

กรณีศึกษาสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมอุ่น ถนนสาย รย.4036 Case Study on the Performance of Warm Mix Asphalt Concrete Roads RY.4036

ลิขิต ทิฐิธรรมเจริญ¹ บุญจอม พรหมทอง² ณัฐวิทย์ เวียงยา³ สกนธ์ พิทักษ์วินัย⁴ พิทยุตม์ เจริญพันธุ์⁵

ณัฐธิดา ขวัญลิขิต⁶ สกรรจ์ จ่านงค์⁷ นูรีฮัน ซา⁸ กฤษดา เหมือนเนียม⁹

^{1,2,3,4,5,6,7,8,9} สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท

*Corresponding author; E-mail address: phittayoot.c@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีแอสฟัลต์ชนิดผสมอุ่น (Warm Mix Asphalt; WMA) เป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก โดยสามารถลดอุณหภูมิในขั้นตอนการผลิตส่วนผสมและการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส (°C) เมื่อเทียบกับการใช้แอสฟัลต์ชนิดผสมร้อน (Hot Mix Asphalt; HMA) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล สมรรถนะของผิวทาง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระหว่าง WMA และ HMA โดยเลือกใช้ WMA ชนิดที่เติมสารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Additives) ผลิตภัณฑ์ในโรงงานผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Pre-blend) ที่มีคุณสมบัติช่วยลดแรงตึงผิว (Surfactants) ระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวม และ HMA ที่ใช้เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเทรชันเกรด AC 60-70 โดยได้คัดเลือกแปลงทดลอง ถนนสาย รย.4036 จ.จันทบุรี เป็นถนนเลียบริมชายฝั่งทะเล ซึ่งมีผลกระทบจากการแทรกซึมของโคลไรด์ และเป็นถนนการท่องเที่ยวที่มีปริมาณจราจร 3,212 คัน/วัน จากผลการศึกษาพบว่า WMA สามารถลดอุณหภูมิการผลิตส่วนผสมและการก่อสร้างได้อย่างน้อย 20 (°C) โดยที่คุณสมบัติเชิงกลของ WMA ยังคงเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ WMA ยังสามารถลดการใช้น้ำมันเตา และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide; CO₂) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับ HMA ในส่วนของขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม WMA สามารถลดฝุ่นควันระหว่างการก่อสร้างได้ ซึ่งช่วยให้พื้นที่ก่อสร้างมีสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยทั้งคนปฏิบัติงานและประชาชนในพื้นที่มากขึ้น ทั้งนี้จะมีการติดตามประเมินพฤติกรรมระยะยาวของ WMA ภายใต้สภาพการใช้งานและสภาพแวดล้อมจริงต่อไป

คำสำคัญ: แอสฟัลต์ชนิดผสมอุ่น, สมรรถนะของผิวทาง, การลดการปล่อยมลพิษ

Abstract

Currently, Warm Mix Asphalt (WMA) technology is one of the innovations that help to reduce greenhouse gas emissions into the Earth's atmosphere by lowering the production and construction temperatures of asphalt concrete pavement by 20

to 40°C compared to Hot Mix Asphalt (HMA). This research aimed to study WMA technology in terms of mechanical properties, pavement performance, and environmental impact, comparing WMA and HMA by selecting WMA produced in an asphalt cement mixing plant (pre-blend) with chemical additives that had the properties of reducing the surface tension (surfactants) between asphalt cement and aggregates. A field trial was conducted on Rural Road RY.4036 in Chanthaburi Province, a coastal road with a traffic volume of 3,212 vehicles/day. The results of the study revealed that WMA was able to reduce production and construction temperatures by 20°C while maintaining its mechanical properties. In terms of fuel, compared with HMA, the consumption of boiler oil and the emission could be decreased by 30% in terms of the environment. However, the on-site construction process of WMA can be better for reducing the emission of flue gas pollutants in the construction process, thus bringing a safer environment to the construction site, operators, and on-site residents. Therefore, the evaluation of WMA's long-term behavior under actual use conditions and environments is still of great significance for further monitoring in the future

Keywords: Warm Mix Asphalt, Pavement Performance, Emission Reduction

1. คำนำ

ปัจจุบันโลกกำลังสิ้นสุดยุคโลกร้อน (Global Warming) และกำลังก้าวเข้าสู่ยุคโลกเดือด (Global Boiling) โดยข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจากองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration; NASA) ในปี ค.ศ. 2024 ระบุว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นถึง 1.47 °C เมื่อเทียบกับในช่วงปี ค.ศ. 1850 ถึง 1900 [1] หากอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นถึง 1.50 °C จะทำให้โลกก้าวเข้าสู่ยุคโลกเดือด (Global Boiling) ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตการเป็นอยู่ของ

มนุษย์และสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ซึ่งทั่วโลกได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวจึงได้รวมตัวกัน 196 ประเทศ จัดทำสนธิสัญญาหรือข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) ในปี ค.ศ. 2015 ภายใต้การมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด (Nationally Determined Contribution; NDC) โดยมีเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 30 ถึง 40 จากกรณีปกติ (BAU) ภายในปี ค.ศ. 2030 และสำหรับประเทศไทยได้มีการจัดทำแผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศตั้งแต่ พ.ศ. 2564 ถึง 2573 (NDC Roadmap) และมีเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศร้อยละ 20 ภายในปี พ.ศ. 2573 [2] ในปัจจุบันถนนในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบทนิยมใช้ผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตมากถึงร้อยละ 93 เป็นผิวทางคอนกรีตเพียงร้อยละ 7 [3] ซึ่งในขั้นตอนการผลิตแอสฟัลต์ซีเมนต์ปล่อย CO₂ เท่ากับ 11.91 kg CO₂/gal หินที่ได้จากการระเบิดภูเขา เท่ากับ 1.067 kg CO₂/ton และส่วนผสม HMA ที่ใช้เชื้อเพลิงในการให้ความร้อนวัสดุ เท่ากับ 2.66 kg CO₂/liter [4] อีกทั้งยังก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย และฝุ่นละออง ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5,6]

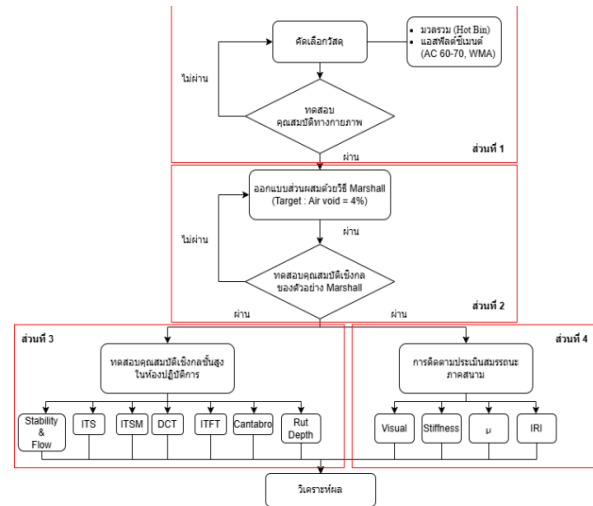
WMA เป็นเทคโนโลยีหนึ่งเพื่อลดอุณหภูมิในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต โดยถือกำเนิดที่ประเทศเยอรมนี ในปี ค.ศ. 1990 ด้วยการใช้น้ำมัน (Waxes) เป็นตัวปรับปรุงความเหนียวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ [7] ทั้งนี้ในทวีปยุโรปการใช้ WMA ยังไม่แพร่หลายเท่ากับสหรัฐอเมริกา เนื่องจากในทวีปยุโรปใช้ WMA เฉพาะงานพิเศษ เช่น งานที่ต้องการเปิดการจราจรที่รวดเร็ว งานทางแยก สนามบิน และพื้นที่ที่มีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งใช้เฉพาะสำหรับงานพิเศษมากกว่าการแทนที่ HMA แบบทั่วไป [8]

เทคโนโลยี WMA ปัจจุบันมีเทคนิคการผลิต 4 เทคนิค ได้แก่ 1) Organic Additives เป็นวิธีการลดความเหนียวและเพิ่มการไหลให้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยใช้ Sasobit หรือ Wax เป็นสารผสมเพิ่ม ซึ่งวิธีนี้สามารถลดอุณหภูมิในการบดอัดได้ 20 ถึง 30 °C [9] 2) Chemical Additives เป็นวิธีการลดแรงตึงผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวม ผลัดกันอยู่ในรูปแบบเม็ด ผง และของเหลว วิธีนี้สามารถลดอุณหภูมิการบดอัดได้มากถึง 30 °C [10] 3) Foaming Techniques เป็นวิธีการทำให้เกิดฟองในแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อเพิ่มปริมาตรและลดความเหนียวได้ [11] 4) Hybrid Technologies เป็นการผสมผสานตั้งแต่ 2 เทคนิคขึ้นไป

กรมทางหลวงชนบทได้ตระหนักถึงความสำคัญในการเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศ จึงมุ่งมั่นในการศึกษาวิจัยและพัฒนาวัสดุสร้างทางที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้แต่ยังคงมีคุณสมบัติเชิงกล ความแข็งแรงและความคงทนเทียบเท่าวัสดุสร้างทางเดิมที่ใช้กันอยู่ปัจจุบัน ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือก ใช้ WMA ชนิดที่เติมสารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Additives) ผลัดในโรงงานผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Pre-blend) และ HMA ที่ใช้เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเทรชันเกรด AC 60-70 เป็นวัสดุประสานในแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ และติดตามสมรรถนะผิวทางทั้งในห้องปฏิบัติการและภายใต้การจราจรและสิ่งแวดล้อมจริง

2. วิธีการดำเนินการ

วิธีการดำเนินการแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบไปด้วย 1) วัสดุและคุณสมบัติทางกายภาพ 2) การออกแบบส่วนผสม 3) การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในห้องปฏิบัติการ และ 4) การติดตามประเมินสมรรถนะภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการดำเนินการ

2.1 วัสดุและคุณสมบัติทางกายภาพ

2.1.1 มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นหินปูน (limestone) จากโรงโม่หิน บ.ศิริภรณ์ศิลา จังหวัดระยอง โดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นและคัดแยกขนาดผ่านตะแกรงที่โรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) หินฝุ่น (Hot Bin 1) 2) หิน 3/8" (Hot Bin 2) 3) หิน 1/2" (Hot Bin 3) และ 4) หิน 3/4" (Hot Bin 4) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 มวลรวม (Hot Bin)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (Hot Bin)

การทดสอบ	Hot Bin 1	Hot Bin 2	Hot Bin 3	Hot Bin 4
Gradation (% Passing)				
3/4"			100	100
1/2"		100	81.85	9.19
3/8"	100	98.99	44.21	2.33
#4	98.44	41.50	1.94	0.71
#8	76.32	2.33	0.80	
#30	30.40	1.49		
#50	21.38			
#100	16.52			
#200	13.50			
Bulk Specific Gravity	2.693	2.726	2.744	2.754
Apparent Specific Gravity	2.755	2.766	2.772	2.776
Flakiness Index (%)		28.94	22.97	14.07
Elongation Index (%)		8.27	29.37	6.56
Los Angeles Abrasion (%)			27.40	
Soundness (% Wt. Loss)	0.87		1.79	
Sand Equivalent (%)	64.38			

2.1.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement; AC) ที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิดได้แก่
1) AC ชนิด AC 60-70 จากบริษัท เรย์โคล แอสฟัลต์ จำกัด จังหวัดระยอง
ใช้สำหรับเชื่อมประสานส่วนผสม HMA และ 2) AC ชนิด WMA ใช้สำหรับเชื่อม
ประสานส่วนผสม WMA ที่ผลิตจาก AC 60-70 ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการ
เติมสารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Additives) เพื่อลดค่าความหนืดใน AC
ที่ควบคุมการผลิตจากโรงงานผลิตแอสฟัลต์ (Pre-blend) เพื่อให้ใช้งานได้ที่
อุณหภูมิขณะผสมและบดอัดได้ต่ำกว่า AC 60-70 อย่างน้อย 20 °C ดังแสดงใน
รูปที่ 3 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 และ WMA

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของ AC 60-70 และ WMA

การทดสอบ	ผลทดสอบ		มาตรฐานที่ กำหนด [12]
	AC 60-70	WMA	
เพนิเทรชัน (Penetration) ที่ 25 °C (0.1 mm.)	64	65	60-70
จุดวาบไฟไม่น้อยกว่า (°C)	340	328	232
จุดอ่อนตัว (°C)	48.6	46.3	45-55

ความต้านแรงเฉือนไดนามิก $G^*/\sin \delta$ ที่ 10 rad/s ที่อุณหภูมิ 64 °C ไม่น้อยกว่า (kPa)	1.09	1.06	1.00
การละลายใน Trichloroethylene ไม่น้อยกว่า (cm.)	99.8	99.9	99.0
การยืดดึง (Ductility) ไม่น้อยกว่า (cm.)	> 100	> 100	100
Specific Gravity	1.02	1.02	Report
ค่าที่เหลือจากการอบ			
น้ำหนักสูญเสียเมื่อให้ความร้อนไม่เกิน (%)	0.12	0.16	0.8
ร้อยละของเพนิเทรชันเดิมไม่น้อยกว่า (%)	80.2	70.8	54
การยืดดึง (Ductility) ไม่น้อยกว่า (cm.)	> 50	> 50	50

2.2 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ผู้วิจัยได้
อ้างอิงคุณสมบัติของส่วนผสมตามมาตรฐาน มทข.230 [13] โดยมีสัดส่วน
ผสมดังแสดงในตารางที่ 3 และมีคุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์
คอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ส่วนผสม (Job Mix Formula)

Mix	Formula	Proportion			
		Hot Bin 1	Hot Bin 2	Hot Bin 3	Hot Bin 4
HMA (Control)	HMA	48	25	14	13
WMA	WMA	48	25	14	13

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต

Properties	Formula	
	HMA	WMA
Bulk Density (g/cm ³)	2.422	2.425
% AC by Wt. of Agg	5.20	5.20
Air Void (%)	4.0	4.0
VMA (%)	15.4	15.3
VFB (%)	70.0	71.0
Stability (lb _f)	2,789	2,383
Flow (0.01")	14.6	13.3
Stability/Flow (lb _f /0.01")	191	179
Strength Index (%)	80	81

2.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในห้องปฏิบัติการ

2.3.1 เสถียรภาพและค่าการไหล (Stability & Flow)

การทดสอบเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) เป็นคุณสมบัติ
พื้นฐานของการออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์ มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมิน
ความสามารถในการรับน้ำหนักของยานพาหนะที่ไม่ทำให้เกิดการยุบตัวหรือเสีย
รูป โดยการเตรียมตัวอย่างขนาด 63.5 × 101.6 มิลลิเมตร บดอัดด้วยวิธี
มาร์แชลล์จำนวน 75 ครั้ง/ด้าน ที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และ
อุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) นำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 60 °C ด้วยอัตรา
การกด 50.8 มิลลิเมตรต่อวินาที [14] ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดที่
อ่านได้คือ Stability และการยุบตัวคือ Flow



รูปที่ 4 การทดสอบ Stability & Flow

2.3.2 ดัชนีความแข็งแรง (Strength Index; SI)

การทดสอบดัชนีความแข็งแรง (SI) เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของการออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์ มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมินความต้านทานต่อการหลุดลอกของส่วนผสมที่ใช้ก่อสร้างชั้นผิวทาง โดยการเตรียมตัวอย่างขนาด 63.5 x 101.6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบดอัดด้วยแรง 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลา 2 นาที ที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และอุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) จำนวน 10 ตัวอย่าง โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 นำไปแช่เกลือแกงความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตร ในหม้อสุญญากาศพร้อมดูดอากาศออกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาแช่เกลือแกงที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบ Stability & Flow ดังแสดงในรูปที่ 4 กลุ่มที่ 2 นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบ Stability & Flow [15] ดังแสดงในรูปที่ 4 นำมาคำนวณค่า SI ดังสมการที่ 1

$$SI = \frac{S_1}{S_2} \times 100 \quad (1)$$

SI คือ Strength Index (%)

S_1 คือ Stability of Soaked Sample (lb_f.)

S_2 คือ Stability of Unsoaked Sample (lb_f.)

2.3.3 กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength; ITS)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (ITS) เป็นการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของส่วนผสมทางอ้อม มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมินความสามารถในการรับแรงดึงที่เกิดได้ทั้งชั้นผิวทาง โดยการเตรียมตัวอย่างขนาด 50.0 x 101.6 มิลลิเมตร บดอัดด้วยวิธีมาร์แชลล์จำนวน 75 ครั้ง/ด้าน ที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และอุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) นำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ด้วยอัตราการกด 50.8 มิลลิเมตรต่อวินาที [16] ดังแสดงในรูปที่ 5 พร้อมบันทึกแรงกระทำสูงสุด (Peak Load) นำมาคำนวณค่า ITS ดังสมการที่ 2

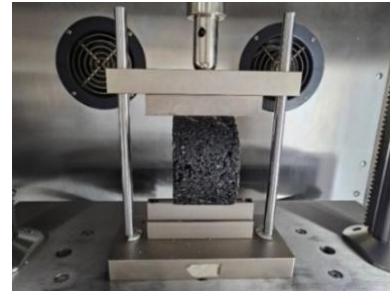
$$ITS = \frac{2000 \times P}{\pi \times D \times H} \quad (2)$$

ITS คือ Indirect Tensile Strength (kPa)

P คือ Peak Load (N)

D คือ Diameter of Specimen (mm.)

H คือ Height of Specimen (mm.)



รูปที่ 5 การทดสอบ ITS

2.3.4 โมดูลัสคืบตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus; ITSM)

การทดสอบโมดูลัสคืบตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (ITSM) เป็นการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของส่วนผสม มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมินพฤติกรรมการรับแรงดึงและการยึดตัวได้ทั้งของชั้นผิวทาง โดยการเตรียมตัวอย่างขนาด 50.0 x 101.6 มิลลิเมตร บดอัดด้วยวิธีมาร์แชลล์จำนวน 75 ครั้ง/ด้าน ที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และอุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) นำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ด้วยแรงแบบพลวัต (Dynamic Load) ลักษณะ Haversine Waveshape ที่แรงกระทำซึ่งทำให้เกิด Recovered horizontal strain เท่ากับ 50 $\mu\epsilon$ เป็นเวลา 0.124 วินาที และพัก 2.876 วินาที จำนวน 1,000 รอบ [17] ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยบันทึกแรงกระทำที่ทำให้เกิด Recovered horizontal strain เท่ากับ 50 $\mu\epsilon$ จำนวน 5 รอบ หลังให้แรงกระทำ 1,000 รอบ นำมาคำนวณค่า ITSM ดังสมการที่ 3

$$E = P \times \frac{(v+0.27)}{H \times h_c} \quad (3)$$

E คือ Stiffness Modulus (MPa)

P คือ Peak Load @ 50 $\mu\epsilon$ (N)

v คือ Poisson Ration (assumed to be 0.4)

H คือ Recovered Horizontal Deformation after Load (mm.)

h_c คือ Height of Specimen (mm.)



รูปที่ 6 การทดสอบ ITSM

2.3.5 การยวบตัวถาวร (Dynamic Creep Test; DCT)

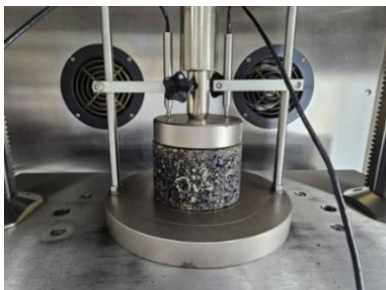
การทดสอบการยวบตัวถาวร (DCT) เป็นการทดสอบคุณสมบัติด้านความต้านทานการเกิดร่องล้อของส่วนผสม มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมินการยวบตัวถาวรของชั้นผิวทาง โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 50.0 × 101.6 มิลลิเมตร บดอัดด้วยวิธีมาร์แชลล์จำนวน 75 ครั้ง/ด้าน ที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และอุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) นำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ด้วยแรงแบบพลวัต (Dynamic Load) ลักษณะ Block Waveshape ที่แรงกระทำ 100 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 0.1 วินาที และพัก 0.1 วินาที จำนวน 3,600 รอบ (cycle) [18] ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยบันทึกการยวบตัวถาวร (Permanent Deformation) ที่เกิดขึ้นคำนวณเป็นร้อยละสะสมของความเครียด (Cumulative Strain, %) นำมาคำนวณอัตราการยวบตัวถาวร (Creep Rate, f_c) ดังสมการที่ 4

$$f_c = \frac{(\epsilon_{n1} - \epsilon_{n2})}{n_1 - n_2} \times 10000 \quad (4)$$

f_c คือ Creep Rate ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{loading cycles}$)

ϵ_{n1} , ϵ_{n2} คือ Cumulative Strain @ n_1 , n_2 cycle (%)

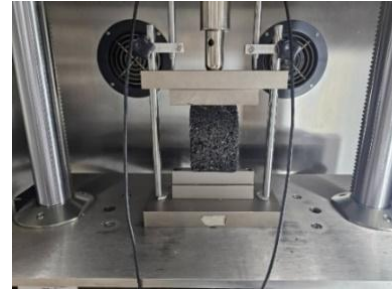
n_1 , n_2 คือ Number of Cycle @ n_1 , n_2 (Cycle)



รูปที่ 7 การทดสอบ DCT

2.3.6 ความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Indirect Tensile Fatigue Test; ITFT)

การทดสอบคุณสมบัติด้านความล้าของส่วนผสม มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมินความต้านทานความล้าของชั้นผิวทาง โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 50.0 × 101.6 มิลลิเมตร บดอัดด้วยวิธีมาร์แชลล์จำนวน 75 ครั้ง/ด้าน ที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และอุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) นำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C ด้วยแรงแบบพลวัต (Dynamic Load) ลักษณะ Haversine Waveshape โดยให้น้ำหนักกระทำที่ร้อยละ 20 ของ Peak Load จากการทดสอบ ITS เป็นเวลา 0.1 วินาที และพัก 0.4 วินาที [19] ดังแสดงในรูปที่ 8 ขณะทดสอบจะทำการบันทึกจำนวนรอบ (Number of cycles) จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ



รูปที่ 8 การทดสอบ ITFT

2.3.7 การสูญเสียมวลต่อแรงกระทำ (Cantabro Test)

เป็นการทดสอบการสูญเสียมวลต่อแรงกระทำของส่วนผสม มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมินความสามารถในการยึดเกาะของส่วนผสมที่ใช้ก่อสร้างชั้นผิวทาง โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 50.0 × 101.6 มิลลิเมตร บดอัดด้วยวิธีมาร์แชลล์จำนวน 75 ครั้ง/ด้าน ที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และอุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) นำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C ด้วยเครื่อง Los Angeles จำนวน 300 รอบที่ความเร็ว 30-33 รอบต่อนาที [20] ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยบันทึกน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบ นำมาคำนวณร้อยละการสูญเสียมวล (Cantabro Loss; CL) ดังสมการที่ 5

$$CL = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (5)$$

CL คือ Cantabro Loss (%)

A คือ Initial Weight of Test Specimen (grams)

B คือ Final Weight of Test Specimen (grams)



รูปที่ 9 การทดสอบ Cantabro Test

2.3.8 ความต้านทานการเกิดร่องล้อ (Wheel Tracking Test)

เป็นการทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อของส่วนผสม มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประเมินความสามารถในการต้านทานการเกิดร่องล้อของส่วนผสมที่ใช้ก่อสร้างชั้นผิวทาง โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 300 × 400 มิลลิเมตร บดอัดที่อุณหภูมิ 150 °C (สำหรับ HMA) และอุณหภูมิ 120 °C (สำหรับ WMA) ด้วยเครื่อง Roller compactor นำมาทดสอบที่อุณหภูมิ 60 °C ด้วยแรงกระทำขนาด 700 N ผ่านล้อเหล็กบนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยความเร็ว 26 รอบ/นาที [21] ดังแสดงในรูปที่ 10 ขณะทดสอบจะทำการบันทึกจำนวนรอบ

(Number of cycles), ความลึกของร่องล้อ (Rut depth) และอุณหภูมิในการทดสอบ (Temperature)



รูปที่ 10 การทดสอบ Wheel Tracking Test

2.4 การติดตามประเมินสมรรถนะภาคสนาม

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของถนนโดยการตรวจพินิจ (Visual Inspections)

การตรวจสอบด้วยตาเปล่า ประกอบกับอุปกรณ์ตรวจวัดพื้นฐาน เช่น ตลับเมตร เทปวัดระยะ ไม้บรรทัด สเกลวัดรอยแตก สเกลวัดความลึก เป็นต้น โดยไม่มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาเกี่ยวข้อง มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินหาตำแหน่งที่เกิดความเสียหายหรือตำแหน่งที่มีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การทดสอบ Visual Inspections

2.4.2 ความแข็งแรงของโครงสร้างทาง (Stiffness)

การทดสอบค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางด้วยวิธีแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) ด้วยเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยการปล่อยน้ำหนักกระแทกบนโครงสร้างทางเพื่อจำลองน้ำหนักของรถบรรทุกกระทำต่อโครงสร้างทาง 50 กิโลนิวตัน ที่วัดด้วยเซลล์วัดแรง (Load Cell) จนเกิดแรงดันบนโครงสร้างทางเท่ากับ 707 กิโลปาสกาล ขณะทดสอบค่าการแอ่นตัวที่เกิดจากแรงตกกระทบบนผิวจะส่งสัญญาณคลื่นของเซนเซอร์วัดความเร็ว (Geophone)



รูปที่ 12 การทดสอบ Stiffness ด้วย FWD

2.4.3 ความเสียดทานของผิวทาง (Friction)

การทดสอบค่าความเสียดทานของผิวทางโดยใช้หลักการ Fixed-Slip จากเครื่อง Surface Friction Tester (SFT T-10) ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นการทดสอบชนิดต่อเนื่องตามความยาวของถนนด้วยหน่วยการหมุนของล้อทดสอบที่ร้อยละ 13 ของความเร็วรถ พร้อมสเปรย์น้ำลงบนผิวทาง โดยโปรแกรมจะทำการประมวลผลค่าความเสียดทาน (Friction) ออกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ)



รูปที่ 13 การทดสอบ μ ด้วย SFT T-10

2.4.4 ดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index; IRI)

การทดสอบค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เป็นการทดสอบค่าความราบเรียบของผิวทางด้วยเครื่อง Hawkeye 1000 ชนิด World Bank Class 1 profiler ดังแสดงในรูปที่ 14 ใช้หลักการคำนวณการสะสมของผลต่างระหว่างระยะของ Laser และผิวทางตามระยะทางที่เคลื่อนที่ในหน่วยของเมตรต่อกิโลเมตร



รูปที่ 14 การทดสอบ IRI ด้วย Hawkeye 1000

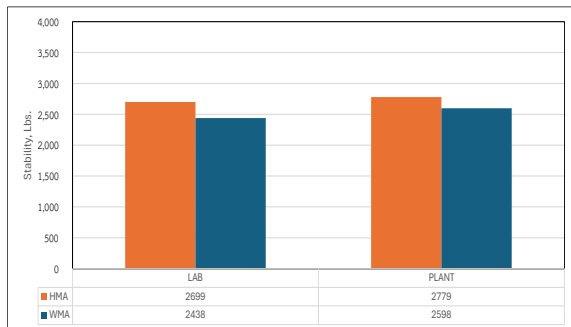
3. ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 ผลด้านคุณสมบัติเชิงกล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ตัวอย่างที่ออกแบบในห้องปฏิบัติการ และ 2) ตัวอย่างที่เก็บในโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยผู้วิจัยกำหนดสัญลักษณ์แทนตัวอย่างที่ออกแบบในห้องปฏิบัติการ คือ LAB และตัวอย่างที่เก็บในโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต คือ PLANT ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้

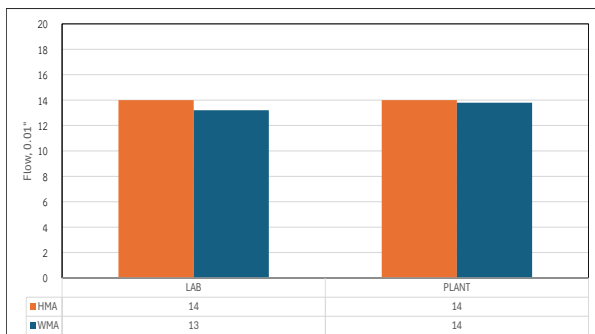
3.1.1 เสถียรภาพและการไหล (Stability & Flow)

จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีค่าเสถียรภาพของส่วนผสม HMA เท่ากับ 2,699 และ 2,779 ปอนด์ ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 2,438 และ 2,598 ปอนด์ ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าค่าเสถียรภาพของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 6 ถึง 9 [22-24] แต่ยังมีค่าไม่น้อยกว่ามาตรฐานกำหนด (>1,800 ปอนด์) [13] ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ค่าเสถียรภาพ

จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีค่าการไหลของส่วนผสม HMA เท่ากับ 14 และ 14 (0.01") ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 13 และ 14 (0.01") ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าค่าการไหลของ WMA มีค่าอยู่ในช่วง 8 ถึง 16 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด [13] ดังแสดงในรูปที่ 16

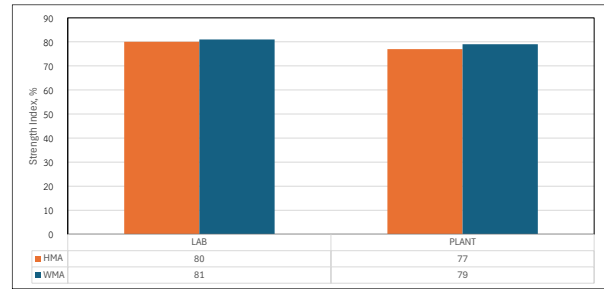


รูปที่ 16 ค่าการไหล

3.1.2 ดัชนีความแข็งแรง (Strength Index; SI)

จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีค่าดัชนีความแข็งแรงของส่วนผสม HMA เท่ากับร้อยละ 80 และ 77 ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับร้อยละ 81 และ 79 ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าค่าดัชนีความแข็งแรง

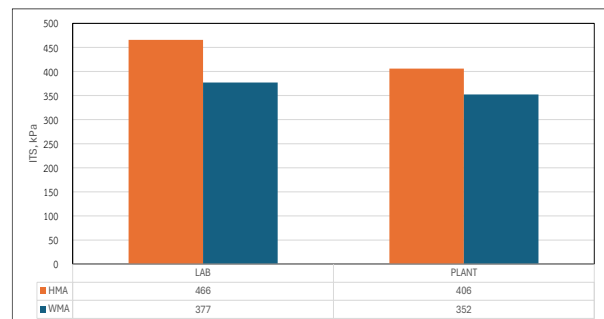
ของ WMA สูงกว่า HMA อยู่ร้อยละ 1 ถึง 3 ซึ่งมีค่าไม่น้อยกว่ามาตรฐานกำหนด (> ร้อยละ 75) [13] ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ค่าดัชนีความแข็งแรง

3.1.3 กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength; ITS)

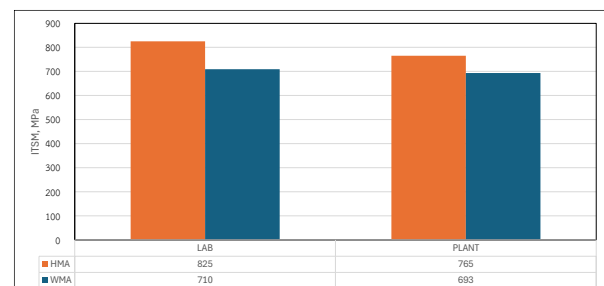
จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสม HMA เท่ากับ 466 และ 406 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 377 และ 352 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 13 ถึง 19 [25-27] ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 กำลังรับแรงดึงทางอ้อม

3.1.4 โมดูลัสคั้นตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus; ITSM)

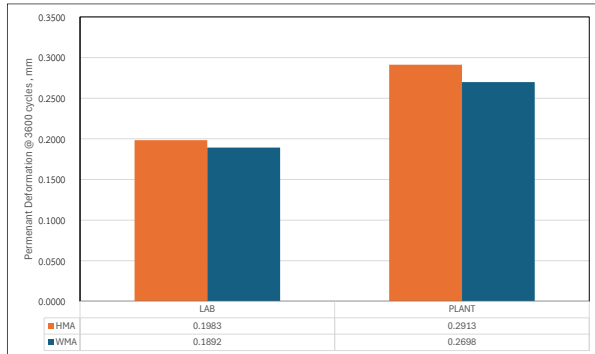
จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีค่าโมดูลัสคั้นตัวด้วยแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสม HMA เท่ากับ 825 และ 765 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 710 และ 693 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 9 ถึง 14 [22] ดังแสดงในรูปที่ 19



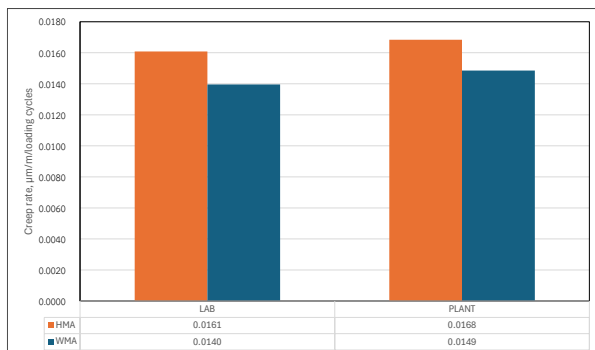
รูปที่ 19 โมดูลัสคั้นตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม

3.1.5 การยวบตัวถาวร (Dynamic Creep Test; DCT)

จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีค่าการยวบตัวถาวรของส่วนผสม HMA เท่ากับ 0.1983 และ 0.2913 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 0.1892 และ 0.2698 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ว่าค่าการยวบตัวถาวรของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 5 ถึง 7 ดังแสดงในรูปที่ 20 อัตราการคืบของส่วนผสม HMA มีค่าเท่ากับ 0.0161 และ 0.0168 ไมโครสเตรนต่อรอบ ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 0.0140 และ 0.0149 ไมโครสเตรนต่อรอบ ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ว่าอัตราการคืบของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 12 ถึง 13 ดังแสดงในรูปที่ 21



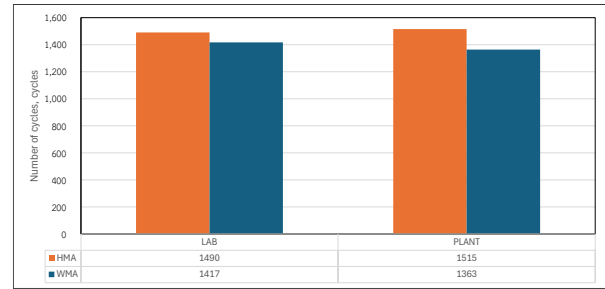
รูปที่ 20 การยวบตัวถาวร



รูปที่ 21 อัตราการคืบ

3.1.6 ความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Indirect Tensile Fatigue Test; ITFT)

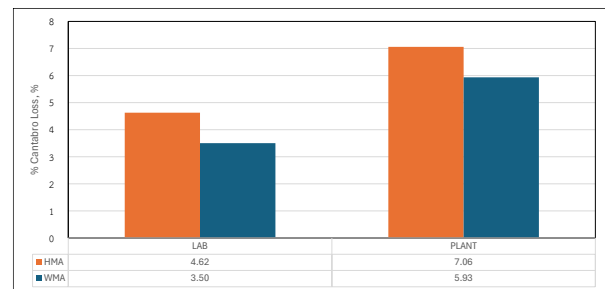
จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีจำนวนรอบความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้าของส่วนผสม HMA เท่ากับ 1,490 และ 1,515 รอบ ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 1,417 และ 1,363 รอบ ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ว่าค่าจำนวนรอบความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้าของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 5 ถึง 10 [28] ดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 จำนวนรอบของความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้า

3.1.7 การสูญเสียมวลต่อแรงกระทำ (Cantabro Test)

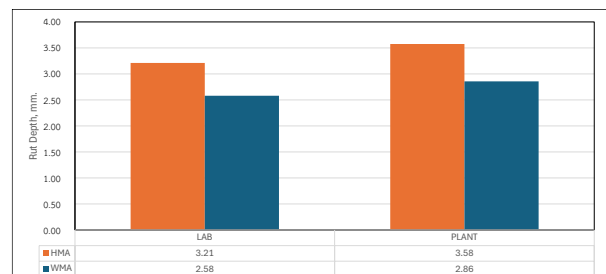
จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีร้อยละการสูญเสียมวลต่อแรงกระทำของส่วนผสม HMA เท่ากับ 4.62 และ 7.06 ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 3.50 และ 5.93 ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ว่าการสูญเสียมวลต่อแรงกระทำของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 16 ถึง 24 ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 ร้อยละการสูญเสียมวลต่อแรงกระทำ

3.1.8 ความต้านทานการเกิดร่องล้อ (Wheel Tracking Test)

จากผลการทดสอบตัวอย่าง LAB และ PLANT มีความลึกร่องล้อของส่วนผสม HMA เท่ากับ 3.21 และ 3.58 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 2.58 และ 2.86 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำให้เห็นได้ว่าความลึกร่องล้อของ WMA น้อยกว่า HMA อยู่ร้อยละ 19 ถึง 20 [23,27] ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 ความลึกร่องล้อ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่าง LAB และ PLANT สรุปดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สรุปคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตใน LAB และ PLANT

คุณสมบัติเชิงกล	LAB		PLANT	
	HMA	WMA	HMA	WMA
Stability (lbs.)	2699	2438	2779	2598
Flow (0.01")	14	13	14	14
Strength Index (%)	80	81	77	79
Indirect Tensile Strength (kPa)	466	377	406	352
Indirect Tensile Stiffness Modulus (MPa)	825	710	765	693
Permanent Deformation (mm)	0.1983	0.1892	0.2913	0.2698
Dynamic Creep Test (µm/m/loading cycles)	0.0161	0.014	0.0168	0.0149
Indirect Tensile Fatigue Test (Cycles)	1490	1417	1515	1363
Cantabro Test (%)	4.62	3.5	7.06	5.93
Wheel Tracking Test (mm)	3.21	2.58	3.58	2.86

3.2 ผลด้านติดตามประเมินสมรรถนะภาคสนาม

3.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของถนนโดยการตรวจพินิจ (Visual Inspections)

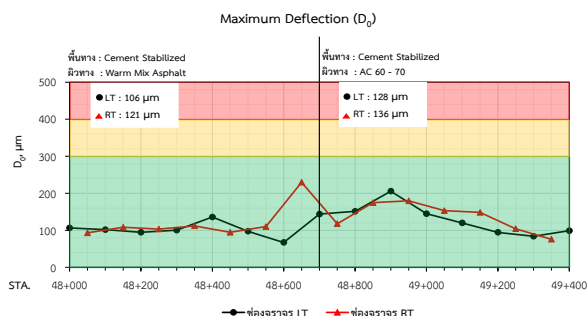
ผลการตรวจติดตามรอบหลังก่อสร้าง 2 เดือน แปลงทดลองไม่พบความเสียหาย ข้อบกพร่อง หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ พบเพียงแต่เศษดิน เศษฝุ่น และรอยเปื้อน บริเวณผิวทางและเส้นจราจร ดังแสดงในรูปที่ 25



รูปที่ 25 ลักษณะทางกายภาพของแปลงทดลองหลังก่อสร้าง 2 เดือน

3.2.2 ความแข็งแรงของโครงสร้างทาง (Stiffness)

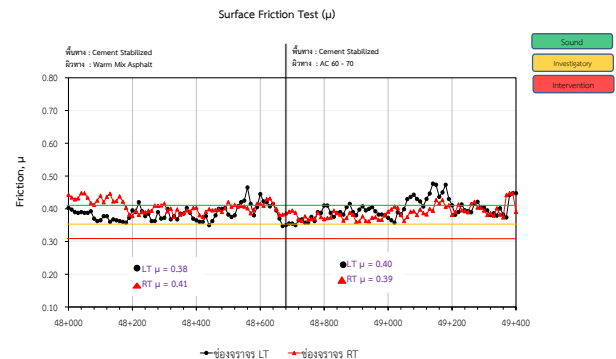
ผลการตรวจติดตามรอบหลังก่อสร้าง 2 เดือน มีค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวที่เกิดจากแรงตกกระแทก (D_0) ของช่องจราจรซ้าย (LT) และช่องจราจรขวา (RT) แปลงทดลอง HMA เท่ากับ 128 และ 136 ไมโครเมตร ตามลำดับ แปลงทดลอง WMA เท่ากับ 106 และ 121 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 แปลงทดสอบ มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน



รูปที่ 26 ค่า D_0 ของแปลงทดลองหลังก่อสร้าง 2 เดือน

3.2.3 ความเสียดทานของผิวทาง (Friction)

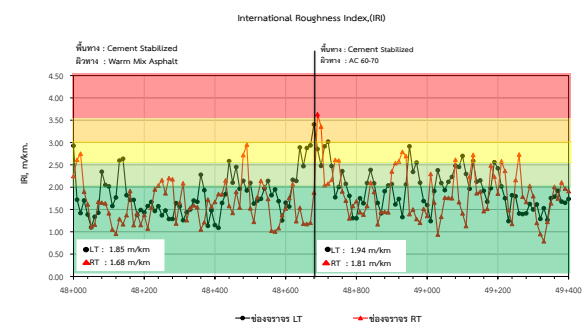
ผลการตรวจติดตามรอบหลังก่อสร้าง 2 เดือน มีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) ของช่องจราจรซ้าย (LT) และช่องจราจรขวา (RT) แปลงทดลอง HMA เท่ากับ 0.40 และ 0.39 ตามลำดับ แปลงทดลอง WMA เท่ากับ 0.38 และ 0.41 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 27 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 แปลงทดสอบ มีความเสียดทานใกล้เคียงกัน



รูปที่ 27 ค่า μ ของแปลงทดลองหลังก่อสร้าง 2 เดือน

3.2.4 ดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index; IRI)

ผลการตรวจติดตามรอบหลังก่อสร้าง 2 เดือน มีค่าเฉลี่ยดัชนีความขรุขระสากล (IRI) ของช่องจราจรซ้าย (LT) และช่องจราจรขวา (RT) แปลงทดลอง HMA เท่ากับ 1.94 และ 1.81 เมตรต่อกิโลเมตร ตามลำดับ แปลงทดลอง WMA เท่ากับ 1.85 และ 1.68 เมตรต่อกิโลเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 28 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 แปลงทดสอบ มีความเรียบใกล้เคียงกัน



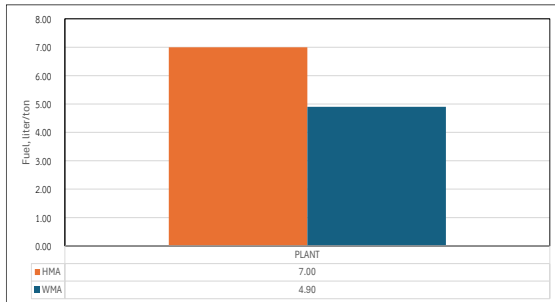
รูปที่ 28 ดัชนี IRI ของแปลงทดลองหลังก่อสร้าง 2 เดือน

3.3 ผลด้านการใช้เชื้อเพลิงและสิ่งแวดล้อม

3.3.1 ผลด้านการใช้เชื้อเพลิง

ผลด้านการใช้เชื้อเพลิงของโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จะคิดปริมาณการใช้น้ำมันเตาเฉลี่ยต่อตันในการผลิตแต่ละส่วนผสม โดยปริมาณเฉลี่ยการใช้เชื้อเพลิงของส่วนผสม HMA เท่ากับ 7.0 ลิตรต่อตัน ส่วนผสม WMA เท่ากับ 4.9 ลิตรต่อตัน เมื่อนำปริมาณเฉลี่ยการใช้เชื้อเพลิงของ

ส่วนผสมทั้ง 2 ส่วนผสมมาเปรียบเทียบพบว่า WMA สามารถช่วยลดการใช้
น้ำมันเตาได้ถึงร้อยละ 30 ดังแสดงในรูปที่ 29

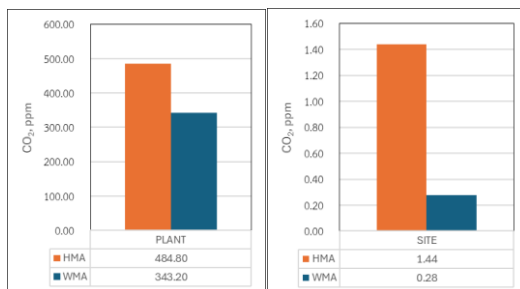


รูปที่ 29 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้เชื้อเพลิง

3.3.2 ผลด้านสิ่งแวดล้อม

ผลด้านสิ่งแวดล้อมจะดำเนินการตรวจวัดปริมาณการปล่อยก๊าซ
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของแต่ละส่วนผสม ณ ตำแหน่งบริเวณห้องผลิต
ส่วนผสมลงสู่รถบรรทุก และบริเวณรถบรรทุกสู่เครื่องปู โดยปริมาณเฉลี่ย
การปล่อยก๊าซ CO₂ ของส่วนผสม HMA เท่ากับ 484.8 และ 1.44 ส่วนใน
ล้านส่วน ตามลำดับ ส่วนผสม WMA เท่ากับ 343.2 และ 0.28 ส่วนในล้าน
ส่วน ตามลำดับ เมื่อนำปริมาณเฉลี่ยการปล่อยก๊าซ CO₂ ของส่วนผสมทั้ง 2
ส่วนผสมมาเปรียบเทียบพบว่า WMA สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO₂
ได้ถึงร้อยละ 21 ถึง 30 ดังแสดงในรูปที่ 30

ในขั้นตอนการก่อสร้างในสนาม WMA สามารถลดการปล่อยมลพิษด้าน
กลิ่นควันระหว่างการก่อสร้างได้ดี ส่งผลให้มีสภาพแวดล้อมในพื้นที่ก่อสร้าง
ที่ปลอดภัยทั้งคนปฏิบัติงานและประชาชนในพื้นที่มากขึ้นดังแสดงในรูปที่
31 ถึง 32



รูปที่ 30 ปริมาณเฉลี่ยการปล่อยก๊าซ CO₂



รูปที่ 31 ควันบริเวณห้องผลิตส่วนผสมลงสู่รถบรรทุกส่วนผสม HMA และ WMA



รูปที่ 32 ควันบริเวณรถบรรทุกสู่เครื่องปูส่วนผสม HMA และ WMA

4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

กรณีศึกษาสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมอุ่น
ถนนสาย รย.4036 สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1) WMA ที่ผลิตจาก AC 60-70 ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเติม
สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Additives) เพื่อลดค่าความหนืดใน AC ที่
ควบคุมการผลิตจากโรงงานผลิตแอสฟัลต์ (Pre-blend) สามารถใช้งานที่
อุณหภูมิขณะผสมและบดอัดต่ำกว่า AC 60-70 อย่างน้อย 20 °C รวมทั้งยัง
สามารถลดการใช้น้ำมันเตา และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง
เป็นสาเหตุของการเกิดก๊าซเรือนกระจกได้ร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับ HMA
นอกจากนี้ WMA ยังสามารถลดฝุ่นควันระหว่างการก่อสร้างได้อีกด้วย

2) ส่วนผสม WMA ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลเล็กน้อย
เมื่อเทียบกับส่วนผสม HMA ได้แก่ ด้านเสถียรภาพและการไหล กำลังรับ

แรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม และความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้า แต่ยังคงคุณสมบัติตามมาตรฐานกำหนด

3) ส่วนผสม WMA ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลให้มีคุณสมบัติดีขึ้นด้านดัชนีความแข็งแรง การยุบตัวถาวร การสูญเสียมวลต่อแรงกระแทก และความต้านทานการเกิดร่องล้อ เมื่อเทียบกับส่วนผสม HMA ซึ่งมีข้อดีในด้านการยึดเกาะของส่วนผสมและต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีขึ้น

4) แปลงทดลองส่วนผสม WMA ภายใต้สภาพการใช้งานและสภาพแวดล้อมจริง มีผลด้านการติดตามประเมินสมรรถนะภาคสนามใกล้เคียงกับส่วนผสม HMA

ทั้งนี้ผลการศึกษสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมอุ่นเป็นเพียงกรณีศึกษาบนพื้นฐานของมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์เพียงชนิดเดียวที่ผู้วิจัยคัดเลือกมาเท่านั้น ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะเพิ่มเติมด้านการศึกษามวลรวมและชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้หลากหลายครอบคลุมการใช้งานในประเทศ และเพิ่มเติมวิธีการทดสอบคุณสมบัติด้านสมรรถนะ (Performance Test) ของส่วนผสม WMA ด้านอื่นๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณกรมทางหลวงชนบท สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กลุ่มวิจัยและพัฒนา และบุคลากรที่เกี่ยวข้องในการสนับสนุนการศึกษาดังกล่าวให้สำเร็จลุล่วงตามเป้าประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bolles, D (2025). Global Temperature. Retrived February 14, 2025, from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/?intent=121>
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2560). แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2564 – 2573. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, pp. 1-96.
- [3] สำนักบำรุงทาง (2568). บัญชีโครงข่ายทางหลวงชนบท ประจำปีงบประมาณ 2568. กรมทางหลวงชนบท, pp.1-366.
- [4] Hatmoko, U.D., Hidayat, A., Setiawati, A. and Praseyo, C.A. (2018). Measuring Carbon Footprint of Flexible Pavement Construction Project in Indonesia. *E3S Web of Conferences* 31, pp. 1-7.
- [5] Ning, L., Liping, L., Mingchen, L. and Lijun, S. (2023). A Comprehensive Review of Warm – Mix Asphalt Mixtures: Mix Design, Construction Temperatures Determination, Performance and Life – Cycle Assessment. *Road Materials and Pavement Design*, pp.1-45.
- [6] Milad, A., Babalghaith, A.M., Al-Sabaei, A.M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S.S., Bilema, M. and Yusoff, N.I.M. (2022). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic

Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, pp. 1-23

- [7] D’Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgarner, G. and Corrigan, M. (2008). Warm-mix Asphalt: European Practice. *International Technology Scanning Program*.
- [8] EAPA. (2012). The use of Warm Mix Asphalt. Brussels: *European Asphalt Pavement Association*,
- [9] Zaumanis, M. (2014). Warm Mix Asphalt. *Green Energy and Technology*, pp.309-334.
- [10] Zaumanis, M. (2010). Warm Mix Asphalt Investigation. *Master of Science Thesis*, Technical University of Denmark in cooperation with the Danish Road Institute.
- [11] Capitaio, S.D., Picado-Santos, L.G. and Martinho, F. (2012). Pavement Engineering Materials: Review on the use of Warm – Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, vol.36, pp.1016-1024.
- [12] มาตรฐานอุตสาหกรรม, 2561. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง, pp. 1-5.
- [13] มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท, 2563. มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete), pp. 1-28.
- [14] ASTM D6927-15. (2015). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. ASTM International, pp. 1-7.
- [15] มาตรฐานกรมทางหลวง, 2544. มาตรฐานวิธีการทดลองหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต, pp. 1-6.
- [16] ASTM D6931-17. (2017). Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures. ASTM International, pp. 1-5.
- [17] As/Nzs 2891.13.1. (2013). Methods of Sampling and Testing Asphalt Determination of the Resilient Modulus of Asphalt— Indirect Tensile Method. The Exchange Centre: Sydney, NSW, Australia, pp. 1-12.
- [18] BS EN 12697-25. (2016). Bituminous mixtures - Test methods - Part 25: Cyclic compression test. BSI Standards Publication, pp. 1-22.
- [19] ASTM D4123-82. (1995). Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. ASTM International, pp. 1-4.
- [20] Tex-245-F. (2019). Test Procedure for Cantabro Loss. Material and tests division, pp. 1-3.

- [21] BS EN 12697-22. (2020). Bituminous mixtures - Test methods - Part 22: Wheel tracking. BSI Standards Publication, pp. 1-29.
- [22] Sukhija, M., Saboo, N., & Pani, A. (2023). Effect of warm mix asphalt (WMA) technologies on the moisture resistance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 369, 130589
- [23] Wu, S., Han, J., Wen, J., & Liu, Z. (2010). Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixture. *International Conference on Asphalt Pavements 2010: ISAP Nagoya 2010*, pp. 1469-1479
- [24] Hilal, M. M., & Fattah, M. Y. (2022). Evaluation of resilient modulus and rutting for warm asphalt mixtures: A local study in Iraq. *Applied Sciences*, 12(24), 12841.
- [25] Dai, B., & Lu, X. (2013). Evaluation of Mechanical Properties of a New Warm-Mix Asphalt using Sylvaroad Additive. *Athens Journal of Technology and Engineering: Athens, Greece*, pp. 1-14.
- [26] Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Jia, X., & Woods, M. (2012). Laboratory performance evaluation of warm-mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Transportation research record*, 2294(1), pp. 98-105.
- [27] Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2006). Evaluation of Evotherm for use in warm mix asphalt. *NCAT report*, 2(06).
- [28] Saleh, M. (2017). Evaluation of Mechanical Properties of a New Warm-Mix Asphalt using Sylvaroad Additive. *Athens Journal of Technology & Engineering*, pp. 83