

การศึกษาสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง

A study on mechanical properties of asphaltic concrete improved with crosslinked thermoplastic elastomer

ปวิศ ธรรมประสม¹ ชนา พุทธนันท์^{2,*} พรเกษม จงประดิษฐ์³ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร⁴ และ เยี่ยมพล นัครามนตรี⁵

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

⁵ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: chana.phu@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ทำจากขยะพลาสติกและยางธรรมชาติโดยผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา ยังพบข้อจำกัดในเรื่องของความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุในขั้นตอนการผสมวัสดุเชื่อมประสาน งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้ของวัสดุโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดผ่านกระบวนการเชื่อมขวางเพื่อสร้างเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่สามารถผสมเข้ากันได้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยมีการประเมินประสิทธิภาพผ่านการทดสอบเสถียรภาพ การไหล และการรับแรงดึงทางอ้อมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการโดยการเตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์ การศึกษานี้พิจารณาอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดยคงที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่อวัสดุมวลรวมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 จากผลการศึกษาพบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญและผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยกรมทางหลวง

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต, แอสฟัลต์ซีเมนต์, เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์, การเชื่อมขวาง, ความเข้ากันได้

Abstract

This research focuses on enhancing the mechanical properties of asphalt concrete using thermoplastic elastomers made from plastic waste and natural rubber through a crosslinking process. As previous studies have identified limitations in material compatibility during the binder mixing process, this research proposes a method to improve the compatibility between these two polymeric materials through

crosslinking, creating thermoplastic elastomers that can blend effectively with asphalt cement for use as a binding material. Performance was evaluated through laboratory testing of stability, flow, and indirect tensile strength of asphalt concrete samples prepared using the Marshall method. This study examined asphalt cement replacement rates with thermoplastic elastomers at 3%, 5%, and 7%, while maintaining a constant binder-to-aggregate ratio of 5%. Results indicate that asphalt cement modified with crosslinked thermoplastic elastomers significantly improves the mechanical properties of asphalt concrete and meets the standards established by the Department of Highways.

Keywords: Asphaltic concrete, Asphalt cement, Thermoplastic Elastomer, Crosslinking, Compatibility

1. คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานผิวทางเป็นจำนวนมาก จากผลสำรวจโดยกรมทางหลวงพบว่าประมาณร้อยละ 94 ของผิวงานทางทั้งหมดในประเทศไทยใช้แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุผิวทาง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้งานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตยังมีข้อจำกัดบางประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงในเวลากลางวัน และต่ำในเวลากลางคืน มากไปกว่านั้น เนื่องจากในปัจจุบันมีจำนวนรถบรรทุกหนักเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งส่งผลโดยตรงให้เกิดความเสียหายต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนหมดอายุการใช้งาน [1] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นจำนวนมาก

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา กรมทางหลวงได้ริเริ่มผลักดันโครงการทดลองวิจัย และพัฒนาการนำขยะพลาสติกมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้ขยะพลาสติกเป็นวัสดุปรับปรุงคุณสมบัติสารเชื่อมประสานช่วยเพิ่มความสามารถในการ

ด้านทานอุณหภูมิที่สูงของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถช่วยลดการเกิดรอยร้าวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ มากกว่านั้นยังพบว่าการใช้ขยะพลาสติกสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของแอสฟัลต์คอนกรีตไปในทิศทางที่ดีมากขึ้นได้อีกด้วย [1]

อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยขยะพลาสติก (ในปริมาณที่มากเกินไป) เพียงอย่างเดียวนั้นอาจส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งเกินไป [2] ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวได้ง่าย เนื่องจากการหดตัวและขยายตัวของผิวทางที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างเวลากลางวันและกลางคืน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำยางธรรมชาติเข้ามาช่วยปรับสมดุลให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสมบัติทางกลของแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น เสถียรภาพ การไหล และความทนทานต่อการเสียดสีเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถพัฒนาเพิ่มขึ้นได้ผ่านการปรับปรุงด้วยขยะพลาสติกและยางธรรมชาติ นอกเหนือจากนี้ แนวทางการใช้ขยะพลาสติกและยางธรรมชาติในการปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตยังช่วยลดปริมาณยางธรรมชาติที่ล้นตลาดและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ของประเทศไทยในการลดปริมาณขยะพลาสติก อย่างไรก็ตาม การนำเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ทำจากยางธรรมชาติและขยะพลาสติกมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสานสำหรับช่วยในการปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตยังมีข้อจำกัดในด้านความเข้ากันในระหว่างการผลิต รวมถึงอาจต้องใช้ขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนและมากขึ้นเพื่อที่จะทำให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อความยุ่งยากในกระบวนการก่อสร้างผิวทาง [3]

เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวไปข้างต้นจึงได้มีแนวความคิดที่จะนำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) มาผสมร่วมกับขยะพลาสติกเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer, TPE) แบบเชื่อมขวาง (Crosslinking) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการวัลคาไนเซชันหรือเชื่อมขวางนี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดและลดค่าความเครียดเนื่องจากการรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4] ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของแอสฟัลต์คอนกรีต มากกว่านั้น วัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางนี้จะมีคุณสมบัติที่มากขึ้นและมีความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงมากขึ้นอีกด้วย [5,6] แต่อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาใดให้ความสำคัญในการตรวจสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการนำวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสานสำหรับปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีการผสมร้อน โดยพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของทั้งแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยวัสดุเทอร์

โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง โดยสมบัติเชิงกลที่พิจารณาในการศึกษานี้ได้แก่ เสถียรภาพ การไหล และการรับแรงดึงทางอ้อมในสภาวะที่อุณหภูมิต่างกัน สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบ การศึกษานี้พิจารณาอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดยคงที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่อวัสดุมวลรวมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 และเตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall)

2. วัสดุตั้งต้นและวิธีการเตรียมวัสดุ

2.1 วัสดุตั้งต้น

2.1.1 วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC60/70

วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับการทดสอบและผ่านตามมาตรฐาน มอก. 851 [7] เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุประสานหรือโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต (Polymer Modified Asphaltic Concrete, PMAC) ในการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

2.1.2 วัสดุยางธรรมชาติและขยะพลาสติก

การศึกษานี้ใช้ ส่วนผสมหลักที่ใช้ในการผลิตวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ได้แก่ วัสดุยางธรรมชาติอัดแท่ง (Standard Thai Rubber, STR5L) ดังแสดงในรูปที่ 1 และวัสดุโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) รีไซเคิลที่ทำจากขยะพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในการศึกษานี้ อัตราส่วนระหว่างขยะพลาสติกรีไซเคิลและยางธรรมชาติที่ 1 ต่อ 1 จะถูกพิจารณาใช้ในการผลิตวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

2.1.3 วัสดุมวลรวม

สำหรับการศึกษานี้ วัสดุหินปูนถูกนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมสำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นหินที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับงานทางในประเทศไทยแสดงดังรูปที่ 3 โดยนำมาจากโรงผลิตหินในกำกับของกรมทางหลวง โดยที่วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ผ่านการทดสอบทางกายภาพตามมาตรฐาน มทข. 209 [8] และมีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน มทข. 236 [9] ดังแสดงในรูปที่ 3

2.2 วิธีการเตรียมวัสดุ

2.2.1 การเตรียมวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง

กระบวนการผลิตวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ดำเนินการโดยใช้เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (Intermix Internal Mixer) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในตารางที่ 1 โดยนำวัสดุตามทีระบุในตารางที่ 2 เข้าสู่กระบวนการผสมตามลำดับ

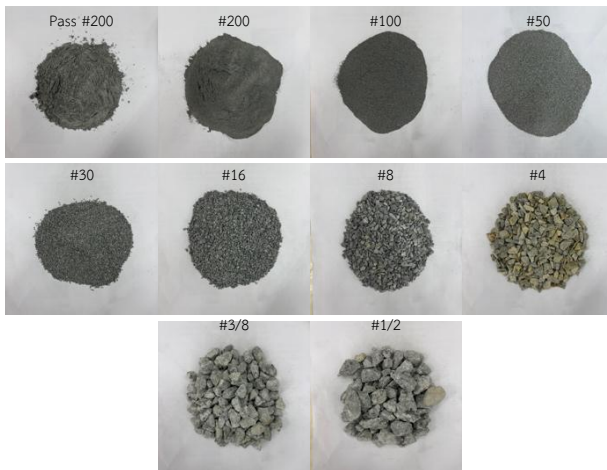
โดยกระบวนการนี้จะทำให้ได้วัสดุยางพรีวัลคาไนซ์ (Pre-Vulcanize Rubber) และถ้ามีการเติมสาร MBTS และกำมะถัน (S) เข้าไปในระหว่างกระบวนการวัลคาไนเซชัน วัสดุยางจะเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslinking) แต่ถ้าไม่มีการเติมสารเหล่านี้ วัสดุยางจะไม่เกิดการเชื่อมขวาง (Uncrosslinking) จากนั้นนำวัสดุยางพรีวัลคาไนซ์มาผสมเข้ากับวัสดุโพลิ



รูปที่ 1 ยางธรรมชาติ



รูปที่ 2 โพลีโพรพิลีนรีไซเคิล



รูปที่ 3 วัสดุผสมรวมแบ่งตามขนาดตะแกรงร่อน

โพรพิลีนรีไซเคิลในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยดำเนินการผสมภายใต้เงื่อนไขการผสมที่กำหนดในตารางที่ 1 ในระหว่างกระบวนการผสมจะดำเนินการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและเวลาในการผสม โดยพิจารณาจากค่าแรงบิด เมื่อค่าของแรงบิดมีแนวโน้มคงที่ แสดงว่าวัสดุที่ทำการผสมเข้าด้วยกันมีการกระจายตัวและเข้ากันได้ดีแสดงดัง Residual Zone ในรูปที่ 4 โดยในรูปที่ 5 แสดงตัวอย่างวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางที่ผสมแล้วเสร็จ โดยในการศึกษานี้ การผสมกันระหว่างวัสดุยางที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางและวัสดุโพลีโพรพิลีนรีไซเคิลจะถูกเรียกว่า “วัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง” ในทางตรงกันข้าม หากทำการผสมวัสดุยางพรีวัลคาไนซ์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางและวัสดุโพลีโพรพิลีนรีไซเคิลเข้าด้วยกัน วัสดุนี้จะถูกเรียกว่า “วัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง”

2.2.3 การเตรียมวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์

สำหรับการเตรียมวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ เริ่มแรกจะนำวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์มาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ $160 \pm 5^\circ\text{C}$ จากนั้นเติมวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ตามอัตราส่วนที่กำหนด หลังจากนั้นทำการผสมส่วนผสมดังกล่าวจนกว่าส่วนผสมจะเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งสามารถสังเกตด้วยตาเปล่า โดยจะเห็นได้ว่าส่วนผสมระหว่างวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์จะผสมเข้ากันได้

อย่างสมบูรณ์เมื่อไม่เห็นเศษเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์หลงเหลือหรือลอยเป็นชิ้นอยู่บนผิวของส่วนผสม โดยระยะเวลาในการผสมจะอยู่ระหว่างประมาณ 10–30 นาที ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ต่อวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์

3. การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบสมบัติเชิงกล

3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล

ก่อนการผสมวัสดุสำหรับเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจำเป็นต้องนำแบบหล่อ (Mold) สำหรับบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และสูง 2.5 นิ้ว (รูปที่ 6(ก)) และค้อนบดอัด (รูปที่ 6(ข)) ให้ความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $90\text{--}150^\circ\text{C}$ จากนั้นนำวัสดุผสมรวมที่มีขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 7 พร้อมทั้งวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์มาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ $160 \pm 5^\circ\text{C}$

เมื่อเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นครบถ้วน ทำการผสมวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุผสมรวมเข้าด้วยกันโดยคลุกเคล้ากันจนกระทั่งวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบวัสดุผสมรวมทั้งหมดอย่างสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 6(ค) จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้เทลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้และเกลี่ยตัวอย่างให้กระจายทั่วแบบหล่อ หลังจากนั้นทำการบดอัดด้วยค้อนบดอัดจำนวน 75 ครั้งในแต่ละด้านของตัวอย่าง

3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.2.1 การทดสอบเสถียรภาพและการไหล

การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ในการตรวจสอบความต้านทานต่อการเสียรูปของตัวอย่างทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และสูง 2.5 นิ้ว ซึ่งการทดสอบนี้มีความสำคัญสำหรับใช้ในการประเมินค่าเสถียรภาพและการ

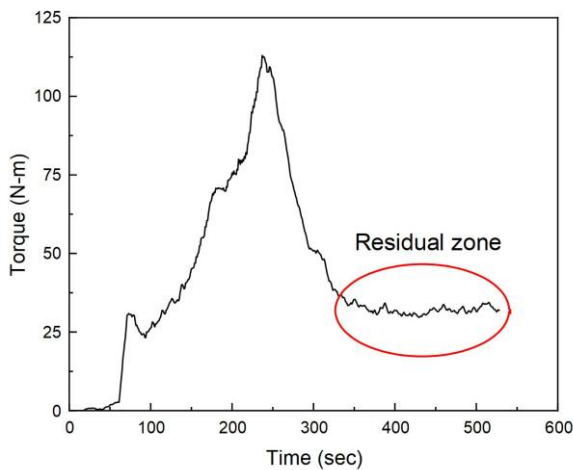
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการผสมต่อการผสมสำหรับยางวัลคาไนซ์

รายการ	เงื่อนไข	หน่วย
ปริมาณห้องผสม	500	มิลลิเมตร
ความสามารถในการผสม	75	ร้อยละ
อุณหภูมิในการผสม	50	$^\circ\text{C}$
ความเร็วในการผสม	60	รอบต่อนาที
เวลาในการผสม	15	นาที

ตารางที่ 2 ลำดับการผสมสารเคมี

ลำดับ	สารเคมี	ร้อยละ	ระยะเวลาบ่ม (นาที)
1	STR5L	90.50	2
2	ZnO	4.54	1
3	Steric acid	0.90	1
4	TMQ	0.90	1
5	6PPD	0.90	1
6	MBTS	1.81	1
7	S	0.45	2

หมายเหตุ: MBTS = Mercaptobenzothiazole Disulfide



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและเวลาระหว่างผสม
เทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์

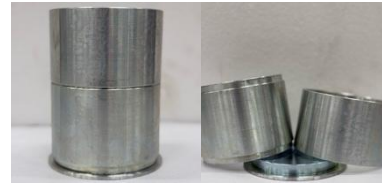


รูปที่ 5 เทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผสมระหว่างโพลิโพรพิลีนและยาง
ธรรมชาติ

ไหลของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้สภาวะที่กำหนด โดยดำเนินการ
ทดสอบตามมาตรฐานที่ระบุไว้ใน ASTM D6927 [10]

3.1.2 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม

การทดสอบนี้สามารถประเมินสมบัติแรงดึงทางอ้อมของตัวอย่าง
ทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4
นิ้ว และสูง 2.5 นิ้ว การทดสอบนี้ใช้แรงอัดข้ามระนาบเส้นผ่านศูนย์กลาง
แนวตั้งของตัวอย่าง การทดสอบนี้ช่วยในการประเมินความสามารถในการ
ทนทานต่อการแตกร้าวและการเสียรูปภายใต้แรงดึงทางอ้อม โดยทั่วไป
ชิ้นงานจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุมอัตราการเสียรูปที่อุณหภูมิเฉพาะ
สำหรับการศึกษานี้ดำเนินการทดสอบโดยให้แรงกดที่อัตราเร่ง 50±5 มม/
นาที และควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างก่อนการทดสอบที่ 25±1°C
(อุณหภูมิห้อง), 40±1°C และ 60±1°C โดยที่นำแรงกระทำสูงสุดที่ได้จาก
การทดสอบมาคำนวณหาแรงดึงทางอ้อมสูงสุดดังสมการที่ (1) ตาม
มาตรฐานที่ระบุใน ASTM D6931 [11]



(ก)



(ค)



(ข)

รูปที่ 6 (ก) โมลบดีดแอตสฟัลต์คอนกรีต (ข) ค้อนบดแอตสฟัลต์คอนกรีต
(ค) แอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุผสมรวมเมื่อผสมแล้วเสร็จ

$$\sigma = 2000P/\pi tD \quad (1)$$

โดย σ = ค่าการรับแรงดึงทางอ้อม (เมกะปาสคาล)
 P = แรงกระทำสูงสุด (กิโลนิวตัน)
 t = ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติเชิงกล

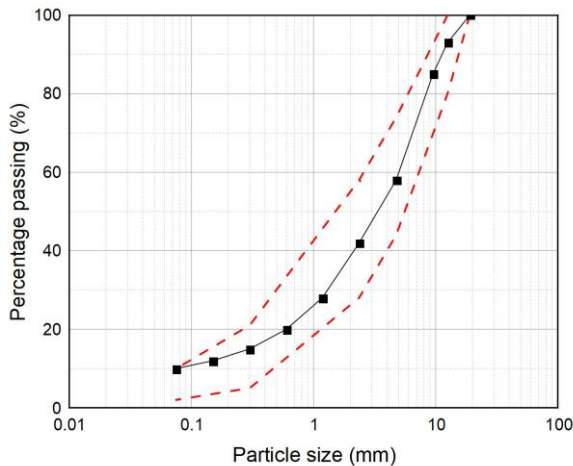
สำหรับขั้นตอนการทดสอบเสถียรภาพและการไหล เริ่มต้นด้วยการนำ
ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมไว้ มาแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ
60±1°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้น นำตัวอย่างทดสอบมาเช็ดผิวให้
แห้งและวางตัวอย่างในอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 ก่อนการทดสอบ
ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ Linear Variable Differential Transformer
(LVDT) เพื่อตรวจวัดการเสียรูปของตัวอย่างเนื่องจากแรงกด (รูปที่ 8)

สำหรับขั้นตอนการทดสอบแรงดึงทางอ้อม เริ่มต้นด้วยการนำตัวอย่าง
แอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมไว้มาแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิที่ต้องการจะทดสอบ
เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้น นำตัวอย่างทดสอบมาเช็ดผิวให้แห้งและวาง
ตัวอย่างในอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9

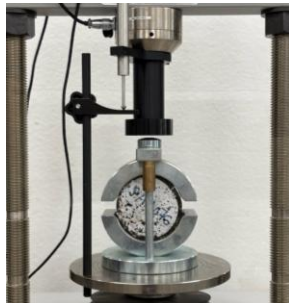
การทดสอบสมบัติเชิงกลทั้ง 2 รูปแบบ มีความคล้ายคลึงกันในส่วนของ
อัตราการกดตัวอย่าง โดยมีความแตกต่างกันเพียงแบบจับตัวอย่างซึ่งจะทำ
ให้แรงกระทำที่แตกต่างกัน เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แล้วเสร็จดำเนินการกด
ตัวอย่างทดสอบโดยควบคุมอัตราการกดที่ 50±5 มม./นาที จนกระทั่ง
ตัวอย่างเกิดการวิบัติหรือสังเกตได้จากแรง (ตรวจวัดด้วย Load Cell) ที่
กระทำกับตัวอย่างทดสอบนั้นเริ่มลดลงอย่างเป็นได้ชัดและถือว่าเป็นที่
สิ้นสุดการทดสอบ โดยที่ผลการทดสอบมาร์แชล (ค่าแรงกระทำสูงสุดและ
ค่าการไหล) ของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่
กำหนดไว้ใน มทข.236 [9] ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดในการออกแบบโพลีเมอร์ไมดิฟายแอสฟัลต์คอนกรีต [9]

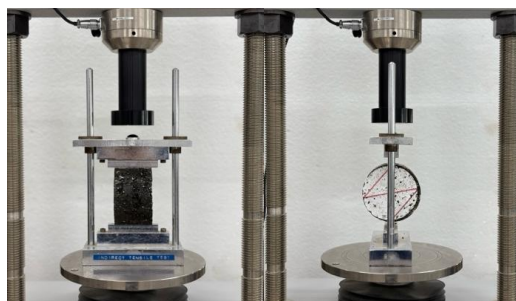
รายการ	ข้อกำหนด
ค่าเสถียรภาพ (มากกว่า)	12,010 นิวตัน
ค่าการไหล (1 = 0.25 มม. or 0.01 นิ้ว)	8-16



รูปที่ 7 ขนาดคละของวัสดุรวมที่ใช้สำหรับการศึกษานี้



รูปที่ 8 แบบจับตัวอย่างสำหรับทดสอบเสถียรภาพและการไหล



รูปที่ 9 แบบจับตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

4. ผลการทดสอบ

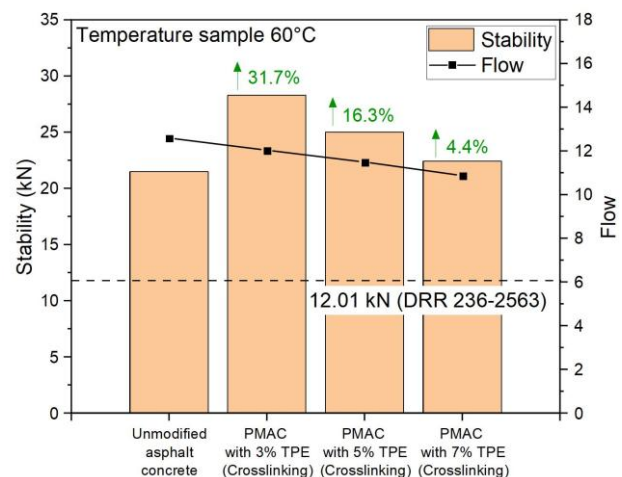
4.1 ค่าเสถียรภาพและการไหล

จากผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง โดยพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดยคั่งที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่อวัสดุรวมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 จากผลการทดสอบที่อุณหภูมิตัวอย่าง 60°C (ตามมาตรฐานการ

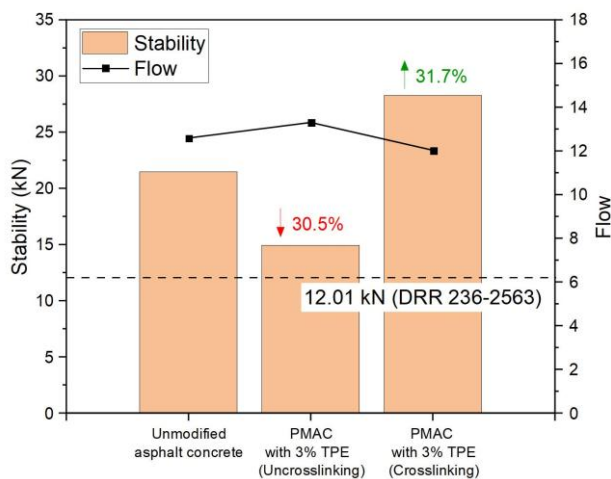
ทดสอบ) ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 3 สามารถเพิ่มค่าเสถียรภาพได้ดีที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 31.7 เมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตบริสุทธิ์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง (ร้อยละ 5 และ 7) พบว่าค่าเสถียรภาพลดลง แต่ยังคงค่าเสถียรภาพที่มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตบริสุทธิ์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง เมื่อเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพที่ได้จากการทดสอบและค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ใน มทข.236 [9] (ตารางที่ 3) พบว่าค่าเสถียรภาพของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในทุกอัตราส่วนการแทนที่ที่พิจารณาในการศึกษานี้มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐาน ในทางตรงกันข้าม ผลทดสอบการไหล (รูปที่ 10)

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงนั้นมีค่าการไหลที่ลดลงเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในการศึกษานี้ยังคงมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3

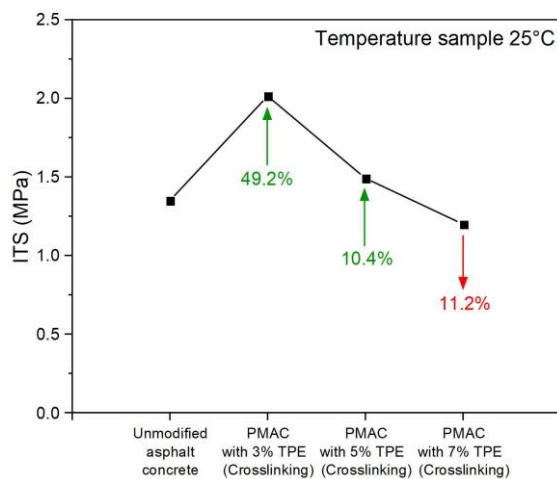
เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในการปรับปรุงค่าเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีต จากผลการเปรียบเทียบระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ร้อยละ 3 (รูปที่ 11) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางไม่สามารถช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงมีสมบัติเชิงกลทางด้านเสถียรภาพที่ดีขึ้น มาก



รูปที่ 10 ค่าเสถียรภาพและค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกโอสโตรเมอร์ที่ผ่านการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ได้รับการปรับปรุง



รูปที่ 11 ค่าเสถียรภาพและค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านและไม่ผ่านการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 3 เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง



รูปที่ 12 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

ไปกว่านั้นยังให้ค่าเสถียรภาพที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง (ค่าเสถียรภาพต่ำกว่าประมาณร้อยละ 30.5) แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งค่าเสถียรภาพและค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด โดยค่าเสถียรภาพมีค่ามากกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดเพียงเล็กน้อย

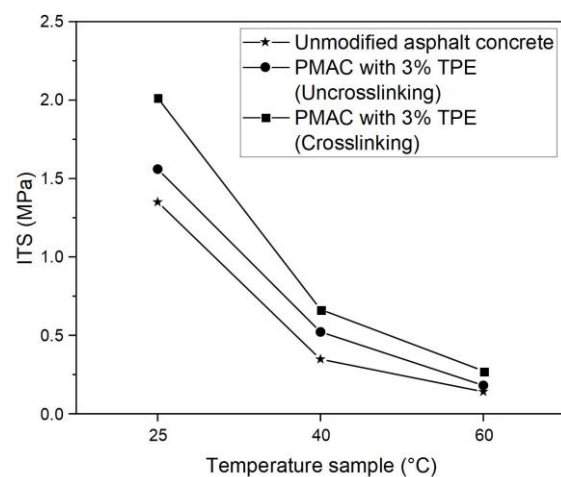
4.2 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม

ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดยคงที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่อวัสดุมวลรวมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 ที่

อุณหภูมิตัวอย่างทดสอบ 25°C แสดงดังรูปที่ 12 จากผลการทดสอบจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในอัตราส่วนร้อยละ 3 และ 5 นั้นนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงทางอ้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 49.2 และ 10.4 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางไปที่ร้อยละ 7 ความสามารถในการรับแรงดึงทางอ้อมลดลงและมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของตัวอย่างในระหว่างการทดสอบก็มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้น ในการศึกษานี้ได้ทำประเมินความสามารถในการรับแรงดึงทางอ้อมในสภาวะที่อุณหภูมิต่างกัน โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (อัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ร้อยละ 3) ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง ณ อุณหภูมิ 25°C, 40°C และ 60°C จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 13

ผลการทดสอบพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางนั้นสามารถเพิ่มความสามารถการรับแรงดึงทางอ้อมได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุงในทุกกรณีอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบ มากไปกว่านั้น ยังพบว่า การปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางนั้นสามารถเพิ่มความสามารถการรับแรงดึงทางอ้อมได้ดีกว่ากรณีที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง



รูปที่ 13 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านและไม่ผ่านการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 3 เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง ณ อุณหภูมิตัวอย่างก่อนการทดสอบที่แตกต่างกัน

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ทำจากขยะพลาสติกและยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวาง โดยพิจารณาอัตราส่วนการแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ร้อยละ 3, 5 และ 7 โดยคงที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่อวัสดุรวมที่อัตราส่วนร้อยละ 5 จากผลการทดสอบพบว่า การนำเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางมาใช้เป็นสารปรับปรุงวัสดุประสานสามารถช่วยให้สมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชลแสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงด้วยวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 3 เป็นอัตราส่วนการแทนที่ที่ดีที่สุดในการปรับปรุงค่าเสถียรภาพค่าการไหล และค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม เมื่อเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ที่ร้อยละ 5 และ 7 อีกทั้งยังมีค่าเสถียรภาพและค่าการไหลที่มากกว่าทั้งแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุงและค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ใน มทข.236 [9] ถึงแม้ว่าค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนการแทนที่ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการไหลนี้ยังคงมีค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ สำหรับค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม ณ สภาวะอุณหภูมิที่ต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางนั้นสามารถให้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสูงที่สุดในทุกอุณหภูมิที่พิจารณาในการศึกษานี้ โดยเปรียบเทียบกับกรณีแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยวัสดุเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมขวางและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

ในการศึกษานี้ สมบัติเชิงกลที่พิจารณาเป็นเพียงค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล และค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น อย่างไรก็ตามยังคงต้องประเมินสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับงานทางอาทิ เช่น การทดสอบแรงดึงทางอ้อมเนื่องจากความล้าและการทดสอบหาค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus) เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับสนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนวิจัยมูลฐาน ปีงบประมาณ 2568 ผ่านโครงการนวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน และขอขอบคุณกรมทางหลวงที่กรุณาให้อนุเคราะห์เกี่ยวกับข้อมูลและวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Enieab, M., Eltwati, A.S. and Al-Jumaili, M.A. (2021). Temperature sensitivity and performance evaluation of

asphalt cement incorporating different types of waste polymers. *Journal of Innovative Transportation*, 2. pp. 984159.

- [2] Grady, P.D. (2021). Waste plastics in asphalt concrete: A review. *SPE Polymers*, 2, pp. 4-18.
- [3] สุทธิชัย เจริญกิจ, ธนิตเชษฐ์ ดวงโสม และ สราวุธ จริตงาม (2021). การศึกษาการใช้เศษพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) ผสมกับแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานทาง. วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปีที่ 21, ฉบับที่ 1, หน้า 96-110
- [4] Harper, C.A. (1992). *Handbook of Plastic, Elastomer, and Compound*. 2nd ed. McGraw Hill: New York.
- [5] Magioli, M., Sirqueira, A.S. and Soares, B.G. (2010). The effect of dynamic vulcanization on the mechanical, dynamic mechanical and fatigue properties of TPV based on polypropylene and ground tire rubber. *Polymer Testing*, 29, pp. 840-848.
- [6] Akiba M. and Hashim A.S. (1997). Vulcanization and crosslinking in elastomers. *Progress in Polymer Science*, 22, pp. 475-521.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2561). มอก. 851 หลักเกณฑ์เฉพาะในการตรวจสอบเพื่อการอนุญาตสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง
- [8] กรมทางหลวงชนบท. (2545). มทข. 209 มาตรฐานวัสดุผสมสำหรับงานแอสฟัลต์คอนกรีต
- [9] กรมทางหลวงชนบท. (2563). มทข. 236 มาตรฐานงานโพลิเมอร์มอดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต
- [10] ASTM (2022). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. ASTM D6927. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [11] ASTM (2012) *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures*. ASTM D6931. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [12] Wang, S., Yuan, C. and Jiayi, D. (2014). Crumb tire rubber and polyethylene mutually stabilized in asphalt by screw extrusion. *Journal of Applied Polymer Science*. 131. pp. 41189
- [13] Sani, A., Mohd Hasan, M.R., Shariff, K.A., Jamshidi, A., Poovaneshvaran and Shahid, K.A. (2021). Physico-mechanical and morphological properties of wax latex-modified asphalt binder. *Iranian journal of science and Technology, Transactions of civil engineering*. 45, pp. 865-878.