

การศึกษาถนนทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติก

A STUDY OF THE IMPACT OF RECYCLING PLASTIC WASTE FOR USE IN ASPHALT CONCRETE PAVEMENT

ทวี แสงสุวรรณโณ¹, ณัฐวิทย์ เวียงยา², สกนธ์ พิทักษ์วินัย³ และ พิทยุตม์ เจริญพันธ์^{4,*}

^{1,2,3,4} สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา, กรมทางหลวงชนบท

*Corresponding author address: phittayoot.c@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการนำขยะพลาสติกที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้มาทำถนนและศึกษาผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น กรมทางหลวงชนบท ได้ทดลองนำขยะพลาสติกมาเป็นส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งได้ผลที่ดีในห้องปฏิบัติการจึงขยายผลการศึกษาลงสู่ถนนที่มีปริมาณการจราจร น้ำหนักบรรทุกและสภาพแวดล้อมจริง เพื่อศึกษาถึงกระบวนการก่อสร้าง ข้อจำกัดปัญหาอุปสรรคต่างๆและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อปรับใช้ให้เหมาะสมต่อไป โดยการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจริงของถนน โดยมีตัวแปรจริงตามธรรมชาติ ทำให้จำเป็นต้องใช้วิธีการออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทางโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) ซึ่งสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ตัวแปรในการออกแบบจากห้องปฏิบัติการ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ เกณฑ์ความเสียหายของวัสดุ ผลการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของแปลงทดลองมีชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต หนา 0.05 เมตร พื้นทางแบบใช้วัสดุเดิมปรับปรุงคุณภาพความหนา 0.20 เมตร ได้ทำการก่อสร้างแปลงทดลองสมรรถนะผิวทางที่ถนนสาย สป.1002 แยกทางหลวงหมายเลข 1 - บ้านสองคอน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ, แก่งคอย จังหวัดสระบุรี ช่วงกิโลเมตรที่ 9+175 - 9+855 ปัจจุบันสำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบทได้ใช้เป็นแปลงทดลองเพื่อติดตาม พฤติกรรมและสมรรถนะทางวิศวกรรมต่อไป

คำสำคัญ: การออกแบบโครงสร้างชั้นทางเชิงวิเคราะห์, แอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติก, โมดูลัสการคืนตัว, ค่าการตอบสนองของโครงสร้างชั้น

Abstract

The paper presents a study of the impact of recycling plastic waste for use in asphalt concrete pavement. The Department of Rural Road has experimented with research to test the properties of recycling plastic waste for use in asphalt concrete pavement. In the laboratory, the results are good, so there is a motivation to move a laboratory section to the site section, thus expanding the study's results into traffic volume, vehicle loads, and environment in reality to study the construction process, limitations, obstacles, and engineering properties. For engineering properties, we study the pavement response actions such as deflection, stress and strain which have environmental variables, So we have to design the pavement thickness by Analytical Method. In this study, we created a Mathematical Model by using various variables of materials and criteria of previous material damage in the laboratory. The pavement structure in the experiment field with an asphalt concrete layer thickness of 0.05 m. and a pavement base using the origin materials thickness of 0.20 m. was completed on the road in January 2020. Nowadays, the Bureau of Testing Research and Development Department uses experiment field to monitor behavior and engineering performance.

Keywords: Analytical method, recycle plastic waste asphalt concrete, resilient modulus, Pavement response

1. บทนำ

ในยุควิถีชีวิตใหม่ (New Normal) ส่งผลให้พฤติกรรมการสั่งอาหารออนไลน์มีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นถึง 6,300 ตันต่อวัน [1] จากปัญหาข้างต้นทำให้หลายหน่วยงานต่างให้ความสำคัญ ด้วยการรณรงค์ลดการใช้ถุงพลาสติกหรือปลุกกระแสรักษ์โลก แต่ก็ยังมีขยะพลาสติกจำนวนมากที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลหรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้

สำหรับขยะพลาสติกที่นำมาใช้งานสำหรับการออกแบบส่วนผสมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต คือขยะพลาสติกประเภทถุงบรรจุ

ภัณฑ์ ที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี ชนิด LDPE (Low Density Polyethylene) เป็นสารโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ การนำขยะพลาสติกไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการนำขยะพลาสติกมาใช้งานที่เป็นประโยชน์ ดังนั้นสำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบทได้ทำการศึกษาพัฒนาการนำขยะพลาสติกชนิด LDPE มาเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยผ่านกระบวนการทำความเข้าใจ และย่อยจนได้ขนาดคละ 2-3 เซนติเมตร จากนั้นจึงนำมาออกแบบอัตราส่วนผสม และทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ทาง

วิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยพบว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติก ให้คุณสมบัติเทียบเท่าแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป

จากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้กรมทางหลวงชนบทสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาการนำขยะพลาสติกมาเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตในแปลงทดลองโดยทำการออกแบบความหนาชั้นโครงสร้างทางด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) เนื่องจากการออกแบบด้วยวิธีนี้สามารถคำนวณหาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างชั้นทางโดยคำนึงถึงค่าพฤติกรรมการตอบสนอง (Pavement Responses) เช่น ค่าความเครียด (Strain) ค่าความเค้น (Stress) หรือค่าการแอ่นตัวของโครงสร้าง (Deflection) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ [2] รวมถึงยังสามารถควบคุมค่าการตอบสนองให้สอดคล้องกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และสามารถติดตามประเมินผลในสนามต่อไปได้ ส่งผลให้สามารถวางแผนงานเพื่อคาดการณ์การปรับปรุงผิวทางสำหรับการยืดอายุการใช้งาน และเพิ่มประสิทธิภาพด้านความแข็งแรง รวมถึงความปลอดภัยของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

2. เครื่องมือทดสอบและแปลงทดสอบ

2.1. เครื่องมือทดสอบเพื่อประเมินผลในห้องปฏิบัติการ

2.1.1. การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (INDIRECT TENSILE TESTS)

การทดสอบแรงดึงอ้อมเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานการดึงอ้อมของหน่วยแรงกระทำ ณ ความเครียดคงที่จนกระทั่งตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความเสียหาย ตามมาตรฐาน ASTM D6931-17 โดยการทดสอบจะนำตัวอย่างไปทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงจำนวน 4 ค่า จากนั้นนำไปบรรจุไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 4 ชั่วโมง ก่อนจะนำตัวอย่างไปติดตั้งลงบนชุดเครื่องมือทดสอบแรงดึงทางอ้อม ในการทดสอบจะให้แรงกระทำด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตร/นาที จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดพร้อมคำนวณค่าความต้านทานการดึงอ้อม [3]



รูปที่ 1 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม

2.1.2. การทดสอบโมดูลัสการคืนตัว (RESILIENT MODULUS TESTS)

การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสการคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตจากแรงที่กระทำซ้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D7369-11 โดยการทดสอบจะนำตัวอย่างไปทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงจำนวน 4 ค่า จากนั้นนำไปบรรจุไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 4 ชั่วโมง ก่อนจะนำตัวอย่างไปติดตั้งลงบนชุดเครื่องมือทดสอบโมดูลัสการคืนตัว ซึ่งการทดสอบจะให้แรงกระทำซ้ำๆ ในลักษณะรูปแบบการให้แรงแบบ Haversine หรือลักษณะของความเค้น จำนวน 105 ครั้ง โดย 5 ครั้งสุดท้ายจะทำการบันทึกค่าแรงกระทำซ้ำต่อตัวอย่างและค่าการเสียรูปแวนอนที่คืนสภาพ พร้อมคำนวณค่าโมดูลัสการคืนตัวในสภาวะยืดหยุ่น [4]



รูปที่ 2 การทดสอบโมดูลัสการคืนตัว

2.1.3. การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อ (WHEEL TRACKING TESTS)

การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐาน EN 12697-22:2003 โดยการทดสอบจะนำตัวอย่างที่ทำการบดอัดด้วยเครื่อง Roller compactor ตามคุณสมบัติที่ออกแบบไว้ จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก เมื่อได้ขนาดตามที่กำหนดแล้วนำไปบรรจุลงแบบทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อพร้อมบรรจุลงเครื่องทดสอบ เปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดสอบจะให้แรงกระทำขนาด 700 N ผ่านล้อมาตรฐานวิ่งลงบนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยความเร็ว 26 รอบต่อนาที ในการทดสอบจะทำการบันทึก จำนวนรอบ (Number of passes), ความลึกของร่องล้อ (Rut depth, mm.) และอุณหภูมิในการทดสอบ (Temperature, °C) [5]



รูปที่ 3 การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อ

2.2. เครื่องมือทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะของผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกในแปลงทดลอง

2.2.1. เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของชั้น โครงสร้างถนน (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER)

Falling Weight Deflectometer (FWD) เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างถนน โดยวิธีการทดสอบคือทำการยกก้อนน้ำหนักไปยังระดับความสูงที่ต้องการ และปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระลงสู่แผ่นรับแรงกระแทก (Plate) โดยทั่วไปแรงตกกระแทกจะมีค่าเท่ากับ 50 kN จะเกิดแรงดันบนผิวทางเท่ากับ 700 kPa การวัดค่าแรงตกกระแทกสามารถวัดได้จากเซลล์วัดแรง (Load Cell) สำหรับค่าการแอ่นตัวที่เกิดจากแรงตกกระแทกจะได้จากการวัดสัญญาณคลื่นของเซนเซอร์วัดความเร็ว (Geophone) ที่ระยะต่างๆ โดยวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4694 [6]



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบ Falling Weight Deflectometer

2.2.2. เครื่องมือทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล BRITISH PENDULUM TESTER (BPT)

เครื่องมือทดสอบหาค่าความต้านทานการลื่นไถล British Pendulum Tester (BPT) มาตรฐานการทดสอบ ASTM E-303 เป็นเครื่องมือทดสอบที่ใช้หลักการวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยการเหวี่ยงก้อนปลายติดแท่นยาง สัมผัสกับพื้นผิวทดสอบ สามารถใช้งานได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและบนผิวทาง โดยผลการทดสอบแสดงเป็นค่า SRV (Skid Resistance Value) [7]



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล British Pendulum Tester

2.2.3. เครื่องมือทดสอบค่าความเสียดทาน AIRPORT SURFACE FRICTION TESTER (ASFT T-10)

เครื่องมือทดสอบ Airport Surface Friction Tester (ASFT T-10) เป็นเครื่องมือทดสอบประเภท Fixed-Slip ที่ถูกออกแบบให้ติดตั้งบนรถพ่วงลาก โดยใช้หลักการวัดความเสียดทานระหว่างล้อยางกับผิวทาง เมื่อทำการล้อการหมุนของล้อยางทดสอบให้อยู่ที่ 13 % ของความเร็วรถลาก โปรแกรมจะทำการประมวลผลค่าความเสียดทาน (Friction) โดยผลการทดสอบแสดงเป็นค่าความเสียดทาน μ (Coefficient of friction) [8]



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบค่าความเสียดทาน Airport Surface Friction Tester

2.2.4. เครื่องมือทดสอบค่าดัชนีความขรุขระสากล (INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX, IRI)

เครื่องมือทดสอบค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index, IRI) คือ ค่าดัชนีที่ใช้ประเมินความขรุขระของผิวทาง บ่งบอกถึงสภาพการให้บริการของผิวทางโดยรวม ได้จากผลการวัดค่าระดับของผิวทางตามทิศทางการวิ่ง นำค่าผลรวมที่ได้มาหารด้วยระยะทางตามแนวราบมาคำนวณตามสมการทางคณิตศาสตร์ [9]



รูปที่ 7 เครื่องมือทดสอบค่าดัชนีความขรุขระสากล
International Roughness Index

2.3. แปลงทดสอบ

แปลงทดลองตั้งอยู่บนถนนสาย สป.1002 แยกทางหลวงหมายเลข 1 – บ้านสองคอน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ, แก่งคอย จังหวัดสระบุรี ในช่วงกิโลเมตรที่ 9+175 – 9+855 (รวมระยะทาง 680 เมตร) เป็นถนน 2 ช่องจราจร ตัดผ่านเขตชุมชน สถานศึกษา แหล่งท่องเที่ยว โรงโมหินและโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ทำให้มีปริมาณจราจรมากถึง 2,716 คันต่อวัน และมีอัตราส่วนปริมาณรถบรรทุกมากถึงร้อยละ 40 ซึ่งเป็นปริมาณที่มากเพียงพอที่จะทำการทดลองคุณสมบัติทางวิศวกรรมภายใต้สิ่งแวดล้อม ปริมาณจราจร และน้ำหนักบรรทุกจริง และ โดยแปลงทดลองช่วงดังกล่าวมีลักษณะถนนค่อนข้างเป็นทางตรง และมีความเสียหายเดิมอยู่แล้วหลายจุด ผู้วิจัยจึงเลือกถนนสายดังกล่าวเป็นถนนทดลองผิวทางแอสฟัลต์ผสมขยะพลาสติก



รูปที่ 8 ถนนสาย สป.1002 ก่อนการก่อสร้างถนนทดลอง

3. การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง

การออกแบบโครงสร้างชั้นทางถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) เป็นวิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างชั้นทางขณะรับน้ำหนักบรรทุก ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย น้ำหนักบรรทุกและปริมาณจราจร (Load and Traffic) สภาพแวดล้อม (Environment) เกณฑ์กำหนดความเสียหาย (Failure Criteria) และคุณสมบัติอีลาสติกของวัสดุ (Modulus of Material) ที่ใช้ในการก่อสร้าง

3.1. น้ำหนักบรรทุกและปริมาณจราจร

(LOAD AND TRAFFIC)

ในการออกแบบความหนาของโครงสร้างชั้นทาง จำเป็นต้องทราบปริมาณจราจรและอายุการออกแบบใช้งาน (Design Period) ก่อน โดยนำข้อมูลจราจรที่แบ่งตามประเภทยานพาหนะ มาแปลงเป็นจำนวนเพลามาตรฐาน (Equivalent Single Axle Load, ESAL) ซึ่งน้ำหนักเพลามาตรฐานสำหรับออกแบบ (Standard Axle)

เท่ากับ 10 ตัน ชนิดเพลาคู่เดี่ยวล้อคู่ (Single Axle, Dual Wheels) [10]

จากข้อมูลการสำรวจปริมาณจราจรสายทาง สป.1002 มีค่าเฉลี่ยปริมาณจราจรรายวัน (Average daily traffic, ADT) ประมาณ 2,716 คัน/วัน โดยเมื่อนำข้อมูลปริมาณจราจรมาแบ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของรถบรรทุกหนัก (%T) เท่ากับ 0.40 ซึ่งการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกหนักในช่องทางจราจรที่ออกแบบ (Design Lane, DL) ในช่วงปีแรกจะกำหนดสัดส่วนปริมาณการวิ่งบนช่องทางจราจรมีค่าแนะนำเท่ากับ 0.50 จากนั้นนำเปอร์เซ็นต์ของรถบรรทุกหนักมาหาค่า Truck Factor (TF) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.77 นอกจากนี้ปัจจัยการเพิ่มขึ้น (Growth Factor, GF) ของปริมาณรถที่เพิ่มขึ้นมีความจำเป็นในการคำนวณปริมาณจราจร โดยกำหนดอัตราการเติบโตที่ 4% และอายุในการออกแบบที่ 7 ปีมีค่า GF เท่ากับ 7.90 แล้วนำไปคำนวณหาจำนวนน้ำหนักเพลามาตรฐาน (ESAL Design = $ADT * \%T * DL * TF * GF * 365$) โดยโครงสร้างทางตลอดช่วงเวลาออกแบบจะได้ค่าออกมาเท่ากับ 6,050,000 ESAL

3.2. คุณลักษณะของวัสดุ

(MATERIAL CHARACTERISTIC)

3.2.1. ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุแบบกึ่งยืดหยุ่น (Visco-elastic Material) มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและการเสียรูปที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา อุณหภูมิ สถานะความเค้น (Stress State) และอัตราการเกิดความเครียด (Strain Rate) โดยคุณสมบัติของวัสดุสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM D7369-11 โดยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสการคืบตัวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละชนิด

ชนิดของผิวทาง	โมดูลัสการคืบตัว, M_r (MPa)
แอสฟัลต์คอนกรีต (AC)	3,013
แอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกที่แทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยขยะพลาสติกร้อยละ 8 (AC-8%PL)	4,698
แอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกที่แทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยขยะพลาสติกร้อยละ 10 (AC-10%PL)	5,462

3.2.2. วัสดุพื้นฐาน

วัสดุพื้นทางเป็นวัสดุไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Unbound Material) โดยทั่วไปนิยมใช้หินคลุกในการก่อสร้าง ซึ่งปัจจุบันได้มีการศึกษานำวัสดุชั้นพื้นทางเดิมมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง เรียกว่า (Pavement In – Place Recycling) เป็นการปรับปรุงชั้นทางเดิมให้มีคุณภาพที่เพิ่มสูงขึ้น โดยได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ทำให้วัสดุชั้นพื้นทางเดิมกลายเป็นวัสดุที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Bound Material) ที่มีพันธะเชื่อมประสาน (Cementation Bond) ช่วยให้วัสดุพื้นทางมีความสามารถในการรับแรงดึงและกำลังต้านแรงเฉือนได้สูงขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยคุณสมบัติของวัสดุสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน AASHTO T294-94 [11] โดยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสการคืนตัวของพื้นทาง

ชนิดของพื้นทาง	โมดูลัสการคืนตัว, M_r (MPa)
ชั้นพื้นทาง (Pavement In – Place Recycling)	6,173
ชั้นพื้นทาง (หินคลุก)	400
ชั้นรองพื้นทาง (ลูกรัง)	150

3.2.3. วัสดุเม็ดละเอียด

วัสดุเม็ดละเอียด หรือ ดินเดิม ดินถม ทรายถม เป็นวัสดุที่มีส่วนละเอียดมาก ความสามารถในการรับน้ำหนักได้น้อยที่สุด โดยทั่วไปนิยมใช้สำหรับการปรับระดับหรือปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเดิมก่อนการก่อสร้าง ซึ่งค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุเม็ดละเอียดสามารถทดสอบได้จากมาตรฐาน AASHTO T274 โดยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสการคืนตัวของวัสดุเม็ดละเอียด

ชนิดของพื้นทาง	โมดูลัสการคืนตัว, M_r (MPa)
ชั้นดินเดิม CBR = 5%	49.3

3.2.4. อัตราส่วนปัวซอง

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio, ν) เป็นอัตราส่วนของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงขนาดเกิดความเครียดในแนวแรง (axial strain) ถ้าวัตถุยืดตัวออก พื้นที่หน้าตัด (cross-section area) ของวัตถุจะลดลงเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า ความเครียดในแนวขวาง (lateral strain) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับแรงที่กระทำ ดังแสดงในสมการที่ (1) ทั้งนี้ทาง AUSTROADS (2004) ได้แนะนำค่าโมดูลัสการคืนตัวและอัตราส่วนปัวซองของวัสดุฐานทางดังแสดงในตารางที่ 4

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{axial}} \quad (1)$$

โดยที่

$\epsilon_{lateral}$ = การเคลื่อนตัวในแนวราบ

ϵ_{axial} = การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง

ตารางที่ 4 ค่าโมดูลัสการคืนตัวและอัตราส่วนปัวซองของวัสดุฐานทางที่แนะนำ [12]

ชนิดของวัสดุ	ค่าโมดูลัสการคืนตัว (MPa)			อัตราส่วนปัวซอง	
	ค่าต่ำสุด	ค่าทั่วไป	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
แอสฟัลต์คอนกรีต	500	3500	14000	0.25	0.40
ชนิดของวัสดุ	ค่าโมดูลัสการคืนตัว (MPa)			อัตราส่วนปัวซอง	
	ค่าต่ำสุด	ค่าทั่วไป	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
พื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์	1400	5000	14000	0.15	0.25
วัสดุเม็ดหยาบ	70	200	350	0.20	0.40
วัสดุเม็ดละเอียด	30	100	200	0.20	0.40
ดินทั่วไป	20	50	170	0.30	0.45

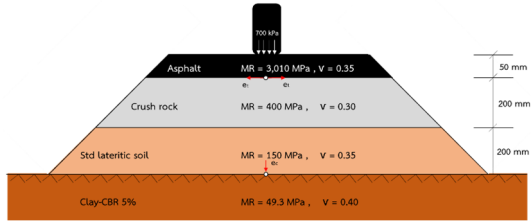
3.3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างชั้นทาง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางของแปลงทดลองนี้ เพื่อวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองของโครงสร้างชั้นทาง (Pavement Response) ต่อแรงหรือน้ำหนักบรรทุกทุกที่มากระทำ ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการสร้างแบบจำลองโดยการกำหนดชนิดของวัสดุและความหนาของแต่ละชั้นทาง คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชั้นผิวทางและวัสดุพื้นทางในห้องปฏิบัติการ

3.3.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทาง

รูปแบบที่ 1

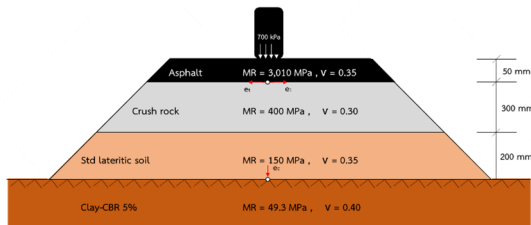
กำหนดรูปแบบของแบบจำลองให้มีชนิดและความหนาของวัสดุชั้นทางเหมือนกับรูปแบบโครงสร้างชั้นทางตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท โดยมีชั้นผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.05 เมตร พื้นทางแบบหินคลุกหนา 0.20 เมตร ชั้นรองพื้นทางลูกรัง 0.20 เมตร และชั้นคั่นทางที่สมมติให้มีความหนาแบบไม่มีที่สิ้นสุด มีน้ำหนักจากรถบรรทุกทุกกลองเท่ากับ 10 ตัน



รูปที่ 9 แบบจำลองคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 1

3.3.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 2

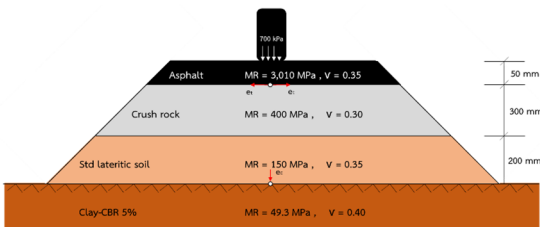
กำหนดรูปแบบของแบบจำลองให้มีจำนวนชั้นทาง และชนิดวัสดุเหมือนกับโครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 1 แต่เพิ่มความหนาของวัสดุชั้นพื้นทางขึ้น โดยมีชั้นผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.05 เมตร พื้นทางแบบหินคลุกหนา 0.30 เมตร ชั้นรองพื้นทางลูกรัง 0.20 เมตร และชั้นคันทางที่สมมุติให้มีความหนาแบบไม่มีที่สิ้นสุด มีน้ำหนักจากรถบรรทุกทุกเลาเท่ากับ 10 ตัน



รูปที่ 10 แบบจำลองคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 2

3.3.3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 3

กำหนดรูปแบบของแบบจำลองให้มีจำนวนชั้นทาง และชนิดวัสดุเหมือนกับโครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 1 แต่เพิ่มความหนาของวัสดุชั้นผิวทางขึ้น โดยมีชั้นผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.10 เมตร พื้นทางแบบหินคลุกหนา 0.25 เมตร ชั้นรองพื้นทางลูกรัง 0.25 เมตร และชั้นคันทางที่สมมุติให้มีความหนาแบบไม่มีที่สิ้นสุด มีน้ำหนักจากรถบรรทุกทุกเลาเท่ากับ 10 ตัน

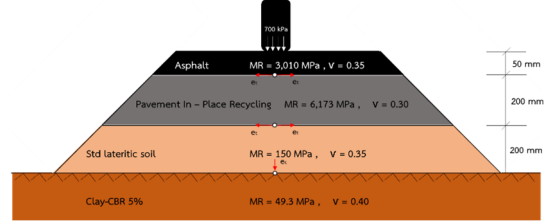


รูปที่ 11 แบบจำลองคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 3

3.3.4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 4

กำหนดรูปแบบของแบบจำลองให้มีชนิดและความหนาของวัสดุชั้นทางเหมือนกับ โครงสร้างชั้นทางที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยมีชั้นผิว

ทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 0.05 เมตร พื้นทางแบบหินเวียนวัสดุในที่หนา 0.20 เมตร ชั้นรองพื้นทางลูกรัง 0.20 เมตร และชั้นคันทางที่สมมุติให้มีความหนาแบบไม่มีที่สิ้นสุด มีน้ำหนักจากรถบรรทุกทุกเลาเท่ากับ 10 ตัน



รูปที่ 12 แบบจำลองคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 4

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างชั้นทางทั้ง 4 รูปแบบ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ความเครียดในแต่ละชั้นทางได้ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ความเครียดในแต่ละชั้นทาง

ลำดับ	ϵ_t (μ strain) ใต้ผิวทาง	ϵ_t (μ strain) ใต้ชั้น Recycling	ϵ_c (μ strain) บนดินเดิม
1	197.8	-	853.0
2	188.4	-	580.9
3	185.6	-	465.9
4	71.1	115.40	340.8

3.4. เกณฑ์กำหนดความเสียหาย (FAILURE CRITERIA)

จากการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองของโครงสร้างชั้นทาง (Pavement Response) ต่อแรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำ สามารถวิเคราะห์หาปริมาณจราจรที่รองรับได้ โดยเลือกใช้สมการของ Shell [13] เป็นเกณฑ์กำหนดความเสียหาย (Failure Criteria) เนื่องจากเกณฑ์กำหนดความเสียหายของ Shell มีความใกล้เคียงกับการความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในประเทศไทยมากที่สุด โดยแบ่งเกณฑ์กำหนดความเสียหายออกเป็น 2 เกณฑ์ คือ 1) ความเสียหายเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking) บริเวณใต้ผิวของชั้นผิวทาง และ 2) ความเสียหายเนื่องจากร่องล้อ (Rutting) บริเวณชั้นดินเดิม จากเกณฑ์กำหนดความเสียหายสามารถนำมาหาปริมาณจราจรที่รองรับ

ตารางที่ 6 ค่าความเครียดของโครงสร้างทางทั้ง 4 แบบที่ได้จากการวิเคราะห์

แบบ	ESAL ที่	(Fatigue Cracking)		(Rutting)	ผล
		N_f	N_f	N_f	

	ออกแบ บ (x10 ⁶)	ได้ผิวทาง (x10 ⁶)	ได้ชั้น Recycling (x10 ⁶)	บนดินเดิม	
1	6.05	6.89	-	1.16	Fail
2	6.05	8.79	-	5.39	Fail
3	6.05	9.47	-	13.02	Pass
4	6.05	1149.4 6	101.91	45.48	Pass

จากผลการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองและผลการเปรียบเทียบเกณฑ์การลำของวัสดุชั้นทาง ผู้วิจัยได้เลือกแนวทางการออกแบบตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างทางแบบที่ 4 เนื่องจากชั้นโครงสร้างดังกล่าวมีคุณสมบัติในการรับปริมาณจราจรที่วิ่งผ่านได้ตามปีที่ออกแบบไว้ (7 ปี) รวมไปถึงโครงสร้างทางดังกล่าวมีงบประมาณในการก่อสร้างที่เหมาะสมไม่มากเกินไปเมื่อเทียบกับโครงสร้างทางแบบที่ 3 ซึ่งเป็นการก่อสร้างด้วยวัสดุใหม่ทั้งหมด อีกทั้งยังมีความหนาของชั้นทางที่มากส่งผลให้งบประมาณการก่อสร้างมีงบประมาณที่เพิ่มมากขึ้น แตกต่างจากโครงสร้างทางแบบที่ 4 ที่นำวัสดุชั้นพื้นทางเดิมมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Pavement In - Place Recycling) เป็นการปรับปรุงชั้นทางเดิมให้มีคุณภาพที่เพิ่มสูงขึ้น ลดงบประมาณในการรื้อ ขนย้ายพื้นที่ในการจัดเก็บและลดการนำทรัพยากรใหม่เข้ามาใช้ ส่งผลทำให้ลดมลภาวะของสิ่งแวดล้อมในการระเหิดหินเพื่อนำวัสดุมาใช้ในการก่อสร้างเป็นต้น

4. ก่อสร้าง

ในกระบวนการก่อสร้างถนนทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกมีขั้นตอนการก่อสร้างเช่นเดียวกับแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป โดยแตกต่างกันตรงกระบวนการผสมเศษขยะพลาสติกลงในห้องผสม (Pug mill) ผ่านการชั่งน้ำหนักด้วย Load cell เพื่อควบคุมปริมาณขยะพลาสติกได้อย่างถูกต้องแม่นยำ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



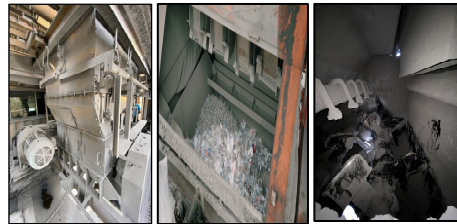
รูปที่ 13 เศษขยะพลาสติกที่นำมาใช้ในการทดสอบ

1) การเตรียมเศษขยะพลาสติกที่ยัง ในโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จากนั้นชั่งน้ำหนักเศษขยะพลาสติกจากอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกที่ได้ทำการออกแบบ และลำเลียงเศษขยะพลาสติกเข้าสู่ห้องผสม (Pug mill) เพื่อผสมเข้ากับหินร้อน



รูปที่ 14 การเตรียมเศษขยะพลาสติกเพื่อลำเลียงเข้าสู่ Pug mill

2) ผสมเศษขยะพลาสติกร่วมกับวัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์ในห้องผสม ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบ



รูปที่ 15 ขั้นตอนการผสมวัสดุตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบ

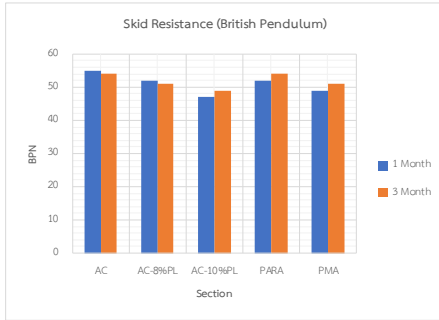
3) นำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกที่ได้จากห้องผสม ใส่รถบรรทุกและควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด จากนั้นนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกไปผิวทางบนแปลงทดสอบบนสายทาง



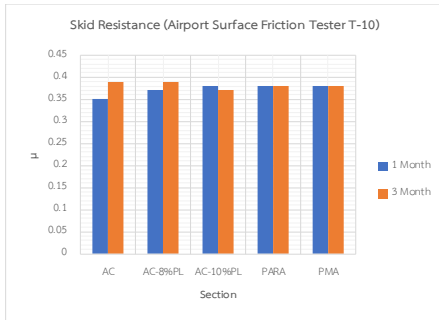
รูปที่ 16 ขั้นตอนการปูผิวทางด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกบนสายทาง

5. ติดตามประเมินผลคุณสมบัติทางวิศวกรรม

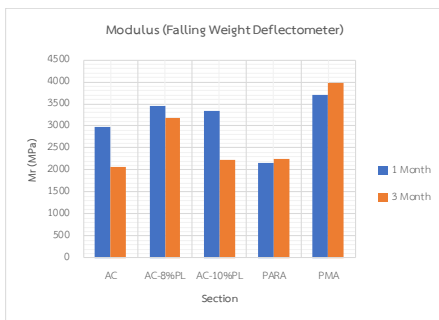
หลังจากปูผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติก บนสายทางแล้ว จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกภาคสนาม เพื่อประเมินประสิทธิภาพของผิวทางเมื่อเปิดใช้งาน โดยการทดสอบความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างถนนด้วยเครื่องมือ FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER, ทดสอบหาค่าความต้านทานการลื่นไถล (SKID RESISTANCE VALUE, SRV), ทดสอบหาค่าความเสียดทาน (Friction) และทดสอบหาค่าดัชนีความขรุขระสากล (INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX, IRI) แสดงผลการทดสอบดังนี้



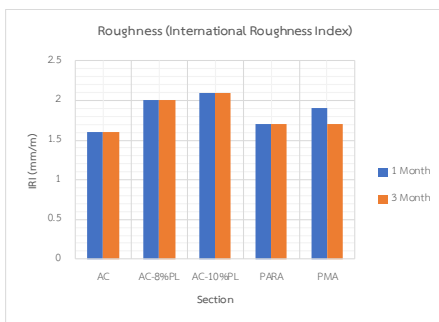
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BPN กับชนิดผิวทาง



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Friction กับชนิดผิวทาง



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus กับชนิดผิวทาง



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI กับชนิดผิวทาง

จากรูปที่ 17 ถึง 20 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมในภาคสนาม พบว่าคุณสมบัติในการต้านทานความชื้นเกลือและความเสียหายใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีต ค่าความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างชั้นทางของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขี้เถ้าร้อยละ 8 มีค่าสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีต ส่วนแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขี้เถ้าร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงแอสฟัลต์คอนกรีต และค่าดัชนีความขรุขระสากลของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขี้เถ้ามี

แนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณร้อยละผสม ทั้งนี้อาจเกิดจากกระบวนการก่อสร้าง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นโค้งขึ้นและลงเนิน โดยคุณสมบัติดังกล่าวยังมีระยะเวลาในการศึกษาที่ไม่มากพอ ปัจจุบันยังอยู่ระหว่างการติดตามและรวบรวมข้อมูล

6. สรุปและการนำไปใช้

จากการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขี้เถ้าพลาสติกในห้องปฏิบัติการ พบว่าการใช้ขี้เถ้าพลาสติกผสมลงไปกับมวลรวมเพื่อลดปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ลงในปริมาณไม่เกินร้อยละ 10 ยังคงคุณสมบัติให้เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานได้ และค่าสมรรถนะของผิวทางยังมีแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยมีกำลังรับแรงดิ่งทางอ้อมที่เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 15-50 โมดูลัสคืนตัวเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 55-80 และค่าการต้านทานร่องล้อเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4-7 ตามปริมาณการผสมขี้เถ้าพลาสติกที่เพิ่มขึ้น

จากการใช้ขี้เถ้าพลาสติกผสมลงไปกับมวลรวมเพื่อลดปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ลงในปริมาณร้อยละ 10 สามารถลดปริมาณการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ลงและยังช่วยในการกำจัดขยะที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้

ดังนั้นในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตภาคสนาม ชนิดผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขี้เถ้าพลาสติก มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบเท่ากับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยทั่วไป

7. การอ้างอิง

- [1] สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย (2563). การดำเนินงานจัดการพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวในธุรกิจบริการส่งอาหาร (Food Delivery). นำเสนอในการประชุมเชิงปฏิบัติการการลดการใช้พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้งจากการบริการส่งอาหารและซื้อกลับบ้าน วันที่ 3 ธันวาคม 2563
- [2] Huang, Y.H. (1993) Pavement Analysis and Design. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- [3] ASTM (2017). ASTM D6931-17, Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [4] ASTM (2011). ASTM D7369-11, Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test (Withdrawn 2020), ASTM International, West Conshohocken, PA
- [5] British Standards Institution (2003). EN 12697-22:2003 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking
- [6] ASTM (2020). ASTM D4694-09(2020), Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [7] ASTM (2018). ASTM E303-93(2018), Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA

- [8] ASTM (2020). ASTM E274 / E274M-15(2020), Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [9] ASTM (2021). ASTM E1926-08(2021), Standard Practice for Computing International Roughness Index
- [10] AASHTO (1993) Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [11] AASHTO (1994) Standard Method of Test for Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils - SHRP Protocol P46. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [12] Austroads (2004). Pavement Design Manual, Austroads, Sydney, NSW
- [13] Shell S. P. D. M. A. (1978), Pavements and Overlays for Road Traffic. Shell International Petroleum, London.