

สมบัติมาร์แชลล์ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเย็น
ที่ปรับปรุงด้วยขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Marshall Properties of Cold Mix Asphalt Concrete Modified With Waste Plastics
PolyethyleneTerephthalateType

ฐานทัพบกเทียนทอง¹ สุขสันต์² หอพิบูลสุข² อภิชาติ สุดดีพงษ์³ คงศักดิ์ อัครวงค์วัฒนา⁴

¹ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กรุงเทพมหานคร

² หลักสูตรวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

³ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

⁴ หลักสูตรวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

*Mr.Thantup Theantong; E-mail address: thantapofficial@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติมาร์แชลล์ของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น (Cold mix asphalt concrete, CMA) ที่ปรับปรุงด้วยขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ด้วยวิธีการผสมเพิ่ม (CMA-PET) ที่ร้อยละ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ของน้ำหนักมวลรวม เพื่อทราบอัตราส่วนการปรับปรุงด้วย PET ที่เหมาะสมตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม.407/2542 ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า CMA-PET ที่การปรับปรุงด้วย PET ร้อยละ 0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 มีสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงด้วย PET ร้อยละ 1.0 สมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็นมีค่าการไหลบ่า (Runoff) ไม่ผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวง นอกจากนี้ CMA-PET มีค่าเสถียรภาพ สูงขึ้นตามร้อยละการปรับปรุงด้วย PET ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ร้อยละการปรับปรุงด้วย PET ร้อยละ 0.8 CMA-PET ที่ปรับปรุงด้วย PET ร้อยละ 0.8 มีค่าเสถียรภาพสูงกว่า CMA ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วย PET (ปรับปรุงด้วย PET ร้อยละ 0) ร้อยละ 31.63

คำสำคัญ: พลาสติก, โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต, แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น, แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็นที่ปรับปรุงด้วยขยะพลาสติก

Abstract

This research focused on evaluating the Marshall properties of cold-mix asphalt concrete (CMA) modified with polyethylene terephthalate (PET) plastic waste as an additive, referred to as CMA-PET. PET contents of 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0% by aggregate weight were considered to determine the optimum PET ratio, as per Thailand's Department of Highways standard (DOH, 1999). The test results indicated that CMA-PET mixtures containing 0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8% PET complied with

the DOH specifications. However, the CMA-PET modified with 1.0% PET failed to meet the runoff criteria. Additionally, the stability of CMA-PET increased with higher PET contents, reaching a maximum of 0.8% PET content by weight of aggregate. CMA-PET with 0.8% PET content exhibited higher stability than the unmodified CMA mixture (0% PET content) at 31.63%.

Keywords: plastic, polyethylene terephthalate, cold mix asphalt concrete, cold mix asphalt concrete modified by waste plastics polyethylene terephthalate type

1. บทนำ

ถนนในความรับผิดชอบของกระทรวงคมนาคมปีใน พ.ศ. 2565 ประกอบด้วย ถนนคอนกรีตยาว 5,700 กม. (ร้อยละ 5.60) ถนนลาดยางหรือถนนแอสฟัลต์คอนกรีตยาว 96,000 กม.(ร้อยละ 93.90) ถนนลูกรังยาว 537 กม. (ร้อยละ 0.50) แสดงให้เห็นว่า ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมีความยาวรวมสูงสุด ข้อดีของถนนประเภทนี้คือ มีมูลค่าก่อสร้างที่ต่ำกว่าแบบถนนคอนกรีต เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุชั้นโครงสร้างที่ต่ำกว่าชั้นผิวทางลงไปได้ อย่างไรก็ตาม ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตมีมูลค่าการบำรุงรักษาที่สูงกว่าแบบคอนกรีตเมื่อเทียบที่อายุการใช้งานเท่ากัน ผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีต สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักตามอุณหภูมิการผสม ได้แก่ 1) แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete, HMA) ประกอบด้วย มวลรวม ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ และใช้กระบวนการผลิตที่อาศัยความร้อนสูง 2) แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น (Cold mix Asphalt concrete, CMA) ประกอบด้วย มวลรวม น้ำ ยางแอสฟัลต์อิมัลชัน ใช้กระบวนการผลิตและก่อสร้างในอุณหภูมิตามสภาพแวดล้อม ในปัจจุบัน HMA นิยมใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องใช้ปริมาณมาก เช่น ถนน ลานจอดรถ แต่กระบวนการผลิตมีความยุ่งยากและมีต้นทุนการผลิตสูง CMA

มักถูกใช้ในงานขนาดเล็ก เช่น งานซ่อมผิวจราจร งานปรับระดับถนน งานเสริมผิวถนน เนื่องจากมีความสะดวก มีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า HMA

พลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่เป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และกรดเทเรฟทาลิกบริสุทธิ์ (PTA) สมบัติเด่นของ PET คือความเหนียว ทนทานต่อแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย น้ำหนักเบา และสามารถรีไซเคิลได้ร้อยละ 100 มักถูกใช้ในการผลิตขวดน้ำพลาสติก ในกระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติก PET ขวดพลาสติกถูกบดย่อยให้มีขนาดตามที่ต้องการด้วยเครื่องจักร จากนั้นนำไปสู่ขั้นตอนอื่นของกระบวนการรีไซเคิลต่อไป ซึ่งในขั้นตอนการบดย่อยนี้ทำให้เกิดเศษพลาสติกขนาดเล็กติดอยู่ในเครื่องจักรดังรูปที่ 1 ทำให้เครื่องจักรทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงต้องทำความสะอาดเศษพลาสติกดังกล่าวออกโดยการฉีดล้างแล้วตักออก เศษพลาสติกเหล่านี้จัดเป็นขยะของกระบวนการย่อยขวดพลาสติก อาจมีวัสดุอื่นเจือปนและไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่อ ขยะเศษพลาสติกนี้ถูกนำไปกำจัดทิ้งโดยการฝังกลบซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานในการย่อยสลายตามธรรมชาติ ข้อมูลจากบริษัทสมคิดพลาสติกนำเข้าและส่งออก จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ชี้ให้เห็นว่า โรงงานบดย่อยเศษขวด PET หนึ่งแห่งก่อให้เกิดขยะพลาสติกจากกระบวนการบดย่อยที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ประมาณ 40 กิโลกรัมต่อวัน หรือประมาณ 10.5 ตันต่อปี ขยะพลาสติกดังกล่าวมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เศษพลาสติกที่ติดอยู่ในเครื่องจักรบดย่อย



รูปที่ 2 ลักษณะของขยะเศษพลาสติกภายหลังถูกล้างออกจากเครื่องจักรบดย่อย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขนาดคละของมวลรวม

ตารางที่ 1 แสดงขนาดคละของมวลรวม CMA ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 407/2542 วัสดุมวลรวมผสมเย็นด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน [1] งานวิจัยนี้เลือกใช้มวลรวมละเอียดที่มีความเหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างทาง งานปรับระดับ (Leveling) และงานเสริมผิว (Overlay)

ตารางที่ 1 ขนาดคละมวลรวม สำหรับงานก่อสร้างทาง งานปรับระดับ (Leveling) และงานเสริมผิว (Overlay) ตามมาตรฐาน ทล.-ม. 407

ขนาดตะแกรง	ชั้นรองผิวทาง		ชั้นผิวทาง
	เกรตหยาบ	เกรตปานกลาง	เกรตละเอียด
19.0 มม. (3/4")	-	80-100	
12.5 มม. (1/2")	25-60	-	100
9.50 มม. (3/8")	-	20-55	80-100
4.75 มม. (เบอร์4)	0-20	5-30	10-40
2.36 มม. (เบอร์8)	0-5	0-5	0-10
1.18 มม. (เบอร์16)	-	-	0-5
75 ไมครอน (เบอร์200)	0-2	0-2	0-2

2.2 แอสฟัลต์อิมัลชัน

เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมน้ำโดยใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ผสมเพิ่ม ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กและมีเยื่อบางๆ ห่อหุ้มไม่ให้แอสฟัลต์เกิดการรวมตัวกันโดยมีสถานะเป็นของเหลว ทั้งนี้แอสฟัลต์อิมัลชันสามารถแบ่งตามชนิดประจุไฟฟ้าของสารอิมัลชันซิฟายเออร์โดยมี 2 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2 ในงานวิจัยนี้ใช้แอสฟัลต์ชนิด CMS-2h โดย 2h มีความหมายดังนี้ เลข 2 บ่งบอกว่ามีคุณสมบัติความหนืดสัมพัทธ์ (Relative viscosity) ของอิมัลชันที่สูงกว่าแบบธรรมดาที่มีตัวเลขน้อยกว่าหรือไม่มีตัวเลขกำกับ และ h หมายถึงการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดที่แข็งกว่า (Harder) ในการผลิตอิมัลชันชนิดนี้ ทั้งนี้ CMS-2h มีจุดวาบไฟที่อุณหภูมิ 230-260°C โดยต้องมีสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด ทล.-ก. 404/2531 [2] กำหนดไว้และใช้ปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ตามตารางที่ 3 เป็นขอบเขตที่กำหนดดังมาตรฐาน ทล.-ม.407/2542 และตาม A Basic Asphalt Emulsion Manual Series No.19 Third Edition, [3] การหาปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสมให้ใช้วิธีการไหลบ่า (Runoff)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างของแอสฟัลต์อิมัลชันตามชนิดประจุไฟฟ้า

Asphalt Emulsion	Anionic	Cationic
ชนิดก่อตัวเร็ว	Rapid Setting (RS)	Cationic Rapid Setting (CRS)
ชนิดก่อตัวปานกลาง	Medium Setting (MS)	Cationic Medium Setting (CMS)
ชนิดก่อตัวช้า	Slow Setting (SS)	Cationic Slow Setting (CSS)



การเคลือบผิว 100%



การเคลือบผิว ≥ 75%



การเคลือบผิว < 75%

รูปที่ 3 ระดับการเคลือบผิวของแอสฟัลต์อิมัลชัน
(มาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม.407/2542)

ตารางที่ 3 ปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันที่แนะนำสำหรับมวลรวมแต่ละขนาด

ขนาดวัสดุมวลรวม (Aggregate)	ปริมาณยางแอสฟัลต์อิมัลชัน (ร้อยละน้ำหนักโดยหินแห้ง)
เกรตหยาบ	4.5 - 6.5
เกรตปานกลาง	5.0 - 7.0
เกรตละเอียด	6.0 - 8.0

2.3 แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมเย็น

CMA คือการนำวัสดุผสมเย็นผสมรวมกับยางแอสฟัลต์อิมัลชัน ตามวิธีที่กำหนดตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม.407/2542 และสมบัติของ CMA สำหรับงานก่อสร้างในแต่ละประเภทต้องเป็นไปตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติของส่วนผสมของ CMA ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม.407/2542

การทดสอบ	หน่วย	งานก่อสร้าง	
		ชั้นรองผิวทาง	ชั้นผิวทาง
Coating	%	≥ 50	≥ 75
Runoff	%	≤ 0.5	≤ 0.5
Washoff	%	≤ 0.5	≤ 0.5
Combine	%	≤ 0.5	≤ 0.5

2.3.1 การทดสอบการเคลือบ

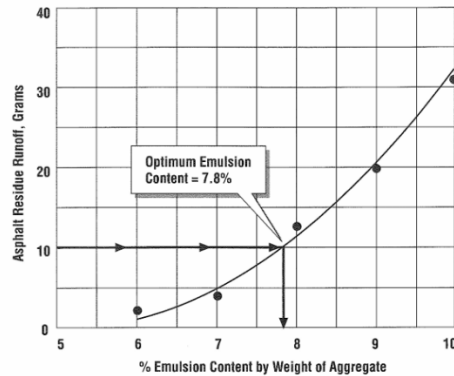
การทดสอบการเคลือบทำโดยนำมวลรวมที่ผ่านมาตรฐานทล.ม.407/2542 ผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h แล้วประเมินความสามารถการเคลือบผิว ด้วยวิธีตามมาตรฐาน Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts ASTM D244 [4] ใช้วิธีแบบมวลรวมแห้ง โดยผลทดสอบการเคลือบผิวแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

- ระดับดี คือพื้นที่ผิวของมวลรวมถูกเคลือบทั้งหมดร้อยละ 100
- ระดับพอใช้ คือ พื้นที่ผิวของมวลรวมถูกเคลือบตั้งแต่ร้อยละ 75 ขึ้นไป
- ระดับใช้ไม่ได้ (สำหรับชั้นผิวทาง) คือ พื้นที่ผิวของมวลรวมถูกเคลือบน้อยกว่าร้อยละ 75

2.3.2 การทดสอบการไหลบ่า (Runoff)

การนำมวลรวมที่ผ่านมาตรฐาน ทล.ม.407/2542 ผสมแอสฟัลต์อิมัลชันวางพักไว้บนตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร สูงจากถาดรองกากแอสฟัลต์ 300 มิลลิเมตร แล้วบันทึกค่าปริมาณกากแอสฟัลต์อิมัลชันที่ไหลออก โดยให้ทำการทดลองอย่างน้อย 3 อัตราส่วนผสม เพื่อให้สามารถอ่านค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมจากกราฟค่าเฉลี่ยที่เกิดปริมาณกากแอสฟัลต์ที่ 10 กรัม และเมื่อทราบค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมให้ทำการทดลองผสมแล้วคำนวณค่าร้อยละการไหลบ่าจากสมการที่ (1)

$$(\%) \text{ Runoff} = (\text{ปริมาณกากแอสฟัลต์ที่ไหลออก} / \text{น้ำหนักของมวลรวมของตัวอย่าง}) \times 100 \quad (1)$$



รูปที่ 4 การอ่านค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม

(A Basic Asphalt Emulsion Manual series no.19 Third Edition)

2.3.3 การทดสอบการชะล้าง (Washoff)

เป็นการทดสอบความสามารถในการทนต่อความเสียหายจากการชะล้างของน้ำฝน การทดสอบนี้จำเป็นเฉพาะในกรณีที่คาดว่าจะมีฝนตกในช่วงสั้นๆ หลังจากการบดอัดผิวทางขณะก่อสร้าง โดยทดสอบตัวอย่างที่อัดแน่นซึ่งยังคงอยู่ในแบบภายหลังการบ่ม 24 ชั่วโมง [5] ค่า Washoff คำนวณได้จากสมการที่ (2) ค่า Combine คำนวณได้จากสมการที่ (3) ค่า Washoff และค่า Combine ต้องมีค่าตามมาตรฐาน ทล.ม.407/2542

$$(\%) \text{ Washoff} = (\text{น้ำหนักของแอสฟัลต์ที่หายไป} / \text{น้ำหนักของมวลรวมของตัวอย่าง}) \times 100 \quad (2)$$

$$(\%) \text{ Combine} = \% \text{Runoff} + \% \text{Washoff} \quad (3)$$

2.3.4 การทดสอบเสถียรภาพ

ตัวอย่าง CMA สำหรับการทดสอบเสถียรภาพถูกเตรียมด้วยการบดอัดด้วยวิธี Double plunger ด้วยแรงสถิติ 25,000 ปอนด์ กดไว้นาน 30 วินาที จากนั้นทดสอบเสถียรภาพด้วยวิธีมาร์แชลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D1559 [6] ตามที่ A Basic Asphalt Emulsion No.19 Third Edition [3] แนะนำ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C หากมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 500 ปอนด์ หรือ 2,224 นิวตัน สามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างถนนที่รองรับปริมาณจราจรต่ำถึงปานกลาง

2.4 วัสดุผสมเพิ่มในงานวิจัย

2.4.1 พลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET)

พลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) เป็นพลาสติกประเภทที่ 1 ที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมมีความแข็งแรงทนทานและ มีความหนาแน่น 1,380 ถึง 1390 kg/m³ มีจุดหลอมเหลวที่ 250 ถึง 260°C สูตรทางเคมีคือ (C₁₀H₈O₄)_n

2.4.2 การรีไซเคิลพลาสติก

การรีไซเคิลพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น แบบปฐมภูมิ (Primary Recycling) เป็นการนำเศษพลาสติกชนิดเดียวกันบดย่อยและใช้ภายในโรงงานในอัตราส่วนต่างๆ และ แบบทุติยภูมิ (Secondary Recycling) เป็นการนำเศษพลาสติกมาปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปขึ้นรูปใช้งานพลาสติกด้วยกระบวนการต่างๆ แต่ไม่เป็นการรีไซเคิลแบบใดคุณภาพของพลาสติกที่ได้ลดลงจากเดิมเนื่องจากความบริสุทธิ์ที่ลดลง หากพลาสติกผ่านกระบวนการรีไซเคิลมาหลายครั้งหรือมีความบริสุทธิ์น้อยมากอาจไม่คุ้มค่าต้องการรีไซเคิลเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่อาจเพิ่มสูงขึ้นตามกระบวนการต่างๆ หากเปรียบเทียบกับการผลิตพลาสติกขึ้นมาใหม่

2.4.3 การผสมวัสดุเพิ่มเพื่อปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีต

Lingyun You et al. ศึกษาการรีไซเคิลขยะพลาสติกเป็นส่วนผสมของ HMA พบว่า การผสมพลาสติกชนิด PET เพิ่มในแอสฟัลต์ด้วยวิธีแบบเปียก เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมเนื่องจาก พลาสติกดังกล่าวมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า 200°C การผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้เข้ากับพลาสติก PET ด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของ PET ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เสื่อมคุณภาพ อย่างไรก็ตาม หากผสมแบบ PET ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยวิธีแบบแห้งกับมวลรวมร้อนและแอสฟัลต์ซีเมนต์แล้วบดอัดสามารถปรับปรุงความต้านทานความเสียหายจากความชื้น เพิ่มการต้านทานการล้า เพิ่มโมดูลัสคืนตัวภายใต้แรงกระทำพลวัตที่อุณหภูมิต่ำถึงปานกลางได้ [7]

Laomuad et al. ศึกษาสมรรถนะเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุผิวทางเดิม (RAP) ทดแทนมวลรวมทั้งหมดและใช้ PET เป็นวัสดุผสมเพิ่ม โดยศึกษาการเติม PET ที่ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 1 ของน้ำหนักมวลรวมการใส่ PET ผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี RAP เป็นมวลรวม ทำให้เกิด

ช่องว่างอากาศและใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะและความต้านทานต่อการแยกตัวของรวมถึงปรับปรุงคุณสมบัติมาร์แชล (Marshall properties) และค่าดัชนีความแข็งแรง (SI) นอกจากนี้ การเติม PET ยังทำให้ชั้นฟิล์มแอสฟัลต์ซีเมนต์รอบๆ วัสดุมวลรวมหนาขึ้น ส่งผลให้ค่าเสถียรภาพ ดัชนีความแข็งแรง แรงดึงทางอ้อม อายุการล้าและการต้านทานการเกิดร่องล้อ เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ PET เติผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี RAP เป็นมวลรวม [8]

สุชาวรรณ ชูณรงค์ และคณะ ศึกษาการปรับปรุงยางมะตอยผสมเยื่อสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนผสมยางพาราเพื่อใช้เป็นผิวทางจราจรที่มีปริมาณสูง โดยศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต 4 ประเภท ประกอบด้วย ประเภทที่ 1 Carbon Cold Premix ประเภทที่ 2 Carbon Cold Premix กับน้ำยางธรรมชาติ ประเภทที่ 3 HMA และประเภทที่ 4 HMA กับน้ำยางธรรมชาติ โดยในการทดสอบเสถียรภาพได้ผลสรุปว่าน้ำยางธรรมชาติมีผลช่วยให้ทั้ง HMA และ Carbon Cold Premix ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติปรับปรุงคุณภาพมีค่าการยึดเกาะระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ดีขึ้น มีแรงต้านทานและความคงทนต่อแรงกดที่มากขึ้น [9]

3. ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1 วิธีการออกแบบส่วนผสม

3.1.1 วัสดุมวลรวม

CMA ผู้วิจัยเลือกใช้มวลรวมหยาบ (ขนาดมากกว่า 4.75 มม.) จากโรงโม่หินที่อำเภอปากช่องจังหวัดนครราชสีมา และใช้มวลรวมละเอียด (ขนาดน้อยกว่า 4.75 มม.) จากโรงโม่หิน อำเภอเฉลิมพระเกียรติฯ จังหวัดสระบุรี โดยทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม.407/2542 วัสดุมวลรวมผสมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน (Cold Mixed Asphalt) โดยทดสอบค่าความคงทน (Soundness) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.213/2531 [10], ค่าความสึกหรอ (Loss Angeles abrasion) ตามมาตรฐานทล.-ท.202/2515. [11], ค่าความสมมูลของทราย (Sand equivalent) ตามมาตรฐานทล.-ท.203/2515 [12] และเลือกใช้ขนาดคละสำหรับงานก่อสร้างผิวทาง ดังตารางที่ 1

3.1.2 แอสฟัลต์อิมัลชัน

แอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด CMS-2h ที่มีสมบัติผ่านมาตรฐาน มอก.371-2530 ผลทดสอบสมบัติการเคลือบและชะล้าง พบว่ามีสมบัติการเคลือบผิวมวลรวมทั้งก่อนและหลังชะล้างอยู่ในระดับที่ดีร้อยละ 100 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ก. 404/2531

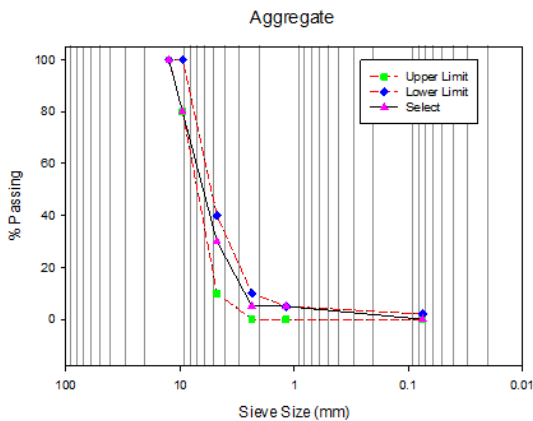
3.1.3 วัสดุผสมเพิ่ม

องค์ประกอบทางเคมีของ PET ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกตรวจสอบด้วยวิธี XRD และ LECO แสดงดังตารางที่ 5 PET มีคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพลาสติกมากที่สุดร้อยละ 23.69 อย่างไรก็ตาม PET ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกเจือปนด้วยองค์ประกอบอื่น เช่น ซิลิกอนร้อยละ 22.93 เหล็ก

ร้อยละ 16.63 และแคลเซียมร้อยละ 16.50 ที่อาจปนเปื้อนระหว่างกระบวนการบดย่อยและการจัดเก็บที่ไม่เหมาะสม วัสดุประเภทนี้จึงไม่นิยมนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นพลาสติกกรีซไคเคิลและมักถูกกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ งานวิจัยนี้ใช้วิธีผสม PET ใน CMA ด้วยวิธีแบบแห้งที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ของน้ำหนักมวลรวม โดยผสมเศษพลาสติกกับมวลรวมที่มีความชื้นที่พอเหมาะจากนั้นจึงผสมแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h ก่อนนำเข้าแบบและบดอัดในระดับสุดท้าย

3.2 การออกแบบส่วนผสม การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบสมบัติมาร์แชลล์

วัสดุมวลรวมที่ใช้เตรียมตัวอย่าง CMA มีสมบัติดังตารางที่ 6 ถูกออกแบบให้มีขนาดคละดังรูปที่ 5 สำหรับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CMS-2h มีสมบัติตามตารางที่ 7 และสำหรับวัสดุผสมเพิ่มถูกทำให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิไม่เกิน 40°C เพื่อลดการเปลี่ยนรูปของวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงและใช้วัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มม. และค้ำบนตะแกรงขนาด 1.18 มม.



รูปที่ 5 ผลทดสอบขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.ม.407/2542

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางเคมี XRD และ LECO ของวัสดุผสมเพิ่ม (ASTM D5373-16)

No.	รายการ	ร้อยละโดยมวล
1	Magnesium (Mg)	3.66
2	Aluminium (Al)	0.74
3	Silicon (Si)	22.93
4	Phosphorus (P)	10.61
5	Potassium (K)	2.23
No.	รายการ	ร้อยละโดยมวล
6	Calcium (Ca)	16.5
7	Titanium (Ti)	0.49
8	Manganese (Mn)	0.27
9	Iron (Fe)	16.63
10	Nikel (Ni)	0.17
11	Carbon (C)	23.69
12	Hydrogen (H)	2.07

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม. 407/2542

สมบัติ	มวลรวมจากถังหินเย็น (Cold bin)	
	ข้อกำหนด ทล.ม.407/2542	ผลการทดสอบ
ค่าความสึกหรอ	≤40%	32%
ค่าความคงทน	≤9%	0.85%
ค่าความสมบูรณ์ของทราย	≥50%	74.20%
ค่าความถ่วงจำเพาะ	-	Bulk specific gravity ขนาด 3/4" = 2.740 ขนาด 3/8" = 2.695 หินฝุ่น = 2.673 Apparent specific gravity ขนาด 3/4" = 2.752 ขนาด 3/8" = 2.716 หินฝุ่น = 2.727

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบคุณลักษณะที่ต้องการของแอสฟัลต์อิมัลชัน ตาม มอก.371-2530

Test Description	Result	Specification	Unit	ASTM
		Lower to Upper		
Coating Ability, Dry	92.5	80-99.9	%	244
Coating Ability, Wet	90	60-99.9	%	44
Ductility of Residue @ 25°C	100	40-150	cm	113
Oil from Distillation	6	0-12	%(V)	6997
Penetration Resid after Drift @25°C	79	40-90	dmm	5
Residue from Distillation	66.7	65-99.9	%(m)	6997
Settlement 5 Day	0.8	0-5	%(m)	6930
Sieve Test (Mesh No.20)	0.01	0.0-0.1	%(m)	6933
Solubility Trichlorethylene	99.4	97.5-99	%(m)	2042
Storage Stability, 24 Hours	0.5	0-1	%(m)	6930
Test Description	Result	Specification	Unit	ASTM
Storage Stability, 24 Hours	0.5	Lower to Upper	0-1	%(m) 6930
Viscosity Saybolt Furol @50°C	279	50-450	s	7496

ทำการทดสอบการไหลบ่า (Runoff) เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับการเติมวัสดุผสมเพิ่มที่ร้อยละ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โดยเตรียมมวลรวมที่บ่มความชื้นร้อยละ 2 แล้วเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมแอสฟัลต์อิมัลชันที่อุณหภูมิ 60°C ผสมทุกส่วนให้เข้ากันแล้ว

บรรจุจนตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร วางสูง 300 มิลลิเมตร โดยมีถาดรองกากแอสฟัลต์ที่ไหลออก สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณกากแอสฟัลต์กับปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ผสมเพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมดังรูปที่ 4 ค่าการไหลบ่าถูกคำนวณตามสมการที่ (1)

ตัวอย่าง CMA ถูกเตรียมโดยการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละอัตราส่วนบรรจุเข้าแบบและบดอัดด้วยวิธี Double plunger ด้วยแรงสถิติ 25,000 ปอนด์ หรือ 11,160 กิโลกรัม กดไว้นาน 30 วินาที บ่มตัวอย่างขณะอยู่ในแบบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงสำหรับทดสอบสมบัติด้านการชะล้าง และบ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมงสำหรับทดสอบเสถียรภาพแล้วจึงถอดออกจากแบบ [13]



รูปที่ 6 การบดอัดด้วยวิธี Double plunger ด้วยแรงสถิติ 25,000 ปอนด์

สำหรับการทดสอบการชะล้าง (Washoff) ทดสอบตัวอย่าง CMA ซึ่งยังคงอยู่ภายในแบบภายหลังการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยการนำไปวางบนแท่นและตะแกรงลวด เทน้ำ 200 มิลลิลิตร ลงบนตัวอย่างดังรูปที่ 8 และเก็บตัวอย่างที่ชะล้างไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทซึ่งวางไว้ใต้ตะแกรง ปล่อยให้ส่วนผสมระบายออกเป็นเวลา 30 นาที ภาชนะถูกทำให้แห้งจนมีน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ}\text{F}$) คำนวณ %Washoff จากสมการที่ (2) และ %Combine จากสมการที่ (3)



รูปที่ 7 การทดสอบด้านการชะล้าง

การทดสอบเสถียรภาพของ CMA ดำเนินการตามวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐาน ASTM D1559 ดังรูปที่ 8 โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ด้วยอัตราการให้แรงกระทำ 50 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วบันทึกค่าแรงกระทำและการยุบตัว โดยค่าเสถียรภาพได้จากค่ากำลังรับแรงกระทำสูงสุดก่อนที่ตัวอย่างเริ่มเสียรูปหรือแตกร้าวและค่าการไหลหากค่ายุบตัวหรือระยะยึดของ Dial Gage ก่อนที่ตัวอย่างเริ่มเปลี่ยนรูปร่าง ขณะที่ค่าเสถียรภาพใกล้เคียงค่าสูงสุด



รูปที่ 8 การทดสอบเสถียรภาพด้วยวิธีมาร์แชลล์ ASTM D1559

4. วิเคราะห์ผลทดสอบ

ผลการทดสอบการไหลบ่า (Runoff) เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ต่อมิลลิลิตรที่เหมาะสมของ PET-CMA แสดงดังตารางที่ 8 ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 ถึงร้อยละ 0.8 มีค่าการใช้ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมไม่มากกว่าร้อยละ 8.0 และผลรวมระหว่าง %Runoff และ %Washoff ไม่เกินร้อยละ 0.5 ตามที่มาตรฐาน ทล.ม.407/2542 กำหนดจึงผ่านตามข้อกำหนดดังกล่าว แต่การเติม PET ที่ปริมาณร้อยละ 1.0 มีผลทำให้ต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมมากกว่าร้อยละ 8.0 และให้ค่าผลรวมระหว่าง %Runoff และ %Washoff มากกว่าร้อยละ 0.5 ซึ่งค่าทั้งคู่มีค่ามากกว่าที่มาตรฐานทล.ม. 407/2542 กำหนดไว้ ผู้วิจัยจึงไม่ทำการศึกษาในอัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มเติม

ตารางที่ 8 สมบัติ PET-CMA ตามมาตรฐาน ทล.ม.407/2542

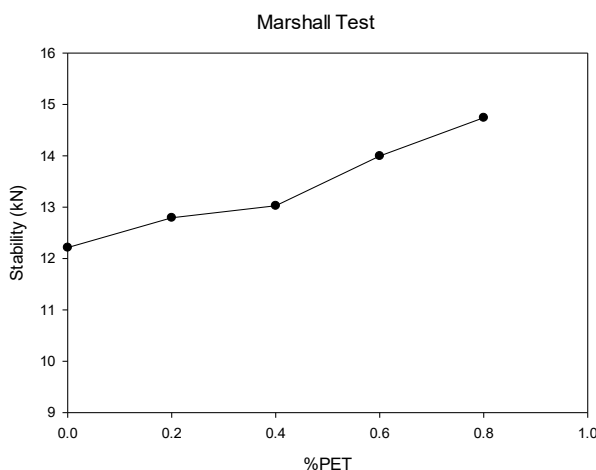
ปริมาณการเติม PET (%)	ปริมาณแอสฟัลต์มิลลิลิตรที่เหมาะสม (%)	การไหลบ่า (%)	การต้านการชะล้าง (%)	รวม (%)	ผลตามข้อกำหนด ทล.ม. 407/2542
0	6.2	0.31	0.0	0.31	ผ่าน
0.2	6.4	0.47	0.0	0.47	ผ่าน
0.4	6.7	0.15	0.0	0.15	ผ่าน
0.6	6.9	0.25	0.0	0.25	ผ่าน
0.8	7.3	0.22	0.0	0.22	ผ่าน
1	8.2	0.60	-	0.60	ไม่ผ่าน

ตารางที่ 9 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ของ CMA เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม PET ร้อยละ 0 ถึง 0.4 เป็นผลมาจาก PET ที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศ (Air void) ใน CMA ทำ

ให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อเติม PET ปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.4 เนื่องจากปริมาณ PET ที่มากเกินไปส่งผลให้ความต้องการแอสฟัลต์เพิ่มมากขึ้นไป ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจึงมีค่าลดลง ค่าการไหลบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูปที่จุดวิบัติ ที่ปริมาณการเติม PET ร้อยละ 0 ถึง 0.4 มีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้น การเติม PET ที่มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของ CMA เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความต้านทานการเสียรูปที่จุดวิบัติเพิ่มขึ้นขณะที่การเติม PET ปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.4 ส่งผลให้ความหนาแน่นของ CMA ลดลงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเสียรูปที่จุดวิบัติลดลงรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพ (Stability) และปริมาณ PET จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ PET เพิ่มขึ้นส่งผลให้ต้องการแอสฟัลต์อิมัลชันเพิ่มขึ้น (ตามตารางที่ 8) ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างมวลรวมใน CMA เพิ่มขึ้นค่าเสถียรภาพของ CMA จึงมีค่าเพิ่มขึ้น CMA ที่การเติม PET ปริมาณร้อยละ 0.8 มีค่ามากกว่า CMA เดิมที่ไม่เติม PET (PET ร้อยละ 0) ร้อยละ 31.63

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบเสถียรภาพด้วยวิธีมาร์แชลล์ (ASTM D1559)

ปริมาณการเติม PET (%)	Bulk Density (gm/cc)	Stability (kN)	Flow (0.25 mm)
0.0	2.285	11.38	6.7
0.2	2.287	12.54	8.92
0.4	2.290	13.08	10.5
0.6	2.288	14.53	9.92
0.8	2.286	14.98	9.63



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเสถียรภาพกับ CMA ที่ปรับปรุงด้วย PET ที่ปริมาณต่างๆ

5. สรุปผลการวิจัย

การเติม PET ผสมเพิ่มใน CMA ที่มีขนาดผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร และค้ำบนตะแกรงขนาด 1.18 มิลลิเมตร เป็นการควบคุมขนาด

และพื้นที่ผิวของวัสดุผสมเพิ่มให้มีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้ปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันที่เหมาะสมคงที่เช่นกัน ศึกษาการเติม PET ผสมเพิ่มที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ของน้ำหนักมวลรวม แสดงให้เห็นว่ามีเพียงการเติม PET ที่ปริมาณร้อยละ 1.0 ไม่ผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง แต่การศึกษาการเติม PET ในปริมาณร้อยละ 0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โดยน้ำหนักมวลรวมผ่านตามข้อกำหนดมาตรฐานดังกล่าว การเติม PET ช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพ โดยที่การเติมร้อยละ 0.8 มีค่าเสถียรภาพสูงสุด โดยสามารถปรับปรุงค่าเสถียรภาพของ CMA ได้ถึงร้อยละ 31.63 เมื่อเปรียบเทียบกับ CMA ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วย PET

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุทางในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง. (2542). วัสดุมวลรวมผสมเย็นด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน (Cold Mixed Asphalt). ทล.-ม.407/2542.กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง
- [2] กรมทางหลวง. (2531). คุณสมบัติที่ต้องการของแคตไอออนิกแอสฟัลต์อิมัลชันตาม มอก. 371-2530 ทล.-ก.404/2531. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง
- [3] A Basic Asphalt Emulsion Manual ; Manual Series No.19 Third Edition, Mach 1979.
- [4] Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts ; ASTM D244
- [5] R.G. Hick, Jean Walter, and Ronald Williamson Mix-Design Procedures for Open-Graded Emulsion Mixes., 1980, pp25-32
- [6] American Society for Testing and Materials. Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixture Using Marshall apparatus; ASTM D1559.
- [7] Lingyun You, Zhengwu Long, Zhanping You, Dongdong Ge, Xu Yang, Fu Xu, Mohammad Hashemi, and Aboelkasim Diab. (2022). Review of recycling waste pastics in asphalt paving material. Journal of traffic and transportation engineering (English edition), 9(5), pp. 742-764
- [8] Laomuad A., Suddeepong A., Horpibulsuk S., Buritatum A., Yaowarat T., Akkharawongwhattana K., Pongsri N., Phunpeng V., Chinkulkijniwat A., Arulrajah A. (2024). Evaluating polyethylene terephthalate in asphalt concrete with reclaimed asphalt pavement for enhanced

- performance, Construction and Building Materials, Vol. 422, 135749, Suranaree University of Technology
- [9] สุชาวรรณ ชูณรงค์, วีระเกษตร สอนผกา, และวัชรินทร์ วิทยกุล. (2566). การปรับปรุงยางมะตอยผสมเยื่อสำเร็จรูปชนิดคาร์บอนผสม
- [10] กรมทางหลวง. (2531). วิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม โดยใช้โซเดียมซัลเฟต ทล.-ท. 213/2531. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง
- [11] กรมทางหลวง. (2515). วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles. ทล.-ท.202/2515. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง
- [12] กรมทางหลวง. (2515). วิธีการทดสอบหาค่าสมมูลด้วยทราย Sand equivalent. ทล.-ท.203/2515. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง
- [13] Dallas N. Little, Jon A. Epps, and Bob M. Gallaway. Mixture Design Method Treated Bases and Surface, Research Report 41-1, Texas Transportation Institute Texas A&M University College Station