวกันกับดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น ต่างกันเพียงใช้น้ำยางสดที่มีอายุไม่เกิน 4 – 5 ชม. ในการผสมตามอัตราส่วนในตารางที่ 2-11 เมื่อนำไปบ่มไว้ครบอายุ 7 วันและนำไปทดสอบ UCS ได้ผลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-12

จากตารางที่ 2-11 จะเห็นได้ว่า ยางพาราสด 122 กรัม ถูกใช้เตรียมตัวอย่างโดยผสมกับดินซีเมนต์แห้ง 3,060 กรัม เมื่อยางพาราเข้มข้นมีเนื้อยาง (Dry Rubber Content: DRC) อยู่ 30% เนื้อยางที่ใช้ผสมทั้งหมดต่อตัวอย่าง 1 ก้อน จะเท่ากับ 36.6 กรัม (1.2% ของน้ำหนักดินซีเมนต์)

2.4 งานทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ

2.4.1 งานวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น

2.4.1.1 การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

- ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวอย่าง (อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D6931 และ ทล.ม. 407)
 1. จัดเตรียมวัสดุมวลรวมให้ได้ขนาดคละ และให้ความร้อนกับวัสดุเชื่อมประสานตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม. 407
 2. นำวัสดุมวลรวมเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 ชั่วโมง
 3. ให้ความร้อนกับวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิ 55 - 70 องศาเซลเซียส สำหรับในโครงการนี้ ที่ปรึกษาได้ทำการผสมวัสดุเชื่อมประสานกับยางพาราเข้มข้น 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้
 - a. ผสมวัสดุเชื่อมประสานชนิด CMS-2h กับยางพาราร้อยละ 1 ร้อยละ 3 และ ร้อยละ 5 โดยใช้เครื่อง colloid mill ที่มีอยู่ในโรงงานผลิตยางมะตอยน้ำ (Asphalt Emulsion) ตามกระบวนการดังที่กล่าวไปแล้วในการออกแบบส่วนผสม และ
 - b. กรณีใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด CMS-2h ผสมยางพาราชนิดเข้มข้น ร้อยละ 1 ร้อยละ 3 และ ร้อยละ 5 ต้องทำการผสมวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS - 2h ให้เข้ากันก่อน หลังจากนั้นนำยางพาราชนิดเข้มข้น น้ำ และ สารลดแรงดึงผิวผสมที่หลังตามอัตราส่วนดังตารางที่ 2-13
 4. เมื่อเทวัสดุเชื่อมประสานในข้อที่ 3 บนวัสดุมวลรวมที่จัดเตรียมไว้แล้ว คลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันโดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 55 - 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 1 นาที นำไปบดอัดในแบบเตรียมก่อนตัวอย่างตามวิธีมาร์แชลล์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 การเตรียมวัสดุมวลรวม กับวัสดุเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน

ตารางที่ 2-13 อัตราส่วนผสมผลิตรหัสสำหรับงานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น

สูตรที่	เนื้อยางแห้ง ร้อยละ	น้ำหนักส่วนผสม (กรัม)			
		น้ำยางพาราเข้มข้น*	สารลดแรงตึงผิว (NP-9)	น้ำ	ยางน้ำ CMS-2h
1.	1	1.20	0.60	0.60	72
2.	3	3.60	1.80	1.80	72
3.	5	4.81	2.41	2.41	72

หมายเหตุ *คำนวณโดยสมมติให้น้ำหนักเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราเข้มข้น เท่ากับร้อยละ 60

- นำมวลรวมร้อนและวัสดุเชื่อมประสานที่ผสมเข้ากันดีแล้ว ใส่ลงในแบบแล้วใช้อุปกรณ์แซะรอบด้านในแบบประมาณ 10 ครั้ง และในตัวอย่างอีก 15 ครั้ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 ขั้นตอนการเทวัสดุส่วนผสมเข้าแบบ (mold)

- ทำการบดอัดตัวอย่างในแบบทั้ง 2 ด้าน โดยปล่อยน้ำหนักมาตรฐานด้านละ 75 ครั้ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-19 ขั้นตอนการนำแบบ Mold เข้าเครื่องบดอัด Marshall compaction



7. พักตัวอย่างไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส จึงดันตัวอย่างออกจากแบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-20 และตรวจสอบความหนาของก้อนตัวอย่าง นำตัวอย่างไป หาค่า Bulk Density ตามวิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์



รูปที่ 2-20 ก้อนตัวอย่างหลังจากเข้าเครื่องบดอัด Marshall compaction

- ขั้นตอนการเตรียมก้อนตัวอย่างการทดสอบ
 1. สำหรับการปรับอุณหภูมิตัวอย่างก่อนการทดสอบ สามารถทำได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้ (อ้างอิง ASTM D6931)
 - a. นำตัวอย่างใส่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส (Air Bath) ไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง
 - b. นำตัวอย่างบรรจุในถุงที่สามารถป้องกันน้ำได้ แล้วนำตัวอย่างที่บรรจุถุงกันน้ำ ลงปรับอุณหภูมิในอ่างปรับอุณหภูมิ (water bath) ที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 - c. นำตัวอย่างแช่ในอ่างปรับอุณหภูมิ (water bath) ที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แต่ไม่เกิน 120 นาที ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-21 แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม

การปรับอุณหภูมิตัวอย่างก่อนการทดสอบในโครงการนี้ ใช้วิธี b และ c ในการปรับอุณหภูมิตัวอย่าง



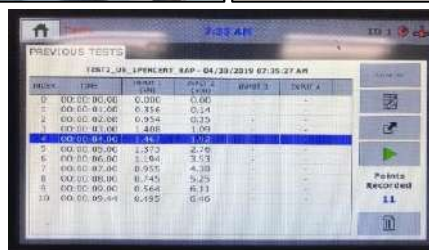
รูปที่ 2-21 ขั้นตอนการนำก้อนตัวอย่างแช่ในอ่างปรับอุณหภูมิ (water bath) ที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมมาตรฐาน ASTM D6931
 1. นำตัวอย่างวางบน Steel loading strip ที่อยู่ด้านล่าง แล้วปรับ Steel loading strip ที่อยู่ด้านบนลงมาสัมผัสกับผิวตัวอย่างอย่างตรวจสอบว่า Steel loading strip ต้องอยู่ตรงศูนย์กลาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 ขั้นตอนการนำก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

2. เดินเครื่องโดยให้น้ำหนักกดในแนวตั้งด้วยอัตราเร็ว 50 ± 5 มิลลิเมตรต่อนาทีอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าแรงกระทำสูงสุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-23

TIME	LOAD	DISP	LOAD
0	00.00	00.000	0.000
1	00.00	01.680	0.316
2	00.00	02.000	0.294
3	00.00	01.000	1.000
4	00.00	00.000	1.000
5	00.00	00.000	1.572
6	00.00	06.000	11.564
7	00.00	07.000	0.935
8	00.00	08.000	0.745
9	00.00	09.000	0.564
10	00.00	09.999	0.492

รูปที่ 2-23 ก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติหลังการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม และอ่านค่าแรงสูงสุด

3. นำค่าที่บันทึกได้มาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมจากสมการ

$$\text{Indirect Tensile Strength (IDT)} = \frac{2P}{\pi DT} \quad (1)$$

- ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุมวลรวมประเภทหินคลุก และ RAP ตารางที่ 2-14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุมวลรวมประเภทหินคลุก และ RAP ด้วยวิธีการปรับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ประเภทของก้อนตัวอย่าง	Indirect Tensile Strength (IDT) (kPa)			
	บรรจุถุงกันน้ำและปรับอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิ		ปรับอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิโดยตรง	
	หินคลุก*	RAP	หินคลุก	RAP
แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS – 2h	95.22	106.31	-	100.29
CMS-2h ผสมยางพาราชนิดเข้มข้นร้อยละ 1	76.72	123.34	-	120.67
CMS-2h ผสมยางพาราชนิดเข้มข้นร้อยละ 3	94.48	121.38	-	117.89
CMS-2h ผสมยางพาราชนิดเข้มข้นร้อยละ 5	89.41	83.86	-	77.68

หมายเหตุ *วัสดุมวลรวมประเภทหินคลุกไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากก้อนตัวอย่างหลุดร่อน และแตกออกจากกัน

2.4.1.2 การทดสอบ Tensile Strength Ratio

(อ้างอิงคู่มือแนะนำการทดสอบ AG/PT: T232 และ มาตรฐาน ASTM D6847)

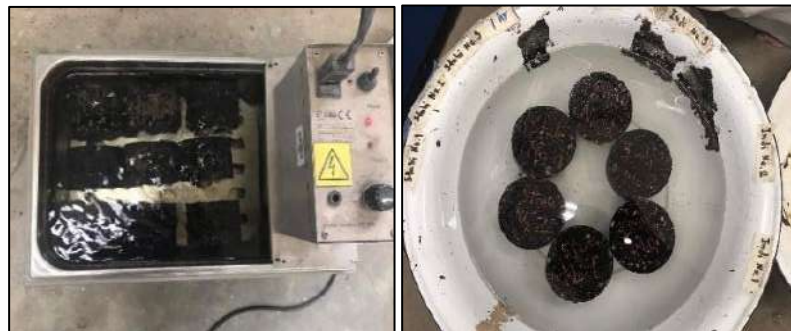
- ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวอย่าง จะมีวิธีการเหมือนดังที่กล่าวในการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม
- ขั้นตอนการเตรียมก้อนตัวอย่างการทดสอบ
 1. มีการแบ่งก้อนตัวอย่างเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละไม่น้อยกว่า 3 ก้อนตัวอย่าง โดยแต่ละกลุ่มจะต้องมีค่า Bulk Density เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน (ทดสอบตาม ทล.-ท.604 “วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall”) ซึ่งแตกต่างกันไม่เกิน 0.02 กรัมต่อมิลลิเมตรของค่าเฉลี่ย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-24



รูปที่ 2-24 จัดกลุ่มก้อนตัวอย่างก่อนการทดสอบ



2. นำตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (Soaked Sample) แช่ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที และนำออกมาคำนวณหาระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ซึ่งต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 55–80%
 - a. ในกรณีที่ระดับความอิ่มตัวของตัวอย่างไม่ถึง 55% ให้นำตัวอย่างบรรจุลงในหม้ออัดแรงดัน และใช้แรงดันอัดน้ำให้ซึมเข้าสู่ตัวอย่างเป็นเวลาไม่เกิน 5 นาที ที่แรงดัน 70 kPa หรือ 525 mm Hg.
 - b. กรณีที่ตัวอย่างมีระดับความอิ่มตัวเกิน 80% ให้ทำการลดระยะเวลาแช่ตัวอย่างลง
3. นำตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (soaked sample) ลงแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. หลังจากแช่ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (Soaked sample) ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส ครบ 24 ชั่วโมงแล้ว นำตัวอย่างทั้งสองกลุ่ม (Soaked and unsoaked samples) ลงแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-25 แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่าทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม



รูปที่ 2-25 ขั้นตอนการนำก้อนตัวอย่างแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

- วิธีการทดสอบ Tensile Strength Ratio (TSR)
 1. ค่า Tensile Strength Ratio (TSR) สามารถหาค่าได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมได้ดังสมการ
$$\text{Tensile Strength Ratio (TSR)} = \frac{\text{IDT of Soaked Sample}}{\text{IDT of Unsoaked Sample}} \times 100 \quad (2)$$
- ผลการทดสอบ Tensile Strength Ratio (TSR) ของวัสดุผสมรวมประเภทหินคลุก และ RAP

ตารางที่ 2-15 ผลการทดสอบ TSR ของวัสดุผสมรวมประเภทหินคลุก และ RAP

Mix	หินคลุก			RAP		
	Soak	Unsoak	TSR (%)	Soak	Unsoak	TSR (%)
แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS – 2h	-	-	-	103.76	107.62	96.42
CMS-2h ผสมยางพาราชนิด เข็มชั้นร้อยละ 1	-	-	-	116.51	122.40	95.19
CMS-2h ผสมยางพาราชนิด เข็มชั้นร้อยละ 3	-	-	-	-	120.28	-
CMS-2h ผสมยางพาราชนิด เข็มชั้นร้อยละ 5	-	-	-	-	84.64	-

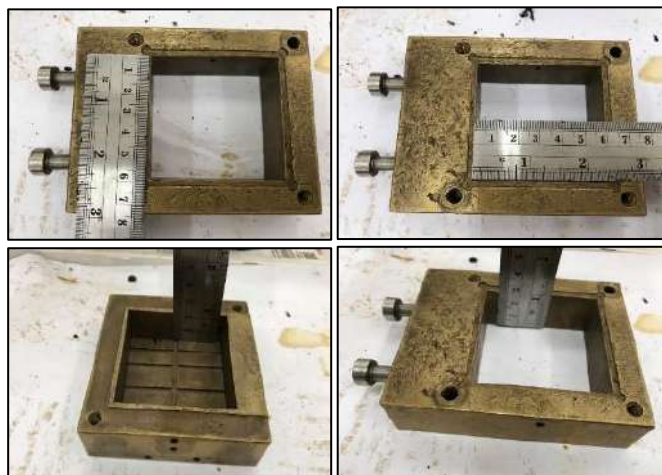
หมายเหตุ *วัสดุผสมรวมประเภทหินคลุกไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากก้อนตัวอย่างหลุดร่อน และแตกออกจากกัน

2.4.2 งานวัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

2.4.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3080 และ ทล.ม. 321)

- ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวอย่าง

- เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนพร้อมวัดขนาด Mold (ขนาด Mold ด้านล่าง 6 x 6 x 2 ลบ.ซม. และขนาด Mold ด้านบน 6 x 6 x 2.5 ลบ.ซม.) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-26



รูปที่ 2-26 อุปกรณ์สำหรับทดสอบ Direct Shear



- นำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมไว้โดยต้องมีขนาดพอดีกับ Mold สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (น้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ประมาณ 250 - 430 กรัม ต่อ 1 การทดสอบ) นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-27



รูปที่ 2-27 นำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเข้าเตาอบ

- นำวัสดุรอยต่อชนิดเทอร์ออนอุ่นให้ร้อน (140 – 150 องศาเซลเซียส) จนมีลักษณะกึ่งเหลว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-28



รูปที่ 2-28 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุรอยต่อชนิดเทอร์ออน

- นำแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมไว้ออกจากเตาอบใส่ใน Mold ด้านล่างพร้อมอัดให้แน่นด้วยแม่แรงขนาด 10 ตัน นำ Mold ด้านบนวางประกบปิดใส่نواتยัดด้านบนให้แน่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-29



รูปที่ 2-29 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

5. ติดตั้งวัสดุรอยต่อชนิดเทอร์อนให้มีความหนาประมาณ 2 - 3 มม. ระหว่างก้อนแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-30



รูปที่ 2-30 ขั้นตอนการติดตั้งวัสดุรอยต่อ

6. นำแอสฟัลต์คอนกรีตใส่ลงใน Mold ด้านบน อัดให้แน่นด้วยแม่แรงอีกครั้งทิ้งไว้ให้เย็นและนำไปทดสอบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-31



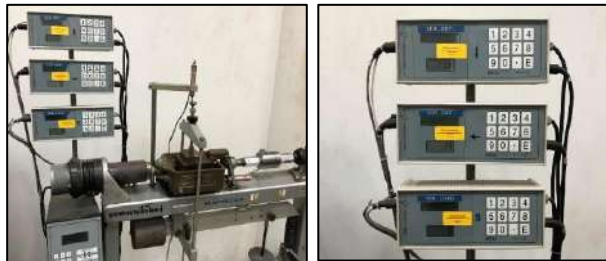
รูปที่ 2-31 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

- วิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน
 1. ติดตั้ง Vertical Load* กับ Shear Box ที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่ โดยใช้น้ำหนักถ่วงเท่ากับ 1 kg หรือเท่ากับ Vertical Normal Stress 0.03 ksc (2.7 kPa)
หมายเหตุ * การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนของวัสดุรอยต่อชนิดต่างๆ การติดตั้ง vertical load มีวัตถุประสงค์เพื่อประคองให้องค์ประกอบต่างๆ ของ shear box และตัวอย่างเคลื่อนที่ไปพร้อมกันระหว่างให้แรงเฉือนตรงกับตัวอย่างเท่านั้น
 2. จัดมาตรวัดระยะในแนวราบ และแนวดิ่ง (Horizontal & Vertical LVDT) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-32



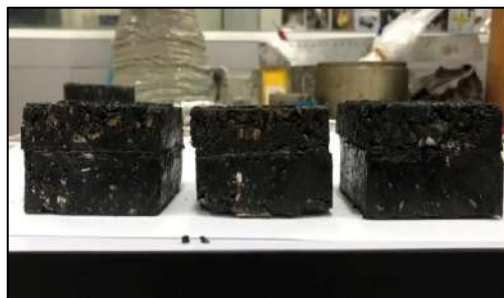
รูปที่ 2-32 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ Direct Shear

3. เริ่มทดสอบโดยให้แรงเฉือนตรงกับวัสดุอย่างต่อเนื่อง จนวัสดุค่อยๆ เกิดการวิบัติ (ทำการ Shear ตัวอย่างโดยให้อัตราการเฉือน 1 มิลลิเมตร/นาที) บันทึกค่าแรงเฉือนตรง การเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวราบ ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM D3080 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-33



รูปที่ 2-33 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนขั้นตอนจากมาตรฐาน
ASTM D3080

4. การทดสอบจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อแรงในแนวราบที่อ่านได้มีค่าลดลงหรือการเคลื่อนที่ในแนวราบมากกว่า 10% - 20% ของความกว้างของตัวอย่าง (ASTM D3080) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-34
5. ทำการเตรียมตัวอย่างใหม่โดยเปลี่ยนวัสดุอย่างต่อเนื่องชนิดเทอร์นผสมยางพารา ชนิดเข้มข้น ร้อยละ 1 ร้อยละ 3 และร้อยละ 5 ตามลำดับโดยมีวิธีการขึ้นรูปและวิธีทดสอบเหมือนกับตัวอย่างที่ใช้วัสดุอย่างต่อเนื่องชนิดเทอร์น



รูปที่ 2-34 การวิบัติด้วยแรงเฉือนของก้อนตัวอย่างหลังการทดสอบ



- ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ตารางที่ 2-16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

วัสดุเชื่อมประสาน	Sample 1		Sample 2		Sample 3	
	Horizontal def. at failure (cm)	Shear strength (kg/cm ²)	Horizontal def. at failure (cm)	Shear strength (kg/cm ²)	Horizontal def. at failure (cm)	Shear strength (kg/cm ²)
วัสดุอารอยต่อชนิดเทอร์รอน	0.106	1.78	0.065	1.13	0.108	1.47
วัสดุอารอยต่อชนิดเทอร์รอนผสมยางพาราชนิดเข้มข้น ร้อยละ 1	0.076	1.08	0.150	1.10	0.120	1.53
วัสดุอารอยต่อชนิดเทอร์รอนผสมยางพาราชนิดเข้มข้น ร้อยละ 3	0.093	1.30	0.119	0.74	0.254	0.51
วัสดุอารอยต่อชนิดเทอร์รอนผสมยางพาราชนิดเข้มข้น ร้อยละ 5	0.171	0.54	0.137	1.16	0.223	0.31

2.4.3 งานการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

2.4.3.1 การทดสอบ Unconsolidated Undrained (UU) Triaxial test

- การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างดินไหล่ทาง ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ผสมยางพารา จะถูกผสมขึ้นตามอัตราส่วนเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ Unconfined Compression Test (ตารางที่ 2-17)

ตารางที่ 2-17 น้ำหนักส่วนผสมของตัวอย่างเพื่อทดสอบ Triaxial test

ประเภทดิน	น้ำหนักส่วนผสม (กรัม)				
	ดินไหล่ทาง	ซีเมนต์	น้ำ	สารลดแรงตึงผิว	ยางพารา
ดินไหล่ทาง	480	-	38.4	-	-
ดินซีเมนต์	480	9.6	39.2	-	-
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	480	9.6	19.6	0.5	19.1
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	480	9.6	17.7	0.5	21.0

นำมาบดอัดลงใน Cylindrical Mould ที่จัดทำขึ้นเองเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และมีความสูงไม่น้อยกว่า 100 มม. (รูปที่ 2-35) โดยความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ของตัวอย่างที่ได้รับการบดอัด จะต้องไม่ค่าน้อยกว่า 95% ของความหนาแน่นแห้งที่ได้จากการทดสอบ Modified Proctor Test



รูปที่ 2-35 แสดงภาพ Mould ที่ใช้ในการบดอัดและตัวอย่างดินหลังการบดอัด

สำหรับตัวอย่างดินไหล่ทางบดอัดเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปทดสอบ UU Triaxial Test และ Permeability Test ทันทีหลังเสร็จสิ้นขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง แต่ตัวอย่างดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมยางพาราจะถูกห่อหุ้มด้วย Plastic Wrap และบรรจุลงกล่องปิดเพื่อบ่มตัวอย่างเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 7 วันก่อนที่จะทำการทดสอบ

- **ขั้นตอนการทดสอบ (Unconsolidated-Undrained Test)**

1. วางตัวอย่างดินลงบนฐาน Triaxial Cell ต้องมี Porous Stone อยู่ระหว่างตัวอย่างและฐานเพื่อความสะดวกในการระบายน้ำเข้าออก (รูปที่ 2-36) จากนั้นใส่ถุงยาง (Rubber membrane) ครอบตัวอย่างดิน โดยใช้ membrane stretcher แล้วรัดด้วย O-ring ให้ถุงยาง (Rubber membrane) ติดแน่นกับฐาน โดยของเหลวภายนอกนั้นจะต้องไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้



รูปที่ 2-36 ขั้นตอนการติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ UU Triaxial Test

2. วาง Top Porous Stone และ Top Cap ลงบนตัวอย่างตามลำดับ ดึงผ้ายางให้คลุมอยู่ภายนอก Top Cap แล้วจึงรัดด้วย O-ring ให้แน่น เอาครอบแก้วสวมลงบนตัวอย่างดิน ต้องระวังให้ Loading ram อยู่บนกึ่งกลางของ Top Cap พอดีแล้วขัน Screw ยึดกับฐานให้แน่น



3. เมื่อปล่อยน้ำเข้า Triaxial Cell จนเต็มแล้ว เพิ่ม Confining pressure ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 50 kPa และทำการกดตัวอย่างโดยกำหนดอัตราการเพิ่มแรงกดให้มีค่าเท่ากับ 1 mm/min.
4. ทำการบันทึกค่า Compressive Stress และ Vertical Deformation ระหว่างการทดสอบจนตัวอย่างวิบัติ (fail)
5. ทำซ้ำข้อที่ 1-4 กับตัวอย่างชุดเดียวกันเพิ่มอีก 2 ตัวอย่าง โดยเปลี่ยนค่า Confining Pressure เป็น 100 kPa และ 150 kPa ตามลำดับ



รูปที่ 2-37 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ UU Triaxial Test





โดยจากการทดลอง UU Triaxial Test ของตัวอย่างทั้ง 4 ชุด จะได้ผลการทดสอบ ดังนี้ ตารางที่ 2-18 ผลการทดสอบ UU Triaxial Test

Mixture	Sample No.	Curing Time (Days)	Dry Unit Weight (kN/cu.m.)	Moisture Content (%)		Degree of Saturation (%)
				Initial	Final	
ดินไหลทางบดอัด	1	-	22.27	9.45	10.1	21.46
	2	-	22.17	9.58	10.6	22.26
	3	-	22.07	9.64	10.5	22.34
ดินซีเมนต์	1	7	22.26	9.81	10.6	21.81
	2	8	21.97	8.77	10.7	22.50
	3	8	22.66	8.93	10.3	21.40
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	1	7	19.86	4.52	8.7	17.71
	2	8	20.22	6.36	8.6	17.53
	3	8	20.40	6.49	8.7	17.51
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	1	7	19.96	5.81	6.7	13.72
	2	7	19.85	6.10	7.0	14.22
	3	7	20.05	6.03	7.8	15.85



จากการทดสอบนั้นมีลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง ดังนี้

ตารางที่ 2-19 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง

ชนิดตัวอย่าง	ลักษณะการวิบัติ
ดินไหล่ทาง	
ดินซีเมนต์	
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	



2.4.3.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

- การเตรียมตัวอย่าง

โดยการเตรียมตัวอย่างเหมือนดังวิธีที่นำก้อนตัวอย่างในการทดสอบ Unconsolidated Undrained (UU) Triaxial test ที่กล่าวมาตั้งในข้อ 2.4.3.1

- ขั้นตอนการทดสอบ (Permeability Test)

1. ปลอ่ยน้ำเข้าสู่ Triaxial Cell ให้เต็มและล้นออกทาง Bleeding Value ด้านบน Triaxial Cell แล้วจึงทำการเพิ่มความดันของ Confining Pressure ให้มีค่าเท่ากับ 65 kPa เพื่อช่วยประคองตัวอย่างดินระหว่างการทดสอบ เนื่องจากระหว่างทดสอบหาค่า Permeability จะมีการเพิ่มแรงดันในตัวอย่างผ่านทาง Back Pressure Valve
2. เพิ่มแรงดันภายในตัวอย่างผ่านทาง Back Pressure valve (ด้านบนตัวอย่าง) โดยให้แรงดันเท่ากับ 60 kPa (ไม่มากเกินไปกว่า Confining Pressure) เพื่อให้น้ำไหลเข้าสู่ตัวอย่างและทำให้ตัวอย่างชุ่มน้ำมากที่สุด โดยระหว่างขั้นตอนนี้ Pore Pressure valve จะเปิดอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้สามารถไหลออกที่ฐานของตัวอย่างได้
3. เมื่อสังเกตเห็นน้ำไหลออกจาก Pore Pressure Valve มีอัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอ ให้ทำการจับเวลาและวัดปริมาตรน้ำที่ไหลจากตัวอย่าง เพื่อนำไปคำนวณหาค่า Permeability จากสมการดังต่อไปนี้

Hydraulic Conductivity :

$$K_T = \frac{Q \times L}{A \times h \times t}$$

โดย

- k = ค่าความซึมผ่านของตัวอย่างดิน (cm/s, m/s, ft/day, m/yr, etc.)
- Q = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านมวลตัวอย่างดินในช่วงเวลา t (cm³, m³, ft³)
- h = ความต่างของระดับน้ำ (Head Difference) ในช่วงความยาวการซึม L
- L = ความยาวของตัวอย่างดิน
- A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินที่น้ำไหลซึมผ่าน
- t = ระยะเวลาที่น้ำไหลลงกระบอกตวงครบตามปริมาณที่กำหนด



รูปที่ 2-38 การทดสอบ Permeability Test

โดยจากการทดสอบนั้นจะได้ผลการทดสอบ Permeability Test ดังนี้
ตารางที่ 2-20 ผลการทดสอบ Permeability Test

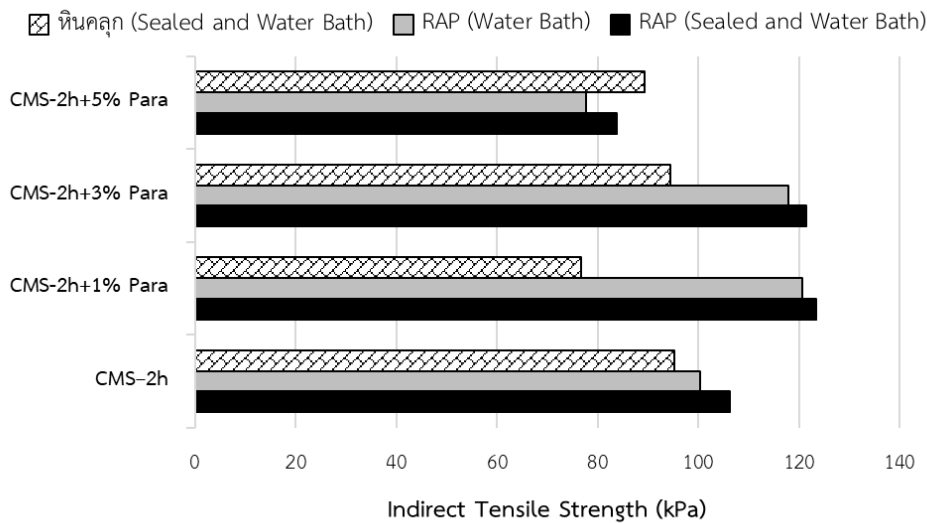
ชนิดตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Permeability)	
	K_T (cm/s)	$K_{20^\circ C}$ (cm/s)
ดินไหล่ทาง	-	-
ดินซีเมนต์	-	-
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	6.13×10^{-7}	5.44×10^{-7}
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	2.27×10^{-5}	2.00×10^{-5}

หมายเหตุ : ไม่สามารถทำการทดสอบดินไหล่ทางและดินซีเมนต์ เนื่องจากความพรุนในตัวอย่างดังกล่าวมีน้อยจึงทำให้การอัดน้ำด้วยแรงดันผ่านตัวอย่างไม่สามารถทำได้ ผู้ทดสอบได้ทำการอัดแรงดันน้ำผ่านตัวอย่างทิ้งไว้เป็นระยะเวลามากกว่า 48 ชั่วโมง ก็ไม่พบน้ำไหลออกทาง Pore Pressure valve แต่อย่างใด

2.4.4 การคัดเลือกวัสดุสำหรับงานจำลองสภาพการใช้งาน

วัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น

รูปที่ 2-39 แสดงผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength (IDT) หรือกำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุปะซ่อมแบบผสมเย็นที่ได้จากวัสดุเชื่อมประสาน 4 ชนิด มวลรวม 2 ชนิด (หินคลุก และ RAP) ปรับอุณหภูมิก่อนทดสอบด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ (1) การแช่ลงในอ่างปรับอุณหภูมิโดยตรง (Water Bath) และ (2) นำตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกกันน้ำก่อนแล้วจึงแช่อ่างปรับอุณหภูมิ (Sealed and Water Bath) จึงมีชุดตัวอย่างทดสอบรวมทั้งหมด 4 วัสดุ \times 2 มวลรวม \times 2 วิธีการปรับอุณหภูมิ = 16 ชุดการทดสอบ เมื่อแต่ละชุดการทดสอบมีการทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง ดังนั้น ทำให้การทดสอบ IDT ต้องจัดเตรียมตัวอย่างทั้งหมดอย่างน้อย 16 ชุด \times 3 ตัวอย่าง = 48 ตัวอย่าง ตัวอย่างทั้งหมดเตรียมโดยการเพิ่มส่วนผสมยางพาราหลังจากคลุกเคล้ามวลรวมกับ CMS-2h แล้วสำหรับสาเหตุที่เลือกใช้วิธีการผสมแบบดังกล่าวจะอธิบายและสรุปไว้ในภายหลัง



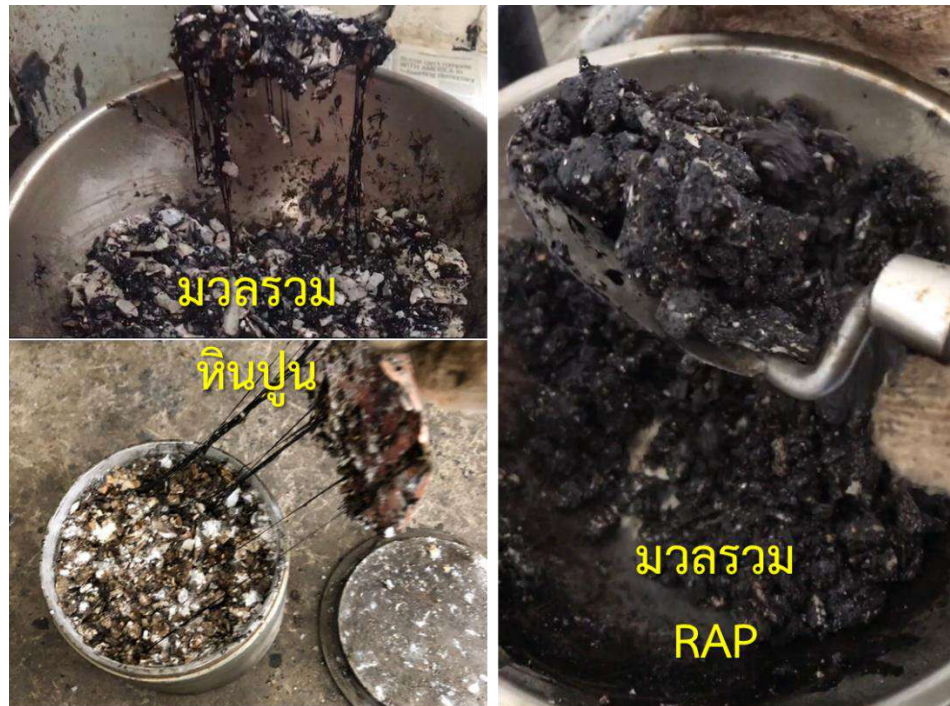
รูปที่ 2-39 ค่า IDT เฉลี่ยของก้อนตัวอย่างที่เตรียมด้วยวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 2-39 แสดงให้เห็นว่า

- เมื่อใช้หินมวลรวมเป็น Recycled Asphalt Pavement (RAP) กำลังรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุปะซ่อมที่ขึ้นรูปด้วย CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 จะให้ค่าสูงสุด รองลงมาคือ CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 3 โดยตัวอย่างที่ปรับอุณหภูมิก่อนการทดสอบด้วยวิธี Sealed and Water Bath จะให้กำลังสูงกว่าตัวอย่างที่ปรับอุณหภูมิด้วยวิธี Water Bath
- เมื่อใช้มวลรวมเป็นหินคลุกจากบ้านศิลาซึ่งเป็นหินปูน (Lime Stone) พบว่าไม่สามารถนำตัวอย่างไปปรับอุณหภูมิก่อนการทดสอบด้วยวิธี Water Bath ได้ เนื่องจากตัวอย่างหลุดร่อนและแยกตัวออกจากกันหลังจากแช่ลงในอ่างปรับอุณหภูมิได้ไม่นาน อย่างไรก็ตาม เมื่อปรับอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างด้วยวิธี Seal and Water Bath พบว่าก้อนตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วย CMS-2h จะให้กำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงสุด ตามด้วยก้อนตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วย CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 3 และยางพาราร้อยละ 5 ตามลำดับ
- เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ IDT ร่วมกับผลการทดสอบ Tensile Strength Ratio (TSR) พบว่าผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่น่าจะนำมาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งาน กับวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.ม. 407 (CMS-2h) คือ RAP ขึ้นรูปด้วย CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้
 - ให้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงสุด
 - เป็นตัวอย่างเพียงชุดเดียว นอกเหนือจากตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วย CMS-2h ที่สามารถทดสอบ IDT หลังแช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำมาหาค่า TSR ได้



จากที่กล่าวไว้เบื้องต้น เมื่อขึ้นรูปก้อนตัวอย่างด้วยหินปูนและ CMS-2h ผสมยางพาราแล้ว ไม่สามารถผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ หรือในกรณีที่ตัวอย่างสามารถขึ้นรูปได้ แต่เมื่อนำไปแช่น้ำแล้วเกิดการล่อนหลุดออกจากกัน (รูปที่ 2-40) เป็นสาเหตุให้ที่ปรึกษาเปลี่ยนแนวทางการผสมวัสดุปะซ่อมแบบมวลรวมผสมเย็น โดยไม่นำยาง CMS-2h ผสมยางพาราที่ผสมด้วย Colloid Mill มาใช้ แต่ใช้น้ำผสมกับหินมวลรวมเสียก่อน แล้วจึงผสมยางพาราตามอัตราส่วนที่ต้องการศึกษาลงไปคลุกเคล้าในภายหลัง



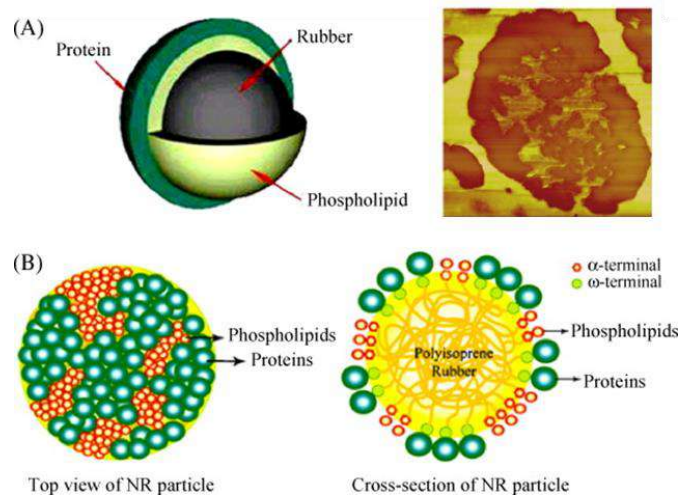
รูปที่ 2-40 ยางมะตอยน้ำผสมยางพาราจับตัวเป็นเส้นใยเมื่อผสมกับหินปูน

เพื่อศึกษาหาสาเหตุ ที่ปรึกษาได้ทดสอบประสิทธิภาพในการเคลือบหินและกันน้ำ (Coating ability and water resistance) ของวัสดุเชื่อมประสานตามมาตรฐาน ASTM D244 “Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts” กับหินปูน ดังแสดงในรูปที่ 2-41 ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติในการเคลือบหินของวัสดุเชื่อมประสาน CMS-2h ผสมยางพารา (รูปที่ 2-41 ฝั่งขวา) หลังจากให้นำไปล้างน้ำแล้วดีกว่า CMS-2h (รูปที่ 2-41 ฝั่งซ้าย) โดยมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ก. 404/2531 ระบุให้ร้อยละของพื้นที่ที่เคลือบ ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80



รูปที่ 2-41 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเคลือบหินและกันน้ำของ CMS-2h และ CMS-2h ผสมยางพารา

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า น้ำยางพาราที่ได้จากธรรมชาติจะมีประจุรอบพื้นผิวอนุภาคเป็นลบ (Anionic) จากโปรตีนที่ห่อหุ้มกลุ่ม polymer เนื้อยางอยู่ (Liyanage, 1999; Rubber Digest, 2019) ซึ่งจะทำให้อนุภาคของยางไม่จับตัวกันหลังจากการเก็บเกี่ยวเนื่องจากแรงผลักรอกจากกัน (Repel) แต่หลังจากเก็บเกี่ยวไม่นาน โปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ภายนอก จะถูกแบคทีเรียที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติย่อยสลาย และทำให้อนุภาคยางรวมตัวกัน ส่งผลให้ยางพาราสูญเสียสภาพอย่างรวดเร็วหลังจากนั้น (4 – 6 ชั่วโมง) รูปที่ 2-42 แสดงรูปโครงสร้างของอนุภาคยางพารา ซึ่งมีสายโพลีเมอร์ชนิด polyisoprene รวมตัวกันอยู่ตรงกลาง ที่พื้นผิวของอนุภาคจะมีโปรตีนและฟอสโฟไลปิดห่อหุ้มอยู่ โดยอนุภาคของยางพาราธรรมชาติ จะแขวนลอย (colloid) อยู่ในน้ำยางพารา (Nawamawat, K. et al., 2011; Liyanage, N.M.V, 1999)



รูปที่ 2-42 อนุภาคของยางพาราที่แขวนลอยอยู่ในน้ำยางพาราธรรมชาติ (Nawamawat, K. et al., 2011)

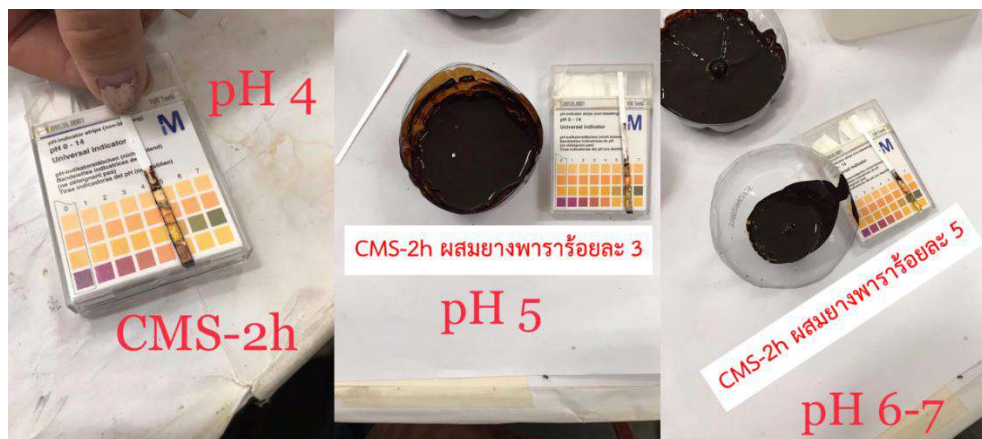


สารลดแรงตึงผิว หรือ Surfactant ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นประเภทไม่มีประจุ (Non-ionic) และมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นกลาง (รูปที่ 2-43) หลังจากเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำยางพารา อนุภาคยางพาราจะคูดเอาโมเลกุลของน้ำเข้าไปล้อมรอบอนุภาค ส่งผลให้แรงตึงผิวของน้ำยางพาราลดลง เมื่อนำไปผสมกับยางมะตอยน้ำ จะช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคยางและจับตัวกับอนุภาคแอสฟัลต์ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2-43 การทดสอบ pH ของสารลดแรงตึงผิว ยางพาราเข้มข้น และยางพาราเข้มข้นผสมสารลดแรงตึงผิว

การเพิ่มแอมโมเนีย เพื่อรักษาสภาพยางพาราหลังจากที่แปรรูปเป็นยางพาราเข้มข้น (Concentrated Latex) ส่งผลให้ยางพาราเข้มข้นมีสภาพเป็นด่าง (รูปที่ 2-43) นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันไม่ให้แบคทีเรียเข้าไปทำให้ยางพาราเสียสภาพเร็วอีกด้วย การผสมยางพาราเข้มข้น สารลดแรงตึงผิว และยางมะตอยน้ำ CMS-2h เข้าด้วยกัน ทำให้ pH ของส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนยางพาราเข้มข้นที่เติมลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2-44



รูปที่ 2-44 การทดสอบสภาพความเป็นกรดต่างของ CMS-2h และ CMS-2h ผสมยางพารา

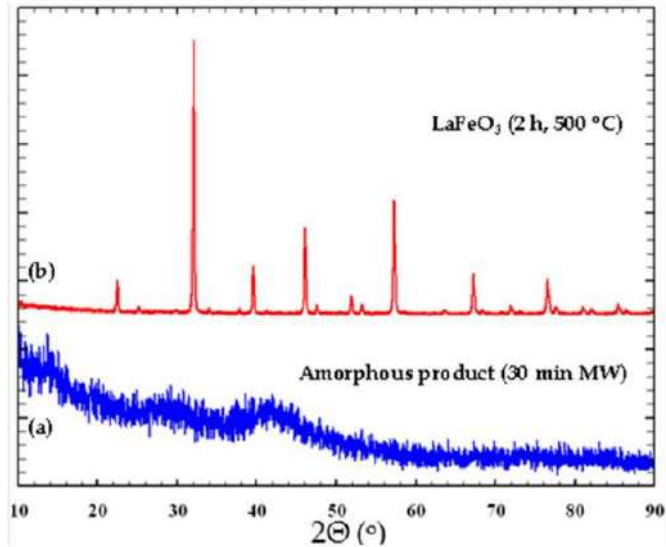


จากรูปที่ 2-44 จะเห็นได้ว่าส่วนผสมระหว่างยางมะตอยน้ำและยางพาราเกิดสูญเสียสภาพความเป็นกรด เมื่อเติมยางพาราเข้มข้นที่มีสภาพความเป็นด่างลงไป จากการรายงานของ King et al. (2012) ชี้ให้เห็นว่า ยางมะตอยน้ำประเภทแคทไอออนิก (Cationic Asphalt Emulsion) เช่น CMS-2h จะมีประสิทธิภาพที่ด้อยลงเมื่อ pH ของยางมะตอยน้ำเพิ่มขึ้น (สูญเสียประจุเมื่อมีสภาพเป็นกลาง) โดยทั่วไปแล้วยางมะตอยน้ำประเภทนี้จะถูกผลิตให้มี pH เท่ากับ 4 และต้องจัดเก็บ รวมถึงใช้งานที่ค่า pH เท่ากันด้วย (King et al., 2012) ดังนั้นค่า pH ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการผสมยางพารา จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพของยางมะตอยน้ำลดลง เมื่อนำไปใช้งาน

อย่างไรก็ตาม การนำยางพารามาผลิตยางมะตอยน้ำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นยังมีความเป็นไปได้ ซึ่งจากการศึกษาของ Federal Highway Administration (FHWA) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดย King et al. (2012) แสดงให้เห็นว่า การผสมยางพาราธรรมชาติหรือ polymer ชนิดอื่นๆ กับแอสฟัลต์ในช่วงการแปรสภาพส่วนผสมให้เป็นอิมัลชัน (Co-milling หรือ Pre-batching) จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ Polymer Modified Asphalt Emulsion มีประสิทธิภาพดีที่สุด การเติมยางพาราธรรมชาติหรือ polymer ชนิดอื่นๆ ในยางมะตอยน้ำในภายหลังหรือที่เรียกว่า Post-modification อาจไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นเลยก็ได้

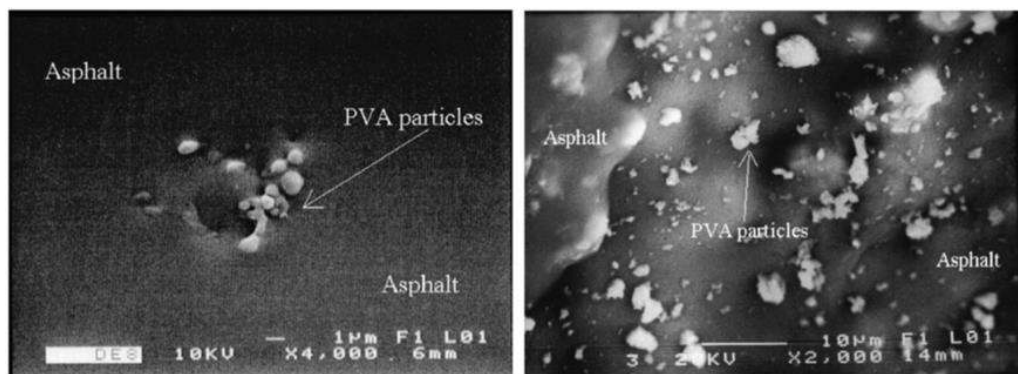
ตัวอย่างการปรับปรุงคุณภาพของยางมะตอยน้ำชนิด Cationic ภายหลังจากการผลิตหรือ Post-modification เช่น การศึกษาของ Chavez-Valencia, et al. (2007) ซึ่งใช้ synthetic polymer ประเภท Polyvinyl Acetate (PVA) มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่ม Compressive Strength ของแอสฟัลต์คอนกรีตหลังจากการปรับปรุงคุณภาพของยางมะตอยน้ำ ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่ายางมะตอยน้ำที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย PVA ไม่ได้ทำให้ Compressive Strength ของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ Compressive Strength ของ Asphalt Emulsion ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

อย่างไรก็ดี ยังมีประเด็นน่าสนใจอื่นๆ ที่ได้รับการทบทวนงานการวิจัยในอดีต เช่น อนุภาค polymer ยางพารามีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลแบบ ออสัญฐาน (Amorphous) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของยางพาราและผลิตภัณฑ์ยางพารา ไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีทั่วไป เช่น X-Ray Diffractometer (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 2-45 เป็นการเปรียบเทียบผล XRD ของวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบผลึก (Crystal) และอสัญฐาน (Amorphous) รูปที่ 2-45 แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวแบบอสัญฐาน (รูปที่ 2-45b) จะไม่สามารถแยกองค์ประกอบทางเคมีได้ชัดเจน เหมือนกับวัสดุที่มีโครงสร้างผลึก (รูปที่ 2-45a)



รูปที่ 2-45 แสดงผลการทดสอบ XRD ของวัสดุที่มีโครงสร้างจัดเรียงตัวแบบ (a) แบบอสัณฐาน (Amorphous) และ (b) ผลึก (Crystal) (Prado-Gonjal et al., 2015)

จากที่กล่าวไปเบื้องต้น ว่ายางพารามีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบอสัณฐาน นอกจากไม่สามารถวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction แล้วเมื่อถ่ายภาพ Scanning Electron Microscope (SEM) ของ Cement และ Concrete จะเห็นรูปแบบการเกิดผลึก ส่วนยางพาราและผลิตภัณฑ์ยางพาราจะไม่เห็นรูปแบบการเกิดผลึก อย่างไรก็ตาม ที่ปรึกษาได้รวบรวมตัวอย่างภาพถ่าย SEM และ Fluorescent Image ของ Polymer Modified Asphalt Emulsion และ Polymer Modified Asphalt ไว้ดังแสดงในรูปที่ 2-46 ถึงรูปที่ 2-48



รูปที่ 2-46 ภาพถ่าย SEM ของ Polymer Modified Asphalt Emulsion ที่มีอนุภาคของ Polyvinyl Acetate เกาะติดกับยางมะตอยน้ำ โดย Polymer ที่ใช้อยู่ในรูปแบบของแข็ง (Solid) จึงเห็นการเกาะติดของอนุภาค Polymer บนพื้นผิวแอสฟัลต์ (Chavez-Valencia, et al. 2007)

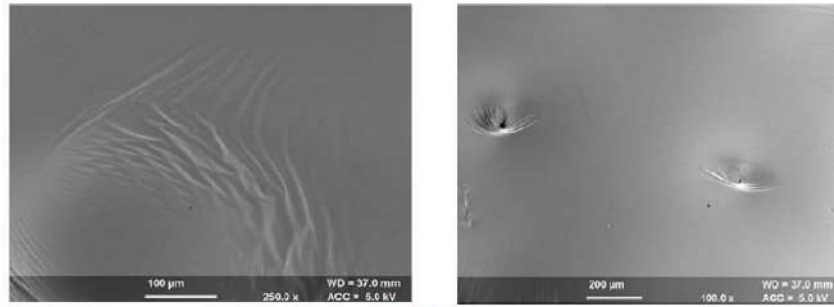


Fig. 5 Neat Bitumen VG-10

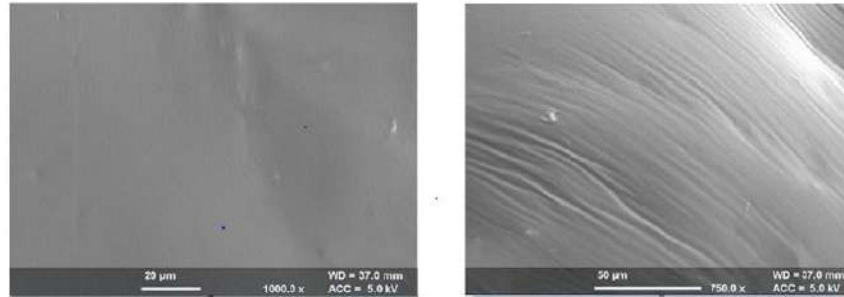
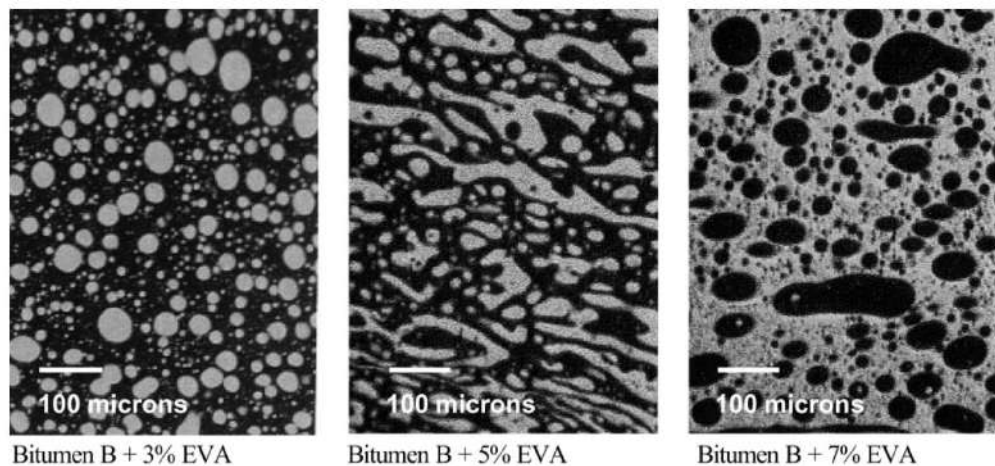


Fig. 6 Neat Bitumen VG-10+ SBS

รูปที่ 2-47 ภาพถ่าย SEM ของ Asphalt ก่อน (บน) และหลัง (ล่าง) จากการปรับปรุงคุณภาพ (modify) ด้วย polymer ประเภท Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) หรือ Synthetic Rubber ซึ่งภาพถ่ายแบบ SEM แสดงให้เห็นถึงการกลายเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมเท่านั้น (Surti and Mishra, 2017)



รูปที่ 2-48 ภาพถ่าย Fluorescent ของ Polymer Modified Asphalt ที่ใช้ Polymer ประเภท Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) ณ อัตราส่วนผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วน polymer ส่งผลให้ส่วนผสมเปลี่ยนจากการแขวนลอยของ polymer ในแอสฟัลต์ เป็นการแขวนลอยของแอสฟัลต์ในโพลีเมอร์ (Zhu et al. 2014)



วัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

วัสดุอุดรอยต่อชนิดเทร็อน (Joint Sealant) ตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 และ Joint Sealant ผสมยางพารา ร้อยละ 1 ร้อยละ 3 และร้อยละ 5 ได้ถูกนำมาติดตั้งเชื่อมประสานระหว่างก้อนแอสฟัลต์ คอนกรีต 2 ก้อนและนำไปทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) โดยประยุกต์จาก มาตรฐาน ASTM D3080 โดย Joint Sealant แต่ละประเภท จะถูกทดสอบซ้ำเป็นจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม ดังนั้นตัวอย่างที่ใช้ทั้งหมดจึงมีจำนวนอย่างน้อย 4 ส่วนผสม \times 3 ตัวอย่าง = 12 ตัวอย่าง ซึ่งระหว่างการทดสอบ Direct Shear Test ค่าน้ำหนักกดทับในแนวตั้ง (Vertical Load) อัตราการเฉือนวัสดุ (Shearing Rate) และอุณหภูมิการทดสอบได้ถูกควบคุมให้มีค่าคงที่

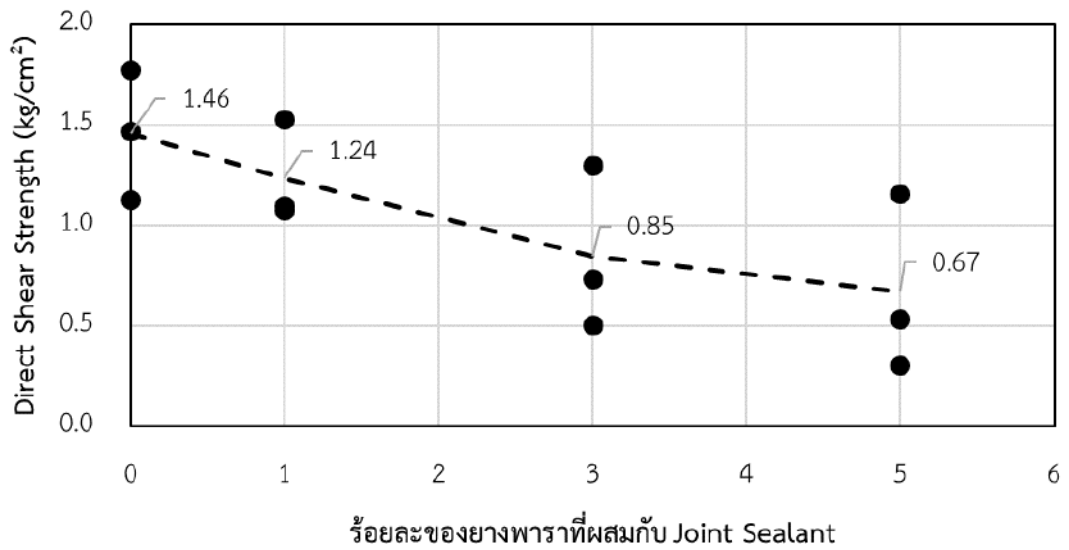
รูปที่ 2-49 แสดงให้เห็นถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนตรงของวัสดุอุดรอยแตกชนิดต่างๆ ส่วนค่า การเคลื่อนตัวในแนวราบ ณ ตำแหน่งที่วัสดุเกิดการวิบัติได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-50 จากรูปที่ 2-49 จะ เห็นได้ว่าวัสดุอุดรอยต่อชนิดเทร็อนที่ไม่มีส่วนผสมของยางพารา (ยางพาราร้อยละ 0) สามารถรับแรง เฉือนตรงได้มากที่สุด และวัสดุรับแรงเฉือนตรงได้น้อยลงเมื่ออัตราส่วนของยางพาราเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม วัสดุอุดรอยแตกที่มีส่วนผสมของยางพาราสูงที่สุด (ร้อยละ 5) กลับมีความยืดหยุ่น (Ductile) ดีกว่าวัสดุอุดรอยแตกที่มีส่วนผสมยางพาราอยู่น้อย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-50 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบ ณ จุดวิบัติ (Horizontal Deformation at Failure) ของวัสดุอุดรอยแตก จะมีการลดลงเมื่อส่วนผสมของยางพาราลดน้อยลง อีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่า วัสดุอุดรอยแตกชนิด เทร็อนตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 จะมีความยืดหยุ่น (Ductility) เพิ่มมากขึ้นเมื่อใส่ยางพาราลงไป เป็นส่วนผสม แต่จะทำให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนตรงลดต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบ Direct Shear Test ของวัสดุอุดรอยแตกชนิดเทร็อน พบว่า ผลลัพธ์จากยางพาราที่น่าจะนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการใช้งานกับวัสดุตามมาตรฐาน งานทางที่ ทล.ม. 328 (Joint Sealant) คือ Joint Sealant ผสมยางพาราร้อยละ 1 เนื่องจากเหตุผล ดังต่อไปนี้

- ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนตรงเป็นอันดับที่ 2 รองจาก Joint Sealant ตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 (ยางพาราร้อยละ 0)
- มีความยืดหยุ่นดีกว่า Joint Sealant ตามมาตรฐาน ทล.ม. 328

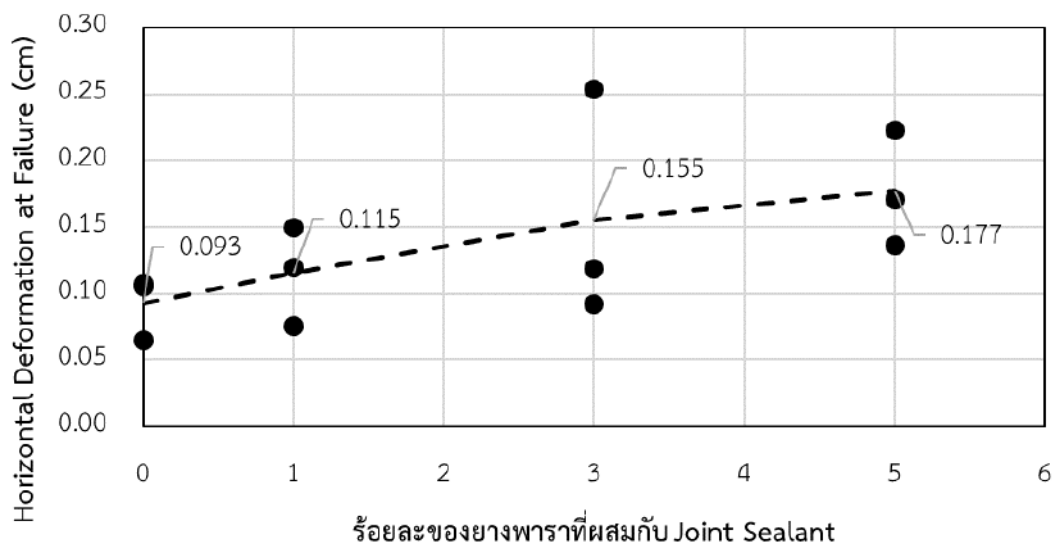


กำลังรับแรงเฉือนตรง



รูปที่ 2-49 กำลังรับแรงเฉือนตรงของวัสดุอุดรอยต่อตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 (ยางพาราร้อยละ 0) และที่มีส่วนผสมของยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ

การเคลื่อนตัวในแนวนอน ณ จุดที่ตัวอย่างวิบัติ



รูปที่ 2-50 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่วัสดุอุดรอยต่อตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 (ยางพาราร้อยละ 0) และที่มีส่วนผสมของยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ รับแรงเฉือนได้สูงสุด



วัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ ในการนำยางพาราเป็นส่วนผสมหรือเป็นวัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง วัสดุและส่วนผสมที่นำมาทดสอบ Triaxial Test และ Permeability Test ในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย

- วัสดุไหลทางตามมาตรฐาน ทล.ม. 207
- วัสดุไหลทางผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 ซึ่งปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมได้ถูกออกแบบโดยใช้กำลังรับแรงอัด Unconfined Compressive Strength (UCS) จากข้อแนะนำตาม ทล.-ม. 206 มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ โดยวัสดุประเภทนี้จะเป็นตัวแทนของ ดินซีเมนต์ผสมยางพาราร้อยละ 0
- วัสดุไหลทางผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 และผสมยางพาราสด (ปริมาณเท่ากับ OMC)
- วัสดุไหลทางผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 และผสมยางพาราเข้มข้น (ปริมาณเท่ากับ OMC)

วัสดุและส่วนผสมทั้งหมดจะได้รับการบดอัดที่ Optimum Moisture Content และบ่มที่ระยะเวลา 7 วันก่อนนำมาทดสอบ (เฉพาะวัสดุที่มีซีเมนต์เป็นส่วนผสม)

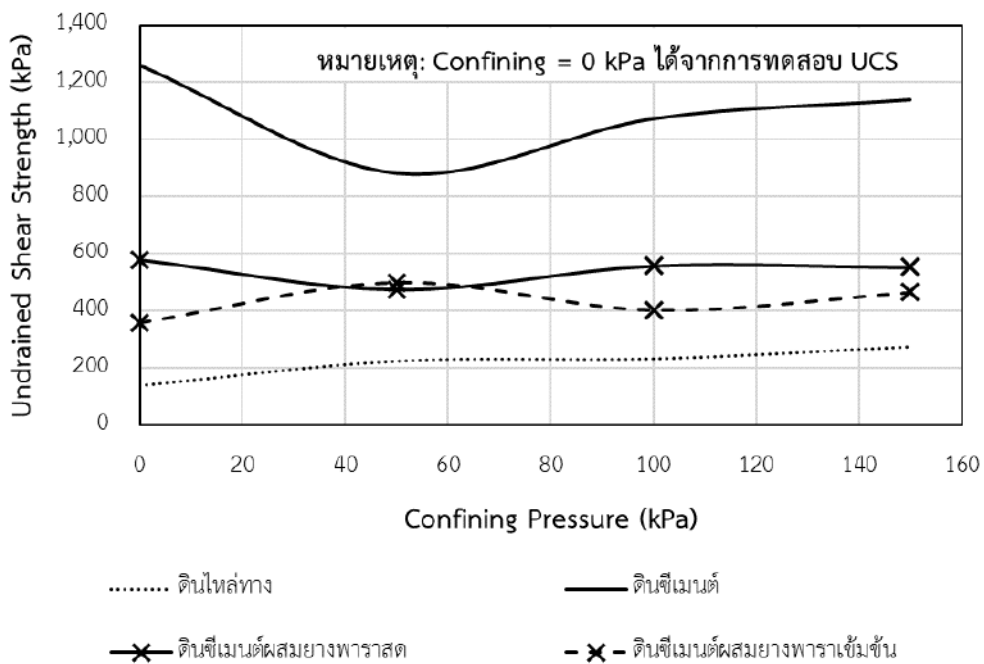
ตารางที่ 2-21 ค่าดีกรีความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ของตัวอย่างจากการทดสอบ UU Triaxial Test

Mixture	Sample No.	Curing Time (Days)	Dry Unit Weight (kN/cu.m.)	Moisture Content (%)		Degree of Saturation (%)
				Initial	Final	
ดินไหลทางบดอัด	1	-	22.27	9.45	10.1	21.46
	2	-	22.17	9.58	10.6	22.26
	3	-	22.07	9.64	10.5	22.34
ดินซีเมนต์	1	7	22.26	9.81	10.6	21.81
	2	8	21.97	8.77	10.7	22.50
	3	8	22.66	8.93	10.3	21.40
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	1	7	19.86	4.52	8.7	17.71
	2	8	20.22	6.36	8.6	17.53
	3	8	20.40	6.49	8.7	17.51
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	1	7	19.96	5.81	6.7	13.72
	2	7	19.85	6.10	7.0	14.22
	3	7	20.05	6.03	7.8	15.85

ผลการทดสอบ Unconsolidated Undrained (UU) Triaxial Test พบว่าค่า Deviator Stress ที่จุดวิบัติของวัสดุส่วนใหญ่ในการศึกษานี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Confining Pressure เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ สาเหตุอาจเป็นเพราะวัสดุที่นำมาทดสอบไม่อยู่ในสภาพอิ่มตัว (Fully Saturated) ก่อนการทดสอบ UU Triaxial Test ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-21



รูปที่ 2-51 แสดงค่า Undrained Shear Strength (C_u) ของส่วนผสมต่างๆ ที่ได้รับการทดสอบที่ Confining Pressure = 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa และ 150 kPa ซึ่งสามารถหาได้จากการนำ Corrected Deviator Stress มาหารด้วย 2 โดยค่า C_u ที่ Confining Pressure = 0 kPa ได้จากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ของส่วนผสมต่างๆ จะเห็นได้ว่า ดินไหล่ทางผสมซีเมนต์ร้อยละ 2 ที่อายุ 7 วัน มีค่า C_u สูงที่สุด มากกว่าดินไหล่ทางบดอัดถึงร้อยละ 80 โดยประมาณ และสูงกว่าดินซีเมนต์ผสมยางพาราสดและยางพาราเข้มข้นร้อยละ 50 และร้อยละ 60 ตามลำดับ



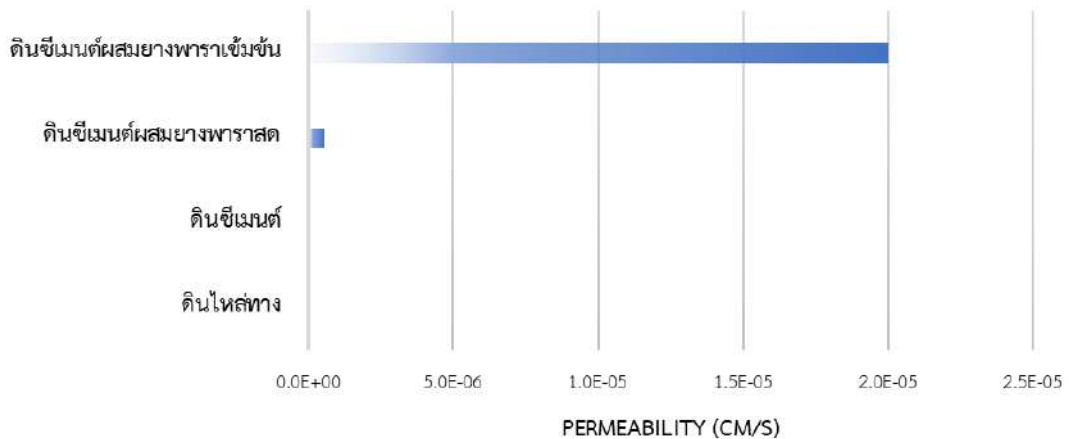
รูปที่ 2-51 Undrained Shear Strength ของส่วนผสมที่ Confining Pressure ต่างๆ

นอกจากนี้ รูปที่ 2-51 ยังแสดงให้เห็นว่าดินซีเมนต์ผสมยางพาราสดมี C_u เฉลี่ยอยู่ที่ 542 kPa ส่วนดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นมี C_u เฉลี่ยอยู่ที่ 432 kPa ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากปริมาณเนื้อยางที่เพิ่มขึ้นของน้ำยางพาราเข้มข้น ส่งผลให้ C_u ของวัสดุลดลง รูปที่ 2-52 แสดงให้เห็นลักษณะของเนื้อดินซีเมนต์ที่มียางพาราจับตัวอยู่ จากรูปเห็นได้ชัดเจนว่าเนื้อยางพาราที่ผสมลงไปได้เข้าไปจับตัวกับดินเม็ดละเอียดและฟอร์มตัวเป็นกลุ่มก้อนเฉพาะบางจุดในเนื้อดิน ส่งผลให้เนื้อดินซีเมนต์ที่มียางพาราเป็นส่วนผสมมีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบากว่าดินไหล่ทางบดอัดและดินซีเมนต์บดอัด โดยสามารถดูได้จากข้อมูลหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight) จากตารางที่ 2-21 และค่าความชื้นน้ำในรูปที่ 2-53



รูปที่ 2-52 ลักษณะของเนื้อยางพาราที่จับตัวอยู่ในเนื้อดินซีเมนต์ (ตัวอย่าง UU Triaxial Test)

รูปที่ 2-53 แสดงค่า Permeability ของก้อนตัวอย่างที่เตรียมจากวัสดุทั้ง 4 ประเภท และอัดน้ำด้วยแรงดันเท่ากับ 60 kPa ผ่านตัวอย่างทุกประเภทโดยเครื่อง Triaxial พบว่า ดินไหลทางบดอัดและดินซีเมนต์มีคุณสมบัติเหมือนกับวัสดุที่บดน้ำ ส่วนดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นจะมีความพรุนสูงกว่าดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด



รูปที่ 2-53 ค่า Permeability ของก้อนตัวอย่างที่วัดได้จากการประยุกต์ใช้เครื่อง Triaxial Test



จากการทดสอบ UU Triaxial Test และ เปรียบเทียบค่าการซึมผ่านวัสดุภายใต้แรงดันที่เท่ากันพบว่าวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงสุดคือ ดินซีเมนต์ นอกจากนี้วัสดุดังกล่าวยังมีคุณสมบัติที่น้ำ ($k = 0 \text{ cm/s}$) เมื่อนำไปใช้เป็นโครงสร้างชั้นทางอาจมีประโยชน์อย่างมาก ที่จะป้องกันไม่ให้น้ำซึมลงไปสร้างความเสียหายกับชั้นทางด้านล่าง ถึงแม้ว่าวัสดุดังกล่าวจะมีความเหมาะสมอย่างมากในการนำไปใช้งาน แต่วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้คือการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำยางพาราไปใช้สำหรับงานก่อสร้างชั้นทาง ดังนั้น ที่ปรึกษาจึงได้เลือกใช้ ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น เป็นผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่จะนำมาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานกับวัสดุตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.ม. 207 (วัสดุไหล่ทาง) และดินบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน โดยเหตุผลดังต่อไปนี้

- ถึงแม้ว่า C_u ของดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นจะมีค่าต่ำกว่า C_u ของดินซีเมนต์ผสมยางพาราสดเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 20) แต่ก็ยังสูงกว่าดินไหล่ทางบดอัด
- ยางพาราเข้มข้นเป็นวัสดุที่เก็บรักษาได้นาน และเหมาะสมที่จะนำไปใช้ใน งานก่อสร้างมากกว่า ยางพาราสด เนื่องจากยางพาราสดมีอายุในการเก็บรักษาเพียง 4-6 ชั่วโมง แล้วจะเกิดการเสียสภาพ (บูด) หลังจากนั้น จึงอาจไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ใน งานก่อสร้างจริง ที่โครงการตั้งอยู่ในจุดที่ห่างไกลจากแหล่งผลิตรายางพารา หรือโครงการที่ไม่สามารถก่อสร้างได้ตามแผนงานเนื่องจากสภาพดิน ฟ้า อากาศ และสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย

ตารางที่ 2-22 แสดงรายการวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการคัดเลือกเพื่อไปทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานเทียบกับวัสดุที่แนะนำจากมาตรฐานของกรมทางหลวง

ผลิตภัณฑ์	วัสดุที่กรมทางหลวงใช้อยู่เดิม	ส่วนผสมของวัสดุและยางพาราที่ถูกคัดเลือก
วัสดุปะซ่อมแบบผสมเย็น	แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h (ทล.ม. 407)	CMS-2h ผสมยางพารา ร้อยละ 1
วัสดุอุดรอยแตก	ยางอุดรอยแตกชนิดเทอร์ออน (ทล.ม. 328)	ยางอุดรอยแตกชนิดเทอร์ออน ผสมยางพารา ร้อยละ 1
วัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน	วัสดุไหล่ทาง (ทล.ม. 207)	ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น

2.5 งานจำลองสภาพการใช้งาน

หลังจากที่ปรึกษาดำเนินการออกแบบส่วนผสม ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ เมื่อเลือกวัสดุที่ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้งานของวัสดุต่าง ๆ กับวัสดุที่กรมทางหลวงใช้อยู่เดิมได้แล้ว จึงนำมาเตรียมตัวอย่างเพื่อจำลองสภาพการใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 งานทดสอบเพื่อจำลองสภาพการใช้งานของวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, IDT) พบว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุผสมหินคลุกไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากระหว่างแช่น้ำตัวอย่างหลุดร่อนและแตกออกจากกัน รวมถึงพบปัญหาเดียวกันนี้กับก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุผสม Recycled Asphalt Concrete (RAP) ที่ใช้อัตราส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชันต่อน้ำยางพาราเข้มข้น 60% ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 และอัตราส่วนผสมร้อยละ 5 ดังนั้นที่ปรึกษาจึงได้คัดเลือกวัสดุผสมประเภท Recycled Asphalt Concrete (RAP) และวัสดุเชื่อมประสานประเภท (1) แอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2h และ (2) แอสฟัลต์อิมัลชัน CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 เพื่อนำมาใช้งานจำลองสภาพการใช้งานของวัสดุที่ปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างของวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น

- ที่ปรึกษาได้ดำเนินการเตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดพื้นที่ 50 x 50 ตร.ซม.หนา 5 ซม. ทำการจำลองสภาพความเสียหายของผิวทางในสภาพความเสียหายเป็นหลุมบ่อ (Pot Hole) โดยการเจาะตัดชิ้นส่วนของแผ่นตัวอย่างให้มีขนาดพื้นที่ขนาด 40 x 25 ตร.ซม. ลึก 2.5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2-54



รูปที่ 2-54 จำลองสภาพความเสียหายหลุมบ่อ (Pot Hole) บนแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีต

- ผสมวัสดุมวลรวม Recycled Asphalt Concrete (RAP) วัสดุประสานคือ แอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CMS-2h และ CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 อ้างอิงมาตรฐานกรมทางหลวง ที่ ทล-ม 407/2532 วัสดุมวลรวมผสมเย็นด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน (Cold Mixed Asphalt) เพื่อนำมาใช้ในงานงานจำลองสภาพการใช้งานของวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น ในอัตราส่วนผสมใช้แอสฟัลต์อิมัลชันร้อยละ 6 จากนั้นคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ให้เกิด การแตกตัวของแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยสังเกตได้จากสีของตัวแอสฟัลต์อิมัลชัน จากสีน้ำตาลเป็น สีดำหรือทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอาจมีการคลุกเคล้าบ้างเป็นระยะ ๆ (รูปที่ 2-55)



รูปที่ 2-55 ขั้นตอนการผสมวัสดุมวลรวม RAP กับแอสฟัลต์อิมัลชัน

- ทำการบดอัดวัสดุมวลรวมผสมเย็นด้วยเครื่องตบดินบดอัด โดยควบคุมความแน่นของวัสดุบดอัด จาก (1) น้ำหนักส่วนผสมจากวัสดุเชื่อมประสานทั้งสองที่จะนำไปปะซ่อมต้องเท่ากัน (เนื่องจาก pot hole มีปริมาตรเท่ากัน) (2) ระยะเวลาในการบดอัดและจำนวนเที่ยวบดอัด จากนั้น ทิ้งตัวอย่างไว้ในแบบก่อน 24 ชั่วโมง (รูปที่ 2-56) จึงถอดแบบออกเพื่อรอทำการทดสอบ ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2-56 ขั้นตอนการบดอัดแผ่นตัวอย่างวัสดุมวลรวมผสมเย็น

ขั้นตอนการทดสอบงานจำลองสภาพการใช้งานของวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็นด้วยเครื่องทดสอบ Accelerated Polishing Machine for Asphalt Mixtures



รูปที่ 2-57 ขั้นตอนการขัดแผ่นด้วยเครื่องทดสอบ Accelerated Polishing Machine for Asphalt Mixtures

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจำลองการใช้งานของวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็นโดยใช้วัสดุผสมรวม Recycled Asphalt Concrete (RAP) และแอสฟัลต์อิมัลชันสองชนิด ได้แก่ CMS-2h และ CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 ทำการเปรียบเทียบสภาพความเสียหายจากการขัดด้วยล้อยาง โดยได้ทำการตั้งรอบการขัดที่ 0, 5000, 7500 และ 10000 รอบ หลังจากทุกๆชุดรอบการขัดค่าการยุบตัวของผิวทางตามร่องล้อ (Rutting) และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว จะได้รับการประเมิน (รูปที่ 2-58) ดังแสดงผลในตารางที่ 2-22



รูปที่ 2-58 การวัดค่าการยุบตัวของวัสดุปะซ่อมและประเมินสภาพพื้นผิว



ตารางที่ 2-23 ผลการวัดค่าการยุบตัว (Rutting) และสภาพพื้นผิวหลังจำลองสภาพการใช้งาน

จำนวนรอบ การขีด (Cycles)	วัสดุปะซ่อมผสมด้วย CMS-2h				วัสดุปะซ่อมผสมด้วย CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1			
	ระยะยุบตัว (mm.)		สภาพพื้นผิววัสดุ	ระยะยุบตัว (mm.)		สภาพพื้นผิววัสดุ		
	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2		แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2			
0	0.00	0.00	การบดอัดวัสดุปะซ่อมมีระดับผิวสม่ำเสมอกับระดับผิวเดิม		0.00	0.00	การบดอัดวัสดุปะซ่อมมีระดับผิวสม่ำเสมอกับระดับผิวเดิม	
5,000	0.50	0.23	พบร่องรอยการขีดระหว่างล้อยางและผิวทางสังเกตการยุบตัวไม่สม่ำเสมอ		4.00	3.25	พบว่าบริเวณรอยล้ออย่างมีการยุบตัวที่เห็นได้ชัดระหว่างความแตกต่างของผิวเดิมและผิวปะซ่อม	
7,500	1.00	0.83	พบค่าการยุบตัวไม่สม่ำเสมอเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากช่วงรอยต่อระหว่างผิวทางปะซ่อมกับผิวทางเดิมชัดเจน		5.00	4.93	บริเวณรอยล้ออย่างที่ถูกขีดมีร่องรอยการยุบตัวเพิ่มมากขึ้น	
10,000	1.50	1.08	พบการยุบตัวอย่างเห็นได้ชัดที่บริเวณช่วงรอยต่อบริเวณรอยล้ออย่าง วัสดุรวมหลุดร่อน		5.00	5.26	สังเกตเห็นได้ชัดเจนถึงความไม่สม่ำเสมอระหว่างผิวทางปะซ่อมกับผิวทางเดิม	

2.5.2 งานทดสอบเพื่อจำลองการใช้งานของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรง (Direct Shear Test) โดยประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM D3080 ของวัสดุอุดซ่อมรอยต่อ ที่ปรึกษาได้ทำการคัดเลือก Joint Sealant และ Joint Sealant ผสมยางพารา ร้อยละ 1 มาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้งานด้วยเครื่องเร่งการخشดี ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

- ที่ปรึกษาได้ดำเนินการเตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตขนาด 50 x 50 x 5 เซนติเมตร ทำการเจาะตัดชิ้นส่วนของแผ่นตัวอย่างให้เป็นร่องกว้าง 1 เซนติเมตร และลึก 2.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2-59



รูปที่ 2-59 จำลองสภาพความเสียหายจากรอยแตกบนแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีต

- ให้อุณหภูมิกับวัสดุสำหรับงานอุดซ่อมรอยแตกที่ 150 องศาเซลเซียส เมื่อส่วนผสมหลอมละลายดีแล้ว เทส่วนผสมลงบนรอยแตกทั้งแผ่นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง (รูปที่ 2-60)
- เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกทั้ง 2 ชนิด (Joint sealant และ joint sealant ผสมยางพาราร้อยละ 1) วัสดุอุดซ่อมรอยแตกที่ติดตั้งบนแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีต จะถูกควบคุมปริมาณให้ใกล้เคียงกันในการติดตั้งวัสดุดังกล่าวในแต่ละครั้ง (ประมาณ 100 cc)



รูปที่ 2-60 ขั้นตอนการเทส่วนผสมวัสดุอุดซ่อมรอยแตก



ขั้นตอนการทดสอบงานจำลองสภาพการใช้งานของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทางด้วยเครื่องทดสอบ Accelerated Polishing Machine for Asphalt Mixtures



รูปที่ 2-61 ขั้นตอนการขัดแผ่นด้วยเครื่องทดสอบ Accelerated Polishing Machine for Asphalt Mixtures

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจำลองการใช้งานของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทางโดยใช้วัสดุสำหรับงานอุดซ่อมรอยแตกสองชนิด ได้แก่ Joint Sealant และ Joint Sealant ผสมยางพาราร้อยละ 1 และทำการเปรียบเทียบสภาพความเสียหายจากการขัดด้วยล้อยาง โดยได้ทำการตั้งรอบการขัดที่ 0, 5000, 75000 และ 10000 รอบ แล้วประเมินการเสียหายของวัสดุอุดซ่อมรอยแตก ดังแสดงผลในตารางที่ 2-24



ตารางที่ 2-24 ผลการทดสอบการเสถียรภาพของวัสดุอุดรอยต่อตามจำนวนรอบการขัด

จำนวนรอบ การขัด (Cycles)	วัสดุอุดซ่อมรอยต่อชนิดเทอร์อัน			วัสดุอุดซ่อมรอยต่อชนิดเทอร์อันผสมยางพาราร้อยละ 1		
	สภาพพื้นผิววัสดุ	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	สภาพพื้นผิววัสดุ	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2
0		วัสดุอุดรอยต่อมีความสมบูรณ์ บริเวณที่อุดซ่อมมีความ สม่ำเสมอ วัสดุอุดรอยต่อหนุนขึ้นมาเล็กน้อย			วัสดุอุดรอยต่อมีความสมบูรณ์ บริเวณที่อุดซ่อมมีความ สม่ำเสมอ วัสดุอุดรอยต่อหนุนขึ้นมาเล็กน้อย	
5,000		วัสดุอุดรอยต่อที่ถูกขัดอย่าง ขัดสีเริ่มมีการเสถียรภาพ	วัสดุอุดรอยต่อบริเวณขัดอย่าง ขัด มีรอยถูกขัดเพียง เล็กน้อย		วัสดุอุดรอยต่อที่ถูกขัดอย่าง ขัดสีเริ่มมีการเสถียรภาพ	พบการยุบตัวอย่างรวดเร็ว บริเวณรอยขัด
7,500		วัสดุอุดรอยต่อเสถียรภาพ อย่างต่อเนือง แต่ไม่มาก	วัสดุอุดรอยต่อไม่มีความ เปลี่ยนแปลง		วัสดุอุดรอยต่อเสถียรภาพ จากการขัดของขัดอย่าง	บริเวณรอยขัด เห็นแนวร่อง ลึกลงตัวอย่างชัดเจน
10,000		วัสดุอุดรอยต่อถูกขัดอย่าง กลืนไปกับผิวทางบริเวณ รอบรอยต่อ	วัสดุอุดรอยต่อไม่มีการเสถียร ภาพเพิ่มเติม		วัสดุอุดรอยต่อที่ถูกขัดมี ความสม่ำเสมอกับผิวทาง เดิม	พบการยุบตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น



2.5.3 งานทดสอบเพื่อจำลองการใช้งานของวัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

จากการทดสอบ Unconsolidated-Undrained (UU) Triaxial Test และ Permeability Test ด้วยเครื่อง Triaxial Test พบว่าดินไหลทางผสมซีเมนต์ที่อายุ 7 วัน เป็นวัสดุที่บ้น้ำ (Impervious) และมี Unconfined Compressive Strength (UCS) สูงที่สุด ส่วนดินไหลทางผสมซีเมนต์และยางพาราเข้มข้น เป็นวัสดุที่มี UCS ต่ำสุดและน้ำสามารถซึมผ่านได้ดี

อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้ต้องการศึกษาประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์จากยางพาราในการนำไปใช้ป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง จึงได้เลือกใช้ ดินผสมซีเมนต์และยางพาราเข้มข้น มาจำลองการใช้งานและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทางกับดินไหลทางบดอัด และดินไหลทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน ซึ่งมีวิธีการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

การจำลองฝนระหว่างการทดสอบ

ที่ปรึกษาจะทำการจำลองน้ำฝน โดยใช้อัตราการฉีดพ่นน้ำลงบนแปลงทดสอบ ให้มีปริมาณเทียบเท่ากับ 10 มม./วัน ซึ่งคณะทีมงานที่ปรึกษาได้สร้างชุดจำลองน้ำฝนให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด 1.5 x 1.5 ตร.ม. และทดสอบเพื่อหาแรงดันน้ำและระยะเวลาที่เหมาะสมในการจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2-62



รูปที่ 2-62 ชุดจำลองฝนระหว่างการสอบเทียบ

โครงชุดจำลองฝนใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 นิ้ว ตัวเสายาว 1.40 เมตร จำนวน 4 ต้น ท่อคาดด้านข้างแนวนอนและล่างยาว 1.20 เมตร ยึดโยงกันด้วยข้อต่อขนาด 1 นิ้ว มีท่อ PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ยาว 1.7 เมตร จำนวน 3 ท่อน วางพาดบนท่อ PVC คาดข้างตัวบน เพื่อยึดหัวจ่ายน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำแบบปั๊มจุ่ม ระบบส่งน้ำคือใช้ปั๊มจุ่มปั๊มน้ำส่งผ่านสายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว มีทางน้ำออก 11 หัวจ่าย ควบคุมโดยมีวาล์วควบคุมการไหลและเครื่องมือวัดแรงดัน โดยหัวจ่ายเป็นสปริงเกอร์และหัวฉีดสเปรย์เจ็ท ในการทดสอบนี้ทำการวัดแรงดันก่อนส่งเข้าหัวจ่าย

การเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบ

ที่ปรึกษาเตรียมกระบะเหล็กขนาด $1.5 \times 1.5 \times 0.3$ เมตร สำหรับบดอัดวัสดุไหล่ทาง จำนวน 6 กระบะ แบ่งออกเป็นกระบะเพื่อบรรจุ

1. ดินไหล่ทางบดอัด จำนวน 2 แปลง
2. ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด จำนวน 2 แปลง และ
3. ดินไหล่ทางบดอัด ปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน จำนวน 2 แปลง

โดยทำการคำนวณปริมาณวัสดุไหล่ทางสำหรับการบดอัดให้มีความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของค่าน้ำหนักแห้งสูงสุด ซึ่งจะทำให้การบดอัดกระบะละ 2 ชั้น ดังมีขั้นตอนในการบดอัดดังต่อไปนี้

ดินไหล่ทางบดอัด (รูปที่ 2-63)

- กำหนดปริมาณดินไหล่ทางที่จะใช้สำหรับบดอัดในกระบะทดสอบขนาด $1.5 \times 1.5 \times 0.3$ ลบ.ม. แล้วจัดเตรียมโดยแบ่งออกเป็น 2 กองเท่าๆกัน
- ฉีดพ่นน้ำลงบนดินไหล่ทางกองแรกให้มีปริมาณเท่ากับค่า Optimum Moisture Content (8%) แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน บรรจุดินที่คลุกเคล้าดีแล้วลงในกระบะจำลอง
- บดอัดดินด้วยเครื่องตบดินในกระบะทดสอบจนดินชั้นแรกมีความหนาไม่มากเกินไปกว่า 15 ซม.
- ฉีดพ่นน้ำลงบนดินไหล่ทางกองที่ 2 ให้มีปริมาณเท่ากับค่า Optimum Moisture Content (8%) แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน บรรจุดินที่คลุกเคล้าดีแล้วลงในกระบะจำลอง
- บดอัดดินด้วยเครื่องตบดินในกระบะทดสอบจนดินชั้นที่สองเต็มกระบะทดสอบพอดี



รูปที่ 2-63 การบดอัดวัสดุไหล่ทางในกระบะทดสอบ



ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด (รูปที่ 2-64)

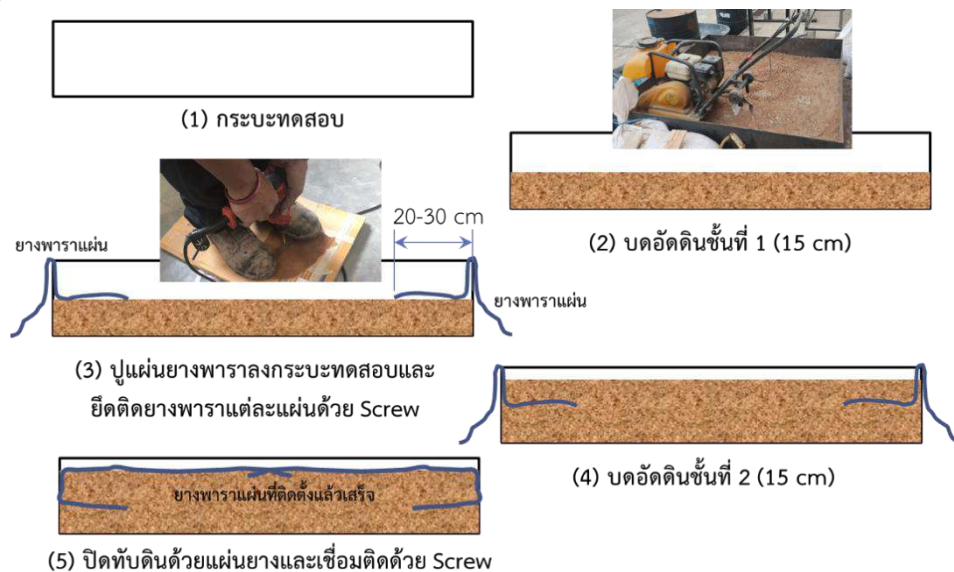
- คำนวณปริมาณดินไหล่ทางที่เมื่อผสมซีเมนต์และยางพาราเข้มข้นแล้ว สามารถบดอัดลงในกระเบตสอบขนาด $1.5 \times 1.5 \times 0.3$ ลบ.ม. ได้พอดี หลังจากนั้นจึงแบ่งออกเป็น 2 กองเท่าๆกัน
- คลุกเคล้าดินกองแรกกับซีเมนต์ที่มีน้ำหนักร้อยละ 2 ของน้ำหนักดินแห้งให้เข้ากันในภาตหรือกระเบขนาดใหญ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 – 20 นาที จนซีเมนต์กระจายอยู่ทั่วเนื้อดินแห้ง
- ผสมน้ำ สารลดแรงตึงผิวและยางพาราเข้มข้น ตามอัตราส่วนที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้แล้ว คนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน
- ฉีดพ่นน้ำผสมยางพาราลงบนดินไหล่ทางกองแรกให้มีปริมาณเท่ากับค่า Optimum Moisture Content (8%) แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากันด้วยความรวดเร็ว เนื่องจากดินซีเมนต์จะเริ่มการจับตัวเป็นก้อนและแข็งตัวเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ บรรจุดินที่คลุกเคล้าดีแล้วลงในกระเบจำลอง
- บดอัดดินด้วยเครื่องตบดินในกระเบตสอบจนดินชั้นแรกมีความหนาไม่มากเกินกว่า 15 ซม.
- ฉีดพ่นน้ำผสมยางพาราลงบนดินไหล่ทางกองที่ 2 ให้มีปริมาณเท่ากับค่า Optimum Moisture Content (8%) แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากันด้วยความรวดเร็ว บรรจุดินที่คลุกเคล้าดีแล้วลงในกระเบจำลอง
- บดอัดดินด้วยเครื่องตบดินในกระเบตสอบจนดินชั้นที่สองเต็มกระเบตสอบพอดี



รูปที่ 2-64 การบดอัดดินซีเมนต์ผสมยางพาราในกระเบตสอบ

ดินไหล่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน (รูปที่ 2-65 ถึง 2-66)

- กำหนดปริมาณดินไหล่ทางที่จะใช้สำหรับบดอัดในกระบะทดสอบขนาด $1.5 \times 1.5 \times 0.3$ ลบ.ม. แล้วจัดเตรียมโดยแบ่งออกเป็น 2 กองเท่าๆ กัน
- ฉีดพ่นน้ำลงบนดินไหล่ทางกองแรกให้มีปริมาณเท่ากับค่า Optimum Moisture Content (8%) แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน บรรจุดินที่คลุกเคล้าดีแล้วลงในกระบะจำลอง
- บดอัดดินด้วยเครื่องตบดินในกระบะทดสอบจนดินชั้นแรกมีความหนาไม่มากเกินกว่า 15 ซม. (รูปที่ 2-65)
- นำแผ่นยางพารารมควันวางโดยรอบกระบะทดสอบให้มีระยะห่างและลักษณะการติดตั้งเหมือน (รูปที่ 2-65) ยึดแผ่นยางพาราแต่ละแผ่นด้วย screw โดยให้มีระยะห่างต่อไม้น้อยกว่า 5 ซม.



รูปที่ 2-65 ภาพแสดงการติดตั้งแผ่นยางพารารมควันปิดทับหน้าดินไหล่ทางบดอัด

- ฉีดพ่นน้ำลงบนดินไหล่ทางกองที่ 2 ให้มีปริมาณเท่ากับค่า Optimum Moisture Content (8%) แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน บรรจุดินที่คลุกเคล้าดีแล้วลงในกระบะจำลอง
- บดอัดดินด้วยเครื่องตบดินในกระบะทดสอบจนดินชั้นที่สองเต็มกระบะทดสอบพอดี
- ทบแผ่นยางปิดด้านบนของดินไหล่ทางบดอัดชั้นที่ 2 นำแผ่นยางจัดเรียงปิดทับหน้าผิวดินให้เต็ม โดยให้มีระยะห่างต่อ ระหว่างแผ่นไม่น้อยกว่า 5 ซม. และยึดแผ่นยางแต่ละแผ่นด้วย screw โดยให้มีระยะห่างระหว่าง screw ไม่น้อยกว่า 10-15 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2-66



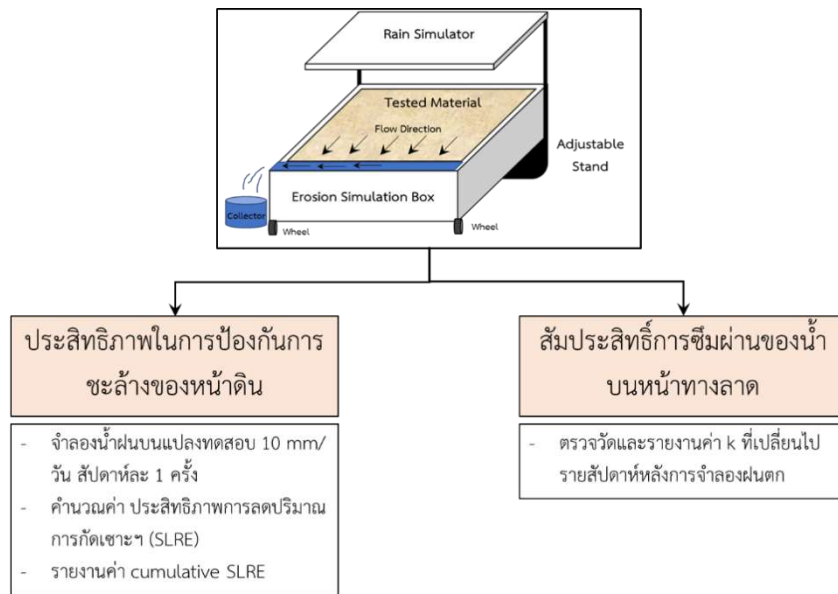
รูปที่ 2-66 ภาพแสดงกระบะจำลองลาดคันทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน

สำหรับกระบะจำลองลาดคันทางทั้ง 6 จะถูกตั้งวางไว้ในพื้นที่ใกล้เคียงกันภายนอกอาคาร เพื่อให้สามารถจำลองสภาพการใช้งานได้ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริง (รูปที่ 2-67) แต่เมื่อฝนตก กระบะทั้ง 6 จะถูกปิดคลุมด้วยผ้าใบเพื่อป้องกันวัสดุในกระบะจากน้ำฝน เนื่องจากฝนจะทำให้ดินบางส่วนถูกชะล้างออกจากกระบะทดสอบและมีผลต่อการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุในโครงการนี้



รูปที่ 2-67 ภาพแสดงกระบะจำลองทั้ง 6 ที่รอการทดสอบ

หลังจากนั้น กระบะทั้ง 6 จะได้รับการทดสอบประสิทธิภาพต่าง ๆ (รูปที่ 2-68) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-68 ภาพแสดงการทดสอบของกระบะจำลอง

การทดสอบหาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะของวัสดุทดลองในกระบะทดสอบ

ในการทดสอบนี้ ที่ปรึกษา ได้เตรียมแปลงจำลองลาดคั่นทาง ขนาดความกว้างและความยาว 1.5 เมตร ความลาดเอียง 1.5 : 1 (H : V) พร้อมชุดอุปกรณ์จำลองสภาวะฝนตกที่สามารถควบคุมปริมาณและระยะเวลาฝนตกจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2-69



รูปที่ 2-69 การจำลองฝนตกในแปลงทดสอบ



ที่ปรึกษาทำการติดตั้งรางน้ำฝน ณ ขอบกระเบียด้านล่าง (รูปที่ 2-70) เพื่อรองรับฝนจำลองที่ไหลตกกระทบผิวหน้าวัสดุไหล่ทางและชะล้างวัสดุไหล่ทาง โดยน้ำโคลนจะไหลผ่านรางน้ำสู่กระเบียดอะคริลิก ขนาด 1 x 1 เมตร ซึ่งใช้ในการเก็บตัวอย่างดินและน้ำที่ไหลผ่านหน้าดิน สำหรับการจำลองปริมาณน้ำฝนนั้น ที่ปรึกษาทำการจำลองสภาพฝนตกโดยวัดความเข้มจากปริมาณน้ำฝนได้ที่ 10 มิลลิเมตร ในเวลา 15 นาที ดังนั้นการทดสอบการจำลองฝนตกจะทดสอบที่ 15 นาทีทุกกระเบียดทดสอบ โดยแต่ละกระเบียดทดสอบจะทำการจำลองฝนตกและเก็บข้อมูลสัปดาห์ละหนึ่งครั้ง



รูปที่ 2-70 การทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน

สำหรับขั้นตอนการจำลองฝนตกและจัดเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดิน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ติดตั้งโครงชุดทดสอบปริมาณน้ำฝนบนกระเบียดทดสอบ (รูปที่ 2-70)
- เปิดเครื่องจำลองปริมาณฝนตกเป็นเวลา 15 นาที ให้น้ำฝนตกชะวัสดุไหล่ทาง วัสดุไหล่ทางและน้ำฝนจะไหลสู่รางน้ำลงสู่กระเบียดอะคริลิก (รูปที่ 2-70) โดยระยะเวลาฝนตกได้ทำการสอบเทียบให้จำลองปริมาณน้ำฝนที่ 10 มม./วัน ดังที่กล่าวไปแล้วเบื้องต้น
- ปล่อยให้ น้ำโคลนในกระเบียดอะคริลิก ตกตะกอนจนน้ำที่ผิวหน้าใส จึงตักน้ำฝนที่ใสด้านบนผิวน้ำออกจนเหลือแต่ตะกอนที่นอนก้นอยู่ในกระเบียดอะคริลิก
- นำตะกอนออกจากกระเบียดอะคริลิก ให้หมด เพื่อนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำข้อมูลมาคำนวณหาประสิทธิภาพการลดปริมาณการกัดเซาะในแปลงทดสอบ ดังขั้นตอนและสมการในรูปที่ 2-71



Soil loss จากแปลงที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง

$$SLRE_i = \left(\frac{SL_{control} - SL_i}{SL_{control}} \right) \times 100\%$$

SLRE: Soil Loss Relative Efficiency
ประสิทธิภาพการลดปริมาณการกัดเซาะในแปลงทดสอบ
ที่มีการปรับปรุงเมื่อเทียบกับแปลงทดสอบควบคุม

SL_{control} = น้ำหนักของดินแห้งที่ถูกชะล้างออกจากกระเบาะที่ไม่ได้ปรับปรุง
SL_i = น้ำหนักของดินแห้งที่ถูกชะล้างออกจากกระเบาะที่ได้รับการปรับปรุง

SLRE = 100% - ดินไม่โดนชะล้างโดยน้ำฝนเลย
= 0% - ดินถูกชะล้างออกไป มีปริมาณเท่ากับกระเบาะที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง

รูปที่ 2-71 แสดงวิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพการลดปริมาณการกัดเซาะในแปลงทดสอบ

- ดำเนินการจำลองฝน และเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการลดปริมาณการกัดเซาะ สัปดาห์ละ 1 ครั้ง ตามขั้นตอนที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

จากการทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง ผลการทดสอบ แสดงไว้ในตารางที่ 2-25



ตารางที่ 2-25 ผลการจำลองฝนและคำนวณประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง (Soil Loss Relative Efficiency: SLRE)

ครั้งที่	ดินไหลทางบดอัด (ควบคุม)				ดินไหลทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพาราธรรมควีน						ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น					
	Soil Loss (SLcontrol) (kg.)				Soil Loss (SLi) (kg.)				SLRE (%)		Soil Loss (SLi) (kg.)				SLRE (%)	
	กระบะ 1	กระบะ 2	เฉลี่ย	สะสม	กระบะ 1	กระบะ 2	เฉลี่ย	สะสม	ต่อครั้ง	สะสม	กระบะ 1	กระบะ 2	เฉลี่ย	สะสม	ต่อครั้ง	สะสม
1	2.14	2.92	2.53	2.53	0	0	0	0	100	100	0.101	0.127	0.114	0.114	95.5	95.5
2	2.07	2.49	2.28	4.81	0	0	0	0	100	100	0.089	0.103	0.096	0.210	95.8	96.4
3	0.75	1.35	1.05	5.86	0	0	0	0	100	100	0.095	0.113	0.104	0.314	90.1	94.6
4	0.98	2.04	1.51	7.37	0	0	0	0	100	100	0.124	0.096	0.110	0.424	92.7	94.2

ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ก่อนและหลังการจำลองฝนตก

ดินไหลทางบดอัด



ดินไหลทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารา



ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น



การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ผิวดิน (Soil Surface Infiltration)

ที่ปรึกษาทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ผิวดินของกระเบทดสอบหลังการจำลองฝนตกทุกครั้ง เพื่อศึกษาค่าการซึมผ่านที่เปลี่ยนไปหลังจากที่หน้าดินโดนชะล้าง การทดสอบนี้ประยุกต์มาจาก ASTM D3385 “Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field using Double-Ring Infiltrometer” วิธีการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำในกระเบทดสอบ แสดงในรูปที่ 2-72



รูปที่ 2-72 ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ผิวดิน (Soil Surface Infiltration)

ขั้นตอนการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ผิวดิน

- เลือกตำแหน่งที่ต้องการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ผิวดิน โดยกระเบหนึ่งจะทำการทดสอบ 3 จุด เลือกตำแหน่งใดก็ได้จากพื้นที่ทั้ง 3 ดังแสดงในรูปที่ 2-73



รูปที่ 2-73 การเลือกตำแหน่งการทดสอบ Surface Infiltration ต่อ 1 กระเบ



- กัดเครื่องทดสอบให้ฐานจมลงดินประมาณ 5 ซม. โดยรบกวนสภาพพื้นผิวของวัสดุเดิมน้อยที่สุด (รูปที่ 2-72)
- ตรวจสอบฐานของชุดทดสอบว่าแนบพื้นผิวดินที่ต้องการทดสอบอย่างเรียบร้อยโดยรอบ ตั้งเวลาทดสอบ 15 นาที
- เติมน้ำลงกระบอกทดสอบให้ล้น จนกระทั่งล้นล้นล้นขึ้นมามีแสดงในรูปที่ 2-72
- เริ่มจับเวลาและจดบันทึกระดับน้ำที่ซึมลงสู่ผิวดินในหน่วย มม. เทียบกับระยะเวลา
- อ่านค่าการยุบตัวของระดับน้ำในหน่วย มม. ทุก ๆ 1 นาที
- เปลี่ยนตำแหน่งการทดสอบให้ครบ 3 จุด/กระบะ/ครั้ง

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ผิวดินแสดงไว้ในตารางที่ 2-26 เนื่องจากแผ่นยางพาราควั่นเป็นวัสดุที่บดน้ำ การทดสอบบนกระบะที่ถูกปิดทับด้วยแผ่นยางพาราจึงไม่มีผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ผิวดิน



ตารางที่ 2-26 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ผิวดิน (Soil Surface Infiltration)

ครั้งที่	Surface infiltration ของดินโหล่ทางบดอัด (ควมคุม) (cm./hr)						Surface infiltration ดินโหล่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพาราธรรมครัน (cm./hr)						Surface infiltration ของดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น (cm./hr)					
	กระบะที่ 1			กระบะที่ 2			กระบะที่ 1			กระบะที่ 2			กระบะที่ 1			กระบะที่ 2		
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
0	270	168	30	198	132	90	-	-	-	-	-	-	420	450	365	558	454	368
1	224	115	121	202	111	142	-	-	-	-	-	-	336	93	279	432	386	126
2	150	51	57	105	75	86	-	-	-	-	-	-	322	265	304	354	256	107
3	201	150	148	114	165	106	-	-	-	-	-	-	267	169	221	277	198	296
4	63	154	144	143	211	81	-	-	-	-	-	-	320	234	88	176	65	179

ภาพระหว่างการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ผิวดิน

ดินโหล่ทางบดอัด



ดินโหล่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารา



ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น

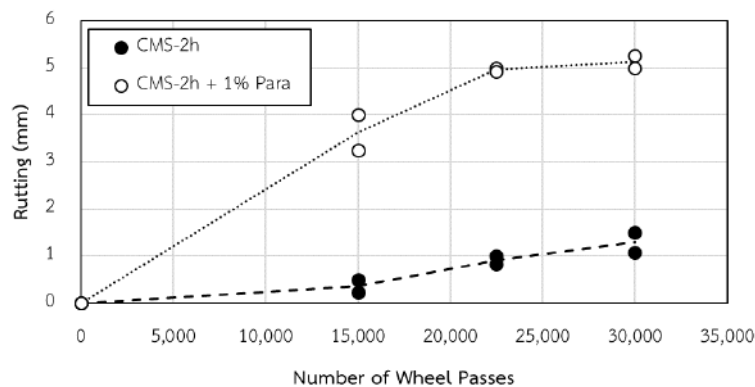


3.1 ผลวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุจากการจำลองสภาพการใช้งาน

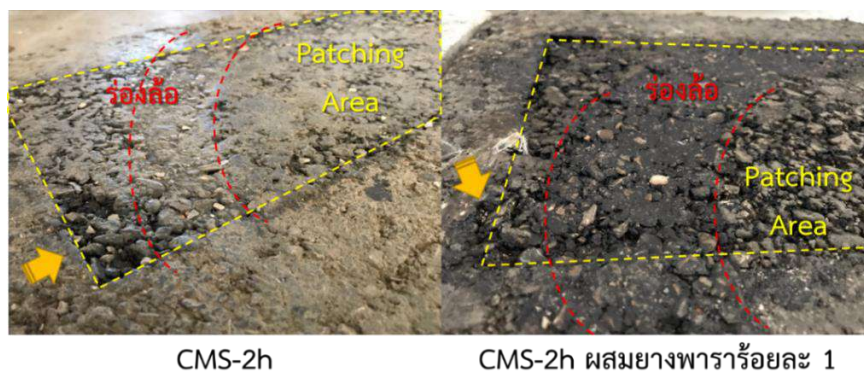
งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น

รูปที่ 3-1 แสดงค่าการยุบตัวตามร่องล้อ (Rutting) ของวัสดุปะซ่อมผิวทางแบบมวลรวมผสมเย็น โดยใช้วัสดุเชื่อมประสานประเภท CMS-2h (ทล.ม. 407) และ CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 (CMS-2h + 1% Para) ทุกส่วนผสมใช้ผิวทางเก่าหรือ Recycled Asphalt Pavement (RAP) เป็นมวลรวม สำหรับจำนวนครั้งที่ล้อวิ่งผ่าน (Number of Wheel Passes) ของเครื่อง Three-Wheel Polishing Machine คำนวณได้โดยใช้จำนวนรอบการขัด (Number of Polishing Cycle) คูณด้วย 3 (3 ล้อ/รอบ) จะเห็นได้จากรูปที่ 3-1 ว่าวัสดุปะซ่อมฯ ที่ใช้ CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 ให้ค่า Rutting สูงกว่าวัสดุที่ใช้ CMS-2h ปกติเป็นส่วนผสม ซึ่งอาจจะไม่เป็นผลดีนักเมื่อนำไปใช้งานจริง เพราะผลิตภัณฑ์จากยางพาราที่ทำการผสมในโครงการนี้จะส่งผลให้พื้นที่ปะซ่อมเกิดการยุบตัวเนื่องจากการจราจรได้เร็วกว่าวัสดุที่กรมทางหลวงใช้อยู่เดิม

ค่าการยุบตัวตามแนวร่องล้อ (Rutting) ของวัสดุปะซ่อม



รูปที่ 3-1 ค่าการยุบตัวของวัสดุปะซ่อมฯ ตามแนวร่องล้อ (Rutting) ต่อจำนวนครั้งที่ล้อวิ่งผ่าน



รูปที่ 3-2 แสดงการเกิดร่องล้อ (Rutting) และการร่อนหลุด (Stripping) ของวัสดุปะซ่อม

วัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

เช่นเดียวกับวัสดุปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น วัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทางได้รับการจำลองให้รับสภาพการใช้งานจริงโดยเครื่อง Three-Wheel Polishing Machine วัสดุอุดซ่อมรอยแตกชนิดเทอร์ออน (Joint Sealant) ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 ถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานกับ Joint Sealant ผสมยางพาราร้อยละ 1 วัสดุทั้งสองชนิดได้ถูกนำมาอุดซ่อมรอยแตกจำลอง และถูกขัดสีภายใต้สภาวะเปียกด้วยล้อยางและน้ำหนักกดทับเป็นจำนวน 30,000 ครั้ง (10,000 รอบ) การจำลองการใช้งานดังกล่าวได้ดำเนินการภายใต้การปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง (28 °C – 30 °C) ผลการศึกษาพบว่า Joint Sealant ตามมาตรฐาน ทล.ม. 328 และส่วนผสมที่มียางพาราร้อยละ 1 สามารถอุดซ่อมรอยแตกจำลองอยู่ได้โดยไม่หลุดร่อน วัสดุอุดซ่อมรอยแตกที่มีส่วนผสมของยางพาราจะมีความอ่อนตัวกว่า เมื่อใช้นิ้วมือกดลงไปหลังจากจำลองสภาพการใช้งาน (รูปที่ 3-3) ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับผลการทดสอบ Direct Shear Test โดย Joint Sealant ที่มีส่วนผสมของยางพาราจะมีความยืดหยุ่นสูงกว่า Joint Sealant ตามมาตรฐาน ทล.ม. 328

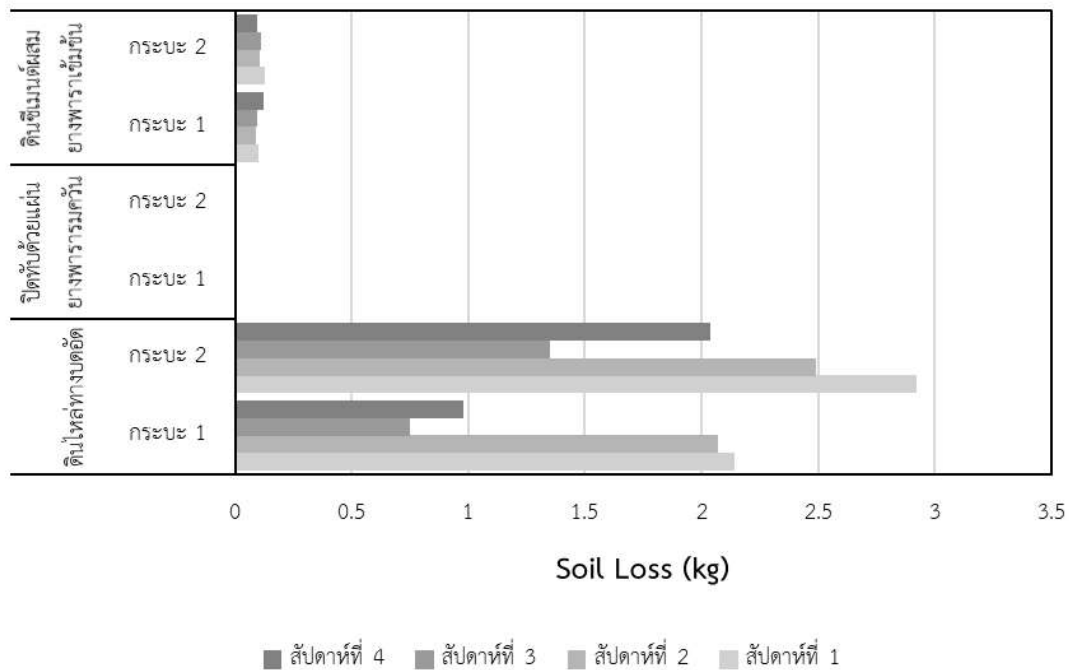


รูปที่ 3-3 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกตาม ทล.ม. 328 และส่วนผสมที่มียางพาราร้อยละ 1 หลังจากจำลองสภาพการใช้งานด้วยเครื่อง Three-Wheel Polishing Machine

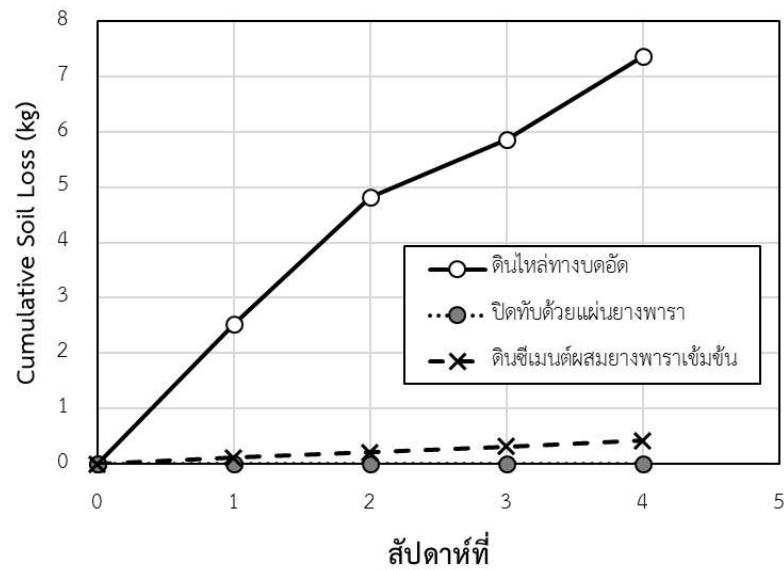


วัตถุประสงค์ป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

รูปที่ 3-4 แสดงค่า Soil Loss (SL) ของกระบะทดสอบทั้ง 6 หลังการจำลองฝนตก ส่วนปริมาณ Cumulative Soil Loss เฉลี่ยของแต่ละวัสดุได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-5 ผลการทดสอบบ่งชี้ให้เห็นว่ากระบะที่ถูกปิดทับด้วยแผ่นยางพาราไม่มีดินที่ถูกกัดกร่อนออกมาเลย ตลอดระยะเวลา 1 เดือน (4 สัปดาห์) ที่ทำการทดสอบ ส่วนกระบะที่บรรจุวัสดุไหลทางบดอัดมีการสูญเสียหน้าดินสะสมไปมากกว่า 7 กิโลกรัมภายใน 1 เดือน ส่วนดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัดมีการสูญเสียหน้าดินสะสมเพียง 0.5 กิโลกรัมเท่านั้น นอกจากนี้ รูปที่ 3-4 ยังแสดงให้เห็นว่าลาดดินไหลทางบดอัดที่ถูกกัดกร่อนด้วยน้ำฝนจำลองเริ่มมีปริมาณลดลงในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากดินเม็ดละเอียดที่ปิดทับอยู่บริเวณหน้าลาดดินได้ถูกชะล้างไปเกือบทั้งหมดในสัปดาห์แรกและสัปดาห์ที่ 2 อัตราการสูญเสียหน้าดินของกระบะทดสอบที่บรรจุดินไหลทางบดอัดจึงลดลงในสัปดาห์ต่อมา

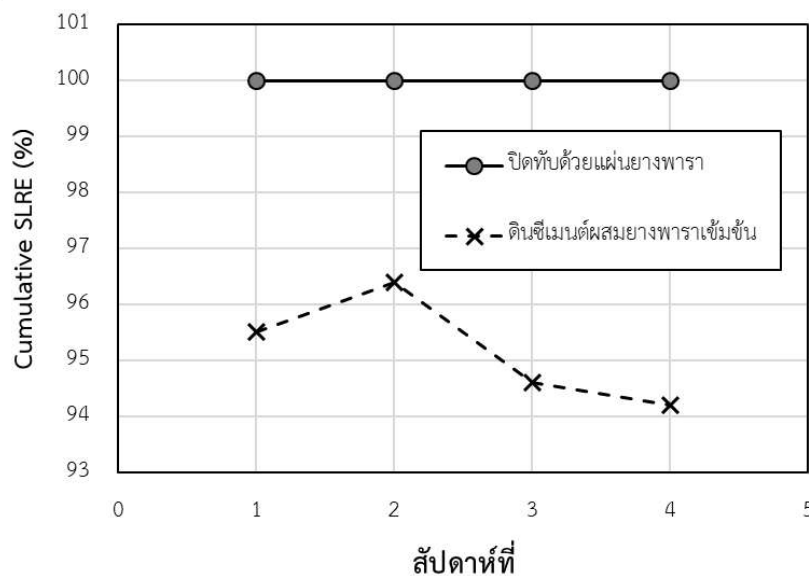


รูปที่ 3-4 น้ำหนักดินที่สูญเสียไป (Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำฝนจำลองในแต่ละสัปดาห์



รูปที่ 3-5 น้ำหนักดินที่สูญเสียม (Cumulative Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำฝนจำลองในแต่ละสัปดาห์

รูปที่ 3-6 แสดงผลการทดสอบและค่า Cumulative Soil Loss Relative Efficiency (SLRE) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากการเทียบเคียงการสูญเสียน้ำดินกับกระบะทดสอบที่บรรจุดินโหล่ทางบดอัดหรือวัสดุควบคุม (Control) จะเห็นได้ว่ากระบะทดสอบที่ถูกปิดทับด้วยแผ่นยางพารามีค่า Cumulative SLRE สูงถึง 100% เนื่องจากไม่มีการสูญเสียน้ำดินเลยตลอด 1 เดือนที่ทำการทดสอบ ส่วนกระบะที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นมีค่า Cumulative SLRE อยู่ระหว่าง 94% - 97%

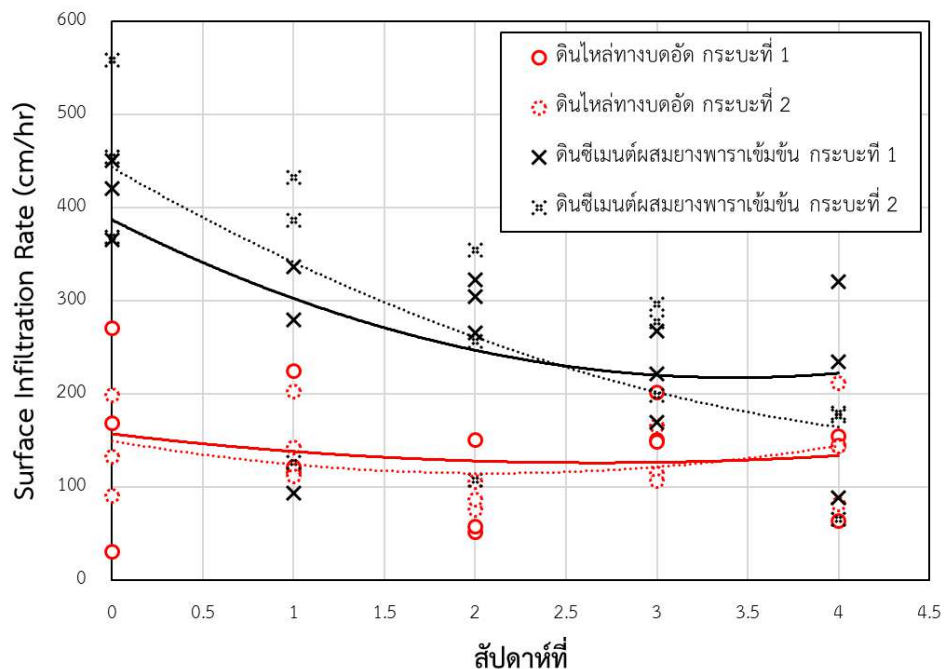


รูปที่ 3-6 น้ำหนักดินที่สูญเสียม (Cumulative Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำฝนจำลองในแต่ละสัปดาห์



รูปที่ 3-7 แสดงค่าความซึมน้ำที่ผิวดิน (Soil Surface Infiltration) ของวัสดุ ที่ตรวจวัดจาก กระบะทดสอบหลังจากการจำลองฝนตกเป็นระยะเวลา 1 เดือน (ค่าที่ตรวจวัดในสัปดาห์ที่ 0 คือ ค่าที่ วัดก่อนการจำลองฝนตก) แม้ว่าค่า Surface Infiltration จะแตกต่างกันมากในแต่ละจุดที่ทำการวัด แต่เส้นแนวโน้มแสดงให้เห็นว่าดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด มีค่าความซึมน้ำที่ผิวดินสูงกว่า ดินไหลทางบดอัด ผลการทดสอบนี้ยืนยันผลการทดสอบ Permeability ที่พบจากการประยุกต์ใช้ เครื่อง Triaxial Test โดยค่า Permeability ของตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นมีค่าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับดินไหลทางบดอัดซึ่งเป็นวัสดุที่บดน้ำ ทั้งนี้ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการใช้ตัวอย่างที่มี ขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม.) โดยเตรียมตัวอย่างให้มีเม็ดดินขนาดโตที่สุดไม่เกิน 5 มม. นอกจากนี้ รูปที่ 3-7 ยังแสดงให้เห็นว่า ค่าความซึมน้ำของดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น มีแนวโน้ม ลดลงเมื่อจำนวนครั้งการจำลองฝนตกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความซึมน้ำของดินไหลทางบดอัดมีแนวโน้ม คงที่

จากผลการทดสอบเพื่อจำลองสภาพการใช้งานพบว่า ดินซีเมนต์ผสมยางพารามีความสามารถ ที่จะใช้เพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดดินได้ นอกจากนี้ ยังมีความพรุนสูง ส่วนแผ่นยางพารารมควัน สามารถนำมาใช้ป้องกันหน้าดินได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาที่ทดสอบ วัสดุทั้งสองชนิดในโครงการนี้มีการดำเนินการเพียง 1 เดือนเท่านั้น



รูปที่ 3-7 Surface Infiltration rate (cm/hr) ของวัสดุในกระบะทดสอบ วัดหลังจากการจำลองฝนตก



3.2 ผลวิเคราะห์ความเหมาะสมทางวิศวกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากผลวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุจากการจำลองสภาพการใช้งานที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าทางที่ปรึกษาได้ทดสอบวัสดุสำหรับงานทั้ง 3 ประเภท อันได้แก่ (1) งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น (2) งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง และ (3) งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง โดยแต่ละประเภท สามารถสรุปรายละเอียดของวัสดุและส่วนผสมที่นำมาทดสอบได้ ดังนี้

1. งานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น
 - 1.1 แผ่นวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง CMS-2h
 - ยางมะตอยชนิดเออี (Asphalt Emulsion) แข็งตัวเร็วปานกลาง เกรด CMS-2h
 - 1.2 แผ่นวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1
 - ยางมะตอยชนิดเออีแข็งตัวเร็วปานกลาง เกรด CMS-2h
 - น้ำยางพาราเข้มข้นชนิด High Ammonia (HA)
 - สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ ชนิด NP9 (Nonyl Phenol Ethoxylate-NPE)
2. งานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง
 - 2.1 วัสดุอุดซ่อมรอยต่อชนิดเทอร์ออน (Joint Sealant)
 - วัสดุอุดซ่อมรอยต่อชนิดเทอร์ออนตามมาตรฐานกรมทางหลวง
 - 2.2 วัสดุอุดซ่อมรอยต่อชนิดเทอร์ออนผสมยางพาราร้อยละ 1
 - วัสดุอุดซ่อมรอยต่อชนิดเทอร์ออนตามมาตรฐานกรมทางหลวง
 - น้ำยางพาราเข้มข้นชนิด High Ammonia (HA)
3. งานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง
 - 3.1. ดินไหลทางบดอัด
 - วัสดุดินไหลทาง (อ้างอิงราคาจากราคาจากการสืบราคา)
 - 3.2. ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด
 - วัสดุหินคลุก
 - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนถุง ประเภท 1 บรรจุ 50 กก./ถุง
 - น้ำยางพาราเข้มข้นชนิด High Ammonia (HA)
 - สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ ชนิด NP9 (Nonyl Phenol Ethoxylate-NPE)
 - 3.3. ดินไหลทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน
 - วัสดุหินคลุก
 - ยางแผ่นรมควัน ชั้น 3



จากนั้นทางที่ปรึกษาได้รวบรวมข้อมูลค่าวัสดุต่าง ๆ ที่ได้ใช้ในการทดสอบจากแหล่งข้อมูลดังต่อไปนี้

- ฐานข้อมูลดัชนีเศรษฐกิจการค้า (<http://www.price.moc.go.th>)
- สมาคมน้ำยางข้นไทย (<http://tla-latex.org/show-rubber-price.php>)
- การยางแห่งประเทศไทย (<http://www.rubber.co.th>)
- สื่อบราคาจากโรงโม่หินบ้านศิลา จ. สุโขทัย

พร้อมทั้งแจกแจงรายละเอียดปริมาณของวัสดุต่าง ๆ ในภาคผนวกท้ายเล่ม โดยอ้างอิงปริมาณที่ใช้จากการจำลองสภาพการใช้งานระหว่างการศึกษาของโครงการ และยังมีได้รวมต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากค่าแรงแต่อย่างใด เพื่อทำเป็นราคากลางของวัสดุและผลิตภัณฑ์ยางพารา มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโครงการ

จากการคำนวณราคาต้นทุนการผลิต โดยมีได้รวมค่าแรง พบว่าการนำยางพารามาเป็นส่วนผสมเพิ่มเติมจากวัสดุทางงานทางปกติ จะทำให้ต้นทุนของวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของยางพาราที่เดิมมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณวัสดุเดิมที่ใช้อยู่ แต่สารเคมีหรือ วัสดุเพิ่มเติมที่นำมาใช้มีราคาต่อหน่วยที่แพงกว่าวัสดุเดิม จึงเป็นผลให้การนำยางพารามาเป็นส่วนผสมเพิ่มเติมจากวัสดุทางงานปกติ มีต้นทุนของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3-1 การวิเคราะห์ต้นทุนของวัสดุแต่ละประเภท

ประเภทวัสดุ		ราคาวัสดุ	ราคาที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุเดิม (%)
ประเภทวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง			
1	แผ่นวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง CMS-2h	75.73	
2	แผ่นวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1	82.98	9.6
ประเภทวัสดุอุดซ่อมรอยต่อ			
1	วัสดุอุดซ่อมรอยต่อ Joint Sealant	1,502.00	
2	วัสดุอุดซ่อมรอยต่อ Joint Sealant ผสมยางพาราร้อยละ 1	1,518.19	1.1
ประเภทวัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง			
1	ดินไหล่ทางบดอัด	100.00	
2	ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด	4,346.25	960.0
3	ดินไหล่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน	790.25	92.7

หมายเหตุ : เป็นราคาจากการจัดซื้อในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้นและยังมีได้รวมต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากค่าแรงแต่อย่างใด





ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งวัสดุสำหรับงานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น และงานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง ที่นำการประยุกต์ใช้ยางพาราเข้ามาเป็นส่วนผสม มิได้ทำให้คุณสมบัติ หรือประสิทธิภาพในการใช้งานดีขึ้น แต่ในทางกลับกัน ต้นทุนของการผลิตวัสดุทั้งสองชนิดเมื่อผสมยางพาราแล้วเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ได้ผสมยางพารา จึงสรุปได้ว่า ทั้งวัสดุสำหรับงานปะซ่อมผิวทางด้วยวัสดุมวลรวมผสมเย็น และงานอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง ไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

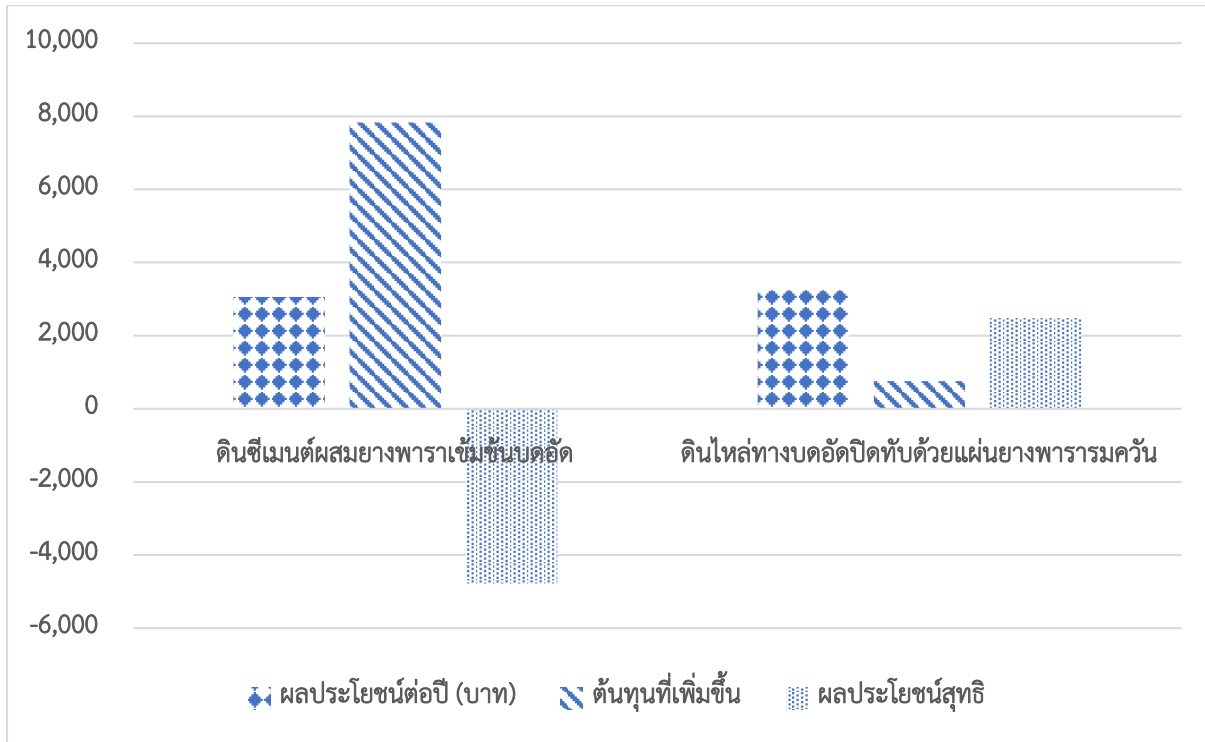
ในส่วนของวัสดุสำหรับงานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง จะเห็นได้ว่าเมื่อนำยางพารา มาประยุกต์ใช้สามารถป้องกันการชะล้างพังทลายได้ดีขึ้นภายในระยะเวลา 1 เดือนที่ทำการทดสอบ ทางที่ปรึกษา จึงวิเคราะห์ผลประโยชน์ที่ได้จากการป้องกันการสูญเสียน้ำดินสะสมโดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

- พิจารณาเสมือนเป็นสายทางที่มีลาดคันทางเอียง 11.3 องศา กว้าง 1.5 เมตร
- ระยะทาง 1 กิโลเมตร โดยมีลาดคันทั้ง 2 ข้างของสายทาง
- เทียบเท่ากับการชะล้างโดยปริมาณน้ำฝนสะสม 10 ซม./สัปดาห์ หรือเทียบเท่ากับปริมาณน้ำฝนสะสม 40 ซม./เดือน
- สมมติฐานให้ 1 ปีมีช่วงฝนตก เป็นระยะเวลา 6 เดือน
- ราคาดินถมที่ใช้ในการทดสอบ 100 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 55 บาทต่อตัน
- อ้างอิงการสูญเสียน้ำดินจากข้อมูลน้ำหนักดินที่สูญเสียน้ำดินสะสม (Cumulative Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำฝนจำลองในหนึ่งเดือนจะสามารถคำนวณปริมาณดินที่สูญเสียน้ำดิน

ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลประโยชน์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิต ระหว่างดินไหลทางบดอัดปกติกับการประยุกต์ใช้ยางพาราเพื่อการป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-2 วิเคราะห์ผลประโยชน์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิต

ชนิดวัสดุ	ราคาเพิ่มขึ้นจากวัสดุเดิม (%)	ผลประโยชน์ต่อต้นทุนที่เพิ่มขึ้น (B/C)
ดินไหลทางบดอัด		
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด	960.0	0.39
ดินไหลทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน	92.7	4.27



รูปที่ 3-8 การวิเคราะห์ผลประโยชน์จากการนำยางพารามาประยุกต์ใช้ในงานป้องกันการชะล้าง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อนำยางพารามาประยุกต์ใช้ในงานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทางในระยะสั้นสามารถป้องกันการชะล้างพังทลายได้ดีขึ้น โดยจากมีสมมุติฐานและข้อจำกัดต่อไปนี้

- ราคาตั้งกล่าวยังมีได้รวมค่าแรงที่จะเพิ่มขึ้นจากการนำยาพารามาประยุกต์ใช้
- ราคาที่ทางที่ปรึกษาใช้เป็นราคา ณ วันที่ 18 มิถุนายน 2562
- ราคาที่แสดงจากการจัดซื้อในขนาดและปริมาณสำหรับระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น
- วิธีการผสม และส่วนผสมอ้างอิงจากขั้นตอนการกระบวนการเตรียมวัสดุที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้

ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัดมีผลประโยชน์ต่อต้นทุนลดลงเหลือเพียง 0.78 หรือลดลงร้อยละ 22 ส่วนดินโหล่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควันแม้จะมีผลประโยชน์ต่อต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเป็น 8.53 อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดเซาะของดินซีเมนต์ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมในรูปแบบเดียวกัน รวมถึงการป้องกันการกัดเซาะในระยะยาว


3.3 สรุปผลการศึกษา

1) วัสดุซ่อมผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเย็น

1. วัสดุส่วนผสมและวิธีการผสม

วัสดุตามมาตรฐาน


: Asphalt Emulsion (CMS-2h)
ผสมมวลรวมหินคลุก [มาตรฐาน ทล.-ม. 407]



CMS-2h

วัสดุที่ใช้ในโครงการ

: Asphalt Emulsion (CMS-2h)
ผสมยางพาราเข้มข้น + มวลรวมหินคลุก



CMS-2h
ผสมยางพาราร้อยละ 1

: Asphalt Emulsion (CMS-2h)
ผสมยางพาราเข้มข้น + Recycled Asphalt Pavement



CMS-2h
ผสมยางพาราร้อยละ 3

: Asphalt Emulsion (CMS-2h)
ผสมยางพาราเข้มข้น + Recycled Asphalt Pavement



CMS-2h
ผสมยางพาราร้อยละ 5

ส่วนผสมเพิ่มเติม

- ยางพาราเข้มข้น
- สารลดแรงตึงผิว



Post-modification

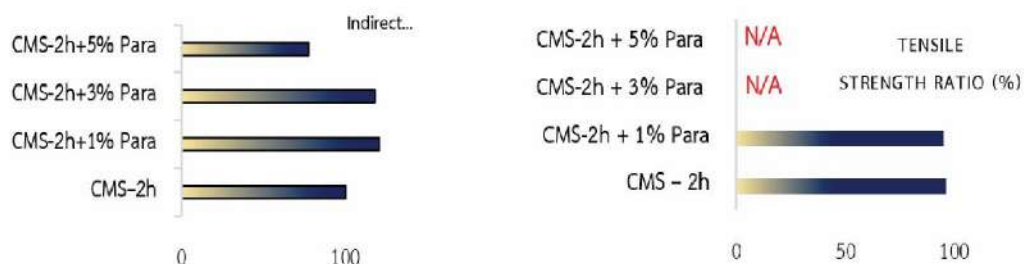
- ผสมในโรงงานด้วยเครื่อง Colloid Mill
- ผสมที่หน้างาน (ด้วยมือ) ก่อนใช้งาน

2. การทดสอบ (ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM D6931 - 17)

วัสดุผสมรวมหินคลุกไม่จับตัวกับ binder จึงมีการทดสอบเพิ่มเติม

- CMS-2h เคลือบผิวหินปูนดีกว่าหินแกรนิต และบะซอลต์
- ยางพาราเข้มข้นทำให้ส่วนผสมมีค่า pH เพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการเคลือบผิวของ binder ลดลง

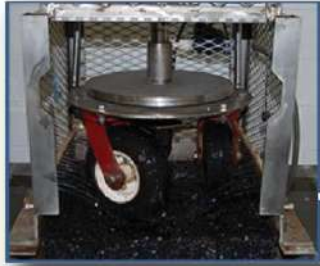
ผลการทดสอบ IDT และ TSR (ดังกราฟ) เป็นส่วนผสมของ Recycled Asphalt Pavement ซึ่งจับตัวกับ Binder ดีกว่า



3. จำลองการใช้งาน

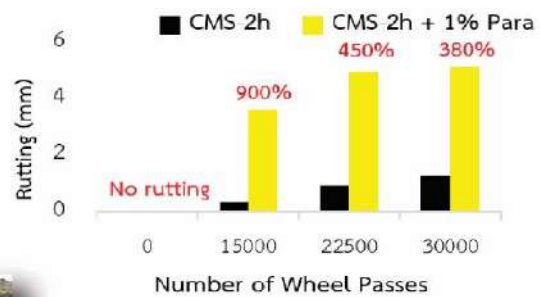
CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 ใช้วัสดุมวลรวม RAP จำลองการใช้งาน

- ส่วนผสมมียางพารา ทำให้ราคาวัสดุเพิ่มขึ้นร้อยละ 10
- แร่งดิ่งทางอ้อม Recycled Asphalt Concrete (RAP) เพิ่มขึ้นร้อยละ 20
- ประสิทธิภาพการเคลือบผิวลดลง
- เกิดการยุบตัว (ร่องล้อ) เพิ่มขึ้น
- ส่วนผสมวัสดุโครงการนี้มีเพียง น้ำยางพาราเข้มข้น สารลดแรงตึงผิว และแอสฟัลต์ดีอิมัลชัน (CMS-2h)



CMS-2h

CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1



4. สรุปผล

วัสดุ	คุณสมบัติทางวิศวกรรม		ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	
	การทดสอบ	ทดสอบการใช้งาน	ราคาวัสดุ (บาท/ตร.ม)	ราคาที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุเดิม (%)
CMS-2h	ค่า IDT ต่ำกว่า CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1	การยุบตัวน้อยกว่า CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1	80	/
CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1	ค่า IDT สูงกว่า CMS-2h ร้อยละ 20	การยุบตัวมากกว่า CMS-2h ร้อยละ 375	85	


2) วัสดุอุดซ่อมรอยแตกจากการเคลื่อนตัวของคันทาง

1. วัสดุส่วนผสมและวิธีการผสม

วัสดุตามมาตรฐาน

↓


Joint Sealant
[มาตรฐาน มอก. 479]




Joint Sealant

วัสดุที่ใช้ในโครงการ


Joint Sealant ผสมยางพารา



Joint Sealant
ผสมยางพาราร้อยละ 1




Joint Sealant
ผสมยางพาราร้อยละ 3



Joint Sealant
ผสมยางพาราร้อยละ 5


ส่วนผสมเพิ่มเติม

- ยางพาราเข้มข้น

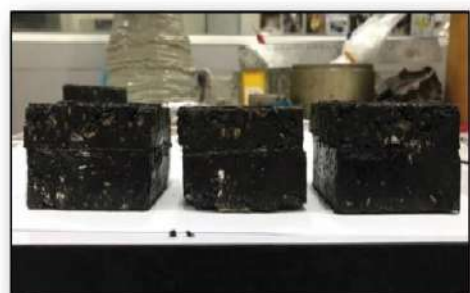


ผสมในโรงงานด้วย High Shear Mixer*
*เช่นเดียวกับกับการผลิต Para Asphalt

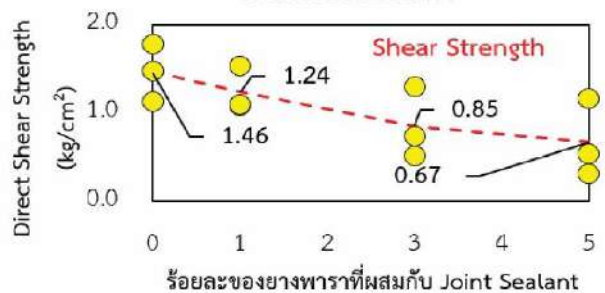
2. การทดสอบ (ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM D6931 - 17)



Modified Direct Shear Test



กำลังรับแรงเฉือนตรง

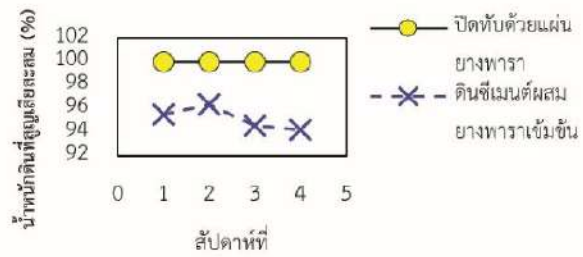
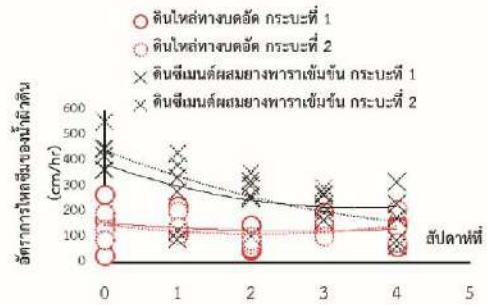


ร้อยละของยางพาราที่ผสมกับ Joint Sealant	Direct Shear Strength (kg/cm ²)
0	1.46
1	1.24
3	0.67
5	0.85

3. จำลองฝนตกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบค่าความซึมน้ำที่ผิวดิน

- (1) ดินโหล่ทางบดอัด
- (2) ดินโหล่ทางบดอัดปิดทับด้วยยางพาราแผ่นรมควัน
- (3) ดินโหล่ทางซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น วัสดุละ 2 กระบะ



4. สรุปผล

วัสดุ	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
ดินบดอัด	ต่ำที่สุด	ที่บ้น้ำ
ดินซีเมนต์บดอัด	สูงกว่าดินโหล่ทางบดอัด 5 เท่า	ที่บ้น้ำ
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	สูงกว่าดินโหล่ทางบดอัด 3 เท่า	มีความพรุนน้ำซึมผ่านได้
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	สูงกว่าดินโหล่ทางบดอัด 2 เท่า	มีความพรุนสูง น้ำซึมผ่านเร็วที่สุด

วัสดุ	ประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้าง	ค่าความซึมน้ำที่ผิวดิน	ราคาวัสดุ (บาท/ตร.ม)	ราคาที่เพิ่มขึ้นจากวัสดุเดิม (%)
ดินบดอัด	ต่ำที่สุด	ปานกลาง	410	-
ดินบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน	ดีที่สุด 100%	ที่บ้น้ำ	790	95
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	ปานกลาง (94% - 97%)	สูงที่สุด	4,346	960

3) วัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

1. วัสดุส่วนผสมและวิธีการผสม

วัสดุตามมาตรฐาน

[มาตรฐาน ทล.-ม. 207]



ดินไหลทาง

วัสดุที่ใช้ในโครงการ



ดินซีเมนต์



ดินซีเมนต์ผสม
ยางพาราเข้มข้น



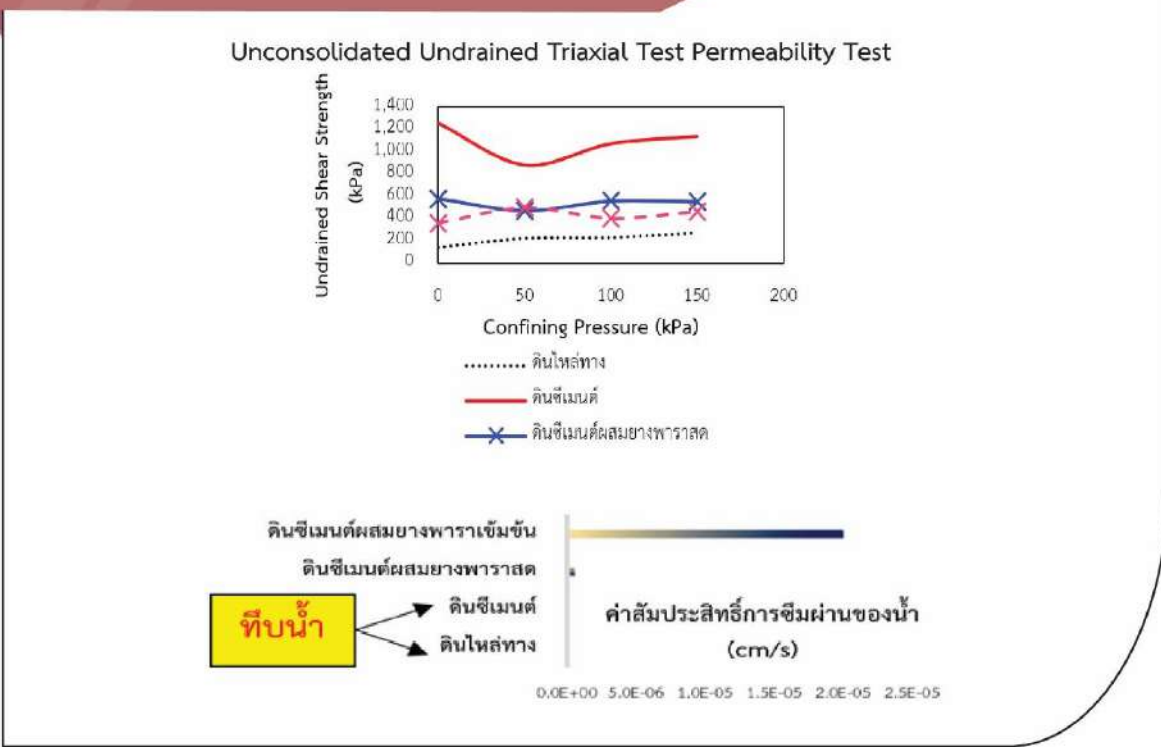
ดินซีเมนต์ผสม
ยางพาราสด

ส่วนผสมเพิ่มเติม

- ยางพาราสด
- ยางพาราเข้มข้น
- สารลดแรงตึงผิว
- ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 2*

*ดินไหลทาง/ดินไหลทางซีเมนต์บดอัด ผสมสารละลายที่ OMC
 *สารละลายประกอบด้วย ยางพารา น้ำ และสารลดแรงตึงผิว เท่านั้น
 *ออกแบบส่วนผสม โดยอ้างอิงมาตรฐาน ทล.-ม. 206 มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์

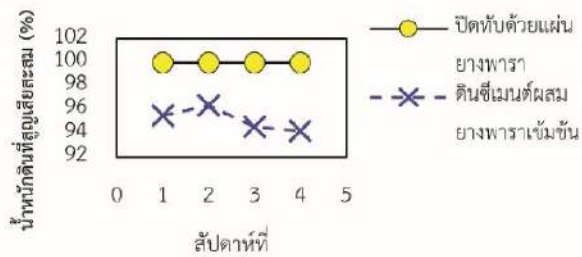
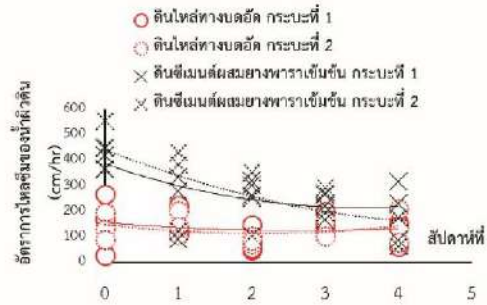
2. การทดสอบ (ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM D2850)



3. จำลองฝนตกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ

การทดสอบค่าความซึมน้ำที่ผิวดิน

- (1) ดินโคลนทางบดอัด
- (2) ดินโคลนทางบดอัดปิดทับด้วยยางพาราแผ่นรมควัน
- (3) ดินโคลนทางซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น วัสดุละ 2 กระบะ



4. สรุปผล

วัสดุ	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
ดินบดอัด	ต่ำที่สุด	ที่บ่น้ำ
ดินซีเมนต์บดอัด	สูงกว่าดินโคลนทางบดอัด 5 เท่า	ที่บ่น้ำ
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	สูงกว่าดินโคลนทางบดอัด 3 เท่า	มีความพรุนน้ำซึมผ่านได้
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	สูงกว่าดินโคลนทางบดอัด 2 เท่า	มีความพรุนสูง น้ำซึมผ่านเร็วที่สุด

วัสดุ	ประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้าง	ค่าความซึมน้ำที่ผิวดิน	ราคาวัสดุ (บาท/ตร.ม)	ราคาเพิ่มขึ้นจากวัสดุเดิม (%)
ดินบดอัด	ต่ำที่สุด	ปานกลาง	410	-
ดินบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน	ดีที่สุด 100%	ที่บ่น้ำ	790	
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	ปานกลาง (94% - 97%)	สูงที่สุด	4,346	



รูปที่ 3-9 แสดงภาพรวมของการดำเนินงานโครงการ ซึ่งจากการทดสอบวัสดุสำหรับงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวงในห้องปฏิบัติการ และการจำลองสภาพการใช้งานให้เหมาะสมกับวัสดุและผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทในโครงการนี้ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและประสิทธิภาพของวัสดุทางด้านวิศวกรรม เมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ จะสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ข้อ 1: การวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมยางพาราในห้องปฏิบัติการและจำลองสภาพการใช้งาน

- ผลิตภัณฑ์จากยางพาราในโครงการนี้ ไม่มีการเติมสารปรับปรุงคุณภาพวัสดุ เช่น โพลีเมอร์ น้ำยาดัดแปร (Modified Rubber Latex) สารปรับสภาพความเป็นกรดต่าง หรือ emulsifier อื่นใดเพิ่มเติม ซึ่งผลการศึกษาบ่งชี้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้ มีประสิทธิภาพทางวิศวกรรมดีกว่าวัสดุที่กรมทางหลวงใช้อยู่เดิม
- ส่วนผสมของวัสดุรวมผสมเย็นสำหรับปะซ่อมผิวทางที่ใช้ในโครงการนี้มีเพียง (1) แอสฟัลต์ อิมัลชัน (2) ยางพาราเข้มข้น และ (3) สารลดแรงตึงผิว
- ผลการทดสอบ IDT และ TSR ของวัสดุปะซ่อมที่มีส่วนผสมยางพารา (CMS-2h ผสมยางพาราที่อัตราส่วนต่าง ๆ) แสดงให้เห็นว่า IDT ของส่วนผสมที่มียางพาราร้อยละ 1 และใช้วัสดุรวมประเภท RAP สามารถรับแรงดึงทางอ้อมได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานเทียบกับวัสดุปะซ่อมตามมาตรฐานกรมทางหลวง (CMS-2h) พบว่า ผลิตภัณฑ์จากยางพาราเสียหายเร็วกว่า และเกิดร่องล้อลึกกว่าหลังจากทดสอบด้วยเครื่อง Three-Wheel Polishing Device (TWPD)
- การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพิ่มเติมพบว่าเมื่อผสมยางพาราเข้มข้น และสารลดแรงตึงผิวกับแอสฟัลต์อิมัลชัน (CMS-2h) แล้วทำให้ pH ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการยึดเกาะกับผิวมวลรวมด้อยลง
- ส่วนผสมของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกที่ใช้ในโครงการนี้มีเพียง (1) วัสดุอุดซ่อมรอยแตกชนิดเทร้อน และ (2) ยางพาราเข้มข้น
- การทดสอบ Direct Shear Test ของวัสดุอุดซ่อมรอยแตกผสมยางพาราแสดงให้เห็นว่า Joint Sealant ที่มีส่วนผสมยางพาราจะมีกำลังรับแรงเฉือนลดลงเมื่อปริมาณเนื้อยางที่เป็นส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น แต่มีความยืดหยุ่น (Ductility) ดีกว่า Joint Sealant ที่ไม่ได้ใส่ยางพาราเพิ่มเติม พฤติกรรมเช่นเดียวกันนี้ปรากฏให้เห็นระหว่างการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุด้วย TWPD
- ส่วนผสมดินซีเมนต์ผสมยางพาราในโครงการนี้ไม่ได้ใส่น้ำยาดัดแปร (Modified Rubber Latex) หรือสารผสมเพิ่มเติม ๆ เพิ่มเติม
- ยางพาราสดไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากมีอายุสั้น (4 – 6 ชม.) เมื่อเทียบกับยางพาราเข้มข้นที่มีการใส่สารละลายแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพ และเก็บรักษาได้นานกว่า



- วัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง เมื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และ Permeability แล้ว พบว่า

วัสดุ	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	Permeability
ดินบดอัด	ต่ำที่สุด	ที่บ้น้ำ
ดินซีเมนต์บดอัด	สูงที่สุด	ที่บ้น้ำ
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสด	สูงกว่าดินไหล่ทางบดอัด	มีความพรุน น้ำซึมผ่านได้
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	สูงกว่าดินไหล่ทางบดอัด	มีความพรุนสูง น้ำซึมผ่านเร็วที่สุด

ดินซีเมนต์ผสมยางพาราถูกเลือกเป็นวัสดุที่จะนำไปทดสอบประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้างของดินไหล่ทางบดอัด ดินไหล่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพาราธรรมควัน และดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น ภายในระยะเวลา 30 วัน พบว่า

วัสดุ	ประสิทธิภาพการป้องกันการชะล้าง	Surface Infiltration
ดินบดอัด	ต่ำที่สุด	ปานกลาง
ดินบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพาราธรรมควัน	ดีที่สุด	ที่บ้น้ำ
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น	ปานกลาง	สูงที่สุด

- เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและจำลองสภาพการใช้งานร่วมกัน สามารถสรุปได้ดังนี้
 - ดินซีเมนต์ผสมยางพาราบดอัดสามารถป้องกันการชะล้าง กัดกร่อนหน้าดินเนื่องจากน้ำฝนได้มีประสิทธิภาพปานกลาง แต่ การที่ดินซีเมนต์ผสมยางพาราที่มีความพรุนสูง อาจส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางได้รับผลกระทบเนื่องจากความชื้นในระยะยาว
 - แม้ว่าแผ่นยางพาราธรรมควัน จะสามารถป้องกันการชะล้าง กัดกร่อนหน้าดินเนื่องจากน้ำฝนได้ดีที่สุดในวัสดุที่ทำการทดสอบ 3 ประเภท (ระหว่างช่วงระยะเวลาทดสอบ 30 วัน)



วัตถุประสงค์ข้อที่ 2: การวิเคราะห์ความเหมาะสมด้านวิศวกรรมและความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำผลผลิตไปใช้ประโยชน์ในงานทาง

- วัสดุปะซ่อมผิวทางแบบมวลรวมผสมเย็นและวัสดุอุดซ่อมรอยแตกที่มียางพาราเป็นส่วนผสม ซึ่งใช้วัสดุและวิธีการผสมตามรายละเอียดที่แสดงอยู่ในบทที่ 2 ของรายงาน มิได้ส่งผลให้คุณสมบัติ หรือ ประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมดีขึ้น แต่ต้นทุนของการผลิตวัสดุทั้ง 2 ชนิด เมื่อผสมยางพาราแล้วกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุที่กรมทางหลวงใช้อยู่เดิม จึงสามารถสรุปได้ว่า ทั้งวัสดุประเภทปะซ่อมผิวทางและวัสดุประเภทอุดซ่อมรอยแตกไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
- เมื่อนำยางพารามาประยุกต์ใช้ในงานป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง สามารถป้องกันการชะล้างหน้าดินเนื่องจากน้ำฝนได้ และอาจมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์* (เนื่องจากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้จากผลการทดลองเพียง 1 เดือนเท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงอายุการเสื่อมสภาพของยางพารา) เมื่อใช้วัสดุและอัตราส่วนผสมตามที่รายงานไว้ในบทที่ 2



โครงการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ยางพาราในงานซ่อมบำรุงผิวทางหลวง

ทบทวนวรรณกรรม

ผลิตภัณฑ์จากยางพารา

วัสดุปะซ่อมผิวทางผิวทางด้วยวัสดุผสมรวมผสมเขิน

การออกแบบส่วนผสม

- Colloid Mill Machine
- ผสมในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบ

- Indirect tensile test
- Tensile strength ratio

$$IDT = \frac{2P}{\pi D T}$$

$$TSR = \frac{IDT \text{ of Soaked}}{IDT \text{ of Unsoaked}} \times 100$$

เลือก CMS-2h + ยางพาราร้อยละ 1 ไปทดสอบประสิทธิภาพด้านทานการขัดสีเทียบกับวัสดุ CMS-2h

การจำลองสภาพการใช้งาน

ค่าการสูญเสียหินมวลรวมรอง (Spalling) ของวัสดุปะซ่อม

สรุปผล

- ✓ CMS-2h + 1% Para และใช้วัสดุ Rap ให้ค่า IDT ได้ดีที่สุด
- ✓ ประสิทธิภาพการใช้งาน CMS-2h + 1% Para มีการเสียหายเล็กน้อย และเกิดร่องลึอกมากกว่า CMS-2h
- ✓ ไม่มีการใช้สารผสมเพิ่ม/โพลีเมอร์เพิ่มเติมในโครงการนี้
- ✓ การผสมยางพาราเข้มข้น และสารลดแรงตึงผิวเข้าผสมกับ CMS-2h ทำให้ pH เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้การยึดเกาะกับผิวมวลรวมลดต่ำลง

วัสดุอุดซ่อมรอยแตก

การออกแบบส่วนผสม

- วัสดุอุดรอยต่อชนิดเทอร์นผสมกับน้ำยางพาราเข้มข้นโดยใช้เครื่อง High Shear Mixer

การทดสอบ

- Direct Shear Test

นำ Joint Sealant + ยางพาราร้อยละ 1 ไปทดสอบประสิทธิภาพด้านทานการขัดสีเทียบกับวัสดุ Joint Sealant ปกติ

การจำลองสภาพการใช้งาน

สรุปผล

วัสดุ	กำลังรับแรงเฉือน แบบปรายยาเป่า	Permeability
กันบดก	ต่ำที่สุด	กันน้ำ
กันซึมกันบดก	สูงที่สุด	กันน้ำ
กันซึมกันบดก	สูงว่ากันเป่ายาง	มีความพรุน
ยางพาราปกติ	ปกติ	ปานกลาง
กันซึมกันบดก	สูงว่ากันเป่ายาง	มีความพรุนสูง
ยางพาราเข้มข้น	ปกติ	ปานกลางถึงที่สุด

วัสดุ	ประสิทธิภาพการ ป้องกันการชะล้าง	Surface infiltration
กันบดก	ต่ำที่สุด	ปานกลาง
กันบดกติดกับผิว	ต่ำที่สุด	กันน้ำ
กันซึมยางพารากรวน	ต่ำที่สุด	กันน้ำ
กันซึมกันบดก	ปานกลาง	สูงที่สุด
ยางพาราเข้มข้น	ปานกลาง	สูงที่สุด

- ✓ ดินซีเมนต์ผสมยางพาราสามารถป้องกันการชะล้าง กัดกร่อนหน้าดินเนื่องจากน้ำฝนได้มีประสิทธิภาพปานกลางภายในระยะเวลา 1 เดือนที่ทำการทดสอบ
- ✓ ไม่มีการใช้สารผสมเพิ่ม/น้ำยาขัดแปรเพิ่มเติม

วัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง

การออกแบบส่วนผสม

- ดินโคลงทาง ดินซีเมนต์ และดินซีเมนต์ผสมยางพารา จะถูกผสมขึ้นตามอัตราส่วน

ประเภทหิน	น้ำหนักส่วนผสมแห้ง				
	กันน้ำต่ำ	กันน้ำ	น้ำ	ทราย	บดกรวด
กันน้ำต่ำ	480	-	38.4	-	-
กันน้ำ	480	9.6	39.2	-	-
กันน้ำปานกลาง	480	9.6	19.6	0.5	19.1
กันน้ำสูง	480	9.6	17.7	0.5	21.0

การทดสอบ

- Unconsolidated Undrained (UU) Triaxial test

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

$$K_T = \frac{Q \times L}{A \times h \times t}$$

นำ "ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้น" จำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนกับ

- ดินโคลงทางที่ไม่ได้รับการปรับปรุง
- ดินโคลงทางที่ถูกปิดทับด้วยแผ่นยางพารากรวน

การจำลองสภาพการใช้งาน

- เปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อน

สรุปผล

- เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำผิวดิน

รูปที่ 3-9 แสดงผลงานภาพรวมของโครงการ



ภาคผนวก ก





ตารางที่ ก-1 ตารางราคากลางวัสดุที่ใช้ในโครงการ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาวัสดุ		รวม (บาท/หน่วย)					
				ราคาหน่วย	รวมราคาวัสดุ						
ประเภทวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง											
แผ่นวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง CMS-2h [0.4 x 0.25 x 0.025 cu.m.]											
1	ยางมะตอยชนิดเออี แข็งตัวเร็วปานกลาง เกรด CMS-2h บรรจุ BULK	0.00036	ตัน	21,302.67	7.67	75.73					
	รวม						75.73				
	แผ่นวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง CMS-2h ผสมยางพาราร้อยละ 1 [0.4 x 0.25 x 0.025 cu.m.]										
2	ยางมะตอยชนิดเออี แข็งตัวเร็วปานกลาง เกรด CMS-2h บรรจุ BULK	0.00036	ตัน	21,302.67	7.67	75.73					
	น้ำยางพาราเข้มข้น						0.0000006	ตัน	37,744.70	0.02	2.24
	สารลดแรงตึงผิว NP9 (Nonyl Phenol Ethoxylate-NPE)						0.003	กิโลกรัม	169.00	0.51	5.01
	รวม						82.98				
ประเภทวัสดุอุดซ่อมรอยต่อ											
วัสดุอุดซ่อมรอยต่อ Joint Sealant [0.4 x 0.01 x 0.025 cu.m.]											
1	วัสดุยารอยต่อชนิด เทอร์รอน	0.103	กิโลกรัม	58.33	6.01	1,502.00					
	รวม						1,502.00				
วัสดุอุดซ่อมรอยต่อ Joint Sealant ผสมยางพาราร้อยละ 1 [0.4 x 0.01 x 0.025 cu.m.]											
2	วัสดุยารอยต่อชนิด เทอร์รอน	0.103	กิโลกรัม	58.33	6.01	1,502.00					
	น้ำยางพาราเข้มข้น						0.00000172	ตัน	37,744.70	0.06	16.20
	รวม						1,518.19				
ประเภทวัสดุป้องกันการชะล้างพังทลายของลาดคันทาง											
ดินไหลทางบดอัด [ขนาดกระบะ 1.5 x 1.5 x 0.3 cu.m.]											
1	วัสดุหินคลุก	1.23	ตัน	55	68	68					
	รวม						68				



ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคาค่าวัสดุ		รวม (บาท/หน่วย)
				ราคาหน่วย	รวมราคาวัสดุ	
ประเภทวัสดุที่ปะซ่อมผิวทาง						
2	ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด					
	วัสดุหินคลุก	1.23	ตัน	55	68	68
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนถุง ประเภท 1 บรรจุ 50 กก./ถุง	0.0303	ตัน	2,694.00	81.63	121.23
	น้ำยางพาราเข้มข้น	0.06124	ตัน	37,744.70	2,311.49	3,434.77
	สารลดแรงตึงผิว NP9 (Nonyl Phenol Ethoxylate-NPE)	1.52	กิโลกรัม	169.00	256.88	380.25
	รวม					4,004.25
3	ดินไถ่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่นยางพารารมควัน					
	- วัสดุหินคลุก	1.23	ตัน	55	68	68
	ยางแผ่นรมควัน ชั้น 3 [ขนาดกระบะ 1.5 x 1.5 m]	27.2	กิโลกรัม	55.89	1,520.21	675.65
	รวม					743.65

หมายเหตุ : เป็นราคาจากการจัดซื้อในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น

ตารางที่ ก-2 น้ำหนักดินที่สูญเสียสะสม (Cumulative Soil Loss) เนื่องจากการกัดกร่อนของน้ำฝนจำลองในหนึ่งเดือน

ชนิดวัสดุ	สูญเสียหน้าดิน ในการทดลอง (กิโลกรัม)	สูญเสียหน้าดินต่อ 1 กม. (กิโลกรัม)	มูลค่าดินต่อเดือน (บาท)
ดินไถ่ทางบดอัด	7.37	9,827	540
ดินซีเมนต์ผสมยางพาราเข้มข้นบดอัด	0.42	565	31
ดินไถ่ทางบดอัดปิดทับด้วยแผ่น ยางพารารมควัน	0.00	0	0



ตารางที่ ก-3 วิเคราะห์ผลประโยชน์ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิต

ชนิดวัสดุ	มูลค่าดิน ต่อเดือน (บาท)	มูลค่าดิน ต่อปี (บาท)	ผลประโยชน์ ต่อปี (บาท)	ต้นทุนที่เพิ่มขึ้น (บาท)	ผลประโยชน์ต่อ ต้นทุนที่เพิ่มขึ้น (B/C)
ดินไหลทางบดอัด	540	3,243			
ดินซีเมนต์ผสมยางพารา เข้มข้นบดอัด	31	187	3,056	7,830	0.39
ดินไหลทางบดอัดปิดทับ ด้วยแผ่นยางพารารมควัน	0	0	3,243	759.7	4.27