

สมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขยะพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการบดย่อยขวด ประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Performance of Hot Mix Asphalt Concrete Modified with Plastic Waste from the Crushing Process of Polyethylene Terephthalate Bottles

นิตี พันธุ์โสภาส^{1*}, สุขสันต์ หอพิบูลสุข², อภิชาติ สุดดีพงษ์³, และคงศักดิ์ อัครวงค์วัฒนา⁴

¹ กรมทางหลวง ถ.ศรีอยุธยา เขตราชเทวี กรุงเทพฯ

² หลักสูตรวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

³ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

⁴ หลักสูตรวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: niti4955@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เศษขวดพลาสติกเหลือทิ้งประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) สำหรับปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ศึกษาอิทธิพลของการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่ม (Adding) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยวิธีแบบแห้งต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต และส่วนที่ 2 ศึกษาการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการแทนที่ (Replacing) ในมวลรวมละเอียดบางส่วนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต เศษขวด PET ที่ใช้ศึกษามีขนาดเล็กกว่า 2.36 มิลลิเมตร ปริมาณร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์กวดำเนินการตามมาตรฐานกรมทางหลวง ออกแบบในเกณฑ์ชั้นผิวทาง (Wearing Course) โดยมีขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวม 12.5 มิลลิเมตร สมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตถูกศึกษาทั้งแบบสถิต (กำลังดึงทางอ้อม) และแบบพลวัต (โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม) จากผลการศึกษาพบว่า ทุกส่วนผสมมีสมบัติมาร์แชลล์ผ่านตามมาตรฐานกรมทางหลวง สมรรถนะแบบสถิตและแบบพลวัตของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก อนุภาคของ PET เป็นแบบกึ่งแข็งกึ่งอ่อน (Semicrystalline) ส่วนที่อ่อนจะละลายกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เหนียวขึ้น และส่วนที่แข็งทำหน้าที่รับน้ำหนักระหว่างมวลรวม โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ทั้ง 2 วิธีมีสมรรถนะแบบสถิตและแบบพลวัตเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มีค่ามากกว่าร้อยละ 0.6 ทำให้สมรรถนะแบบสถิตและแบบพลวัตลดลงตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก เศษขวด PET มีความแกร่ง (Stiffness) น้อยกว่ามวลรวม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มากเกินไปทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้การใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่มทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีสมรรถนะสูงกว่าการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้เป็น

แนวทางสำหรับการนำเศษขวด PET มาใช้ในการปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความยั่งยืนและยังเป็นแนวทางที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน, สมรรถนะเชิงกล, แรงดึงทางอ้อม, เศษขยะพลาสติก, โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Abstract

This study investigates the utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) plastic bottles to enhance the performance of asphalt concrete. The research is divided into two parts: (1) examining the influence of adding PET waste directly into the asphalt concrete mixture using the dry method, and (2) exploring the replacement of a portion of fine aggregates with PET waste. PET particles smaller than 2.36 mm were incorporated at varying percentages (0.0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1.0% by total aggregate weight). The asphalt concrete mixtures were designed and tested using the Marshall method in accordance with the Department of Highways standards, focusing on the wearing course with a maximum aggregate size of 12.5 mm. Performance evaluations included both static (indirect tensile strength) and dynamic (indirect tensile resilient modulus) tests. Results indicated that all mixtures met the Marshall criteria set by the Department of Highways. Increasing PET content up to 0.6% improved both static and dynamic performances. Adding PET enhances the ITS of asphalt concrete by improving bond strength between aggregate and AC through the melted components of PET during the hot mixed process [16]. However, the ITS decreases as the PET content exceeds 0.6% for all methods and temperatures due to its excessive volume of un-melted PET particles having lower stiffness than

aggregate. Additionally, the method of adding PET directly into the mixture yielded better performance enhancements than replacing fine aggregates. This research offers a sustainable approach to improving asphalt concrete performance while mitigating environmental impacts through the reuse of PET waste.

Keywords: hot mix asphalt concrete, mechanical performance, plastic waste, Indirect tensile strength, polyethylene terephthalate

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันประชากรมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วความต้องการในสิ่งอำนวยความสะดวกของสาธารณูปโภคทุกด้าน โดยเฉพาะด้านการคมนาคมทางบก ถนนหรือทางหลวงจัดเป็นเส้นทางการคมนาคมที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ข้อมูลจากกระทรวงคมนาคม ปี 2565 ระบุว่าถนนภายในประเทศไทยทั้งหมดร้อยละ 93.90 เป็นถนนลาดยางหรือแอสฟัลต์คอนกรีต ข้อดีของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต คือ ใช้งบประมาณในการก่อสร้างน้อย การบำรุงรักษาที่ง่าย และมีความราบเรียบไม่มีรอยต่อ ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตได้จากการผสมระหว่างมวลรวม (Aggregate) และแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 160 องศาเซลเซียส โดยการควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิให้ได้มาตรฐาน แล้วบดอัดบนชั้นทางจนได้ความแน่นตามมาตรฐาน (กรมทางหลวง, 2548) เมื่อถนนแอสฟัลต์คอนกรีตรองรับน้ำหนักบรรทุกจากล้อยานพาหนะจะเกิดความเสียหาย โดยสาเหตุที่ทำให้ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความเสียหายก่อนระยะเวลาที่ออกแบบไว้ส่วนใหญ่มาจากการบรรทุกน้ำหนักเกินตามที่กฎหมายกำหนด ส่งผลให้ต้องมีการขุดรื้อและซ่อมแซมถนนที่หมดสภาพการใช้งาน ทำให้ต้องใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติที่มีจำกัดและสูญเสียงบประมาณในการก่อสร้างผิวทางใหม่ ด้วยเหตุนี้ หน่วยงานที่รับผิดชอบถนนแอสฟัลต์คอนกรีตจึงพยายามที่จะพัฒนาความแข็งแรงของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อยืดอายุการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

การปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตถูกศึกษามายาวนาน โดยงานวิจัยส่วนใหญ่สรุปไว้ว่าการปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถทำได้ 3 วิธี ได้แก่ 1) การปรับขนาดคละของมวลรวมให้ใหญ่ขึ้น เพื่อให้การถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างมวลรวมมีประสิทธิภาพมากขึ้น 2) การใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตให้ดีขึ้น และ 3) การใช้เคลือบผิวทางเดิมโดยลอกผิวทางเก่ามาบดย่อยให้ได้ขนาดตามต้องการและนำไปทดแทนวัสดุใหม่บางส่วนซึ่งเป็นการลดการใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีปริมาณจำกัด [1] โดยส่วนใหญ่แล้ว การใช้สารผสมเพิ่มเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์มีสมบัติทางกายภาพคล้ายกับพอลิเมอร์ สารผสมเพิ่มส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ปรับปรุงแอสฟัลต์ สารผสมเพิ่มส่วนใหญ่จึงเป็นสาร

จำพวก พอลิเมอร์ ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางรีไซเคิล พลาสติก และเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น งานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ [1-3] แสดงให้เห็นว่าการใช้พลาสติกกรีไซเคิลสามารถปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ และยังช่วยลดปริมาณของขยะพลาสติกที่เป็นปัญหาหลักต่อสิ่งแวดล้อม

พลาสติกกรีไซเคิลที่ใช้ในการปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิล มักจะได้จากกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกจากรูปร่างเดิมให้มีขนาดเล็กก่อนจะนำไปสู่ขั้นตอนการให้ความร้อนเพื่อรีดขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติก นอกจากนี้ การบดย่อยพลาสติกจะเกิดเศษพลาสติกเหลือทิ้งขนาดเล็กติดอยู่บริเวณเครื่องจักร ซึ่งจะต้องทำความสะอาดเครื่องจักรโดยนำเศษพลาสติกเหลือทิ้งดังกล่าวออก และถูกนำไปกำจัดทิ้งด้วยการฝังกลบ จากข้อมูลของบริษัท สมคิดพลาสติกนำเข้าและส่งออก จำกัด จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ปริมาณเศษพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการบดย่อยเกิดขึ้นประมาณ 40 กิโลกรัมต่อวัน หรือประมาณ 14.6 ตันต่อปี โดยเศษพลาสติกเหลือทิ้งส่วนใหญ่เป็นพลาสติกประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีความโปร่งใสและแข็งแรงทนทานนิยมใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์และขวดบรรจุเครื่องดื่มอย่างแพร่หลาย โดยปกติแล้วจะใช้งานเพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง PET เป็นพลาสติกที่มีความทนทานสูง และมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 260 องศาเซลเซียส และไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ [2]

Gius and Boom [2] ศึกษาการใช้พลาสติกกรีไซเคิลมาปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่า การใช้พลาสติกในการปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ 1) เติมพลาสติกลงในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขณะผสมระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 150-160 องศาเซลเซียส (วิธีแบบแห้ง) และ 2) ผสมพลาสติกกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส ให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนแล้วค่อยนำไปผสมกับมวลรวม (วิธีแบบเปียก) PET มีอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวสูงถึง 260 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สามารถผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ เนื่องจาก อุณหภูมิการใช้งานของแอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในช่วง 150 ถึง 160 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกินกว่า 160 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เสื่อมคุณภาพด้วยเหตุนี้ เศษขวด PET ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลจึงนิยมใช้ปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีแบบแห้ง

Suddepong et al. [1] ทำการศึกษาการใช้เศษขวด PET ปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่ใช้มวลรวมเป็นวัสดุกรีไซเคิล เศษขวด PET ขนาดเล็กกว่า 2.36 มิลลิเมตร ถูกใช้ด้วยวิธีแบบแห้งด้วยการเติมเพิ่ม (Adding) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตปริมาณร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ของน้ำหนักมวลรวม ผลการศึกษา พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตมีสมรรถนะทุกด้าน (กำลังดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความต้านทานการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความต้านทานการยุบตัวถาวร และความต้านทานการเกิดร่องล้อ) เพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก อนุภาคของ PET เป็นแบบกึ่งแข็งกึ่งอ่อน (Semicrystalline) ส่วนที่อ่อนจะละลายกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้แอสฟัลต์

ซีเมนต์เหนียวขึ้น และส่วนที่แข็งทำหน้าที่ดูดซับและกระจายน้ำหนักจากการทดสอบ โดยสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มีค่ามากกว่าร้อยละ 0.6 ทำให้สมรรถนะทุกด้านลดลงตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก เศษขวด PET มีความแกร่ง (Stiffness) น้อยกว่ามวลรวม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มากเกินไปทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงลดลง [1] Aghayan และ Khafajeh [3] ศึกษาการใช้เคลือบพลาสติก PET เพื่อนำมาใช้ทดแทน (Replacing) มวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ปริมาณการแทนที่ของ PET ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักมวลรวม ผลการศึกษา พบว่า การใช้ PET ในปริมาณร้อยละ 25 ถึง 50 สามารถปรับปรุงสมรรถนะ (กำลังดึงทางอ้อม ความต้านทานร่องล้อ และความต้านทานการฉีกจากแรงดึง) ของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม การใช้ PET ในปริมาณที่สูงเกินไป (ร้อยละ 75 ถึง 100) ส่งผลให้สมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง และได้แนะนำให้ศึกษาปริมาณของ PET ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความทนทาน สมรรถนะของผิวทาง และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [3]

การศึกษาก่อนหน้าเป็นการศึกษาอิทธิพลของ PET ทั้งวิธีการเติมเพิ่มในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและวิธีการแทนที่ในมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต รวมถึงปริมาณของ PET ต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ PET ในการปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยปริมาณ PET ที่เหมาะสมทั้ง 2 วิธี อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาวิธีการใช้ที่เหมาะสมระหว่างการเติมเพิ่มและการแทนที่มวลรวม และยังไม่มีมีการเปรียบเทียบอิทธิพลของวิธีการใช้ PET ปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการใช้เศษขวด PET ปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ศึกษาการใช้เศษขวด PET เป็นวัสดุเติมเพิ่มในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีแบบแห้ง และส่วนที่ 2 ศึกษาการใช้เศษขวด PET แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เศษขวด PET ที่ใช้ศึกษามีขนาดเล็กกว่า 2.36 มิลลิเมตร และศึกษาในปริมาณร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตดำเนินการด้วยวิธีมาร์แชลตามมาตรฐานกรมทางหลวง เกณฑ์ชั้น Wearing Course ขนาดมวลรวมใหญ่สุด 12.5 มิลลิเมตร สมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตถูกศึกษาทั้งแบบสถิต (กำลังดึงทางอ้อม) และแบบพลวัต (โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม) ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางสำหรับการนำเศษขวด PET มาใช้ในการปรับปรุงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มสำหรับถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความยั่งยืนและช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่มและวิธีการแทนที่ในมวลรวมละเอียดบางส่วนต่อสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532 “แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน” ของกรมทางหลวง

2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่มและวิธีการแทนที่ในมวลรวมละเอียดบางส่วนต่อสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต

2. วัสดุในงานวิจัย

2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement, AC)

งานวิจัยนี้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเทรชันเกรด 60 ถึง 70 (AC60/70) จากบริษัท ทีบีโก้ แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน) โรงงานพระประแดง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีสมบัติตามข้อกำหนดกรมทางหลวง ทล.-ก. 401/2531 [4] แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70

Properties	results	Specifications [4]	Test Method
Penetration at 25 °C	65	60 - 70	DH-T 403/1975
Flash point	358	> 232	DH-T 406/1976
Ductility at 25 °C	152	> 100	DH-T 405/1976
Solubility in Trichloroethylene	99.9	> 99.0	DH-T 409/1977
Thin-film oven test 3.2 mm., 163 °C 5 hour			AASHTO T 179
- Loss on heating	0.08	< 0.8	DH-T 404/1975
- Penetration of residue	85.1	> 54	
- Ductility of residue at 25 °C	150	> 50	
Loss on heating, 163 °C 5 hour	0.09	< 0.8	

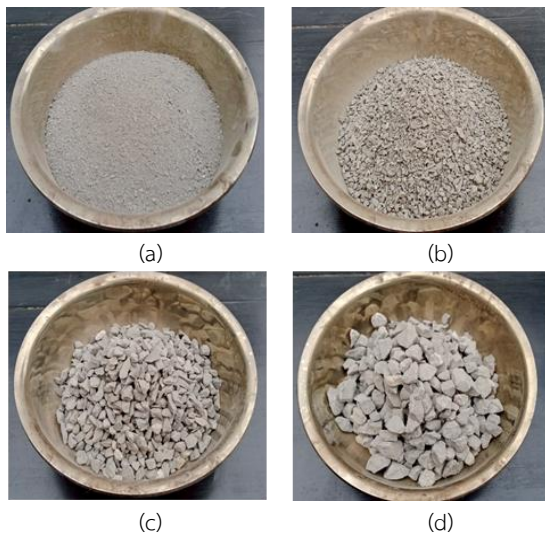


รูปที่ 1 แอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเทรชันเกรด 60 ถึง 70 (AC60/70)

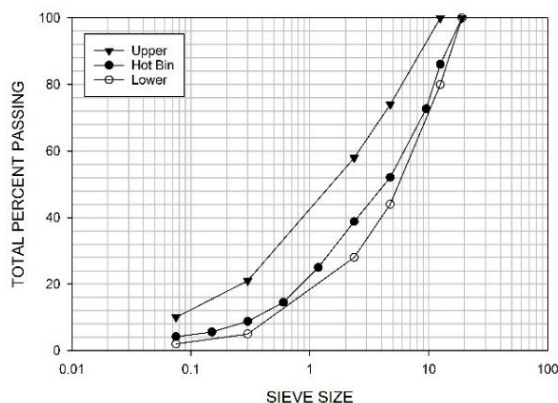
2.2 วัสดุมวลรวม (Aggregate)

วัสดุมวลรวม ประกอบด้วย 1) มวลรวมหยาบ คือ วัสดุมวลรวมที่มีค่าบนตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ซึ่งมีวัสดุมวลรวมละเอียดปนอยู่บ้าง ปกติวัสดุมวลรวมหยาบจะใช้น้ำหนักตั้งแต่ 2 ขนาดขึ้นไปผสมกัน หินแต่ละขนาดที่ใช้จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นขนาดเดี่ยว (Single Size) ทั้งนี้เพื่อลดการแยกตัว 2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) คือ วัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ในกรณีเมื่อผสมวัสดุมวลรวมหยาบและวัสดุมวลรวม

เอียงเป็นวัสดุรวมคลแล้วส่วนละเอียดมีไม่เพียงพอต้องใช้วัสดุผสม
แทรก (Mineral Filler) ใช้ผสมกับวัสดุรวมคลเพื่อปรับปรุง
คุณสมบัติตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง วัสดุรวมคลที่ใช้ในงานวิจัยนี้
เป็นหินปูน (Limestone) จากโรงไม่ขุมเงินชุมทอง อำเภอปากช่อง จังหวัด
นครราชสีมา ที่ผ่านกระบวนการ เผาที่โรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
และถูกคลขนาดไผ่ยังหินร้อน (Hot Bin, HB) 4 ขนาด ได้แก่ หินฝุ่น (HB1)
หรือหินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4.75 มิลลิเมตร หิน 3/8 นิ้ว (HB2)
หรือหินที่มีขนาดเล็กกว่า 9.5 มิลลิเมตร หิน 1/2 นิ้ว หรือหินที่มีขนาดเล็ก
กว่า 12.5 มิลลิเมตร และหิน 3/4 นิ้ว (HB4) หรือหินที่มีขนาดเล็กกว่า 19.0
มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วัสดุรวมคล (Aggregate, Agg) (a) HB1 (b) HB2 (c) HB3
และ (d) HB4



รูปที่ 3 ผลการทดสอบขนาดคลของวัสดุรวมคล

โดยวัสดุรวมคลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดคล และสมบัติเป็นไปตาม
มาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม.408/2532 [5] แสดงดังรูปที่ 3 และตารางที่ 2
ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุรวมคล (Aggregate, Agg)

Description	HOT BIN				Total
	HB 1	HB 2	HB 3	HB 4	
Mix Proportion (%)	45	20	20	15	100
Bulk Specific Gravity	2.666	2.673	2.681	2.691	2.674
Apparent Specific Gravity	2.669	2.703	2.705	2.709	2.689
Effective Specific Gravity	-	-	-	-	2.691
Water Absorption (%)	0.80	0.42	0.34	0.25	-
Flakiness Index (%)	-	24.7	23.8	20.5	23.0
Elongation Index (%)	-	21	29	21	24
Asphalt Absorption (%)					0.24
Los Angeles Abrasion (%)	-Aggregate 3/4"				22.2
Soundness (%)	-Aggregate 3/4"				1.0
	-Fine Aggregate				0.75
Sand Equivalent (%)	-Fine Aggregate				70.8
	-Hot Bin 1				72.9

2.3 พลาสติกประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET)

งานวิจัยนี้ใช้ PET ที่เป็นเศษพลาสติกเหลือทิ้งจากกระบวนการบดย่อย
ขวดพลาสติก PET และไม่ได้ถูกนำไปรีไซเคิล โดยมีขนาดเล็กกว่า 2.36
มิลลิเมตร จากโรงงาน ของ บริษัท สมคิดพลาสติกนำเข้าและส่งออก จำกัด
แสดงดังรูปที่ 4 จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าประกอบของธาตุ พบว่า มี
ธาตุคาร์บอน (C) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งคาร์บอน เป็นส่วนประกอบหลักของ
พลาสติกประเภทโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต จึงสามารถเชื่อได้ว่าคุณสมบัติ
พื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับพลาสติกประเภท
โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ดังแสดงในตารางที่ 3



(a)



(b)

รูปที่ 4 (a) ขวดพลาสติก PET รอการรีไซเคิล
(b) วัสดุเศษขยะพลาสติก PET ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิล

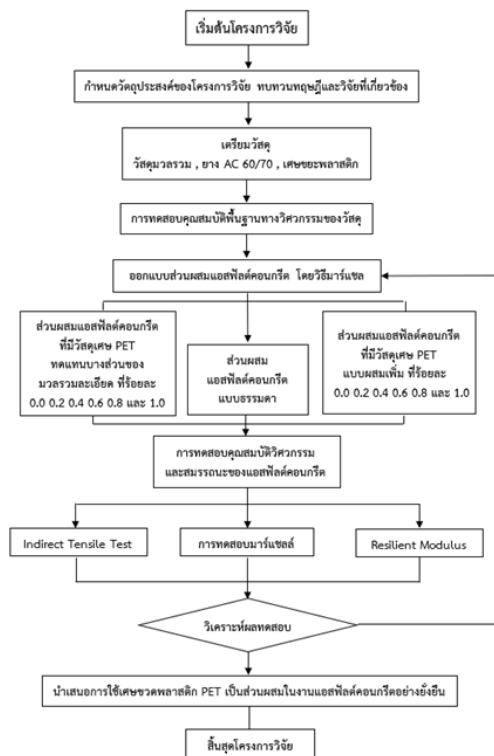
ตารางที่ 3 ผลทดสอบสมบัติของวัสดุขยะพลาสติก (Wasted PET)

No.	Properties	Results
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
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
13	Nitrogen (N)	N.D.

3. ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 วิธี คือ 1) การใช้เศษขวด PET เดิมเข้าไปในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีแบบแห้ง และ 2) การใช้เศษขวด PET แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

งานวิจัยนี้ศึกษาส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับชั้นผิวทาง (Wearing Course) ที่มีขนาดมวลรวมใหญ่สุด 12.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม.408/2532 หลังจากทำการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวม แอสฟัลต์ซีเมนต์ และเศษขวด PET ให้นำวัสดุทั้งหมดมาออกแบบหาอัตราส่วนที่เหมาะสม (Mix Proportion) ที่ทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศร้อยละ 4 โดยใช้ปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง [5] จากนั้น ให้เตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจากสัดส่วนวัสดุที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ กำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) และโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus)

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเริ่มจากการให้ความร้อนของแบบหล่อ (Mold) และมวลรวมในตู้อบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และให้ความร้อนกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยสุ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในช่วงร้อยละ 3-7 ระยะเวลาไม่เกิน 60 วินาที เพื่อรักษาอุณหภูมิไม่ให้ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส จากนั้นให้ทำการบดอัดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยค้อนที่มีน้ำหนัก 4.5 กิโลกรัม ระยะยก 45 เซนติเมตร การบดอัด ทั้ง 2 ด้าน ด้านละ 75 ครั้ง เมื่อบดอัดก้อนตัวอย่างแล้วให้พักก้อนตัวอย่างไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงดันก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อเพื่อนำไปทดสอบสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 6 การผลิตก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล [6] จะพิจารณาจากสมบัติ 2 ประเภท ได้แก่ 1) สมบัติเชิงปริมาตร คือ สมบัติที่ชี้วัดการห่อหุ้มปริมาณของช่องว่างภายในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกบดอัดแล้ว ประกอบด้วย ความหนาแน่น (Density) ปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม (Void In Mineral Aggregate, VMA) ปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Void Filled by Asphalt Cement) และปริมาณช่องว่างอากาศ (Air Void) โดยสมบัติเชิงปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักในอากาศ น้ำหนักในน้ำ และน้ำหนักก้อนตัวอย่างแห้งของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และ 2) สมบัติเชิงกล คือ สมบัติที่ชี้วัดการห่อหุ้มความสามารถในการรับน้ำหนักโดยไม่เสียรูปของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกบดอัดแล้ว ประกอบด้วย ค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) โดยทดสอบตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ด้วยอัตราการให้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธีมาร์แชล (Marshall)

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต

3.3.1 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D6931 [12] มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการรับแรงดึงของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เป็นของแข็ง ซึ่งไม่สามารถทดสอบกำลังดึงโดยตรงได้ โดยได้จากแรงกดในแนวตั้งกระทำกับก้อนตัวอย่าง (ทดสอบทั้ง 2 ทิศทาง) จึงเกิดการขยายตัวด้านข้างของก้อนตัวอย่างในจุดที่ไม่เกิดจุด Yield แล้วแต่ละตัวอย่างจะได้ค่าร้อยละการกระจายตัวเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย (%CV) ไม่เกิน 10 % ขณะเกิดการขยายตัว ในด้านข้างนี้ ใช้การตรวจจับการเปลี่ยนรูป (LVDT) ซึ่งในการให้น้ำหนักในลักษณะเป็นการอัดค่า Tensile Stress ของก้อนตัวอย่างโดยพิจารณาจากค่า Poisson's Ratio ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน วิธีการทดสอบ ASTM D4123-82 ค่ากำลังดึงทางอ้อมหาจากแรงกดตัวอย่างตามแนวขวางสูงสุดที่ทดสอบด้วยอัตรา 50.8 มิลลิเมตรต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิของการทดสอบ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 8

เนื่องจากการทดสอบควรทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 3 ค่า เพื่อแสดงถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุ โดยบันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด แล้วทำการคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ITS ดังสมการที่ 1

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (1)$$

ITS คือ ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม - กิโลพาสคาล (kPa)
P คือ ค่าน้ำหนักสูงสุด - นิวตัน (N)
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่าง - มิลลิเมตร (mm).
H คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง - มิลลิเมตร (mm).



รูปที่ 8 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

3.3.2 การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, IT_{MR})

การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4123 [13] การติดตั้งตัวอย่างจะเป็นลักษณะเดียวกันกับการทดสอบกำลังดึงทางอ้อม แต่จะมีการติดตั้ง Linear Variable Differential Transducers (LVDT) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ให้แรงกระทำพลวัตแบบ Haversine ที่ความถี่ 1 รอบต่อวินาที โดยมีระยะเวลาในการให้แรงกระทำ 0.1 วินาที และมีระยะเวลาพัก 0.9 วินาที หน่วยแรงทดสอบเท่ากับร้อยละ 15 ของกำลังดึงทางอ้อมดำเนินการทดสอบจำนวน 200 รอบ ค่าโมดูลัสการคืนตัวเป็นค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 9 และสามารถนำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ดังสมการที่ 2

$$IT_{MR} = \frac{P(0.27+v)}{\Delta H(D)} \quad (2)$$

IT_{MR} คือ โมดูลัสการคืนตัว, เมกะปาสคาล (MPa)
P คือ ค่าน้ำหนักสูงสุด - นิวตัน (N)
V คือ อัตราส่วนปัวซองมีค่าเท่ากับ 0.35
 ΔH คือ ผลต่างของการยุบตัวในแนวนอนของ 5 รอบสุดท้าย
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (mm.)



รูปที่ 9 การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม

4.ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบ

4.1 ผลการออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล

งานวิจัยนี้ออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน 3 แบบ ประกอบด้วย 1) ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนแบบธรรมดา (HMA) 2) ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ด้วยวิธีเติมเพิ่ม (Adding PET, A-PET-HMA) และ 3) ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ด้วยวิธีแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน (Replacing PET, R-PET-HMA) ผลการออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง [5] แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง

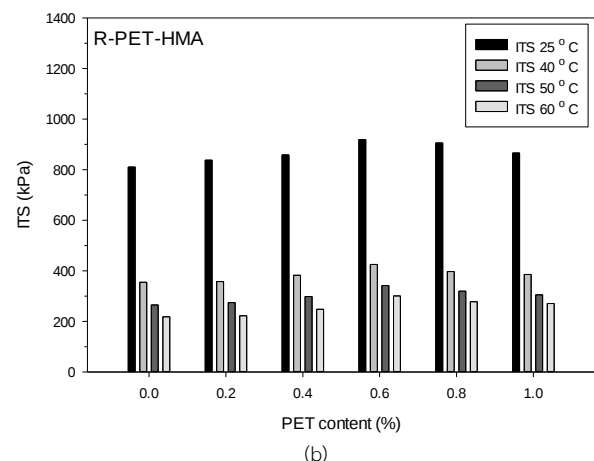
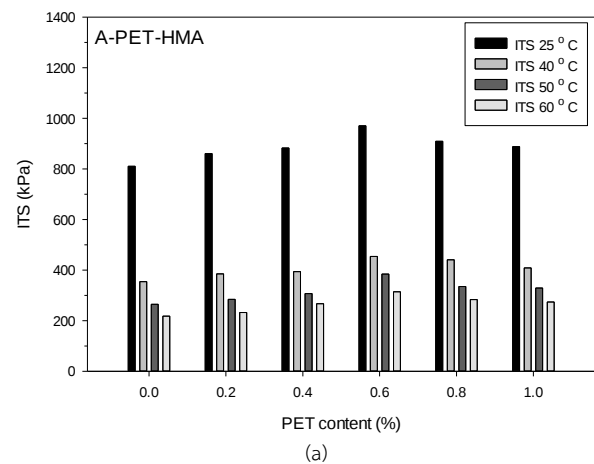
Specimen	HMA	A-PET-HMA					R-PET-HMA					Specification [4]
		%PET by total Wt. of Aggregate					%PET by total Wt. of Aggregate					
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
Total asphalt (%)	5.0	5.0	5.0	5.1	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0	5.1	5.1	-
Ari Void (%)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3 - 5
Bulk Density (g/cm ²)	2.396	2.396	2.394	2.416	2.397	2.403	2.397	2.390	2.398	2.382	2.379	-
V.M.A. (%)	14.6	14.8	14.8	14.7	14.7	14.8	14.7	14.8	14.9	14.8	14.7	≥14
V.F.B. (%)	72.7	72.3	72.2	72.8	72.1	71.2	72.1	72.3	72.6	72.3	72.0	-
Stability (N)	13,713	18,390	18,796	19,124	20,703	21,550	18,130	18,706	20,041	20,211	20,470	≥8006
Flow (0.25mm)	11	11	11	11	12	12	11	11	11	12	12	8 - 16
Stability/Flow	1,246	1,671	1,708	1,738	1,725	1,795	1,648	1,700	1,670	1,684	1,705	≥712
Strength Index (%)	85.51	83.7	83.5	85.2	84.7	82.9	81.6	83.2	84.4	82.9	83.5	≥75

4.2 ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 11 พบว่า เมื่ออุณหภูมิทดสอบเพิ่มขึ้นกำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงเนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตมีความอ่อนตัวมากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงได้ลดลงที่อุณหภูมิในการทดสอบค่าเดียวกัน [1] พิจารณาที่วิธีการใช้เศษขวด PET

เดียวกัน พบว่า A-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 810.77 860.67 882.95 970.48 909.31 และ 888.24 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 354.7 385.43 394.30 454.19 441.15 และ 409.09 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 264.88 284.41 307.25 384.62 335.42 และ 329.23 กิโลพาสคัล ตามลำดับ และกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเท่ากับ 218.06 232.45 267.24 314.64 283.85 และ 274.2 กิโลพาสคัล ตามลำดับ ขณะที่ R-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 810.77 837.73 858.42 919.31 905.74 และ 866.12 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 354.7 357.21 382.13 425.18 396.82 และ 385.43 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับ 264.88 274.12 298.34 341.96 319.25 และ 305.07 กิโลพาสคัล ตามลำดับ และกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเท่ากับ 218.06 222.04 247.84 300.61 278.00 และ 270.63 กิโลพาสคัล ตามลำดับ กำลังดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PET ที่เพิ่มขึ้น โดย A-PET-HMA และ R-PET-HMA มีกำลังดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 เนื่องจาก อนุภาคของ PET เป็นแบบกึ่งแข็งกึ่งอ่อน (Semicrystalline) ส่วนที่อ่อนจะละลายกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เหนียวขึ้น และส่วนที่แข็งทำหน้าที่รับน้ำหนักระหว่างมวลรวม อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มีค่ามากกว่าร้อยละ 0.6 ทำให้สมรรถนะแบบสถิตและแบบพลวัตลดลงตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก เศษขวด PET มีความแข็งแรง (Stiffness) น้อยกว่ามวลรวม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มากเกินไปทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีกำลังดึงทางอ้อมลดลง นอกจากนี้ การใช้เศษ

ขวด PET ด้วยวิธีการเดิมเพิ่มทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีสมรรถนะสูงกว่าการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

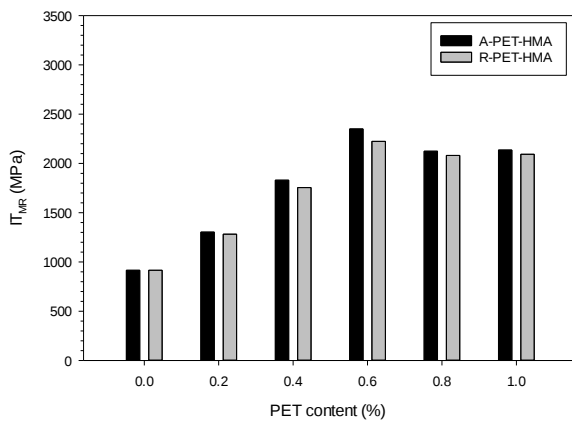


รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
(a) A-PET-HMA และ (b) R-PET-HMA

4.3 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, IT_{MR})

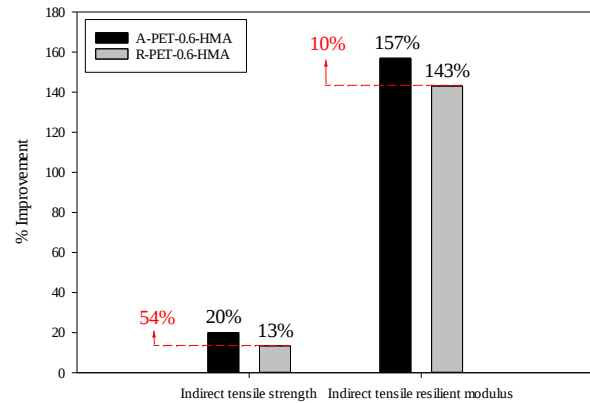
ผลทดสอบโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมแสดงดังรูปที่ 12 A-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 โดยที่

โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมมีค่าเท่ากับ 915 1,303 1,830 2,350 2,124 และ 2,136 เมกะพาสคัล ตามลำดับ สำหรับโดย R-PET-HMA ที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มีโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม เท่ากับ 915 1,282 1,755 2,224 2,081 และ 2,093 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ค่าโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมมีค่าตามปริมาณ PET ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 จากนั้น เมื่อปริมาณ PET มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 0.6 ทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมลดลง เมื่อพิจารณาที่ปริมาณ PET เท่ากัน พบว่า A-PET-HMA มีค่าโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงกว่า R-PET-HMA ซึ่งผลการทดสอบเป็นลักษณะเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมแสดงให้เห็นว่า PET ช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความยืดหยุ่นภายใต้แรงพลวัตด้วย



รูปที่ 12 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม

จากผลการทดสอบสมรรถนะทั้งสถิตและพลวัต พบว่า ปริมาณเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 ทำให้สมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้นสูงสุด พิจารณาส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ถูกปรับปรุง (HMA) พบว่า A-PET-HMA มีค่าแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงกว่า HMA ร้อยละ 20 และ 157 ตามลำดับ ขณะที่ R-PET-HMA มีค่าแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงกว่า HMA ร้อยละ 13 และ 143 ตามลำดับ โดย A-PET-HMA มีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมสูงกว่า R-PET-HMA ร้อยละ 54 และ 10 ตามลำดับ จะเห็นว่า การใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่มมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมรรถนะของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสูงกว่าการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เปรียบเทียบสมรรถนะเชิงกลของการใช้ PET ที่ร้อยละ 0.6

5.บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติและสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ประกอบไปด้วย ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ด้วยวิธีเติมเพิ่ม และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ด้วยวิธีแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ออกแบบและเตรียมตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชล ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม.408/2532 ซึ่งใช้เศษขวด PET ปริมาณร้อยละ 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ของน้ำหนักของมวลรวมผลการวิจัยสรุปได้ ดังนี้

1. สมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60/70 มีมวลรวมขนาดละเอียดเหมือนกันและอัตราส่วนช่องว่างอากาศ (Air Void) เดียวกัน พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ทั้ง 2 รูปแบบ มีผลทดสอบผ่านตามค่ามาตรฐานของกรมทางหลวง การทดสอบค่าเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษขวด PET ทั้งสองรูปแบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเศษขวดพลาสติก PET ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยเศษขวด PET

2. ผลการทดสอบสมรรถนะทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ในพจนของการเติมเพิ่มและทดแทนมวลรวมละเอียดบางส่วน แสดงให้เห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตมีสมรรถนะทุกด้าน (กำลังดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.6 อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเศษขวด PET มากขึ้นส่งผลให้ แอสฟัลต์คอนกรีตมีสมรรถนะต่ำลง นอกจากนี้ การใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการเติมเพิ่มมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมรรถนะของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสูงกว่าการใช้เศษขวด PET ด้วยวิธีการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ออกแบบและทดสอบโดยใช้เศษขวด PET จากโรงงานในจังหวัดนครราชสีมา เพียงโรงงานเดียวในการศึกษาการใช้วัสดุรีไซเคิลเป็นวัสดุมวลรวมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต การนำไปใช้ในงานก่อสร้างถนน ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยการเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เศษขวดพลาสติกที่เหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิลหลากหลายแหล่งเพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการพัฒนาคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งสามารถเสนอเป็นแนวทางเลือกในการดำเนินการได้จริงในระยะยาว สามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากเศษขยะของกระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติก PET และยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของ

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาท่าน ศ.ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข ประธานหลักสูตรหลักสูตรวิศวกรรมโยธา และการบริหารงานก่อสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ท่านอาจารย์ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ และท่านอาจารย์ ดร.คงศักดิ์ อัครวงศ์วัฒนา ที่ให้คำปรึกษางานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สำนักงานทางหลวงที่ 10 ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการทดสอบ ตลอดจนวัสดุงานทางในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Suddeepong, A. , Akkharawongwhattana, K. , Horpibulsuk, S. , Buritatum, A. , Hoy, M. , Yaowarat, T. , Pongsri, N. , Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, J. (2024). Polyethylene Terephthalate Modified Asphalt Concrete with Blended Recycled Aggregates: Analysis and Assessment [Article] . *Civil Engineering Journal (Iran)*, 10(11), 3569-3588. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-11-08>
- [2] Gius Tozzi, F., and Boom, Y. (2021). Use of road-grade recycled plastics for sustainable asphalt pavements: overview of the recycled plastic industry and recycled plastic types. *Austroroads Ltd, Inc.*,
- [3] Aghayan, I., & Khafajeh, R. (2019). Recycling of PET in asphalt concrete. In *Use of Recycled Plastics in Eco – efficient Concrete, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, (pp. 269-285).
- [4] กรมทางหลวง. (2531). ทล.-ก. 401/2531. SPECIFICATION FOR ASPHALT CEMENT. ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [5] กรมทางหลวง. (2517). ทล.-ม. 408/2517 แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน. ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [6] กรมทางหลวง. (2517). ทล.-ม. 604/2517 วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall. ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [7] กรมทางหลวง. (2515). ทล.-ท. 202/2515. วิธีการทดลองหาความสึกกร่อนของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion. ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [8] กรมทางหลวง. (2517). ทล.-ท. 207/2517. วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดหยาบ. ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [9] กรมทางหลวง. (2518). ทล.-ท. 210/2518. วิธีการทดลองหาอัตราความแบน (Flakiness Index). ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [10] กรมทางหลวง. (2518). วิธีการทดลองหาอัตราความยาว (Elongation Index). ทล.-ท. 211/2518. ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [11] กรมทางหลวง. (2531). วิธีการทดลองหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวมโดยใช้โซเดียมซัลเฟต หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต. ทล.-ท. 213/2531. ราชเทวี, กรุงเทพมหานคร: กรมทางหลวง.
- [12] ASTM. (2017). Standard test method for indirect tensile (IDT) strength of asphalt mixtures. ASTM D6931. West Conshohocken, PA: ASTM
- [13] ASTM. (1995). Standard test method for indirect tensile test for resilient modulus of bituminous mixtures. ASTM D4123-82. West Conshohocken, PA: ASTM.