

การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิม  
ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเส้นลวดในยางรถยนต์

**A STUDY ON PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE  
USING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IMPROVED WITH  
TIRE-DERIVED STEEL**

ธีรเดช เอียดยอด<sup>1</sup> ชลัท ทิพากรเกียรติ<sup>2</sup> และ ภาวัด ไชยชาณาวาทิก<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่างอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, teeradetiadyod@gmail.com

<sup>2</sup>อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่างอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, chalat.t@rmutsv.ac.th

<sup>3</sup>อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250, ch.bhawat@gmail.com

Teeradet ladyod<sup>1</sup>, Chalath Tipakornkiat<sup>2</sup> and Bhawat Chaichannawatik<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2/4 Ratchadamnoennok Rd., Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand, teeradetiadyod@gmail.com

<sup>2</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2/4 Ratchadamnoennok Rd., Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand, chalat.t@rmutsv.ac.th

<sup>3</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, 1761 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250, Thailand, ch.bhawat@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับวัสดุชั้นผิวทางเดิมและปรับปรุงคุณภาพด้วยเส้นลวดในยางรถยนต์ ขนาดประมาณ 10-20 มิลลิเมตร โดยงานวิจัยนี้ได้ ออกแบบส่วนผสม กำหนดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวม หินฝุ่น, 3/8", 1/2" และ 3/4" เท่ากับ

40: 23: 17: 20 ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม งานวิจัยนี้มีการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล และ SEM พบว่าที่อัตราส่วนผสม W0.1 จะให้ค่าเสถียรภาพสูงที่สุดถึง 2,524.77 lbs ซึ่งมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาที่มีค่าเสถียรภาพเพียง 2,260 ปอนด์ และในทุก ๆ อัตราส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่ามาตรฐานทั้งหมด สอดคล้องกับการมีเส้นลวดในยางรถยนต์เป็นส่วนผสมนั้นจะเกิดการสร้างพันธะยึดเกาะกันภายในมวลรวมแอสฟัลต์ยึดเกาะกันที่ผิวหน้าของเส้นลวดในยางรถยนต์ซึ่งมีความขรุขระยึดจับกับยางแอสฟัลต์ได้ดีจากผลการทดสอบ SEM ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course สามารถนำไปใช้ได้กับงานที่มีปริมาณการจราจรสูง (Heavy Traffic) จะช่วยลดอัตราส่วนผสมของมวลรวมใหม่และเป็นการนำวัสดุมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ การเพิ่ม RAP เป็นส่วนผสมสามารถลดการใช้มวลรวมใหม่ได้ถึงร้อยละ 20 ลดราคาต้นทุนงาน AC Binder Course ลงร้อยละ 5 ต่อตารางเมตร และลดจำนวนในการทำลายยางรถยนต์เก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วอีกด้วย

**คำสำคัญ:** แอสฟัลต์คอนกรีต, วัสดุชั้นผิวทางเดิม, เส้นลวดในยางรถยนต์

#### ABSTRACT

This research studied the properties of asphalt concrete that was mixed with the original pavement material and improved with wires in car tires, size approximately 10-20 millimeters. This research is designed to define the mixture as the percentage by weight of the aggregate. Rock dust, 3/8", 1/2", 3/4" are equal to 40 : 23 : 17 : 20. The amount of asphalt cement is equal to 5.0% by total weight of aggregate. This research tested the engineering properties, including stability, flow, and SEM. It was found that at a mix ratio of W0.1, the highest stability was 2,524.77 lbs, which is higher than HMA, which has a stability value of only 2,260 lbs. Every wire mixture in tires has a higher density than all HMA. Consistent with the presence of tire-derived steel, bonds will form within the asphalt aggregate, bonding together on the surface of the wires in tires, which are rough and adhere to the asphalt. It can be clearly seen from the photo of the SEM test results that it passed the criteria specified for the Binder Course class. It can be used in road with high traffic volumes (Heavy Traffic). It will reduce the mixing ratio of new aggregates and allow for recycling of materials. Adding RAP as an ingredient can reduce the use of new aggregate by up to 20 percent and reduce the cost of AC Binder Course by 5 percent per

square meter. It can be reused and reduces the cost of destroying old tires that have already been used.

**KEYWORDS:** Asphalt Concrete, RAP, Tire-derived steel

## 1. บทนำ

ในประเทศไทยมีทางหลวงแผ่นดินที่อยู่ในความดูแลของกรมทางหลวง จำนวน 52,341.804 กม. [1] ซึ่งแต่ละปีต้องใช้งบประมาณ 20,925 ล้านบาทในการบำรุงรักษาทางหลวง [2] เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและโครงข่ายทางหลวงที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับปริมาณการจราจรที่สูงขึ้นทำให้ผิวทางของถนนได้รับความเสียหายก่อนระยะเวลาตามที่ได้ออกแบบไว้และก่อนจะทำการซ่อมบำรุงผิวทางใหม่จะต้องทำการขุดไส (Milling) ผิวทางเดิมที่เสียหายออกก่อน ทำให้วัสดุส่วนนี้มีปริมาณที่มากและกองเก็บไว้โดยเปล่าประโยชน์ หากนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ได้จะเป็นการลดงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาถนนและลดปริมาณวัสดุมูลรวมผสมแอสฟัลต์ซึ่งในปัจจุบันแหล่งวัสดุมูลรวมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมีจำนวนที่น้อยลงอย่างมาก

ในแต่ละปีมีปริมาณยางรถยนต์ในประเทศไทยมียางรถยนต์ที่ใช้งานแล้ว จำนวน 57 ล้านเส้น [3] โดยส่วนประกอบสำคัญของยางรถยนต์ คือ ลวด ซึ่งลวดที่อยู่ภายในยางรถยนต์นี้มีคุณสมบัติการรับแรงดึงสูง และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ [4]

เหล็กลวดสำหรับนำไปผลิตลวดเหล็กเสริมยางรถยนต์ ได้แก่ เหล็กลวดเปียโน ที่ถูกนำไปดึงเย็นหลายขั้นตอน เพื่อให้ได้ลวดเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วง 0.15-0.38 มม. ซึ่งจะไปผลิตต่อเป็น Bead Wire สำหรับช่วยยึดโครงสร้างของยาง และ Tire Cord สำหรับเสริมหน้ายาง เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรง ซึ่งใช้ในงานผลิตล้อรถต่าง ๆ รวมถึงล้อเครื่องบินด้วย ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ต้องผ่านการดึงขึ้นรูปสูง และต้องการความแข็งแรงสูงมาก ดังนั้นจึงต้องการเหล็กลวดคาร์บอนสูง และต้องมีความสะอาดสูงมาก โดยทั้งธาตุผสมตกค้าง และสารมลทินในปริมาณที่ต่ำมาก และคุณภาพผิวของเหล็กลวดต้องดีมากเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นในระหว่างการดึงเย็น

ในปัจจุบันมีงานวิจัยด้านการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) กลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งพบว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมทางวิศวกรรม รวมถึงมีงานวิจัยการนำเส้นใย (fiber) ชนิดต่าง ๆ มาใช้ร่วมกับงานด้านผิวทาง รวมถึงงานวัสดุด้านอื่น ๆ อีกเช่นกัน แต่ยังไม่มีการนำลวดกำลังสูงในยางรถยนต์มาใช้เป็นส่วนผสมปรับปรุงคุณภาพงานผิวทาง ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงประโยชน์จากตรงส่วนนี้จึงนำมาพัฒนาส่วนผสมเพื่อใช้ในชั้นผิวทางต่อไป

## 2. ทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 ยางรถยนต์

ยางรถยนต์เป็นนวัตกรรมที่มีพัฒนาการทั้งทางด้านวัสดุ และด้านการออกแบบที่น่าสนใจ จากในตอนแรกเริ่มมีการประดิษฐ์ออกมา นั้น ยางรถยนต์ทำจากยางธรรมชาติทั้งหมดมีลักษณะเป็น ล้อตันทั้งชิ้น ต่อมาจึงค่อยๆมีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาจนกลายเป็นล้อยางที่บรรจุลมข้างในเช่น ทุกวันนี้ ปัจจุบันนี้เราเรียกยางรถยนต์กันว่า “คอมโพสิต (composite)” เนื่องจากเมื่อนำยาง หนึ่งเส้นมาลองวิเคราะห์ห้องค์ประกอบต่างๆ แล้วพบว่าประกอบไปด้วยยางธรรมชาติ 14% ยางสังเคราะห์ 27% ผงเขม่าดำ (carbon black) 10% น้ำมัน (processing oil) 10% ผ้าใบ 4% เส้นลวดเหล็ก 10% และสารอื่น ๆ อีก 7% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสูตรของแต่ละผู้ผลิต ผู้วิจัยได้เลือกใช้ เส้นลวดจาก 2 ส่วนประกอบในล้อยาง ได้แก่ ชั้นโครงยางเป็นชั้นที่อยู่เหนือแผ่นยางรองด้านใน ซึ่ง ประกอบด้วยเส้นใยไฟเบอร์ที่เป็นสิ่งทอบาง ๆ (หรือสายเคเบิล) ที่ผูกมัดเข้ากับวัสดุยาง และ ชั้นปลอกยางชั้นส่วนนี้เป็นตัวกำหนดความแข็งแรงโดยส่วนใหญ่ของยางรถยนต์ ซึ่งประกอบด้วย เหล็กเส้นเรียบบางที่มีความทนทานหลายเส้นผูกมัดกับวัสดุยาง เพราะเล็งเห็นว่าเส้นลวดทั้งสองส่วนนี้มีความยืดหยุ่นสูงพอที่จะรองรับการผิดรูปที่เกิดจากการกระแทก การตกหลุม และ สิ่งกีดขวางอื่น ๆ บนท้องถนน น่าจะนำมาเสริมกำลังให้กับแอสฟัลต์คอนกรีตได้



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของยางรถยนต์ [5]

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.2018 Nokkaew and Parakul [6] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน โดยใช้

วัสดุผสมรวมหินปูนจำนวน 1 แห่่ง ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาด ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของวัสดุชั้นทางเดิมหมุนเวียนที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้งานเท่ากับร้อยละ 40 ของมวลรวม

ในปี ค.ศ.2020 Xing et al [7] ได้ศึกษาผลของความยาวเส้นใยและการรักษาพื้นผิวของเส้นใยอะรามิดต่อประสิทธิภาพของสารยึดเกาะแอสฟัลต์ปรับปรุงด้วยเส้นใยอะรามิด (AFMA) การทดลองนี้ใช้เส้นใยอะรามิดทั้งหมด 4 ขนาด คือ 1 mm, 2 mm, 3 mm, and 6 mm ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการประยุกต์ใช้เส้นใยในสารยึดเกาะแอสฟัลต์และใช้ในการปรับปรุงส่วนผสมของยางแอสฟัลต์คอนกรีตได้

ในปี ค.ศ.2021 Gupta et al [8] ได้ศึกษาการเลือกเส้นใยเพื่อปรับปรุงส่วนผสมยางพอร์สแอสฟัลต์ การศึกษานี้ได้เลือกใช้เส้นใย 4 ชนิดมาศึกษา ได้แก่ aramid fiber, aramid pulp, glass-hybrid fiber, cellulose fiber มีการทดสอบ Cantabro test, permeability test, indirect tensile strength (ITS) test, and moisture susceptibility test. ผลการศึกษพบว่า aramid pulp มีค่าความต้านทานต่อการเสียดสีที่ดี ในขณะที่ glass-hybrid fibers จะมีค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (ITS) ดีที่สุด และจากเส้นใยทั้งหมด aramid pulp เป็นเส้นใยที่ดีที่สุดในการปรับปรุงความต้านทานทางกล

ในปี ค.ศ.2021 Al-Ridha et al [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มเส้นใยเหล็กต่อความเสียหายจากความชื้นและการต้านทานการเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต งานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ชั้น wearing courses เพื่อความทนทานต่อการเสียดรูอย่างถาวรและการรับแรงดึงด้านข้าง ผลการศึกษพบว่า การใส่เส้นใยเหล็ก 0.2% โดยปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมด ทำให้ความต้านทานแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ.2023 Guo et al [10] ได้ศึกษาการใช้เส้นใยในการเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยได้แบ่งการศึกษาเป็นเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ ผู้วิจัยได้สนใจเส้นใยคาร์บอนที่นำมาผสมกับแอสฟัลต์พบว่าที่ความยาวของเส้นใย 3 ซม.ผสมในอัตราส่วน 0.025 ต่อน้ำหนักมวลรวมมีค่าความต้านทานต่อการเสียดรูสูงขึ้นถึง 24.5% และมีอายุมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาที่ไม่ผสมเส้นใยถึง 2.4 เท่า

ในปี ค.ศ.2018 Gao and Wu [11] ได้ศึกษาการใช้ ESEM เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของเส้นใยหินบะซอลต์เมื่อเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยหินบะซอลต์เข้าไปสร้างพันธะทางเคมีสร้างแรงยึดเหนี่ยวตามพื้นผิวของเส้นใยกับแอสฟัลต์มีความคงทนต่อการเสียดรูได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยหินบะซอลต์จะพบว่ามีรอยแตกกว้างบริเวณพื้นผิวมากกว่า

จากการศึกษางานวิจัยทั้งภายในประเทศไทยและต่างประเทศจะเห็นได้ว่า มีการนำวัสดุเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์จากขยะเหลือใช้ชนิดต่าง ๆ มาผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพในแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตไปในทิศทางที่ดีขึ้น การนำเส้นใยชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยอะรามิด มาปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถลดค่าการเกิด

ร่องล้อยึดติดเนื่องจากผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมมีแนวโน้มสูงขึ้นจากแอสฟัลต์ธรรมดา และเส้นใยอะรามิตยังช่วยลดค่าการแตกหักเสียรูปของแอสฟัลต์ได้ดี [8] ทำให้เพิ่มระยะเวลาของรอบการบำรุงรักษาถนน จากงานวิจัยถึงแม้ว่าเส้นใยจากธรรมชาติจะให้ผลการทดสอบที่ดีแต่ก็ยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมนักวิจัยจึงหันมาให้ความสนใจกับเส้นใยสังเคราะห์กันมากขึ้น เช่น เส้นใยโพลีโพรพิลีน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยคาร์บอน การนำวัสดุจำพวกเส้นใยสังเคราะห์เมื่อนำมาผสมกับยางแอสฟัลต์แล้วจะช่วยลดช่องว่างระหว่างมวลรวมเพิ่มพื้นที่การยึดเกาะกันระหว่างยางแอสฟัลต์และเส้นใย โดยจะศึกษาที่ความยาวของเส้นใยที่ต่างกันพบว่าเมื่อผลต่อการยึดเกาะมากกว่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย [10] การนำผิวทางเดิมกลับมาใช้ใหม่นับเป็นงานวิจัยที่สมควรส่งเสริมอย่างมาก เนื่องจากปัจจุบันนี้วัสดุมวลรวมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานนั้นค่อนข้างที่จะขาดแคลนหรือไม่ก็ต้องแบกรับค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุที่สูงเนื่องจากระยะทางขนส่งไกล จากงานวิจัยข้างต้นที่ใช้ผิวทางเดิมในสัดส่วนประมาณร้อยละ 40 ของมวลรวม [6] ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่เยอะพอสมควรหากนำไปใช้จริงในการก่อสร้างถนน สัดส่วนผสมของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่นำมาปรับปรุงคุณภาพร่วมกับยางแอสฟัลต์นั้นให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกันเนื่องมาจากตัวแปร ขนาด รูปร่าง ชนิด น้ำหนัก อุณหภูมิ สารเคลือบ ฯ ล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมทั้งหมด ปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่จะส่งผลต่อผลการทดสอบทางวิศวกรรมนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุชั้นผิวทางเดิมที่นำมาใช้ เพราะอาจมาจากแหล่งที่ต่างกัน ปริมาณจราจรต่างกัน อายุบริการที่ต่างกันของสายทางนั้น ๆ ความเสียหายในขณะขุดไสผิวเดิมต่างกัน

ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่า เส้นลวดกำลังแรงดึงสูงที่อยู่ภายในยางรถยนต์นั้นมีคุณลักษณะและคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเส้นใยสังเคราะห์ในงานวิจัยที่ผ่านมา และยังถือว่าเป็นการนำขยะของเสียหมุนเวียนมาใช้ใหม่ ตามที่ได้ศึกษาค้นคว้ามาแล้วข้างต้น ไม่ว่าจะในด้านการเสริมกำลังรับแรงดึงทางด้านข้างและเพิ่มค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต เพิ่มแรงยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมในระดับอนุภาคมีค่าความต้านทานต่อการเสียรูปและค่าเสถียรภาพที่ดีขึ้น เมื่อนำมาผสมปรับปรุงคุณภาพร่วมกับผิวทางเดิมที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว คาดว่าจะมีผลการทดสอบทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นมีการยึดเกาะที่ดีระหว่างอนุภาคของมวลรวมและแอสฟัลต์ ทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างถนนใหม่ ลดต้นทุนการกำจัดของเสียจากยางรถยนต์เก่าและเป็นทางเลือกในการบำรุงรักษาผิวถนนให้กับหน่วยงานของรัฐได้

### 3. วิธีการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธีมาร์แชลล์ (Mashall Test) ตามมาตรฐานการทดสอบ ที่ ทล.ท.-604/2517 [12] และใช้เกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม.- 408/2532 [13]



รูปที่ 2 การทดสอบมาร์แชลล์

วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

- 1) วัสดุผสมรวมจากโรงม่หิน ธนบดีศิลา ห้างหุ้นส่วนชินวาระลาก่อสร้าง ต.ลิตล อ.เมือง จ.ยะลา
- 2) ใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) จากการขุดใส่ (milling) ชั้นผิวทางเดิมในโครงการก่อสร้าง ทางหลวงหมายเลข 4085 สาย ปากน้ำเทพา - บ.บันนังตามาดอน บ.ปลักบอ - บ.ทุ่งโหนด กม.25+000 - กม.37+800 นำมาคัดแยกขนาดก่อนนำไปทดสอบ
- 3) ยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้วจาก ร้านเพชรเกษมยางยนต์ อ.นาทวี ขนาดหน้ากว้างยาง 215 มม. โดยไม่ได้ระบุยี่ห้อของผู้ผลิตยาง เพื่อเอาเส้นลวดข้างในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 - 1 มม. มาใช้เป็นส่วนผสม
- 4) ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60-70 ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้ในงานของกรมทางหลวง ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.1 ออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาโดยวิธีมาร์แชลล์

ใช้ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาดสูง 2.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ก้อนตัวอย่างจำนวน 5 ชุด ๆ ละ 3 ก้อน แต่ละชุดประกอบด้วยวัสดุผสมรวมคละที่ได้จากการผสมมวลรวมขนาดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่าร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม การบดทับก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมส่วนผสมโดยบดทับด้านละ 75 ครั้ง ที่อุณหภูมิส่วนผสม 150 องศาเซลเซียส เมื่อก้อนตัวอย่างเย็นลงแล้ว จึงดันก้อนตัวอย่างออกจากแบบ (Mold) แล้วนำมาหาค่าเสถียรภาพและการไหล (Stability and Flow) ความแน่นและช่องว่างอากาศ (Density and Void) ของทุก ๆ ชุดตัวอย่าง เพื่อหาอัตราส่วนของวัสดุผสมรวมกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้งาน

ตารางที่ 1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

Sieve Size	% Passing				Combined	Desired	Tolerant Limit
	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4			
1"				100	100	100	100
3/4"				67.0	93.4	90 - 100	88 - 98
1/2"			100	4.2	80.8	-	76 - 86
3/8"		100	29.4	1.8	68.4	56 - 80	63 - 73
# 4	100	41.6	1.2	0.6	49.9	35 - 65	45 - 55
# 8	85.9	2.8	0.5		35.1	23 - 49	30 - 40
# 16	57.1	0.7			23.0	-	19 - 27
# 30	35.3				14.1	-	10 - 18
# 50	23.7				9.5	5 - 19	6 - 14
# 100	16.9				6.8	-	5 - 10
# 200	11.4				4.6	2 - 8	4 - 6
Mix Proportion		40	23	17	20		

### 3.2 ออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดใยยางรถยนต์โดยวิธีมาร์แชลล์

ใช้ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาดสูง 2.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ก้อนตัวอย่างจำนวน 5 ชุดๆ ละ 3 ก้อน แต่ละชุดประกอบด้วยวัสดุมวลรวมคละที่ได้จากการผสมมวลรวมขนาดต่าง ๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่าร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม ปริมาณ RAP ที่ผ่านการคัดแยกขนาด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ที่ผสมร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของมวลรวม ปริมาณเส้นลวดใยยางรถยนต์ที่ตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กขนาด 10-20 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ W0.1, W0.3 และ W0.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม การบดทับก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมส่วนผสมโดยบดทับด้านละ 75 ครั้ง ที่อุณหภูมิส่วนผสม 150 องศาเซลเซียส เมื่อก้อนตัวอย่างเย็นลงแล้ว จึงดันก้อนตัวอย่างออกจากแบบ (Mold) แล้วนำมาหาค่าเสถียรภาพและการไหล (Stability and Flow) ความแน่นและช่องว่างอากาศ (Density and Void) ของทุก ๆ ชุดตัวอย่าง เพื่อหาอัตราส่วนของวัสดุมวลรวมกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในการทำงาน



รูปที่ 3 เส้นลวดไผ่ใยรถยนต์ขนาด 10-20 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 ก้อนตัวอย่างทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดไผ่ใยรถยนต์

ตารางที่ 2 ขนาดละเอียดของวัสดุผิวทางเดิม

Sieve Size	% Passing	Desired
	RAP	
1"	100	100
3/4"	92.8	88 – 98
1/2"	77.2	76 – 86
3/8"	63.8	63 – 73
#4	51.7	45 – 55
#8	39.1	30 – 40
#16	26.2	19 – 27
#30	16.5	10 – 18
#50	10.6	6 – 14
#100	6.8	5 – 10
#200	5.1	4 - 6

### 3.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา กับแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์

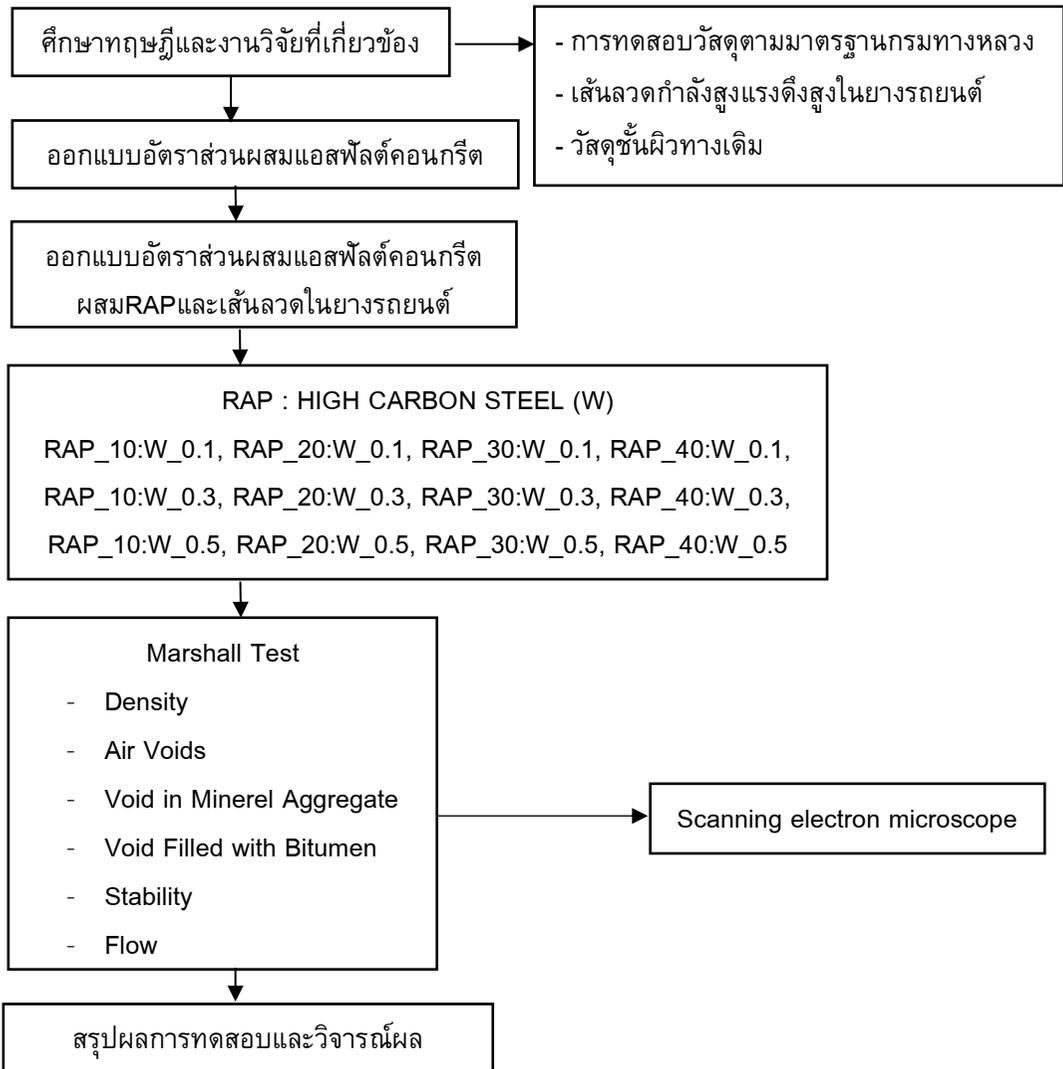
โดยจะพิจารณาจากค่าเสถียรภาพ ค่าอัตราการไหล ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ เปรียบเทียบกับค่าข้อกำหนดในมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม.- 408/2532 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม.- 408/2532 [13]

ชั้นทาง	
รายการ	Binder Course
Blows	75
Stability Min N (lb)	8,006 (1,800)
Flow 0.25 mm (0.01 in)	8 - 16
% Air Void	3 - 6
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) (Min)	13
Stability/Flow (Min) N/0.25 mm (lb/0.01 in)	712 (160)
Percent Strength index (Min)	75

### 3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติสัญญาณโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

โดยจะพิจารณาลักษณะรูปร่าง พื้นผิวหน้าของตัวอย่าง การจัดเรียงตัว การยึดเกาะระหว่างอนุภาค เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่าง แอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา (HMA) และแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ที่กำลังขยาย 10, 50 และ 100 เท่า



หมายเหตุ: คำอธิบายสัญลักษณ์ตัวย่อ

- RAP\_10 = ส่วนผสมRAP อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของมวลรวม
- W\_0.1 = ส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์ อัตราส่วนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของมวลรวม

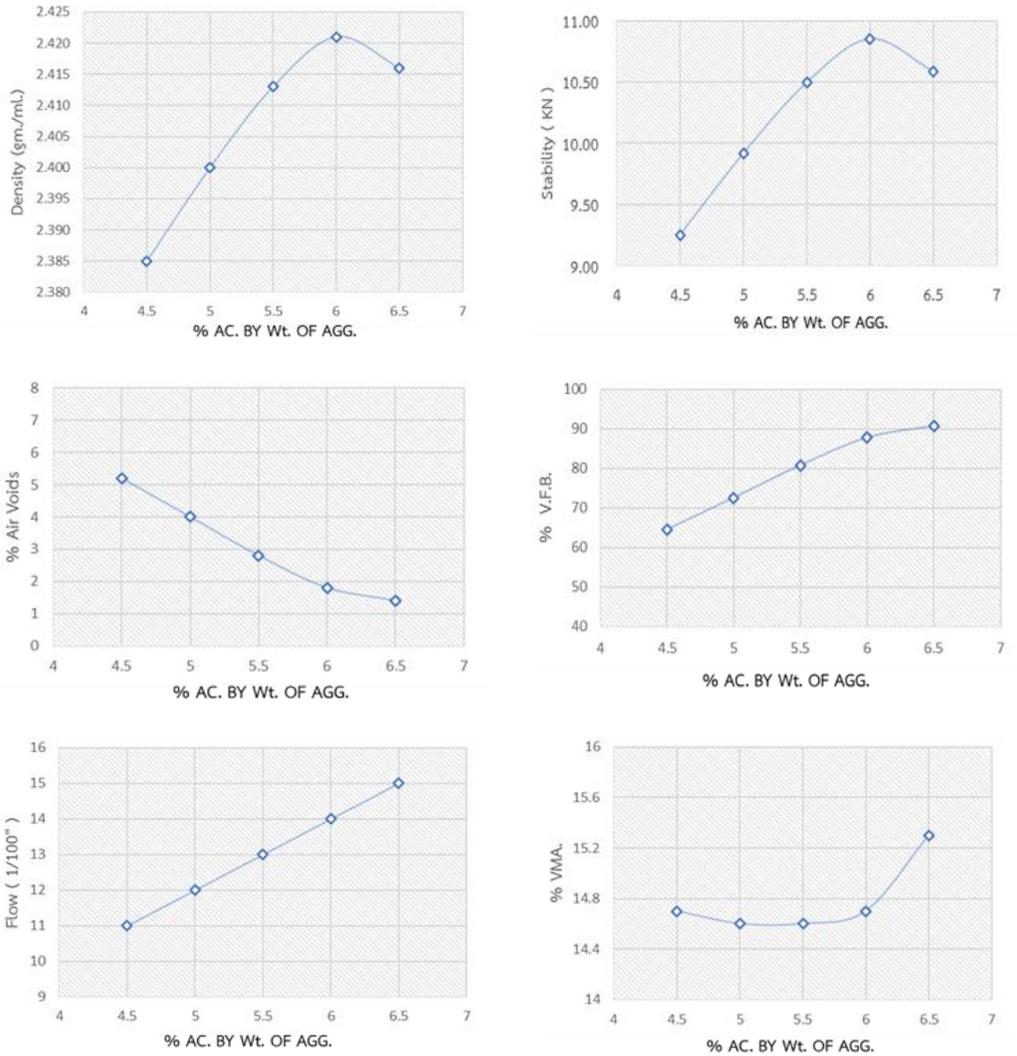
### รูปที่ 5 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย

#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

##### 4.1 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาที่ไม่มีส่วนผสมของ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ โดยใช้วัสดุมวลรวมตามสัดส่วนผสมที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม

ผลทดสอบนี้จะนำไปใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมที่มี RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติที่ได้จากการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

ตารางที่ 4 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต

MIX PROPORTION HOT BIN 1 : 2 : 3 : 4 = 40 : 23 : 17 : 20						
% AC by Wt. of Agg.	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	Tolerant
Density	2.385	2.400	2.413	2.421	2.416	2.391-2.408
% Air Void	5.2	4.0	2.8	1.8	1.4	3 - 6
Stability (lbs)	2,080	2,230	2,360	2,440	2,380	1,800 min
Flow (1/100")	11	12	13	14	15	8 - 16
Stability/Flow	189.1	185.8	181.5	174.2	158.6	160 min
VFB (%)	64.6	72.6	80.8	87.8	90.8	66-77
VMA (%)	14.7	14.6	14.6	14.7	15.3	13 min

**4.2 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่าง ๆ**

ผลการทดสอบคุณสมบัติโดยส่วนใหญ่มีทิศทางที่ดีขึ้นกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา ถึงแม้ว่าค่าจะไม่ได้สูงมากแต่ก็ยังผ่านอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังผลแสดงต่อไปนี้

**4.2.1 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.5**

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ มีค่าความหนาแน่นดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาในทุกอัตราส่วนผสมและสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง จะเห็นได้จากค่าการทดสอบเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP ค่าความหนาแน่นจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง ถึงแม้ว่าจะอยู่ในเกณฑ์ล่างเนื่องจากเส้นลวดในยางรถยนต์ที่ผสมลงไปในมวลรวมผสมกับยางแอสฟัลต์และส่วนละเอียดจาก RAP เข้าไปแทรกแทนที่ช่องว่างได้น้อย ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าเสถียรภาพไม่ค่อยมีความแตกต่างกัน อัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพมากที่สุดคือ RAP ร้อยละ 10 ผสมกับเส้นลวดในยางรถยนต์ร้อยละ 0.3 มีค่าเท่ากับ 2,424 lbs ทุกอัตราส่วนจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

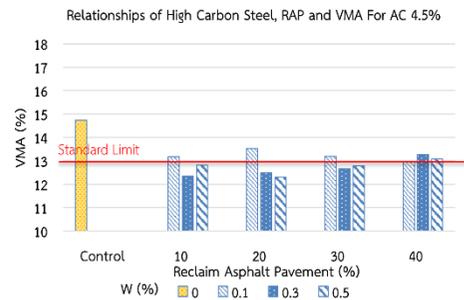
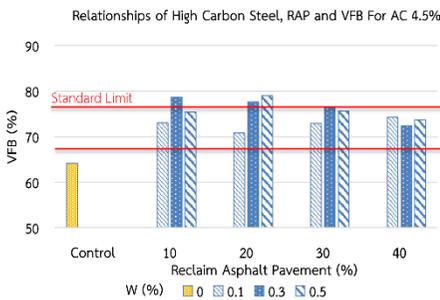
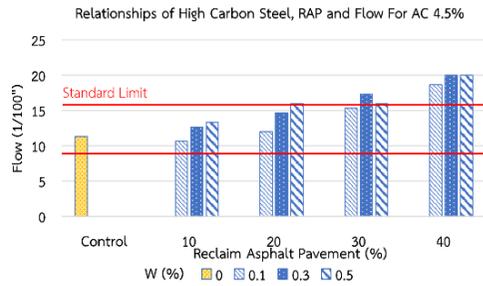
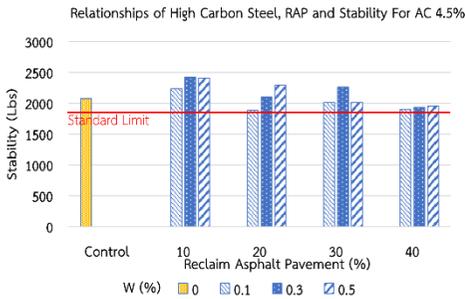
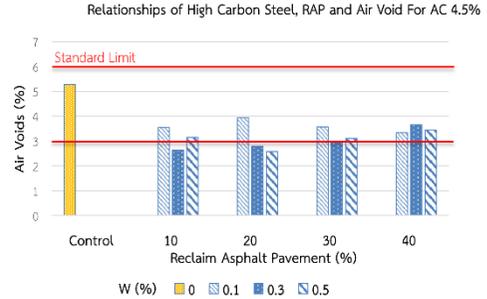
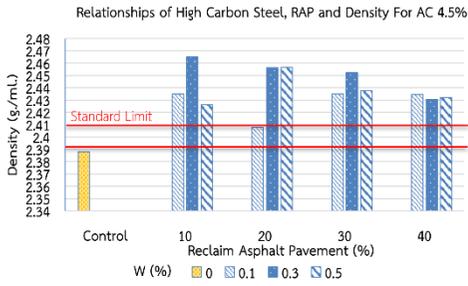
ค่าการไหล (Flow) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น และส่วนใหญ่ก็มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10, 20 และ 30 ก็ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 4

ปริมาณช่องว่างของวัสดุผสมรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุผสมรวมน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาในทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ตารางที่ 5 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.5

Mixed simple	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.390	5.29	2078.80	64.14	14.74	11
RAP10 W0.1	2.430	3.55	2238.53	73.06	13.18	11
RAP10 W0.3	2.453	2.63	2424.59	78.70	12.35	13
RAP10 W0.5	2.440	3.15	2409.56	75.42	12.82	13
RAP20 W0.1	2.420	3.94	1889.00	70.86	13.53	12
RAP20 W0.3	2.450	2.80	2105.64	77.63	12.50	15
RAP20 W0.5	2.453	2.59	2295.63	78.99	12.31	16
RAP30 W0.1	2.427	3.57	2013.63	72.93	13.20	15
RAP30 W0.3	2.443	2.97	2261.85	76.52	12.66	17
RAP30 W0.5	2.440	3.11	2013.45	75.66	12.78	16
RAP40 W0.1	2.433	3.34	1898.07	74.30	12.99	19
RAP40 W0.3	2.427	3.66	1936.67	72.44	13.28	20
RAP40 W0.5	2.433	3.44	1955.99	73.67	13.08	20



### รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.5

#### 4.2.2 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาในทุกอัตราส่วนผสมและสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง อาจมาเนื่องจากการผสมเส้นลวดในยางรถยนต์ลงไปใหม่รวมเมื่อผสมกับยางแอสฟัลต์จะเกิดการสร้างพันธะยึดเกาะกันเกิดขึ้นในระดับอนุภาคจะเห็นได้จาก

ค่าการทดสอบอัตราส่วนมวลรวมเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นลวดในยางรถยนต์ ค่าความหนาแน่นจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าค่อนข้างน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวง อาจเนื่องจากเส้นลวดในยางรถยนต์ที่ผสมลงไปมวลรวมผสมกับยางแอสฟัลต์และส่วนละเอียดจาก RAP เข้าไปแทรกแทนที่ช่องว่างได้น้อย แต่ก็มีข้อดีตรงที่หากนำไปใช้ในพื้นผิวที่มีอากาศค่อนข้างร้อนจะมีผลดีต่อการลดการเกิดการเยิ้มที่ผิวหน้าได้เมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแอสฟัลต์สูง และเมื่อผิวทางมีการตีเส้นจราจรการที่มีค่าช่องว่างระหว่างอากาศน้อยจะทำให้อายุของสีตีเส้นมากกว่าผิวทางที่มีช่องว่างอากาศมาก ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าเสถียรภาพไม่ค่อยมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นอัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพมากที่สุดคือ RAP ร้อยละ 10 ผสมกับเส้นลวดในยางรถยนต์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของมวลรวม มีค่าเท่ากับ 2,524.77 lbs โดยส่วนใหญ่แล้วทุกอัตราส่วนจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

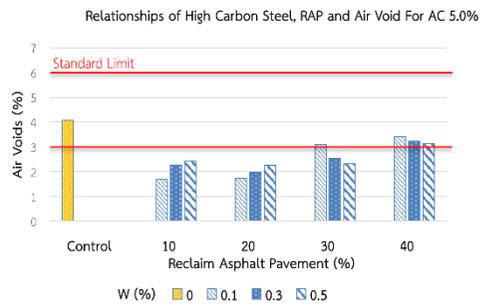
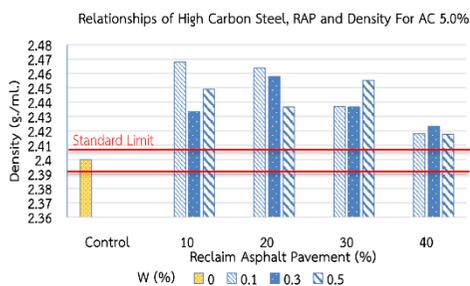
ค่าการไหล (Flow) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นและส่วนใหญ่ก็มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อย 20 ก็ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

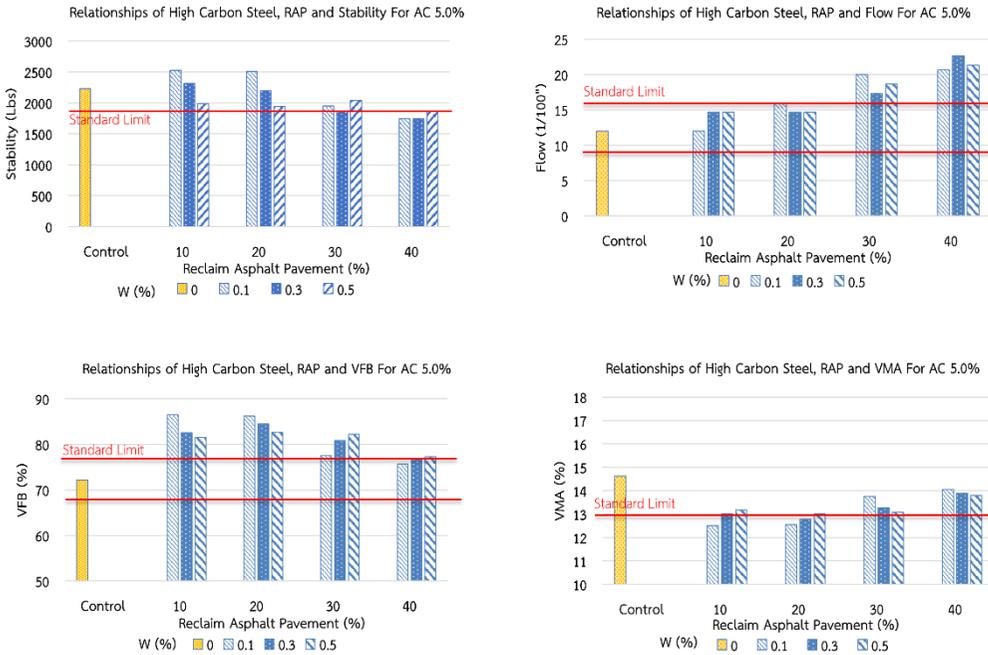
ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวมน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ส่วนใหญ่ก็ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ค่านี้อาจเป็นตัวบ่งชี้ว่ามวลรวมมีช่องว่างเพียงพอสำหรับให้แอสฟัลต์ยึดเกาะเชื่อมประสานกับอนุภาคต่าง ๆ ป้องกันการเยิ้มทะลักของแอสฟัลต์ที่ผิวหน้า ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ตารางที่ 6 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0

Mixed simple	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.400	4.07	2078.80	64.14	14.74	11
RAP10 W0.1	2.460	1.69	2524.77	73.06	13.18	11
RAP10 W0.3	2.443	2.27	2316.08	82.59	13.03	15
RAP10 W0.5	2.440	2.43	1989.23	81.54	13.18	15
RAP20 W0.1	2.457	1.73	2508.48	86.23	12.55	16
RAP20 W0.3	2.453	1.98	2198.91	84.52	12.77	15
RAP20 W0.5	2.447	2.26	1942.79	82.64	13.03	15
RAP30 W0.1	2.423	3.09	1951.59	77.53	13.77	20
RAP30 W0.3	2.437	2.54	1862.51	80.83	13.28	17
RAP30 W0.5	2.447	2.32	2037.88	82.24	13.08	19
RAP40 W0.1	2.417	3.41	1743.67	75.71	14.05	21
RAP40 W0.3	2.420	3.23	1742.67	76.74	13.89	23
RAP40 W0.5	2.423	3.14	1863.00	77.28	13.80	21



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0 (ต่อ)

### 4.2.3 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.5

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาเกือบทุกอัตราส่วนผสมและสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง มีเพียงส่วนผสมที่ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 ที่ผสมเส้นลวดร้อยละ 0.1 เท่านั้นที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าค่อนข้างน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าเสถียรภาพน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา โดยอัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพผ่านเกณฑ์คือ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 ในทุกอัตราส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

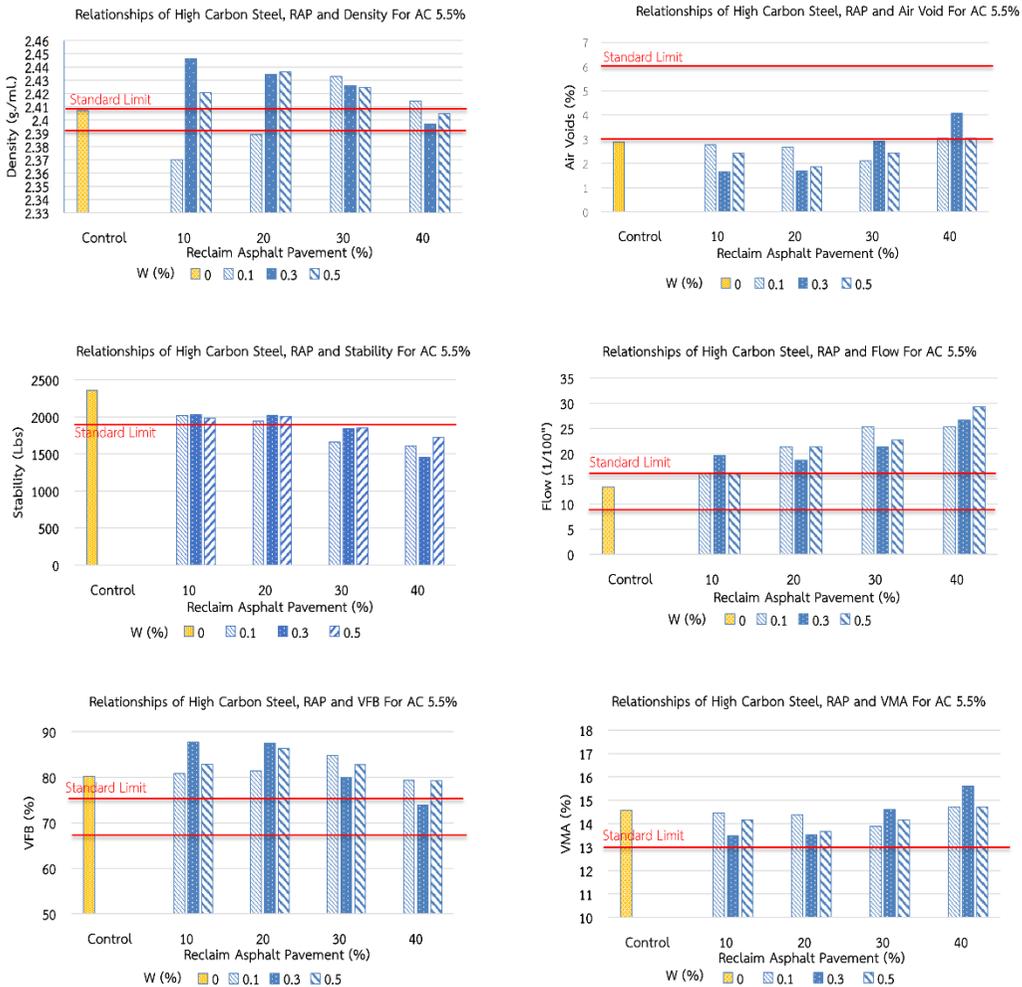
ค่าการไหล (Flow) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของRAPและเส้นลวดในยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นและส่วนใหญ่ก็มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10 ก็ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มากกว่าเกณฑ์มาตรฐานในทุกอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวมไม่แตกต่างจากแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา และทุกอัตราส่วนยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ตารางที่ 7 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.5

Mixed simple	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.410	2.89	2363.33	80.19	14.57	13
RAP10 W0.1	2.417	2.76	2017.25	80.89	14.46	16
RAP10 W0.3	2.443	1.66	2030.16	87.72	13.49	20
RAP10 W0.5	2.423	2.43	1984.33	82.85	14.17	16
RAP20 W0.1	2.420	2.67	1942.08	81.41	14.38	21
RAP20 W0.3	2.440	1.69	2024.19	87.48	13.52	19
RAP20 W0.5	2.440	1.86	2005.00	86.40	13.66	21
RAP30 W0.1	2.427	2.11	1662.09	84.78	13.89	25
RAP30 W0.3	2.413	2.93	1840.16	79.94	14.61	21
RAP30 W0.5	2.420	2.44	1850.00	82.82	14.17	23
RAP40 W0.1	2.407	3.04	1609.15	79.33	14.70	25
RAP40 W0.3	2.383	4.08	1455.36	73.89	15.62	27
RAP40 W0.5	2.407	3.05	1724.33	79.27	14.71	29



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.5

#### 4.2.4 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.0

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นลวดในยางรถยนต์ค่าความหนาแน่นจะมีแนวโน้มสูงขึ้น และทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวงในทุกอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นลวดในยางรถยนต์ ค่าเสถียรภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยอัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพมากที่สุดคือ RAP ร้อยละ 20 เส้นลวด 0.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

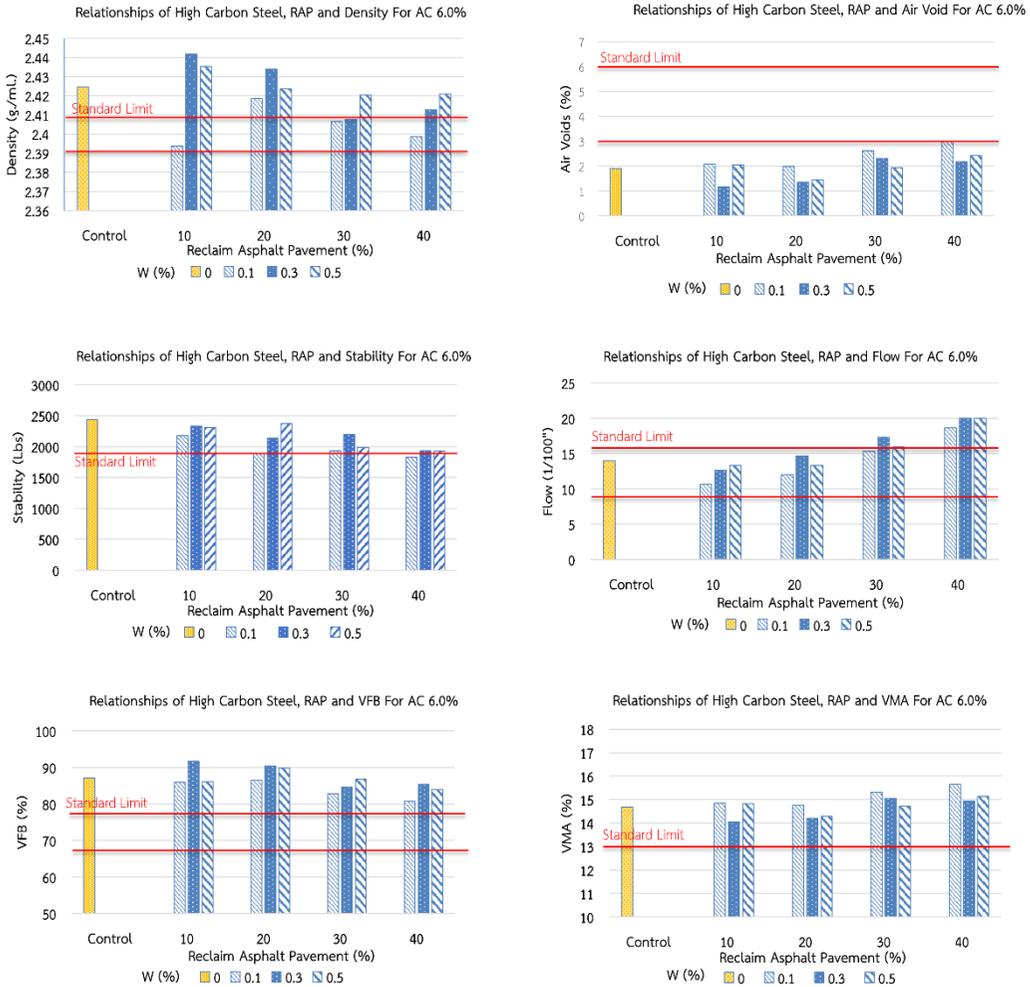
ค่าการไหล (Flow) เมื่อเพิ่มอัตราส่วน RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ให้มากขึ้นพบว่า ค่าการไหลจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 ในทุกอัตราส่วนผสม เส้นลวดในยางรถยนต์ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ RAP แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า ค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ RAP แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นลวดในยางรถยนต์ และทุกอัตราส่วนยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

**ตารางที่ 8 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.0**

Mixed simple	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.420	1.89	2436.67	87.10	14.68	14
Rap10 W0.1	2.417	2.08	2176.93	85.97	14.84	11
Rap10 W0.3	2.440	1.17	2331.33	91.67	14.05	13
Rap10 W0.5	2.417	2.06	2310.33	86.13	14.82	13
Rap20 W0.1	2.417	1.99	1889.00	85.23	14.77	12
Rap20 W0.3	2.433	1.35	2133.00	90.48	14.21	15
Rap20 W0.5	2.430	1.45	2375.67	89.83	14.30	13
Rap30 W0.1	2.403	2.62	1935.20	82.87	15.31	15
Rap30 W0.3	2.413	2.31	2201.00	84.63	15.04	17
Rap30 W0.5	2.420	1.94	1987.00	86.84	14.72	16
Rap40 W0.1	2.393	3.01	1828.27	80.76	15.65	19
Rap40 W0.3	2.413	2.18	1935.72	85.40	14.93	20
Rap40 W0.5	2.407	2.42	1929.21	83.99	15.14	20



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.0

4.2.5 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.5

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นลวดในยางรถยนต์ค่าความหนาแน่นจะมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ส่วนใหญ่ก็ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวงในทุกอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ค่าเสถียรภาพ (Stability) เมื่อเพิ่มอัตราส่วน RAP พบว่าค่าเสถียรภาพจะมีแนวโน้มลดลง โดยมีเพียงอัตราส่วนผสม RAP ร้อยละ 10 และ 20 ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

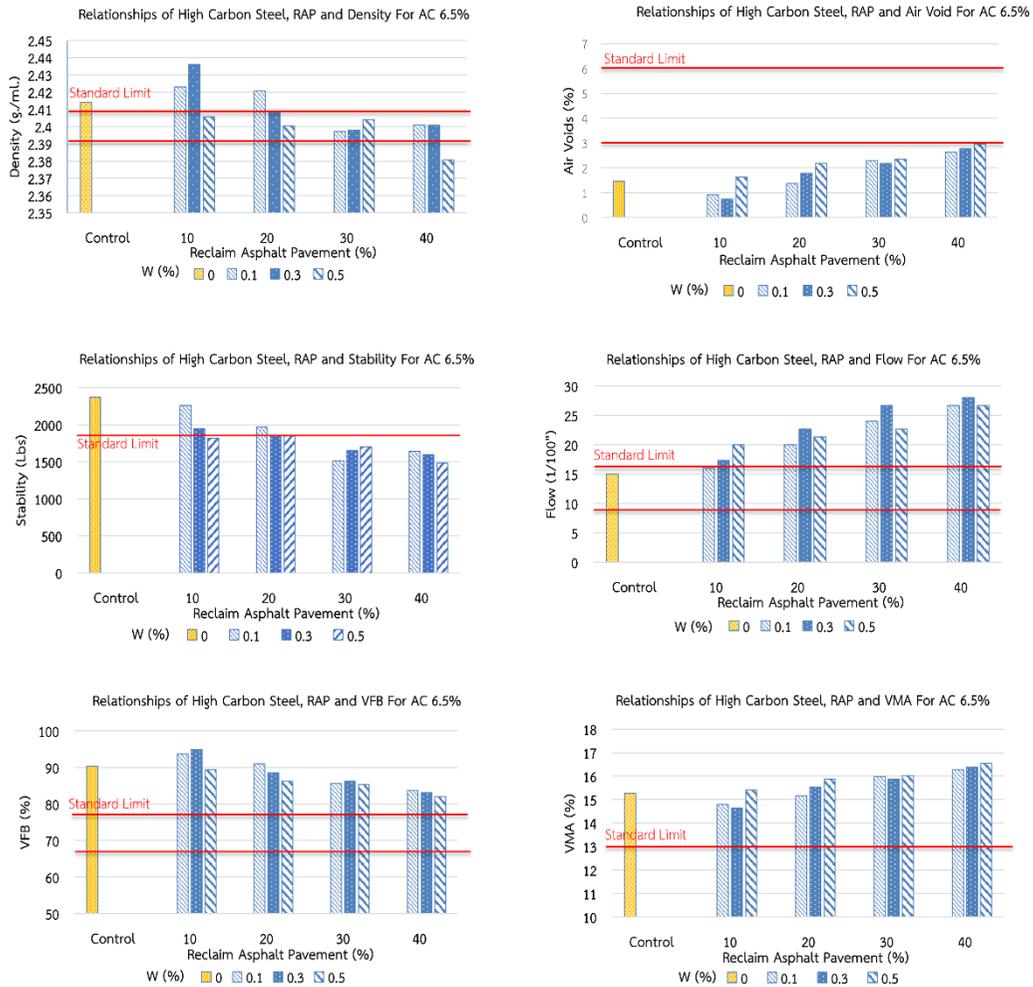
ค่าการไหล (Flow) เมื่อเพิ่มอัตราส่วน RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ให้มากขึ้นพบว่าค่าการไหลจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และทุกอัตราส่วนผสมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่าค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ และทุกอัตราส่วนยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

**ตารางที่ 9 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.5**

Mixed simple	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.420	1.47	2376.67	90.00	15.26	15
Rap10 W0.1	2.430	0.92	2258.97	93.76	14.80	16
Rap10 W0.3	2.430	0.75	1949.00	94.91	14.64	17
Rap10 W0.5	2.410	1.64	1821.35	89.36	15.41	20
Rap20 W0.1	2.417	1.37	1972.67	91.00	15.18	20
Rap20 W0.3	2.407	1.78	1851.57	88.53	15.53	23
Rap20 W0.5	2.400	2.18	1852.16	86.28	15.87	21
Rap30 W0.1	2.397	2.30	1514.86	85.61	15.98	24
Rap30 W0.3	2.400	2.18	1652.27	86.27	15.88	27
Rap30 W0.5	2.393	2.34	1704.28	85.38	16.02	23
Rap40 W0.1	2.387	2.64	1643.12	83.77	16.27	27
Rap40 W0.3	2.383	2.76	1598.33	83.14	16.38	28
Rap40 W0.5	2.380	2.97	1482.32	82.08	16.55	27



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.5

### 4.3 ผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

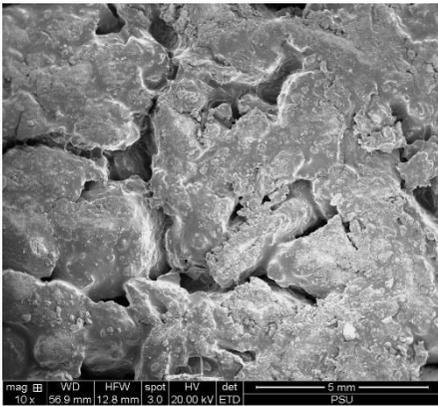
พบว่าเมื่อนำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา (HMA) แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบ่งภาพเป็นกำลังขยาย 10, 50, 100 เท่าตามลำดับ จะเห็นความแตกต่างระหว่างสองตัวอย่างได้อย่างชัดเจน

การจัดเรียงตัวภายในมวลรวม เมื่อใส่เส้นลวดในยางรถยนต์เข้ามาเป็นส่วนผสมจะสังเกตเห็นการลดช่องว่างระหว่างมวลรวมเหล็มน้อยลงเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา ซึ่งก็ตรง

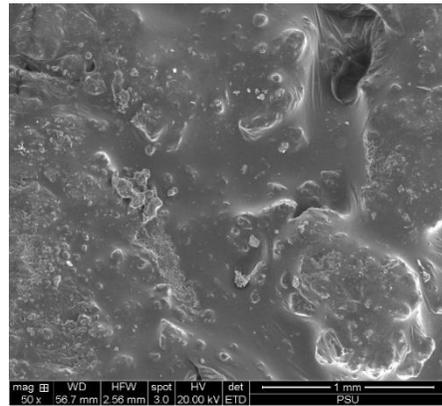
กับผลจากการทดสอบมาร์แชลล์ที่มีค่าความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 12 a) และรูปที่ 13 a)

เมื่อมีเส้นลวดเข้ามา มีการสร้างพันธะยึดเกาะเชื่อมต่อระหว่างรอยแตกหักและส่วนที่เป็นช่องว่างอากาศภายในมวลรวมซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัย [11] ที่เส้นใยสร้างพันธะยึดเกาะกับยางแอสฟัลต์แล้วส่งผลให้มีค่าความต้านทานต่อการเสียรูปเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 13 a) b) และ c)

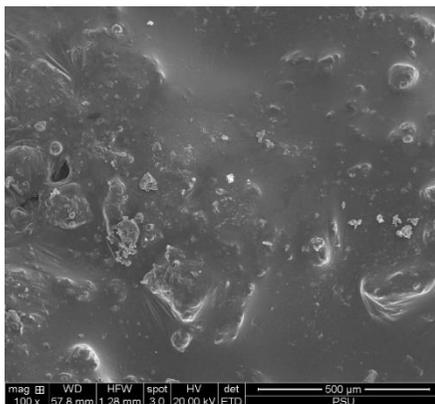
จากในรูปที่ 13 c) จะสังเกตเห็นว่า เส้นลวดถูกห่อหุ้มไปด้วยยางแอสฟัลต์เกือบทั้งเส้นและที่ผิวหน้าของเส้นลวดยังมีพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างขรุขระช่วยเสริมแรงยึดเกาะกับยางแอสฟัลต์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งข้อดีตรงส่วนนี้จะส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีเส้นลวดเป็นส่วนผสมสามารถทนต่อการรับน้ำหนักบรรทุกในระยะยาวได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา



a) กำลังขยาย 10 เท่า

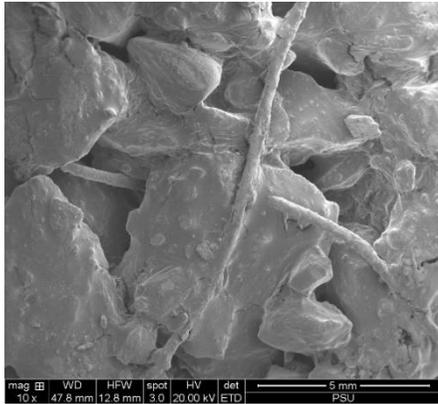


b) กำลังขยาย 50 เท่า

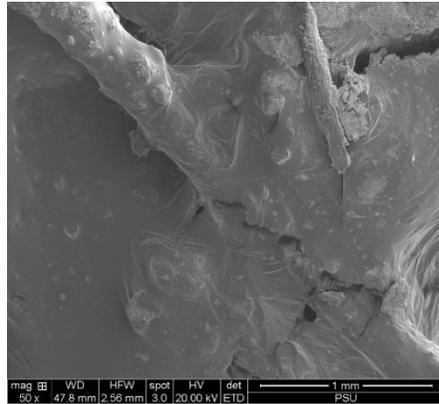


c) กำลังขยาย 100 เท่า

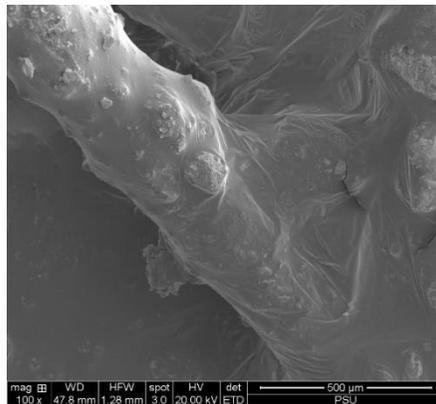
รูปที่ 12 ภาพถ่าย SEM แอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา



a) กำลังขยาย 10 เท่า



b) กำลังขยาย 50 เท่า



c) กำลังขยาย 100 เท่า

### รูปที่ 13 ภาพถ่าย SEM แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์

#### 5. สรุปและอภิปรายผลงานวิจัย

ผลการทดลองทั้งหมดสรุปว่า เส้นลวดในยางรถยนต์ผสมปรับปรุงคุณภาพสามารถใช้เป็นส่วนผสมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ โดยที่อัตราส่วนยาง AC ร้อยละ 5.0 RAP ร้อยละ 10 สามารถใช้ W0.1 โดยน้ำหนักของมวลรวม ถึงแม้ปริมาณเส้นลวดที่ใช้อาจจะน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมาในประเทศอิรัก [9] ที่ใช้เส้นใยเหล็กร้อยละ 0.2 ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ ก็ยังมีค่าเสถียรภาพสูงที่สุดถึง 2,524.77 lbs ซึ่งสูงกว่าค่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาถึงร้อยละ 10 ทั้งนี้ในทุก ๆ อัตราส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาทั้งหมด สอดคล้องกับการมีเส้นลวดในยางรถยนต์เป็นส่วนผสมนั้นจะเกิดการสร้างพันธะยึดเกาะกันภายในมวลรวมแอสฟัลต์ยึดเกาะกันที่ผิวหน้าของเส้นลวดในยางรถยนต์ซึ่งมีความขรุขระจากผลการทดสอบ SEM ทำให้เห็นได้ชัดว่าการมีวัสดุประเภทเส้นใยผสมปรับปรุงคุณภาพ

ในแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะภายในสอตคล้องกับงานวิจัยในประเทศจีน [11] ที่ใช้เส้นใยหินอะซอลต์ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตได้ผลดี การใช้ RAP เป็นส่วนผสมในงานวิจัยครั้งนี้ถึงแม้จะใช้ได้เพียงร้อยละ 10 ของมวลรวม ซึ่งหากเทียบกับงานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมาที่ใช้ได้ถึงร้อยละ 40 [6] ซึ่งถือว่าต่างกันมาก แต่ค่าเสถียรภาพและค่าความหนาแน่นที่สัดส่วน RAP เท่ากันในงานวิจัยนี้มีค่าที่สูงกว่างานวิจัยที่ดังกล่าวที่ผ่านมา สามารถลดการใช้มวลรวมได้ถึงร้อยละ 20 ลดราคาต้นทุนงาน AC Binder Course ลงร้อยละ 5 ต่อตารางเมตร ถึงแม้ว่าคุณสมบัติโดยรวมจะไม่ได้ดีมากแต่ในภาพรวมก็ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งหากนำไปใช้จริงในชั้นผิวทางของกรมทางหลวงถึงแม้จะไม่ได้ใช้ในเส้นทางสายหลักที่มีปริมาณการจราจรที่สูงมากก็สามารถใช้ในทางสายรองหรือทางขนาน (Frontage Road) ที่มีปริมาณการจราจรที่น้อยกว่าก็จะช่วยลดอัตราส่วนผสมของมวลรวมใหม่และเป็นการนำวัสดุมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้และลดต้นทุนในการทำลายยางรถยนต์เก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วอีกด้วย

ผู้วิจัยขอเสนอแนะว่าในการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิม RAP มาเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นควรทดลองศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของการนำ RAP มาปรับปรุงคุณภาพระหว่าง RAP ของสายทางที่มีอายุบริการที่ต่างกันและสายทางที่มีปริมาณการจราจรที่ต่างกัน

เส้นลวดในยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ววัสดุชนิดนี้ถือเป็นเรื่องใหม่สำหรับภายในประเทศที่มีการนำมาปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีต หากมีการทดสอบวัสดุชนิดนี้ร่วมกับยางแอสฟัลต์ชนิดอื่นและเพิ่มสัดส่วนของเส้นลวดให้มากยิ่งขึ้น เช่น ยาง AC 40-50 ที่มีความแข็งมากกว่า ยาง AC 60-70 เส้นลวดอาจช่วยให้ผิวถนนมีค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมากขึ้นได้ ซึ่งในปีงบประมาณ 2566 ที่ผ่านมายางชนิดนี้กำลังนิยมใช้ในการก่อสร้างถนนเส้นทางสายหลักของกรมทางหลวง หากผลเป็นที่น่าพอใจผ่านเกณฑ์มาตรฐานคงจะลดปริมาณวัสดุมวลรวมในการก่อสร้างถนนอย่างมากทั้งยังเป็นการช่วยสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้

### References

- [1] Bureau of Planning. Department of Highways. Highway registration information system [Internet]. 2023 [cited 2023 Nov 23]. Available from: <http://hris2.doh.go.th/home>. (In Thai)

- [2] The Secretariat of the House of Representatives. Budget of the Thailand Government No. 3, Fiscal Year 2023, Volume 5 [Internet]. 2022 [cited 2022 May 31]. Available from: <https://dl.parliament.go.th/handle/20.500.13072/597553>. (In Thai)
- [3] Department of Land Transport. Data report Department of Land Transport fiscal year 2023 [Internet]. 2023 [cited 2023 Sep 30]. Available from: <https://web.dlt.go.th/statistics/>. (In Thai)
- [4] Bridgestone Sales (Thailand). Tire Basic Structure. [Internet]. 2021 [cited 2021 Nov 3]. Available from: <https://bridgestonetruckcenter.com/blog/post/detail/51>. (In Thai)
- [5] Tire Bid Online. Tire composition. [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 3]. Available from: <https://tiresbid.com/content/post/detail/5548>. (In Thai)
- [6] Nokkaew N, Parakul D. Engineering Performance of Asphalt Concrete by Marshall Test Using Different Reclaimed Asphalt Pavement Content. *SWU Engineering Journal* 2018;13(3):114-26. (In Thai)
- [7] Xing X, Liu T, Pei J, Huang J, Li R, Zhang J, et al. Effect of fiber length and surface treatment on the performance of fibermodified Binder. *Construction and Building Materials* 2020;248:118702.
- [8] Gupta A, Fresno DC, Gonzalez PL, Hernandez JR. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. *Construction and Building Materials* 2021;266:121198.
- [9] Al-Ridha AS, Alkaissi ZA, Kareem SM. Evaluating the influence of adding steel fibers on the moisture damage and aging resistance of hot asphalt mixtures. *Materials Today: Proceedings* 2021;47:2520-28.
- [10] Guo Y, Tataranni P, Sangiorgi C. The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review. *Construction and Building Materials* 2023;390:131754.
- [11] Gao C, Wu W. Using ESEM to analyze the microscopic property of basalt fiber reinforced asphalt concrete. *International Journal of Pavement Research and Technology* 2018;11:374-80.
- [12] Department of Highway. Test Number DH-T 604/1974. Standard Test Asphalt Concrete by Marshall Method. Bangkok, Thailand: Department of Highway; 1974. (In Thai)
- [13] Department of Highway. Standard No.DH-S 408/2532. Asphalt Concrete. Bangkok, Thailand: Department of Highway; 1989. (In Thai)

### ประวัติผู้เขียนบทความ



**ธีรเดช เอียดยอด** นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000 เบอร์ติดต่อ 082 439 8674 E-mail: teeradetiadyod@gmail.com  
งานวิจัยที่สนใจ: งานด้านวัสดุวิศวกรรม



**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ** สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000 เบอร์ติดต่อ 088 340 3799 E-mail: chalat.t@rmutsv.ac.th  
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมความปลอดภัยทางถนน วิศวกรรมจราจรและวางแผนการขนส่ง และงานด้านวัสดุวิศวกรรม



**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวัต ไชยชาณวาทิก** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 10250 เบอร์ติดต่อ 02-320-2777 ต่อ 1202 E-mail: ch.bhawat@gmail.com  
งานวิจัยที่สนใจ: งานด้านการวางแผนด้านการจราจรและขนส่ง ความปลอดภัยทางถนน การวิเคราะห์และบริหารจัดการด้านการจราจร

---

#### Article History:

Received: February 24, 2024

Revised: October 23, 2024

Accepted: November 1, 2024