

สมบัติทางกลพนักดูดซับเสียงจากขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

เกียรติศักดิ์ คงเขียว¹ มณีรัตน์ เข็มขาว² และ อภิษฎา สุวรรณสะอาด^{3*}

^{1,2} วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

^{3*} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

E-mail: ¹keattisak.kon@rmutr.ac.th, ²maneerat.khe@rmutr.ac.th, ^{3*}apised.suw@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อทดสอบสมบัติทางกลของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง 2) เพื่อทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ 3) เพื่อทดสอบการดูดซับเสียงของผนังผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

วิธีดำเนินงานวิจัยการศึกษาเชิงทดลอง โดยนำขยะพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการผลิต คือ พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมแทนที่ทรายร้อยละ 10 โดยทดสอบสมบัติทางกลของมอร์ต้า ทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อก และทดสอบการดูดซับเสียงของผนัง และพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ได้จริงในงานก่อสร้าง

ผลการวิจัยพบว่า 1) มอร์ต้าผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ร้อยละ 10 มีสมบัติในกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงได้ดีที่สุดในการทดสอบ เท่ากับ 251.45 กก./ตร.ซม. และ 42.27 กก./ตร.ซม. แต่ต่ำกว่ามาตรฐานได้ค่า 334.28 กก./ตร.ซม. และ 48.10 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ 2) สมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัด 53.03 กก./ตร.ซม. น้อยกว่าคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน เท่ากับ 54.93 กก./ตร.ซม. และ 3) การดูดซับเสียงของผนังผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ร้อยละ 10 ความถี่ที่ 500 Hz สามารถดูดซับเสียงได้น้อยกว่าผนังคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน 1.19 dBA ความถี่ที่ 1,000 Hz สามารถดูดซับเสียงได้น้อยกว่าผนังคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน 7.69 dBA และความถี่ที่ 1,500 Hz สามารถดูดซับเสียงได้น้อยกว่าผนังคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน 17.03 dBA เป็นการเพิ่มมูลค่าสร้างรายได้ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างจากขยะพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อก วัสดุเชิงประกอบมอร์ต้า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง การดูดซับเสียง

* Corresponding author, e-mail: apised.suw@rmutr.ac.th

Mechanical Properties of Sound-Absorbing Walls from High-Density Polyethylene Plastic Waste

Keattisak Kongkeaw¹, Maneerat Khemkhao², Apisedkorn Suwansaard^{3*}

^{1,2}Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

^{3*} Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

E-mail: ¹keattisak.kon@rmutr.ac.th, ²maneerat.khe@rmutr.ac.th, ^{3*}apised.suw@rmutr.ac.th

Abstract

This research aimed to: 1) test the mechanical properties of mortar mixed with high-density polyethylene (HDPE) plastic waste; 2) test the mechanical properties of concrete blocks mixed with high-density polyethylene plastic waste, and 3) test the sound absorption of the wall mixed with high-density polyethylene plastic waste.

Method of conducting an experimental study by using plastic waste remaining from the production process, namely high-density polyethylene plastic (HDPE), mixed to replace 10% of sand. The mechanical properties of mortar and concrete blocks were examined, and the sound absorption of walls was also evaluated, considering the possibility of their practical use in construction work.

The findings revealed that: 1) Mortar mixed with 10% HDPE plastic waste had the highest compressive strength and tensile strength properties, which are 251.45 and 42.27 kg/cm², respectively, but lower than the standard mortar, with values of 334.28 and 48.10 kg/cm², respectively. 2) The mechanical properties of concrete blocks that were mixed with 10% HDPE plastic waste resulted in a compressive strength of 53.03 kg/cm², which is lower than the compressive strength of standard concrete blocks at 54.93 kg/cm². The mechanical properties of concrete blocks mixed with 10% HDPE plastic waste resulted in a compressive strength of 53.03 kg/cm² lower than that of standard concrete blocks at 54.93 kg/cm². 3) The wall mixed with 10% HDPE plastic waste absorbs sound at 500 Hz, reduced to 1.19 dBA, compared with the standard concrete block wall. The frequency at 1,000 Hz could absorb 7.69 dB, which was less noisy than a standard concrete block wall. In addition, the frequency at 1,500 Hz could absorb 17.03 dB, which is less noise than a standard concrete block wall. It is an added value for construction material products made from environmentally friendly plastic waste.

Keywords: Concrete block, Mortar composite, High density polyethylene, Sound absorption

* Corresponding author, e-mail: apised.suw@rmutr.ac.th

1. ที่มาและความสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกและการใช้พลังงานฟอสซิลในระดับสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อทุกภาคส่วนเศรษฐกิจ ซึ่งอุตสาหกรรมการก่อสร้างอาคารเป็นหนึ่งในตัวการใหญ่ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นอกเหนือไปจากการใช้พลังงาน ที่ดิน และวัตถุดิบ [1] ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องนำแบบจำลองเศรษฐกิจหมุนเวียนมาใช้ ซึ่งส่งเสริมการนำกลับมาใช้ใหม่และส่งเสริมการทำงานร่วมกันทางอุตสาหกรรม โดยการนำของเสียที่ไม่ใช้งานกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบรองเพื่อส่งเสริมการพัฒนาผลิตภัณฑ์ก่อสร้างที่ยั่งยืน [2] ซึ่งแนวปฏิบัติในการก่อสร้างอย่างยั่งยืนจะรวมถึงการใช้วัสดุทดแทนและผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมด้วย [3]

พลาสติกถูกนำไปใช้ในงานเกือบทุกประเภท และการผลิตพลาสติกส่งผลกระทบต่อทางเศรษฐกิจอย่างมากทั่วโลก เนื่องจากการใช้งานมากมายนับไม่ถ้วน [4] พบว่ามีการผลิตพลาสติกทั่วโลกประมาณ 400 ล้านตัน [5] ซึ่งนำไปสู่การเกิดขยะมูลฝอยจำนวนมากที่สามารถคงอยู่ได้นานหลายร้อยปีจนกว่าจะถูกลดลงโดยสิ่งแวดล้อมอย่างสมบูรณ์ [6] อย่างไรก็ตามมีเพียงร้อยละ 9 ของพลาสติกที่ผลิตทั้งหมดเท่านั้นถูกนำไปรีไซเคิล ขณะที่เกือบร้อยละ 79 ของขยะถูกนำไปฝังกลบโดยไม่มีกระบวนการรีไซเคิล การนำกลับมาใช้ใหม่ หรือการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใด ๆ [7]

พลาสติกที่ใช้กันมากที่สุดชนิดหนึ่งในงานก่อสร้างสำหรับท่อ ท่อลม หรืออุปกรณ์อื่น ๆ คือ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene, HDPE) ซึ่งการผลิตก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกประมาณ 101 ล้านตัน [8] ขยะ HDPE ที่บดละเอียดที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในฐานะวัสดุถมกลับ (backfill) ที่มีน้ำหนักเบาสำหรับการก่อสร้างคันดินหรือสำหรับชั้นระบายน้ำของหลุมฝังกลบ [9] อีกทางเลือกหนึ่งที่แพร่หลายคือการใช้เทคนิคการไพโรไลซิส (pyrolysis) เพื่อย่อยสลายขยะนี้ จากนั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ [10]

ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้าง หากต้องการอนุรักษ์พลังงานและการใช้ทรัพยากรเพื่อให้เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืน การพัฒนาวัสดุที่ยั่งยืนใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากสำหรับใช้ในภาคการก่อสร้างสมัยใหม่ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจและท้าทายอย่างยิ่ง และการลดการใช้พลังงานกลายเป็นประเด็นที่สำคัญ เนื่องจากร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานทั้งหมดมาจากการทำความเย็นในอาคาร นอกจากนี้ การใช้วัสดุสังเคราะห์เพื่อเป็นฉนวนความร้อนของอาคาร มีประเด็นด้านสุขภาพและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย [11] ซึ่งการรีไซเคิลหรือการนำผลพลอยได้ (by-product) ทางอุตสาหกรรมและทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ จะช่วยลดการปล่อย CO₂ จำนวนมหาศาลหากทำการกำจัดด้วยการเผาไหม้ [12] ดังนั้น การพัฒนาและการใช้งานวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญเนื่องจากมีส่วนร่วมของทรัพยากรและพลังงานที่ยั่งยืน มีงานวิจัยพยายามนำของเหลือทิ้งภาคอุตสาหกรรมมาแทนที่ส่วนผสมบางส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อก [13] เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้งเหล่านั้น ช่วยลดปริมาณของเหลือทิ้งที่โรงงานหรืออุตสาหกรรมต้องทำการกำจัด

ความกังวลทั่วโลกเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับความยั่งยืนและการปกป้องสิ่งแวดล้อมได้กระตุ้นให้เกิดการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุทางเลือกสำหรับการใช้งานต่าง ๆ รวมถึงการควบคุมเสียง วัสดุดูดซับเสียงแบบดั้งเดิมมักใช้เส้นใยสังเคราะห์

ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม [14] นอกจากนี้ การกำจัดขยะพลาสติกยังก่อให้เกิดความท้าทายด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ดังนั้นการใช้วัสดุรีไซเคิลเป็นวัสดุดูดซับเสียงจึงเป็นทางออกที่น่าสนใจซึ่งช่วยแก้ปัญหาทั้งมลภาวะทางเสียงและการจัดการขยะ ซึ่ง HDPE มีข้อดีบางประการเหนือพลาสติกชนิดอื่นในผลิตภัณฑ์ก่อสร้างเนื่องจากสมบัติทางกายภาพ ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ 950-970 กก./ลบ.ม. ความแข็งแรงดึง 20–35 MPa และอุณหภูมิการตีไฟที่ค่อนข้างสูงถึง 487°C [15] นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุเฉื่อยทางเคมี ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมในสารยึดเกาะในงานก่อสร้าง [16] ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาสมบัติทางกลของผนังดูดซับเสียงจากขยะพลาสติก HDPE แทนที่ทราย เพื่อเป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกไม่ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ และลดปริมาณการเผาทำลายหลังการใช้งาน ลดการเกิดมลภาวะทางอากาศ ลดการเกิดโรคในระบบทางเดินหายใจ และเป็นการเพิ่มมูลค่าสร้างรายได้ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างจากขยะพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อทดสอบสมบัติทางกลของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
- 2.2 เพื่อทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
- 2.3 เพื่อทดสอบการดูดซับเสียงของผนังผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

3. ขอบเขตการศึกษา

- 3.1 ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
- 3.2 ขยะพลาสติกจากภาคอุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดลอง คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) หรือ HDPE
- 3.3 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก
- 3.4 อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบมอร์ต้า ซีเมนต์: ทราย: น้ำ เท่ากับ 1: 2.75: 0.485
- 3.5 หล่อก้อนตัวอย่างมอร์ต้าทดสอบกำลังรับแรงอัดขนาด 5 ซม. × 5 ซม. × 5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C109
- 3.6 การทดสอบหาลำไส้อัดของซีเมนต์มอร์ต้า ตามมาตรฐาน ASTM C109 ใช้ก้อนตัวอย่างการแทนที่สัดส่วนทรายด้วยขยะพลาสติก HDPE แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก อย่างละ 5 ก้อน ทำการทดสอบที่ ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน
- 3.7 หล่อก้อนตัวอย่างมอร์ต้าทดสอบกำลังรับแรงดึง แบบหล่อปริเคท ขนาด 7.5 ซม. × 2.5 ซม. × 4.5 ซม. หนา 2.5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C190
- 3.8 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์มอร์ต้า ตามมาตรฐาน ASTM ใช้ก้อนตัวอย่างการแทนที่สัดส่วนทรายด้วยขยะพลาสติก HDPE แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก อย่างละ 5 ก้อน ทำการทดสอบที่ ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

3.9 อัตราส่วนในการหล่อผนังกันเสียง คือ ปูน: ทราย: หินฝุ่น เท่ากับ 1: 2: 6 และใช้น้ำในสัดส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด

3.10 หล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อก ขนาด $39 \times 19 \times 7$ เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก) อัตราส่วนผสมพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงร้อยละ 0 และ 10 แทนที่ทราย โดยน้ำหนัก

3.11 ทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกมาตรฐานและคอนกรีตบล็อกผสมพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่อายุ 28 วัน ทดสอบโดยพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 58-2560

3.12 ก่อคอนกรีตบล็อกเป็นผนัง 4 ด้าน ความกว้างด้านละ 1 เมตร และมีความสูง 1 เมตร ทำการฉาบด้วย ปูนฉาบมอร์ต้ามาตรฐาน ทดสอบการดูดซับเสียงของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

3.13 ทดสอบการดูดซับเสียงของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยใช้ลำโพง เป็นตัวนำคลื่นเสียงที่ 500 Hz, 1000 Hz, และ 1500 Hz โดยใช้เครื่องทดสอบเสียงวัดค่าการดูดซับเสียง

4.วิธีการดำเนินวิจัย

4.1 การเตรียมขยะพลาสติก: พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดหนาแน่นสูง มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรง ค่อนข้างแข็งแต่ยืดได้มาก ไม่แตกง่าย ราคาถูกขึ้นรูปได้ง่าย ทนสารเคมีจึงนิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับน้ำยาทำความสะอาด แชมพูสระผม แป้งเด็ก และถุงหิ้ว นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจาก HDPE ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี จึงใช้เป็นขวดนมเพื่อยืดอายุของนมให้นานขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำ HDPE (รูปที่ 1) มาผสมกับมอร์ต้าเพื่อลดการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 1 เศษขยะพลาสติกจากโรงงานผลิตพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)

4.2 การออกแบบส่วนผสมและหล่อก้อนมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE

4.2.1 การออกแบบส่วนผสมมอร์ต้า

ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมทรายเท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนักและแทนที่ทรายด้วยขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 0 และ 10 ของน้ำหนักทราย และปริมาณน้ำ W/C ที่เหมาะสมจากการทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C230 [17] คือร้อยละ 0.485

4.2.2 หล่อก้อนตัวอย่าง 5.0 x 5.0 x 5.0 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C109 [18]

1. เตรียมวัสดุอุปกรณ์และชั่งเตรียมส่วนผสมซีเมนต์ ขยะพลาสติก น้ำ ตามที่ใช้ในส่วนผสม โดยน้ำที่เหมาะสมจากการทดสอบการไหลของมอร์ต้า (Flow Table)

2. จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องผสม โดยเทมอร์ต้าลงในแบบหล่อเป็น 2 ชั้น ชั้นละประมาณ 25 มิลลิเมตร กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง โดยให้กระทุ้งเป็น 4 รอบ โดยแต่ละรอบให้แท่งกระทุ้งตั้งฉากและแรงกระทุ้งที่สม่ำเสมอ ใส่มอร์ต้าชั้นสองลงไปแบบหล่อแล้วกระทุ้งเช่นเดียวกันกับชั้นแรก โดยเมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วให้ส่วนผสมสูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย ใช้เกรียงปาดที่ล้นแบบหล่อ แล้วปาดผิวให้เรียบหลังจากหล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วให้เก็บตัวอย่างซึ่งอยู่ในแบบหล่อไว้เป็นเวลา 1 วัน

3. ถอดแบบหล่อตัวอย่างทดสอบและนำไปป่นโดยเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบหาสมบัติทางกลของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ตามมาตรฐาน ASTM C109 [18]

4.2.3 หล่อก้อนตัวอย่างแบบหล่อบริเคท ขนาด 7.5 ซม. x 2.5 ซม. x 4.5 ซม. หนา 2.5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C190 [19] นำไปป่นโดยเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงดึง

4.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE

ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก ส่วนผสมคอนกรีตบล็อกในอัตราส่วนต้นแบบคือ ปูนซีเมนต์ : ทราย : หินฟูน เท่ากับ 1: 2: 6 โดยน้ำหนัก และใช้น้ำในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ทราย SCG low carbon มวลรวมละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 ค้างเบอร์ 16 โดยมีขยะพลาสติก HDPE ที่ใช้ในการผสมเพิ่ม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกมาตรฐานและคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE

ตัวอย่าง	ส่วนผสม	อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก (ปูนซีเมนต์: ทราย: หินฟูน)	สัดส่วนการผสม (ร้อยละ)			
			ปูนซีเมนต์	ทราย	หินฟูน	HDPE
standard	ทราย	1: 2: 6	1.00	2.00	6.00	0.00
HDPE10%	ทราย- HDPE 10%	1: 2: 6	1.00	1.80	6.00	0.2

4.4 การเตรียมตัวอย่างบล็อกคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE

ขั้นตอนการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกผสมมีวิธีการดังนี้

4.4.1. เตรียมวัสดุ โดยการนำหินฝุ่น และ ทราย ไปล้างผ่านตะแกรง (รูปที่ 2) จากนั้นนำไปคว่ำให้แห้งแทนการอบ



รูปที่ 2 การเตรียมวัสดุ

4.4.2. ชั่งตวงส่วนผสมทั้งหมดตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ ทั้งอัตราส่วนมาตรฐานและอัตราส่วน โดยใส่ขยะพลาสติก HDPE แทนที่ทรายร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 1

4.4.3. นำส่วนผสมทั้งหมดที่ชั่งไว้เทใส่ในแม่ผสมปูนของเครื่องอัดอิฐบล็อกไฮดรอลิก (รูปที่ 3 ด้านซ้าย) คอนกรีตบล็อก ขนาด 39 X 19 X 7 ซม. ตามมาตรฐาน มอก.58-2560 (คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก) [20]



รูปที่ 3 การเทส่วนผสมลงในแม่ผสมปูน และนำส่วนผสมเทลงบล็อก

4.4.4. นำส่วนผสมที่ได้เทลงในบล็อกอิฐ ของเครื่องอัดอิฐบล็อกไฮดรอลิก (รูปที่ 3 ด้านขวา) จากนั้นเปิดการทำงานของเครื่องอัดอิฐบล็อกไฮดรอลิก

4.4.5. นำอิฐบล็อกที่อัดขึ้นรูปแล้วออกจากบล็อกของเครื่องอัดอิฐบล็อกไฮดรอลิก (รูปที่ 4) มาวางตากลมให้แห้งโดยมีแผ่นไม้รองด้านล่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการเคลื่อนย้ายไปทดสอบต่อไป



รูปที่ 4 การนำอิฐบล็อกที่อัดขึ้นรูปแล้วออกจากเครื่องอัดอิฐบล็อกไฮดรอลิก

4.5 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก (Compressive Strength Test)

ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของก้อนตัวอย่างแล้วชั่งน้ำหนัก ดังรูปที่ 5 จากนั้นนำก้อนตัวอย่างมอร์ต้าเข้าเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด แล้วเดินเครื่องทดสอบด้วยอัตราการเพิ่มแรงอัดอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 6 จนกระทั่งก้อนตัวอย่างเกิดการวิบัติ ทำการจดบันทึกค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด



รูปที่ 5 วัดขนาดก้อนตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 6 นำก้อนตัวอย่างเข้าเครื่องทำสอบและทำการทดสอบก้อนตัวอย่างพร้อมบันทึกค่า

การคำนวณการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก (Compressive Strength Test)

หาลำกำลังรับแรงอัด โดยใช้สมการ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4-1)$$

โดยที่ σ = กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
 P = แรงอัดที่ทำให้ชิ้นส่วนวิบัติ (กิโลกรัม)
 A = พื้นที่รับแรงอัด (ตารางเซนติเมตร)

4.6 การทดสอบดูดซับเสียงมาตรฐานการทดสอบการดูดซับเสียง มาตรฐาน IEC 651 Type 2

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับเสียงของตัวอย่างผนังคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 0 และ 10 เพื่อหาค่าเฉลี่ยความเข้มเสียงที่ 500 Hz ถึง 1,500 Hz [21] นำคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE และคอนกรีตบล็อกมาตรฐานมาทำการก่อเพื่อจำลองเป็นผนัง 4 ด้าน ให้มีความกว้างด้านละ 1 เมตร และสูง 1 เมตร และทำการฉาบด้วยปูนฉาบสำเร็จรูป (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ก่อคอนกรีตบล็อกและทำการฉาบผนังเพื่อใช้ในการทดสอบ

วางตำแหน่งที่ 5 จุด สำหรับการทดสอบผนังทั้ง 4 ด้าน พร้อมนำลำโพงเชื่อมต่อกับเครื่องสื่อสารและตั้งค่าคลื่นเสียงที่ 500, 1,000 และ 1,500 Hz นำเข้าไปไว้ตรงกลาง จากนั้นทำการทดสอบโดยการเปิดค่าเสียงลำโพงสูงสุด และวัดระดับความเข้มของเสียงจากการวางตำแหน่งที่ 5 จุดทดสอบและวัดห่างออกมา 1 เมตร (รูปที่ 8) บันทึกข้อมูล



รูปที่ 8 การวางตำแหน่งการวัดค่าความชื้นและการเตรียมอุปกรณ์ส่งคลื่นเสียง

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE

ผลกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE เมื่อทดสอบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าขนาด 5 ซม. × 5 ซม. × 5 ซม. ของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง โดยตัวอย่างแต่ละส่วนผสมชนิดละ 5 ก้อน และทดสอบที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างตามอายุการบ่มไปทำการทดสอบกำลังอัดประลัยที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้า ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้านั้นแสดงถึงประสิทธิภาพของมอร์ต้าในการรับน้ำหนักที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า การผสมขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 10 จะให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สามารถใช้งานในงานก่อสร้างได้ โดยค่ากำลังอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 251.45 ksc ซึ่งลดลงจากมาตรฐานประมาณร้อยละ 24.6 เป็นผลเนื่องจาก อนุภาคของ HDPE มีขนาดเล็ก เบา และมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้เนื้อวัสดุมีความพรุนมากขึ้น ทำให้ลดความสามารถในการรับน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม HDPE ไม่ดูดซึมน้ำ เนื่องจากมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ และไม่มีรูพรุน [22] จึงช่วยลดการสะสมความชื้นในตัววัสดุ ซึ่งเป็นข้อดีในด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อม การลดลงของกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่าน รายงานว่าแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลรวมละเอียด HDPE ที่ 28 วัน ลดลง เมื่อสัดส่วนของ HDPE เพิ่มขึ้น [23]-[25] โดย Shanmugapriya and Santhi [23] พบว่า กำลังรับแรงอัดลดลง 3 MPa เมื่อเพิ่ม HDPE จากร้อยละ 0 เป็น 5 ส่วน Badache et al. [24] พบแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 52.4 และ 57.8 เมื่อ HDPE เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็น 50 และจาก 50 เป็น 100 ตามลำดับ เช่นเดียวกับ Aocharoen and Chotickai [25] พบกำลังรับแรงอัดลดลงเล็กน้อยร้อยละ 14.9 เมื่อมีการแทน HDPE ร้อยละ 15 แต่เมื่อมีการแทนที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50 ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงไปร้อยละ 55.3

ผลกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE เมื่อทดสอบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าแบบหล่อปริมาตรขนาด 7.5 ซม. × 2.5 ซม. × 4.5 ซม. หน้า 2.5 ซม. ของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง โดยตัวอย่างแต่ละส่วนผสมชนิดละ 5 ก้อน และทดสอบที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างตามอายุการบ่มไปทำการทดสอบกำลังดึงที่กระทำต่อพื้นที่

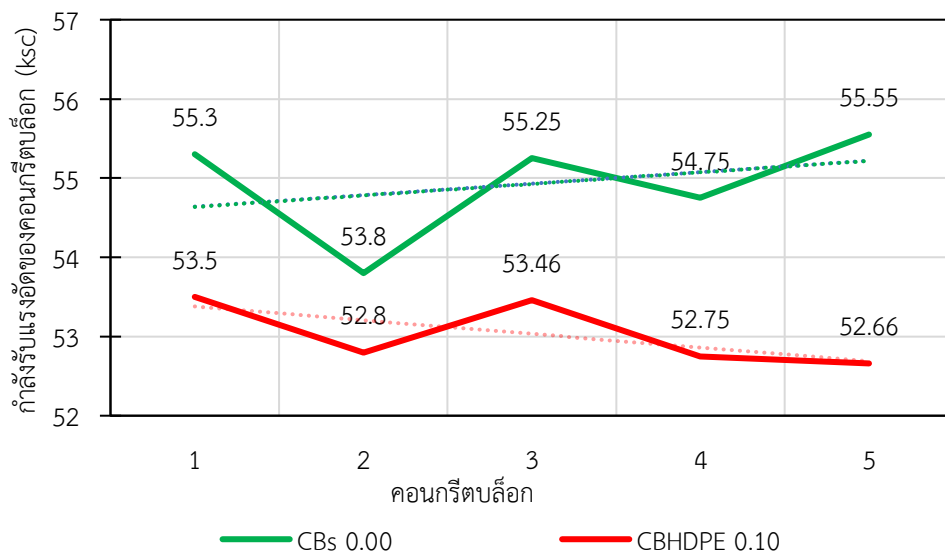
หน้าตัดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้า ซึ่งค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ต้านั้นแสดงถึงประสิทธิภาพของมอร์ต้าในการรับน้ำหนักด้านข้างและพฤติกรรมการแตกร้าวของมอร์ต้าที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างต่อไป พบว่า แนวโน้มการลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกับกำลังอัด โดย HDPE ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคภายในมอร์ต้า ทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น เนื่องมาจากการยึดเกาะที่ไม่ดีระหว่างเนื้อปูนซีเมนต์กับเม็ดโพลิเมอร์ [26] และประสิทธิภาพการถ่ายแรงภายในลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงลดลงเหลือ 42.27 ksc จากมอร์ต้ามาตรฐาน 48.10 ksc อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการยืดหยุ่นตัวของ HDPE อาจช่วยชะลอการแตกร้าวเริ่มต้นได้ในระดับหนึ่ง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE

ก้อน ตัวอย่าง	อัตราส่วนพลาสติก (%)	ทดสอบที่อายุ 28 วัน ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด (ksc)	ทดสอบที่อายุ 28 วัน ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึง (ksc)
Reference	0.00	334.28	48.10
HDPEM10	10.00	251.45	42.27

5.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE

กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE ทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 58-2560 ชนิดไม่รับน้ำหนัก [20] ในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 10 มีอายุการบ่มที่ 28 วัน ให้ค่าดังรูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดลดลงเพียงเล็กน้อยจากคอนกรีตมาตรฐาน คือ 53.03 ksc เทียบกับมาตรฐาน 54.93 ksc หรือคิดเป็นการลดลงเพียงประมาณร้อยละ 3.5 ซึ่งการลดลงของความแข็งแรงของคอนกรีตบล็อกเกิดจากความพรุนที่เพิ่มขึ้นของบล็อกและความแข็งแรงที่ต่ำมากของมวลรวมประเภท Polyethylene (PE) [27] นอกจากนี้ คุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำของ PE และการยึดเกาะที่ไม่ดีของมวลรวม PE กับซีเมนต์เพสต์ยังส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง [26] ผลลัพธ์ที่คล้ายกันนี้ได้รับการรายงานในการศึกษาก่อนหน้า [28]-[29] แต่อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 10 ยังสูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 58-2560 ที่กำหนดไว้ที่ 41 ksc [20] จึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานได้จริงในงานก่อสร้างประเภทไม่รับน้ำหนัก



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมาตรฐานเปรียบเทียบกับ คอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE ที่อายุการบ่ม 28 วัน

5.3 ผลการทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE

ค่าระดับการดูดซับเสียงเปรียบเทียบระหว่างผนังคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่ร้อยละ 0 กับ 10 ดังตารางที่ 4 ผนังที่ทำจากคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE มีค่าการดูดซับเสียงลดลง อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ความถี่สูง 1,500 Hz ค่าความแตกต่างของการดูดซับเสียงอยู่ที่ 17.03 dBA ซึ่งอธิบายได้จากโครงสร้างของ HDPE ที่มีความพรุนไม่เพียงพอ และไม่ได้สร้างแรงสะท้อนกลับหรือการกระเจิงคลื่นเสียงได้ดี เท่ากับผนังที่มีมวลแน่นและหนาแน่นมากกว่า จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงลดลง เนื่องจาก HDPE มีคุณสมบัติ ที่ช่วยให้สามารถดูดซับเสียงได้ แต่การดูดซับพลังงานเสียงจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของขยะพลาสติกมากเกินไป [30] ซึ่งการทดลองนี้ใช้ขยะพลาสติกแทนที่ทรายร้อยละ 10

อย่างไรก็ตาม การใช้ขยะพลาสติก HDPE ในการผลิตวัสดุก่อสร้างยังคงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ ทั้งในด้าน สิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจหมุนเวียน และการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ อีกทั้งยังสามารถพัฒนาเพิ่มเติมโดยการปรับปรุง ส่วนผสม เช่น การผสมวัสดุดูดซับเสียงอื่นร่วมด้วย การควบคุมขนาดอนุภาค HDPE ให้เหมาะสม หรือการเปลี่ยนรูปแบบ บล็อกให้มีโพรงภายในเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการดูดซับเสียง เป็นต้น

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE

ความถี่ (Hz)	ค่าต่างระดับความเข้มเสียง (dBA)		ค่าผลต่าง (dBA)
	Standard	HDPE 10%	
500	25.65	24.46	1.19
1000	31.40	23.71	7.69
1500	33.84	16.81	17.03

6. สรุป

6.1 การแทนที่ทรายด้วยขยะพลาสติก HDPE ส่งผลสมบัติทางกลของมอร์ต้า ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าผสมขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 10 ลดลงไปร้อยละ 24.78 และค่ากำลังรับแรงดึงลดลงไปร้อยละ 12.12 เมื่อเทียบกับมอร์ต้ามาตรฐาน เนื่องจากอนุภาคของพลาสติก HDPE มีขนาดละเอียดของมวลรวมมีอนุภาคนขนาดเล็กและมีความละเอียดทำให้ค่าความหนาแน่นต่ำไปด้วย

6.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกมาตรฐานแค่ร้อยละ 3.46 และมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 58-2560 ชนิดไม่รับน้ำหนัก อยู่ที่ 41 ksc

6.3 ผนังคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 10 ดูดซับเสียงได้น้อยกว่าผนังคอนกรีตบล็อกมาตรฐานทั้ง 3 ช่วงความถี่ โดยเฉพาะความถี่สูงการดูดซับเสียงของผนังคอนกรีตผสมขยะพลาสติก HDPE ร้อยละ 10 จะลดลงเนื่องจากโครงสร้างของ HDPE ที่มีความพรุนไม่เพียงพอ และไม่ได้สร้างแรงสะท้อนกลับหรือการกระเจิงคลื่นเสียงได้ดี อีกทั้งสัดส่วนการเติม HDPE ที่มากเกินไปการดูดซับพลังงานเสียงจะลดลง

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 การนำทรายมาใช้ในการทดสอบควรจะใช้ขนาดละเอียดที่เท่ากับขนาดละเอียดของพลาสติก HDPE เพราะอาจจะทำให้ค่าการทดสอบมีความเป็นไปได้น่าเชื่อถือ และสามารถนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกันได้

7.2 ควรมีการประเมินวัฏจักรชีวิตของคอนกรีตบล็อกผสมขยะพลาสติก HDPE เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกมาตรฐานเพื่อใช้ประกอบการผลิตวัสดุก่อสร้างเชิงทดแทน

7.3 ควรทดสอบในห้องปฏิบัติการระบบปิดในขั้นตอนการทดสอบการดูดซับเสียง เพราะอาจมีเสียงรบกวนจากภายนอก จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบได้

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมรัตนโกสินทร์ และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลายา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงนักศึกษา และอาจารย์ในสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ช่วยเสียสละเวลาและองค์ความรู้ในการสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ และอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิจัยที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Basu, P., Thomas, B. S., Gupta, R. C., & Agrawal, V. (2021). Properties of sustainable self-compacting concrete incorporating discarded sandstone slurry. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125313.
- [2] Silva, L. F. da, Resnitzky, M. H. C., Gonzalez, E. D. R. S., Conti, D. de M., & Costa, P. R. da (2022). Management of plastic waste and a circular economy at the end of the supply chain: a systematic literature review. *Energies*, 15(3), 976.
- [3] Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: a review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96-108.
- [4] Wiah, E. N., Addor, J. A., & Alao, F. I. (2022). Transitional probabilities for plastic waste management and implication on sustainability. *Sustainable Environment*, 8(1), 2118654.
- [5] Wamba, S. F., Fotso, M., Mosconi, E., & Chai, J. (2025). Assessing the potential of plastic waste management in the circular economy: a longitudinal case study in an emerging economy. *Annals of Operations Research*, 355, 1787-1809.
- [6] Babaremu, K. O., Okoya, S. A., Hughes, E., Tijani, B., Teidi, D., Akpan, A., ... & Akinlabi, E. T. (2022). Sustainable plastic waste management in a circular economy. *Heliyon*, 8(7), e09984.
- [7] Baran, B. (2020). Plastic waste as a challenge for sustainable development and circularity in the european union. *Ekonomia I Prawo. Economics and Law*, 19(1), 7-20.
- [8] Balu, R., Dutta, N. K., & Roy Choudhury, N. (2022). Plastic waste upcycling: a sustainable solution for waste management, product development, and circular economy. *Polymers*, 14(22), 4788.
- [9] Abdelsalam, Z., Almashan, N., & Ismael, N. (2019). Reinforcing some kuwaiti soils with shredded high-density polyethylene (HDPE) bits. *Environmental and Engineering Geoscience*, 25(3), 213-221.
- [10] Diaz-Silvarrey, L.S., Zhang, K., & Phan, A.N. (2018). Monomer recovery through advanced pyrolysis of waste high density polyethylene (HDPE). *Green Chemistry*, 20, 1813-1823.

- [11] Binici, H., Aksogan, O., Dincer, A., Luga, E., Eken, M., & Isikaltun, O. (2020). The possibility of vermiculite, sunflower stalk and wheat stalk using for thermal insulation material production. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100567.
- [12] Bozsaky, D. (2019). Nature-based thermal insulation materials from renewable resources – a state-of-the-art review. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(1), 52-59.
- [13] พิมพร อภิชาติบุตร และ มณีรัตน์ เข้มขาว. (2564). การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าหนักสำหรับคอนกรีตบล็อกกันความร้อน (กรณีศึกษา: โรงเผาขยะมูลฝอยชุมชน จังหวัดภูเก็ต). *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 39 ประจำปี 2564* (หน้า 993 – 999). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
- [14] Seddeq, H.S., Aly, N.M., Marwa A.A., & Elshakankery, M.H. (2013). Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials. *Journal of Industrial Textiles*, 43(1), 56–73.
- [15] Abeyasinghe, S., Gunasekara, C., Bandara, C., Nguyen, K., Dissanayake, R., & Mendis, P. (2021). Engineering performance of concrete incorporated with recycled high-density polyethylene (hdpe)—a systematic review. *Polymers*, 13(11), 1885.
- [16] Geyer, R., Jambeck, J.R., & Law, K.L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 1700782.
- [17] American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM C230/C230M-14: standard specification for flow table for use in test of hydraulic cement*, ASTM International.
- [18] American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C109/C109M-20B: standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-In. Or [50 Mm] Cube Specimens)*. ASTM International.
- [19] American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C190-20: standard test method for tensile strength of hydraulic cement mortars*. ASTM International.
- [20] สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. (2560). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกแบบไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2560)*. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [21] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61672-1:2013: Electroacoustics – sound level meters – part 1: specifications*, IEC.
- [22] Álvarez, M., Ferrández Vega, D., Zaragoza-Benzal, A., & Colorado, B. (2024). Initiative to increase the circularity of hdpe waste in the construction industry: a physico-mechanical characterization of new sustainable gypsum products. *Applied Sciences*, 14(2), 478.

- [23] Shanmugapriya, M., & Santhi, H. (2017). Strength and chloride permeable properties of concrete with high density polyethylene wastes. *International Journal of Chemical Sciences*, 15(1), 10-17.
- [24] Badache, A., Benosman, A. S., Senhadji, Y., & Mouli, M. (2018). Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). *Construction and Building Materials*, 163, 40-52.
- [25] Aocharoen, Y., & Chotickai, P. (2021). Compressive mechanical properties of cement mortar containing recycled high-density polyethylene aggregates: Stress-strain relationship. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00752.
- [26] Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste management*, 28(11), 2041-2047.
- [27] Chidiac, S.E., & Mihaljevic, S.N. (2011). Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 855-863
- [28] Ghaly, A. M., & Gill, M. S. (2004). Compression and deformation performance of concrete containing postconsumer plastics. *Journal of materials in civil engineering*, 16(4), 289-296.
- [29] Marzouk, O. Y., Dheilily, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste management*, 27(2), 310-318.
- [30] Marsi, N. B., & Sah, M. S. B. M. (2021). Utilization of insulation foam based on hdpe plastic waste as sound absorption properties. *Proceedings of Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology (MUCET)*, 227-228.