

การพัฒนาบล็อกปูพื้นสองชั้นจากวัสดุผสมพลาสติกเหลือทิ้งทดแทนมวลรวมที่มีศักยภาพในการลดการปลดปล่อยไมโครพลาสติก

Development of Dual-Layer Paving Blocks Using Waste Plastic as Aggregate Replacement with the Potential to Mitigate Microplastic Emissions

ปรัชญา นามวงศ์^{1*}, หฤทัย ล่องกุลบุตร¹, ศิริพงษ์ สมวรรณ¹ และ ฟองจันทร์ จิราลิต²

Prachaya Namwong^{1*}, Haruthai Longkullabutra¹, Siripong Somwan¹ and Fongjan Jirasit²

¹สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ประเทศไทย

²สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ประเทศไทย

¹Division of Science, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand

²Civil and Environmental Engineering Department, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand

Received: 25 February 2026, Received in revised form: 26 May 2026, Accepted: 27 May 2026

Available online: 8 June 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา: จากวิกฤตการณ์ขยะพลาสติกหลังการบริโภคที่ทวีความรุนแรงขึ้นทั่วโลก ได้มีการผลักดันให้เกิดการพัฒนาแนวทางและนวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับด้านวัสดุก่อสร้าง แม้ว่าการนำเศษพลาสติกมาเป็นส่วนผสมเพื่อแทนที่มวลรวมจะเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามปัญหาการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกทุติยภูมิซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพทางกายภาพและรังสีอัลตราไวโอเลตได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้เกิดความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาวจากการนำไปใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ทางวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมและความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตบล็อกปูพื้นที่ใช้เศษพลาสติกเหลือทิ้งเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมบางส่วนร่วมกับเทคนิคการขึ้นรูปแบบสองชั้น วัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาบล็อกปูพื้นที่มีศักยภาพในการลดความเสี่ยงในการเกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้น โดยชั้นในที่เป็นแกนกลางจะผสมเศษพลาสติกและถูกห่อหุ้มด้วยคอนกรีตชั้นนอกที่ปราศจากพลาสติกและมีสมบัติทางกลสูง การออกแบบนี้มีเป้าหมายเพื่อลดโอกาสการปลดปล่อยของเศษพลาสติกหรือไมโครพลาสติกสู่ระบบนิเวศ และมีคุณสมบัติผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนด

วิธีดำเนินการวิจัย: ขั้นตอนการทดลองถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกแบ่งเป็นสามระยะเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสมเพื่อนำไปใช้ในการผลิตบล็อกปูพื้นที่ให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกปูพื้น (มอก. 827-2531) ระยะแรกเป็นศึกษาพื้นฐานเพื่อประเมินอิทธิพลของการลดขนาดมวลรวม (ทรายละเอียดและทรายหยาบ) ที่มีต่อกำลังต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในระยะที่สองได้มีการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลทมาใช้เพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดมือ ในระยะที่สาม มวลรวมบางส่วนจะถูกแทนที่บางส่วนด้วยขยะพลาสติกสามประเภท ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE), พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมในร้อยละ 1.67 และร้อยละ 3.33 โดยน้ำหนักของมวลรวม

โดยศึกษาพลาสติกสองขนาด คือ ขนาดเล็ก (น้อยกว่า 5 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (5 – 15 มิลลิเมตร) และขั้นตอนการทดลองในส่วนที่สองจะเป็นการศึกษากระบวนการผลิตใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบอัดมือ โดยเปรียบเทียบวิธีการขึ้นรูปแบบสองชั้นที่แตกต่างกันสองแนวทาง ได้แก่ (1) การขึ้นรูปแบบแยกส่วน (Sequential Casting) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปและบ่มชั้นในให้แข็งตัวก่อนที่จะนำมาหล่อหุ้มด้วยชั้นนอก และ (2) การขึ้นรูปแบบพร้อมกัน (Simultaneous Casting) ซึ่งเป็นเทคนิคการขึ้นรูปแบบที่ทั้งสองชั้นจะถูกอัดแน่นไปพร้อมกัน ชิ้นงานทดสอบได้รับการบ่มเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ และถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการทดสอบกำลังต้านแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M การทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะบริเวณเชื่อมต่อระหว่างเศษพลาสติกและเนื้อวัสดุซีเมนต์

ผลการวิจัย: ผลการศึกษาในระยะเวลาการประเมินอัตราส่วนผสมพบว่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นชั้นนอก (ปราศจากพลาสติก) คือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก:น้ำ:ทรายหยาบ:สารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 1:0.35:3.00:0.007 ซึ่งให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 508.6 ksc ณ อายุการบ่ม 28 วัน สำหรับการศึกษาอิทธิพลของการแทนที่มวลรวมด้วยเศษพลาสติก พบว่าสมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.67 เป็นร้อยละ 3.33 โดยน้ำหนักของมวลรวม สันฐานวิทยาของชนิดพลาสติกและขนาดมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพเชิงกล โดยชิ้นงานที่ผสมเศษพลาสติก HDPE และ PET ที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงกว่าชิ้นงานขนาดใหญ่ (5 – 15 มิลลิเมตร) เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอภายในเนื้อสารฐาน ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานที่ผสมพลาสติก LDPE แสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยต่ำกว่าเกณฑ์ควบคุมขั้นต่ำของมาตรฐานในทุกอัตราส่วนผสม โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคตรวจพบช่องว่างขนาดใหญ่และการสะสมตัวของผลึกเอททริงไต์ (Ettringite) รูปเข็มในปริมาณมาก ในส่วนของการเปรียบเทียบเทคนิคการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้น โดยส่วนชั้นในมีการใช้เศษพลาสติก HDPE และ PET เป็นมวลรวมทดแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 3.33 โดยน้ำหนักของมวลรวมของสัดส่วนที่ทำให้ทำชั้นนอก พบว่าบล็อกที่ผลิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแยกส่วนประสบปัญหาการเกิดรอยต่อคอนกรีตเย็น ส่งผลให้เกิดความบกพร่องและเกิดการแยกชั้นหลุดร่อนระหว่างโครงสร้าง ในขณะที่ชิ้นงานที่ผลิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปพร้อมกันสามารถพัฒนาพันธะการยึดเกาะเชื่อมประสานเป็นเนื้อเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้นที่ขึ้นรูปพร้อมกันสามารถพัฒนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดได้สูงถึง 481.6 ksc และ 499.2 ksc ตามลำดับ ควบคุมกับค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 3.7 ตามลำดับ ที่ต่ำกว่าร้อยละ 5 สอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรมที่กำหนด

สรุปผลการวิจัย: งานวิจัยนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าการพัฒนาบล็อกปูพื้นสองชั้นเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและเป็นไปได้จริงในการนำเศษพลาสติกมาพัฒนาใช้ในผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง ปริมาณและขนาดของเศษพลาสติกมีผลต่อคุณสมบัติทางกล โดย HDPE และ PET เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่มวลรวม เทคนิคการขึ้นรูปพร้อมกันเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบล็อกปูพื้นแบบสองชั้นเนื่องจากไม่เกิดระนาบรอยต่อที่อ่อนแอในโครงสร้าง นอกจากนี้โครงสร้างชั้นนอกของการขึ้นรูปแบบสองชั้นทำหน้าที่เป็นส่วนที่ช่วยปกป้องเศษพลาสติกจากปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทั้งจากการขัดสีและรังสีอัลตราไวโอเลตจากการนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้ดำเนินงานตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน ช่วยพัฒนาขยะพลาสติกให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ก่อสร้างที่มีมูลค่าและได้มาตรฐาน เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืน ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกแต่ยังมีศักยภาพในการช่วยป้องกันมลพิษไมโครพลาสติกสู่ระบบนิเวศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: บล็อกปูพื้น; ไมโครพลาสติก; การขึ้นรูปแบบสองชั้น; วัสดุทดแทนมวลรวม; การพัฒนาอย่างยั่งยืน

Abstract

Background and Objectives: The escalating global crisis of post-consumer plastic waste has driven the development of innovative solutions and strategic approaches across various sectors. In the field of construction materials, although the incorporation of plastic fragments as a partial aggregate replacement has gained a degree of acceptance, the environmental risks associated with the dispersal of secondary In the field of construction materials, although incorporating plastic fragments as a partial aggregate replacement has gained a degree of acceptance, the problem of the release of secondary microplastics induced by physical degradation and ultraviolet radiation has attracted increasing attention, posing long-term environmental risks during practical implementation. Consequently, this research studies the materials science and engineering feasibility and environmental safety of producing dual-layer paving blocks that utilize recycled plastic waste as a partial aggregate substitute. The primary objective is to develop a paving block with the potential to mitigate these environmental hazards through a specialized structural design: an inner core containing plastic waste is encapsulated within a high performance, plastic-free outer concrete shell. This design specifically aims to prevent the release of plastic fragments or microplastics into the ecosystem while ensuring that the physical and mechanical properties comply with the specified Thai industrial standards.

Methodology: The experimental program was divided into two sections. The first section consisted of three phases aimed at determining the optimal mix proportions to produce paving blocks, ensuring that the specimens achieved mechanical and physical properties in compliance with the Thai Industrial Standard for concrete paving blocks (TIS 827-2531). Phase 1 was a foundational study conducted to evaluate the influence of aggregate grading (fine sand and coarse sand) on the compressive strength of hydraulic cement mortar. In Phase 2, a polycarboxylate-type superplasticizer was introduced to refine the structure, optimizing the physical characteristics and workability required for the manual compaction molding process. In Phase 3, aggregates were partially replaced with three types of plastic waste, including low-density polyethylene (LDPE), high-density polyethylene (HDPE), and polyethylene terephthalate (PET), at replacement ratios of 1.67% and 3.33% by weight of the total aggregate, investigating two particle size ranges: small (less than 5 mm) and large (5 – 15 mm). The second section of the research focused on the production process using the manual hand press technique, involving a comparative analysis of two distinct dual-layer molding approaches: (1) Sequential Casting, where the inner core was molded and cured to harden before being encased in the outer layer, and (2) Simultaneous Casting, a technique where both the inner and outer layers were consolidated and compressed concurrently. Test specimens were cured for 7 and 28 days and were analyzed using compressive strength testing according to ASTM C109/C109M, water absorption testing with TIS 109-2517, and microstructural analysis using Scanning Electron Microscopy (SEM) to investigate the interfacial bonding between the plastic fragments and the cement matrix.

Main Results: The results of the mix proportion evaluation phase indicated that the optimal weight ratio for the outer layer (plastic free) was hydraulic cement : water : coarse sand : superplasticizer at 1:0.35:3.00:0.007, which yielded the maximum compressive strength of 508.6 ksc at 28 days of curing. Regarding the influence of aggregate replacement with waste plastic, mechanical properties exhibited a continuous decreasing trend as the replacement content increased from 1.67% to 3.33% by weight of aggregate. The morphology and size of the plastic types played a crucial role in mechanical performance; specifically, specimens containing HDPE and PET shredded plastics with particle sizes smaller than 5 mm achieved higher compressive strength than those with larger sizes (5 – 15 mm) due to uniform dispersion within the matrix. Conversely, specimens incorporating LDPE plastic exhibited average compressive strengths below the minimum standard requirements across all mix proportions, with microstructural analysis revealing large voids and a high accumulation of needle-like shape of Ettringite. In the comparison of fabrication techniques for the dual-layer concrete paving blocks, where the inner layer utilized HDPE and PET plastics as aggregate replacement at 3.33% by weight of the outer layer mix, it was found that blocks manufactured via sequential casting encountered cold joint issues, leading to defects and interfacial delamination. Conversely, specimens fabricated through simultaneous casting effectively developed a monolithic bond. Consequently, the simultaneously cast dual-layer concrete paving blocks developed high compressive strengths of 481.6 ksc and 499.2 ksc, respectively, along with water absorption rates of 4.4% and 3.7%, respectively, both of which are below 5% and fully comply with the specified industrial standards.

Conclusions: This research demonstrates that the development of dual-layer paving blocks is an effective and viable approach for incorporating plastic waste into construction materials. Both the quantity and size of plastic fragments significantly influence the mechanical properties of the specimens, with HDPE and PET identified as the most suitable materials for aggregate replacement. The simultaneous casting technique is the optimal method for fabricating dual-layer paving blocks, as it eliminates the weak interfacial planes in the structure. Furthermore, the outer layer of the dual-layer structure serves as a protective barrier, shielding the plastic fragments from main degradation factors, such as abrasion and ultraviolet radiation, during practical applications. Adhering to Circular Economy principles, this research transforms plastic waste into high value, standardized construction products, fostering sustainable development that not only reduces plastic waste volume but also effectively possesses the potential to prevent microplastic pollution within the ecosystem.

Keywords: paving blocks; microplastic; dual-layer molding; aggregate replacement material;
sustainable development

*Corresponding author. E-mail : Prachaya@rmutl.ac.th

Introduction

ในปัจจุบันพลาสติกได้กลายเป็นวัสดุดำเนินชีวิตพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ด้วยคุณสมบัติเด่นด้านความทนทาน น้ำหนักเบา ความยืดหยุ่น และมีกระบวนการขึ้นรูปที่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะความคงทนดังกล่าวได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ สำหรับประเทศไทยพบปริมาณขยะพลาสติกสูงถึงประมาณ 2 ล้านตันต่อปี โดยเฉพาะในช่วงการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ในปี พ.ศ. 2563 ที่ปริมาณขยะพลาสติกพุ่งสูงขึ้นถึง 6,300 ตันต่อวัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า (Panyayong, 2025) โดยข้อมูลในปี พ.ศ. 2565 สะท้อนถึงขีดจำกัดและความท้าทายในการบริหารจัดการขยะมูลฝอยรวมของประเทศที่ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2023)

ประเด็นทางสิ่งแวดล้อมที่กำลังได้รับความสนใจและตื่นตัวอย่างเร่งด่วนในระดับสากลคือปัญหา "ไมโครพลาสติก" (Microplastics) หรืออนุภาคพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร อนุภาคเหล่านี้สามารถแพร่กระจายแทรกซึม และสะสมในห่วงโซ่อาหาร ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในระยะยาว แม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัดเกี่ยวกับกลไกผลกระทบก็ตาม (Prasittisopin *et al.*, 2023; Rummel *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2021) เพื่อตอบสนองต่อปัญหานี้ รัฐบาลไทยได้กำหนดแผนการทำงาน (Roadmap) การจัดการขยะพลาสติก พ.ศ. 2561 - 2573 โดยมุ่งเน้นการขับเคลื่อนเชิงนโยบายเพื่อนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในรูปแบบการสร้างมูลค่าเพิ่ม (Pollution Control Department, 2021)

แนวทางหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจและมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางคือการประยุกต์ใช้เศษพลาสติกเหลือทิ้งเป็นวัสดุทางเลือกในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น การประยุกต์ใช้พลาสติก PET แทนที่มวลรวมบางส่วนในงานคอนกรีต (Saikia & de Brito, 2014) การใช้พลาสติกเป็นส่วนผสมในการผลิตบล็อกคอนกรีตปูพื้น (Ghugre *et al.*, 2019) และการนำขยะพลาสติกเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Sarang, 2019) แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นข้อจำกัดที่ชัดเจนว่า การใช้พลาสติกเป็นส่วนผสมส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลโดยตรง โดยเฉพาะค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้น (Khamput *et al.*, 2024; Phatthara *et al.*, 2022; Suweero & Khamput, 2020; Waroonkun *et al.*, 2017) แต่อย่างไรก็ตาม การจัดเรียงขนาดและการกระจายตัวของส่วนผสมที่เหมาะสม จะสามารถช่วยลดอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงาน ส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีความหนาแน่นสูงขึ้น ลดอัตราการดูดซึมน้ำ และช่วยเพิ่มค่ากำลังต้านทานแรงอัดได้ (Janpetch & Kokkamhaeng, 2016) นอกจากนี้ ความแตกต่างของแรงจับยึดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์ของซีเมนต์และพื้นผิวของพลาสติกยังเป็นปัจจัยควบคุมค่าการดูดซึมน้ำและความทนทานในสภาวะแวดล้อมของชิ้นงานอีกด้วย (Khamput *et al.*, 2024; Phatthara *et al.*, 2022)

แม้ว่าการรวมขยะพลาสติกเข้ากับวัสดุก่อสร้างจะเป็นแนวทางหมุนเวียนทรัพยากรที่สร้างสรรค์ แต่ข้อจำกัดเชิงโครงสร้างและความเสี่ยงจากการเกิดปัญหาของไมโครพลาสติกทุติยภูมิ (Secondary Microplastics) ที่เกิดจากการแตกหักของเศษพลาสติกขนาดใหญ่ภายใต้สิ่งแวดล้อม (Crawford & Quinn, 2017) ผลิตภัณฑ์บล็อกพลาสติกเชิงประกอบแบบเนื้อเดียวในอดีตเมื่อ

นำไปใช้งานจริงพลาสติกบริเวณพื้นผิวหน้าของชิ้นงานอาจเกิดการเสื่อมสภาพทางกายภาพผ่านแรงขัดสีจากการใช้งาน การทำปฏิกิริยากับรังสีอัลตราไวโอเลต หรือความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้อนุภาคพลาสติกเกิดการหลุดรอดและปลดปล่อยสู่ระบบนิเวศโดยตรง

งานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเสนอแนวคิดในการลดโอกาสการเกิดไมโครพลาสติกจากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยการพัฒนานวัตกรรมบดอัดขึ้นรูปผ่านเทคนิค "การขึ้นรูปแบบสองชั้น" (Dual-Layer Molding Technique) โดยโครงสร้างส่วนชั้นในจะทำหน้าที่เป็นแกนกลาง (Inner layer) ที่มีการนำขยะพลาสติกหลังการบริโภค 3 ประเภทหลัก ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (PET) มาเป็นส่วนผสม จากนั้นโครงสร้างแกนในจะถูกปิดทับและห่อหุ้มอย่างสมบูรณ์ด้วยชั้นคอนกรีตเปลือกนอก (Outer layer) ที่ปราศจากส่วนผสมของพลาสติก โครงสร้างรูปแบบใหม่นี้ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันทางกายภาพและรังสีที่ช่วยลดโอกาสการสัมผัสสภาวะแวดล้อมภายนอกของตัวพลาสติก จึงสามารถลดความเสี่ยงเชิงกลไกในการปลดปล่อยมลพิษไมโครพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน นอกจากนี้เทคนิคการขึ้นรูปแล้ว งานวิจัยนี้ยังยกระดับความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามนโยบายภาครัฐ (Ministry of Industry, 2022) พร้อมทั้งเลือกใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดมือ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน ประหยัดพลังงาน และเอื้อต่อการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ระดับวิสาหกิจชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม องค์ความรู้ที่ได้รับจากการศึกษาครั้งนี้จึงไม่เพียงแต่นำไปสู่การผลิตวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) แต่ยังนำเสนอแนวทางป้องกันมลพิษเชิงรุกที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

Methodology

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 ปูนซีเมนต์ประเภทไฮดรอลิกที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับงานโครงสร้าง จากการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาศาสตร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น VEGA 3 (TESCAN, Czech Republic) บนชิ้นงานที่เตรียมด้วยการเคลือบทอง ดังแสดงใน Figure 1 พบว่า อนุภาคปูนซีเมนต์มีลักษณะทางกายภาพเป็นทรงเหลี่ยมที่มีขนาดคล้ายกัน โดยสังเกตพบผงปูนขนาดเล็กยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดปูนขนาดใหญ่ เมื่อทดสอบการกระจายตัวของธาตุเชิงพื้นที่ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS Elemental Mapping) สามารถยืนยันการกระจายตัวของธาตุหลัก ได้แก่ แคลเซียม (Ca), ซิลิกอน (Si), เหล็ก (Fe), กำมะถัน (S), อะลูมิเนียม (Al), แมกนีเซียม (Mg) และออกซิเจน (O) ที่เป็นปัจจัยหลักในการควบคุมคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสม นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงปริมาณด้วยเทคนิคการเรืองแสงเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Fluorescence, EDXRF) เครื่องรุ่น JSX3400R (JEOL) ดังแสดงใน Table 1 ยืนยันว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) องค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 80.2644 รองลงมาคือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ตามลำดับ ซึ่งกลุ่มสารประกอบออกไซด์เหล่านี้สำคัญอย่างยิ่งต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เพื่อสร้างความแข็งแรงเชิงกลให้แก่ชิ้นงาน

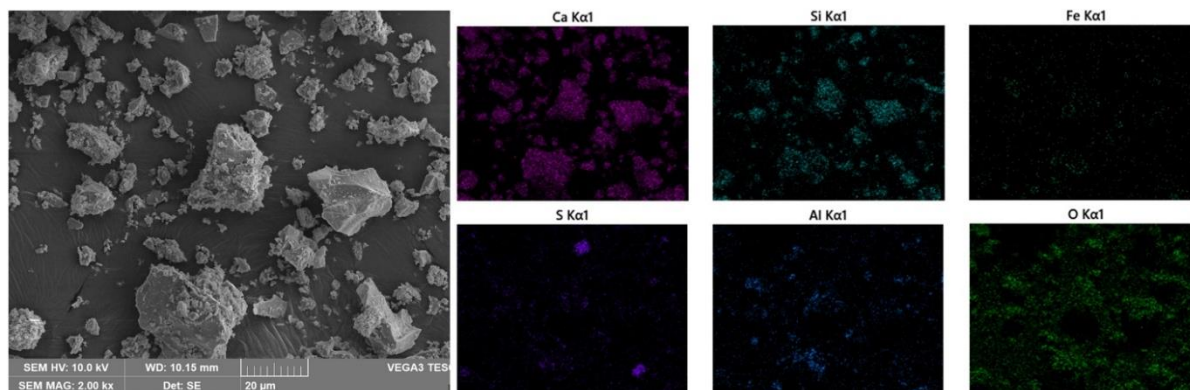


Figure 1 SEM image and EDS elemental mapping illustrating the chemical composition of the hydraulic cement sample at a magnification of 2,000×

Table 1 Chemical composition of hydraulic cement

Chemical composition	%Weight per weight (%w/w)	Chemical composition	%Weight per weight (%w/w)
CaO	80.2644	K ₂ O	0.5089
SiO ₂	8.4960	TiO ₂	0.3050
Fe ₂ O ₃	4.9938	SrO	0.0981
SO ₃	3.8055	ZnO	0.0949
Al ₂ O ₃	1.4335		

Table 2 The fineness modulus of the aggregates

Aggregate	Fineness modulus
Fine sand	1.59
Coarse sand	2.34

1.2 มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยทรายละเอียดและทรายหยาบบรรจุลงเกรตทางการค้า จากการวิเคราะห์ฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM ดังแสดงใน Figure 2 พบว่า อนุภาคของทรายมีลักษณะเหลี่ยมคมและมีพื้นผิวที่ขรุขระ คุณลักษณะทางกายภาพดังกล่าวส่งเสริมกลไกการยึดเกาะเชิงกล (Mechanical Interlocking) ระหว่างผิวสัมผัสของมวลรวมและซีเมนต์พาสต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลังต้านแรงอัด สำหรับการทดสอบหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C136/136M (American Society for Testing and Materials, 2014) และ ASTM C33-08 (American Society for Testing and Materials, 2008) ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อนเชิงกล (Endecotts, Model Minor) โดยผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดทรายละเอียดและทรายหยาบแสดงใน Figure 3 และ Table 2 รายงานค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM)

1.3 วัสดุพลาสติกประกอบด้วยพลาสติก 3 ประเภท ได้แก่ PET, HDPE จากขวดพลาสติก และ LDPE จากถุงพลาสติก โดยทั้งหมดถูกนำมาผ่านกระบวนการลดขนาดด้วยเครื่องบดพลาสติก เพื่อให้ได้เศษพลาสติกคละขนาด 2 ช่วงขนาดหลัก คือ ช่วงขนาด 5 - 15 mm. และช่วงขนาดเล็กกว่า 5 mm เพื่อใช้ศึกษาเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมบางส่วนในสัดส่วนผสมที่กำหนด ลักษณะทางกายภาพของเศษพลาสติกบดแต่ละชนิดถูกแสดงไว้ใน Figure 4

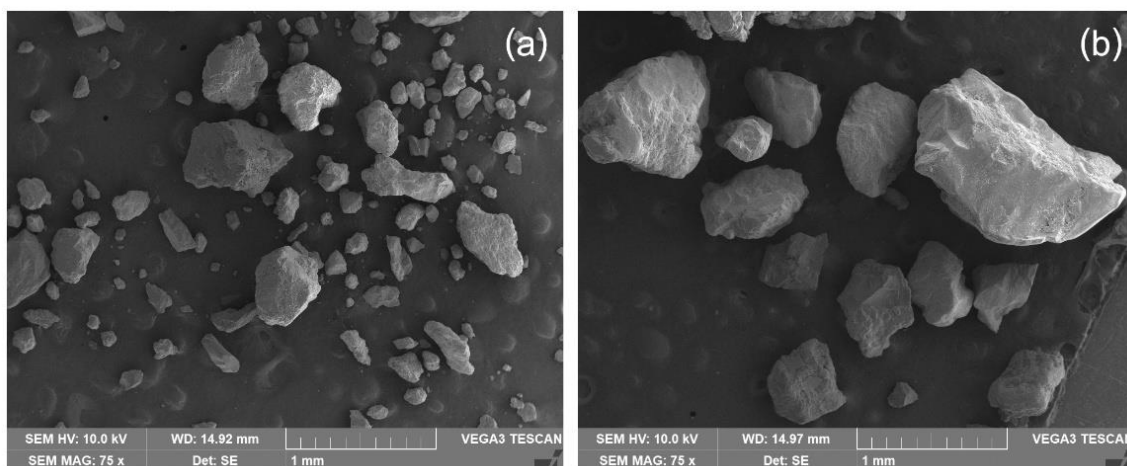


Figure 2 SEM images showing the physical morphology of (a) fine sand and (b) coarse sand at 75× magnification

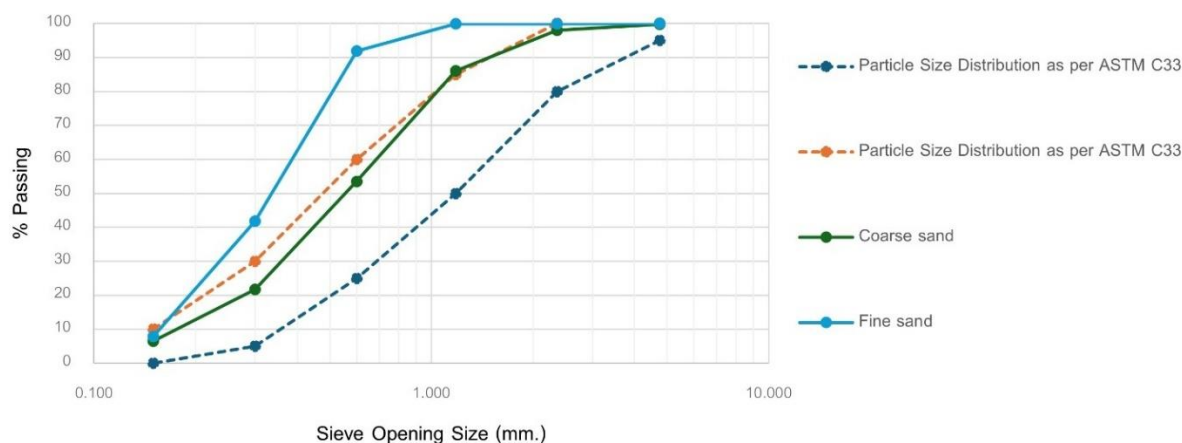


Figure 3 Particle size distribution of fine and coarse sand

1.4 สารลดน้ำพิเศษประเภทลดน้ำอย่างมาก ในกลุ่มโพลีคาร์บอกซีเลท (Polycarboxylate)

1.5 น้ำใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำสะอาดคุณภาพมาตรฐานน้ำดื่มสำหรับการบริโภค



Figure 4 Plastic samples after shredding: (a) LDPE fragments smaller than 5 mm, (b) LDPE fragments between 5 - 15 mm, (c) HDPE fragments smaller than 5 mm, (d) HDPE fragments between 5 - 15 mm, and (e) PET fragments smaller than 5 mm

2. การเตรียมชิ้นงาน

2.1 กระบวนการออกแบบส่วนผสมในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดระหว่าง น้ำ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มวลรวมละเอียด (ทรายละเอียด ทรายหยาบ และเศษพลาสติกบด) และสารลดน้ำพิเศษ เพื่อให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกปูพื้น (มอก. 827-2531) (Thai Industrial Standards Institute (TISI), 1988) ข้อมูลจากสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละขั้นตอนการทดลอง จะถูกนำไปใช้เป็นเกณฑ์ฐานสำหรับการผลิตบล็อกปูพื้นสองชั้นด้วยเทคนิคการอัดมือ โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ระยะหลัก ดังนี้

2.1.1 ระยะที่ 1 เป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างทรายละเอียดและทรายหยาบที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) คงที่ที่ 0.5 ตามแนวทางการงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Khamput *et al.*, 2024; Suweero & Khamput, 2020; Waroonkun *et al.*, 2017) และใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวมเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก (Suweero & Khamput, 2020) โดยกำหนดอัตราส่วนของปูนต่อทรายละเอียดและทรายหยาบออกเป็น 3 สัดส่วนทดลอง ได้แก่ 1:3:0, 1:1.5:1.5 และ 1:0:3 ทั้งนี้ มวลรวมทรายทั้งหมดถูกเตรียมให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry: SSD) เพื่อควบคุมปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมให้คงที่ จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปประเมินค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำ สัดส่วนที่ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำดีที่สุดจะถูกเลือกไปพัฒนาต่อในระยะถัดไป

2.1.2 ระยะที่ 2 การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยสารลดน้ำพิเศษ นำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจาก ระยะที่ 1 มาทำการเพิ่มส่วนผสมของสารลดน้ำพิเศษ โดยลดอัตราส่วนของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงเหลือ 0.35 และกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกกับสารลดน้ำพิเศษเป็น 1:0, 1:0.005, 1:0.007 และ 1:0.010 ตามลำดับ นำตัวอย่างชิ้นงานทั้ง 4 อัตราส่วนสัดส่วนไปทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อคัดเลือก สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาการเติมส่วนผสมของเศษพลาสติกเพื่อทดแทนมวลรวม

2.1.3 ระยะที่ 3 การประเมินสัดส่วนการแทนที่มวลรวมด้วยเศษพลาสติก ในขั้นตอนนี้จะนำสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากขั้นตอนที่ 2.1.2 มาทำการแทนที่มวลรวมด้วยเศษพลาสติก (PET, HDPE และ LDPE) โดยควบคุมอัตราส่วนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวม (1:3 โดยน้ำหนัก) กำหนดสัดส่วนการแทนที่มวลรวมในร้อยละ 1.67 และร้อยละ 3.33 โดยน้ำหนักของมวลรวม (ซึ่งคำนวณและเทียบเท่ากับสัดส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามลำดับ) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของประเภทและสัดส่วนเศษพลาสติกที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค กำลังต้านทาน

แรงอัด และค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นสัดส่วนผสมสุดท้ายในการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตปูพื้นสองชั้นประสิทธิภาพสูงด้วยแม่พิมพ์แบบอัดมือต่อไป

2.2 การผสมและการขึ้นรูปชิ้นงาน

2.2.1 การเตรียมส่วนผสม ในขั้นแรกส่วนผสมทั้งหมดจะถูกชั่งตวงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่กำหนดไว้ในแต่ละสัดส่วนทดลอง จากนั้นดำเนินการผสมโดยดัดแปลงตามมาตรฐาน มอก. 2752 เล่ม 17-2559 (Thai Industrial Standards Institute (TISI), 2016) ด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ซีเมนต์ (HOBART, Model C-100T) โดยควบคุมลำดับและเวลาในการปั่นผสมอย่างเคร่งครัด เพื่อรับประกันความสม่ำเสมอของส่วนผสมสำหรับการนำไปขึ้นรูป

2.2.2 การขึ้นรูปบล็อกทดสอบมอร์ตาร์ เตรียมชิ้นงานทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ ดำเนินการโดยดัดแปลงขั้นตอนตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (American Society for Testing and Materials., 2021) เพื่อวิเคราะห์ค่ากำลังต้านแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ออกแบบ ผลทดสอบในส่วนนี้จะใช้เป็นฐานข้อมูลในการคัดเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตบล็อกคอนกรีตปูพื้นในขั้นตอนถัดไป

2.2.3 การขึ้นรูปบล็อกปูพื้นแบบสองชั้น ในขั้นตอนนี้จะทำการการผลิตบล็อกปูพื้นขนาด $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$ ดำเนินการด้วยเทคนิคการอัดมือ โดยนำส่วนผสมที่ผ่านการคัดเลือกจากระยะก่อนหน้ามาขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอัดมือ

1) วิธีการขึ้นรูปแยกส่วน โดยการเตรียมส่วนชั้นนอกและชั้นในของบล็อกคอนกรีตปูพื้นแยกกัน

- การขึ้นรูปส่วนชั้นใน เตรียมโดยบรรจุส่วนผสมที่มีเศษพลาสติกเป็นมวลรวมบางส่วนลงในแม่พิมพ์ขนาด $80 \times 80 \times 40 \text{ mm}^3$ โดยแบ่งเทเป็น 2 ชั้น ชั้นละ 20 mm ดัดแปลงจากมาตรฐาน มอก. 409-2525 (Thai Industrial Standards Institute (TISI), 1982) ดำเนินการกระทุ้งและปาดผิวหน้าให้เรียบขอบแบบ จากนั้นจึงถอดแม่พิมพ์ออกแล้วจึงนำส่วนชั้นในนำไปบ่มในน้ำสะอาดเป็นเวลา 7 วัน

- การขึ้นรูปส่วนชั้นนอก ใช้แม่พิมพ์บล็อกสี่เหลี่ยมขนาด $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$ เริ่มจากการเทมอร์ตาร์ชั้นผิวหน้า (ส่วนผสมที่ไม่มีเศษพลาสติก) สูง 15 mm ดำเนินการกระทุ้งจากนั้นวางก้อนแกนชั้นในที่ผ่านการบ่มน้ำครบ 7 วันลงกึ่งกลางแม่พิมพ์อย่างระมัดระวัง แล้วจึงเติมมอร์ตาร์ที่ไม่มีเศษพลาสติกในช่องว่างโดยรอบและด้านบนจนเต็มขอบแม่พิมพ์ ดำเนินการกระทุ้งและปาดผิวหน้าให้เรียบ ถอดแม่พิมพ์ และนำไปบ่มน้ำสะอาดเพื่อรอทดสอบคุณสมบัติที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

2) วิธีการขึ้นรูปพร้อมกัน โดยเริ่มจากการเทมอร์ตาร์ที่ไม่มีเศษพลาสติกผสม สูง 15 mm ลงในแม่พิมพ์ขนาด $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$ เพื่อทำส่วนของชั้นผิวหน้า แล้วทำการกระทุ้ง จากนั้นนำแบบหล่อชั่วคราวขนาด $80 \times 80 \times 40 \text{ mm}^3$ ไว้บริเวณกึ่งกลางแม่พิมพ์ จากนั้นเติมมอร์ตาร์ที่ไม่มีเศษพลาสติกผสมลงในช่องว่างรอบนอกจนได้ระดับความสูงที่กำหนด พร้อมกระทุ้ง จากนั้นดึงแบบหล่อชั่วคราวออกจะเกิดช่องว่างตรงกลางขึ้น ในขณะที่มอร์ตาร์ชั้นนอกยังไม่ก่อตัวทำการเติมมอร์ตาร์ผสมเศษพลาสติกลงไปในช่วงว่างดังกล่าวทันทีและกระทุ้งให้แน่น ขั้นตอนสุดท้ายทำการเทมอร์ตาร์สูตรปราศจากพลาสติกปิดทับผิวชั้นบนสุดจนเต็มแม่พิมพ์ กระทุ้งและปาดผิวหน้าให้เรียบ ดำเนินการถอดแบบและนำชิ้นงานไปบ่มน้ำสะอาดต่อเนื่องจนครบอายุทดสอบที่ 7 วัน และ 28 วัน

2.3 การทดสอบคุณสมบัติ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด ดำเนินการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับระเบียบวิธีตามมาตรฐานสากลและมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดและเกณฑ์การทดสอบดังนี้

2.3.1 การทดสอบกำลังต้านแรงอัด (Compressive Strength Test) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (American Society for Testing and Materials, 2021) ด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ขนาด 300 ตัน (ADR Auto 3000 BS Compression Machine model EL 36-4160/01) โดยกำหนดให้ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชิ้นต่อหนึ่งสัดส่วนผสม เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่อายุการบ่มที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน การทดสอบนี้ครอบคลุมทั้งชิ้นงานมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ และชิ้นงานคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้น

2.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Test) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 (Thai Industrial Standards Institute (TISI), 1974) กระบวนการทดสอบใช้ชิ้นงานตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์จำนวน 3 ชิ้น และชิ้นงานคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้นจำนวน 5 ชิ้น ต่อหนึ่งสัดส่วนผสมที่อายุการบ่ม 28 วัน

2.3.3 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและมิติของบล็อกปูพื้น ดำเนินการผ่านการตรวจพินิจร่วมกับการวัดขนาดมิติกว้าง ยาว และหนา ของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ความละเอียดสูง เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของมิติให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐาน มอก. 827-2531 กำหนด โดยใช้ชิ้นงานคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้นจำนวน 5 ชิ้น ต่อหนึ่งสัดส่วนผสมที่อายุการบ่ม 28 วัน

Results

การทดสอบเพื่อประเมินความสัมพันธ์ของสัดส่วนผสมในการค้นหาอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้น ดำเนินการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของชิ้นงานตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน โดยอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของวัสดุแสดงรายละเอียดไว้ใน Table 3 ผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 2.1.1 เผยให้เห็นว่า สัดส่วนทดลองที่ใช้ทรายหยาบเป็นมวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียว ($F_s 0.0 C_s 3.0$) ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ต่ำกว่ากับ 353.6 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ดังแสดงใน Figure 5) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกปูพื้น (มอก. 827-2531) ที่ระบุค่ากำลังต้านทานแรงอัดขั้นต่ำไว้ที่ไม่น้อยกว่า 356.8 ksc (หรือ 35 MPa) พบว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยมีความใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว

สำหรับการทดสอบในขั้นตอนที่ 2.1.2 ซึ่งมีการปรับลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) จาก 0.50 ลงเหลือ 0.35 โดยคงสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมทรายหยาบไว้ที่อัตราส่วน 1:3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดถูกแสดงเปรียบเทียบไว้ใน Figure 5 ผลการทดลองระบุว่า ที่สัดส่วนควบคุมที่ไม่ใช้สารลดน้ำพิเศษ (ร้อยละ 0) และสัดส่วนที่ใช้ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ชิ้นงานแสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่ลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดเริ่มต้นในขั้นตอนที่ 2.1.1 (W/C 0.50) แต่เมื่อมีการปรับเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษขึ้นสู่ระดับร้อยละ 0.7 และร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีการปรับตัวเพิ่มขึ้น โดยที่อายุการบ่ม 7 วัน ชิ้นงานให้ค่าเท่ากับ 461.6 ksc และ 448.1 ksc ตามลำดับ และเมื่อชิ้นงานมีอายุการบ่มครบถ้วนโครงสร้างครบ 28 วัน ผลการทดลองยืนยันว่า สัดส่วนการใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.7 ให้กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มสูงถึง 508.6 ksc และสูงสุดที่ 562.9 ksc

ในสัดส่วนการใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.0 ซึ่งทั้งสองสัดส่วนทดลองนี้มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่สูงกว่าเกณฑ์ควบคุมขั้นต่ำของมาตรฐาน มอก. 827-2531

อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจพินิจพบว่าที่ระดับการใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เกิดลักษณะพฤติกรรมการเอื้อมน้ำบริเวณผิวหน้าด้านบนของชิ้นงานอย่างชัดเจน ดังแสดงใน Figure 6 โดยที่ส่วนผสมมอร์ตาร์สดมีลักษณะนิ่มและการไหลตัวที่สูง ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดมือ ที่จำเป็นต้องถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ต้องมีการคงรูปทรงที่ดี ในส่วนของผลการทดสอบคู่ขนานที่ประเมินการใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละ 0.7 ร่วมกับกลุ่มมวลรวมที่มีทรายละเอียดเป็นองค์ประกอบ พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน แต่มีเพียงอัตราส่วนทรายละเอียดต่อทรายหยาบที่สัดส่วน 1.5:1.5 (Fs1.5) เพียงอัตราส่วนเดียวเท่านั้นที่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกปูพื้น

Table 3 Mix proportions by weight of mortar block specimens

Samples	Hydraulic cement (kg)	Water (kg)	Aggregate (kg)			Type of plastic	Plasticizer (kg)	Methodology
			Fine sand	Coarse sand	Plastic			
Fs3.0Cs0.0	1	0.50	3.00	0	-	-	-	2.1.1
Fs1.5Cs1.5	1	0.50	1.50	1.50	-	-	-	
Fs0.0Cs3.0	1	0.50	0	3.00	-	-	-	
P0.000	1	0.35	-	3.00	-	-	0	2.1.2
P0.005	1	0.35	-	3.00	-	-	0.005	
P0.007	1	0.35	-	3.00	-	-	0.007	
P0.010	1	0.35	-	3.00	-	-	0.010	
Fs3.0	1	0.35	3.00	0	-	-	0.007	
Fs1.5	1	0.35	1.50	1.50	-	-	0.007	
LDPE0.05A	1	0.35	-	2.95	0.05	LDPE	0.007	2.1.3
LDPE0.10A	1	0.35	-	2.90	0.10	LDPE	0.007	
HDPE0.05A	1	0.35	-	2.95	0.05	HDPE	0.007	
HDPE0.10A	1	0.35	-	2.90	0.10	HDPE	0.007	
PET0.05A	1	0.35	-	2.95	0.05	PET	0.007	
PET0.10A	1	0.35	-	2.90	0.10	PET	0.007	
LDPE0.05B	1	0.35	-	2.95	0.05	LDPE	0.007	
LDPE0.10B	1	0.35	-	2.90	0.10	LDPE	0.007	
HDPE0.05B	1	0.35	-	2.95	0.05	HDPE	0.007	
HDPE0.10B	1	0.35	-	2.90	0.10	HDPE	0.007	

Note: All components are expressed as weight ratios relative to 1 kg of hydraulic cement.

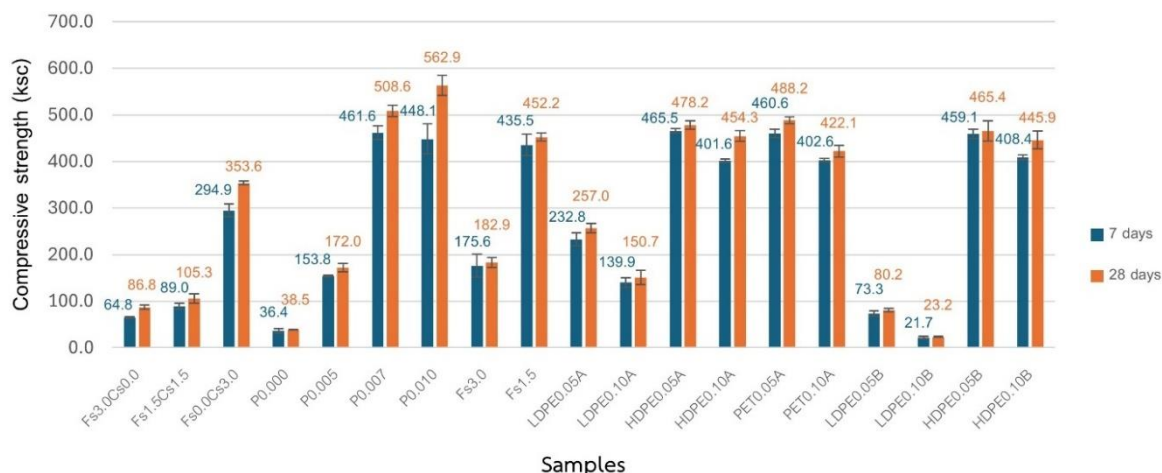


Figure 5 Compressive strength of mortar blocks in methodology 2.1

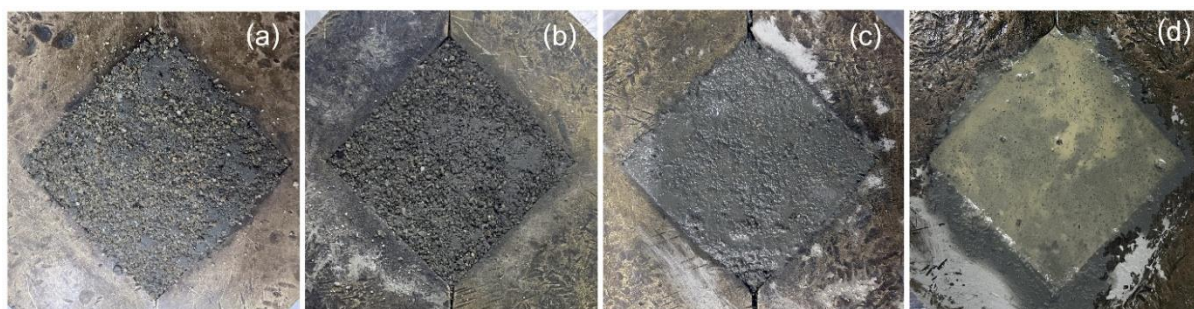


Figure 6 Appearance of specimens during preparation: (a) P0.000, (b) P0.005, (c) P0.007, and (d) P0.010

จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2.1.3 ซึ่งเป็นการศึกษาอิทธิพลการแทนที่มวลรวมด้วยเศษพลาสติก โดยเลือกใช้ อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักฐานของ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก:น้ำ:ทรายหยาบ:สารลดน้ำพิเศษ ไว้ที่สัดส่วนคงที่เท่ากับ 1:0.35:3.00:0.007 และทำการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษพลาสติกบดในสัดส่วนร้อยละ 1.67 และร้อยละ 3.33 โดย น้ำหนักของมวลรวม (เทียบเท่าสัดส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับ) ครอบคลุมเศษพลาสติก 2 ช่วงขนาด คือ ขนาดเล็กกว่า 5 mm (LDPE, HDPE และ PET) และขนาด 5 – 15 mm (LDPE และ HDPE) โดยในกลุ่ม พลาสติก PET ขนาด 5 – 15 mm ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากแนวโน้มพฤติกรรมเชิงกลทางลบที่เด่นชัดซึ่งตรวจพบใน กลุ่มพลาสติก LDPE และ HDPE ขนาดใหญ่จากการทดลองเบื้องต้น เพราะจากการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดที่ แสดงใน Figure 5 ในกลุ่มชิ้นงานที่ผสมเศษพลาสติก LDPE และ HDPE ผลการทดลองเผยให้เห็นอิทธิพลจากขนาดอย่าง เด่นชัด โดยชิ้นงานที่ใช้เศษพลาสติกขนาดเล็กกว่า 5 mm มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่สูงกว่าชิ้นงานที่ใช้เศษ พลาสติกขนาดใหญ่ 5 – 15 mm ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดในกลุ่มชิ้นงานที่ผสมเศษพลาสติก ประเภท LDPE นอกจากนี้ชิ้นงานมอร์ตาร์บดที่ผสมเศษพลาสติกประเภท LDPE ทั้งสองขนาด แสดงค่ากำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ยที่ต่ำกว่าเกณฑ์ควบคุมขั้นต่ำของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 827-2531) ในทางตรงกันข้าม ชิ้นงานที่ผสมเศษพลาสติกประเภท HDPE และ PET กลับให้ผลลัพธ์ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่สูงกว่าเกณฑ์

ควบคุมมาตรฐานอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาแนวโน้มปริมาณการแทนที่พบว่า การเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ของเศษพลาสติกจากร้อยละ 1.67 ขึ้นเป็นร้อยละ 3.33 โดยน้ำหนักมวลรวม ส่งผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบมีแนวโน้มลดลง

เมื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพภายในชิ้นงานดังแสดงใน Figure 7 พบว่า บริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ใช้เศษพลาสติกบดขนาดเล็ก เนื้อซีเมนต์เพสต์สามารถแทรกตัวเข้าสู่ช่องว่างระหว่างเศษพลาสติกได้อย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่โครงสร้างภายในของชิ้นงานที่ผสมเศษพลาสติกบดขนาดใหญ่ ตรวจพบโพรงอากาศและช่องว่างปรากฏขึ้นบริเวณโดยรอบชิ้นส่วนเศษพลาสติก จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างเศษพลาสติกและมอร์ตาร์ ภายในชิ้นงานบล็อกทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงใน Figure 8 ตรวจพบพฤติกรรมทางกายภาพที่สำคัญ 3 รูปแบบ ได้แก่ ในภาพ Figure 8(a) สังเกตเห็นลักษณะการห่อหุ้มของเนื้อมอร์ตาร์บนพื้นผิวพลาสติกอย่างสม่ำเสมอ โดยลักษณะพื้นฐานของรอยแยกขนาดเล็กบนเนื้อมอร์ตาร์มีความสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของเศษพลาสติก ซึ่งบ่งชี้ถึงระยะห่างระหว่างผิวสัมผัสที่น้อยมากและเกิดการยึดเกาะเชิงกลขึ้น และยังพบการยึดเกาะเชิงกลในลักษณะส่วนของมอร์ตาร์เข้าไปห่อหุ้มและยึดติดแน่นกับบริเวณปลายรีของเศษพลาสติกที่เกิดจากแรงตึงเชือกในกระบวนการบดย่อยเชิงกลได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพ Figure 8(b) และในภาพ Figure 8(c) ซึ่งเป็นโครงสร้างภายในชิ้นงานที่ผสมพลาสติก LDPE ตรวจพบช่องว่างขนาดใหญ่และยังพบการสะสมรวมตัวกันของกลุ่มผลึกรูปเข็ม (Needle-like shape) จำนวนมากของผลึกเอททรีนไกต์ ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผสมพลาสติก HDPE และ PET ณ อายุการบ่ม 28 วัน ไม่ตรวจพบกลุ่มผลึกรูปเข็มในลักษณะนี้

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดระหว่างอายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ดังแสดงใน Table 4 จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานทดสอบในทุกสัดส่วนผสมมีการพัฒนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงตั้งแต่ในช่วงอายุการบ่มระยะแรก (7 วัน) และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ลดลงในช่วงอายุการบ่มระยะหลัง (ระหว่างอายุ 7 วัน ถึง 28 วัน)

Table 4 Compressive strength at 7 days as a percentage of 28 days strength for mortar specimens

Samples	% Compressive strength	Samples	% Compressive strength	Samples	% Compressive strength	Samples	% Compressive strength
Fs3.0Cs0.0	74.7	P0.000	94.6	LDPE0.05A	90.6	LDPE0.05B	91.4
Fs1.5Cs1.5	84.5	P0.005	89.4	LDPE0.10A	92.8	LDPE0.10B	93.5
Fs0.0Cs3.0	83.4	P0.007	90.8	HDPE0.05A	97.4	HDPE0.05B	98.6
		P0.010	79.6	HDPE0.10A	88.4	HDPE0.10B	91.6
		Fs3.0	96.0	PET0.05A	94.3		
		Fs1.5	96.3	PET0.10A	95.4		



Figure 7 Internal views of mortar specimens incorporating plastic waste: LDPE fragments at (a) < 5 mm, 0.05%, (b) < 5 mm, 0.10%, (c) 5 – 15 mm, 0.05%, and (d) 5 – 15 mm, 0.10%; HDPE fragments at (e) < 5 mm, 0.05%, (f) < 5 mm, 0.10%, (g) 5 – 15 mm, 0.05%, and (h) 5 – 15 mm, 0.10%; and PET fragments at (i) < 5 mm, 0.05%, (j) < 5 mm, 0.10%

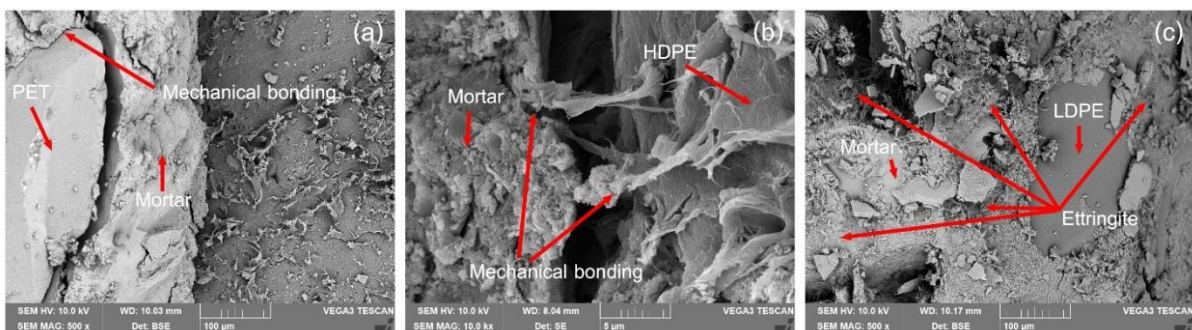


Figure 8 SEM images of the interfacial transition zone between mortar and plastic fragments: (a) PET, (b) HDPE, and (c) LDPE

ในส่วนของการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์บล็อกที่อายุการบ่มครบ 28 วัน ดังแสดงใน Figure 9 พบว่า ในกลุ่มชุดตัวอย่างควบคุมการแปรผันของปริมาณสารลดน้ำพิเศษ (P0.000, P0.005, P0.007 และ P0.010) ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสม สำหรับอิทธิพลของประเภทเศษพลาสติกที่มีต่อพฤติกรรมทางกายภาพ ผลการทดลองยืนยันอย่างเห็นได้ชัดว่า ชุดตัวอย่างมอร์ตาร์บล็อกที่มีส่วนผสมของเศษพลาสติกชนิด LDPE มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าชุดตัวอย่างที่มีส่วนผสมพลาสติกชนิด HDPE และ PET ในทุกช่วงขนาดและทุกสัดส่วนการแทนที่อย่างชัดเจน

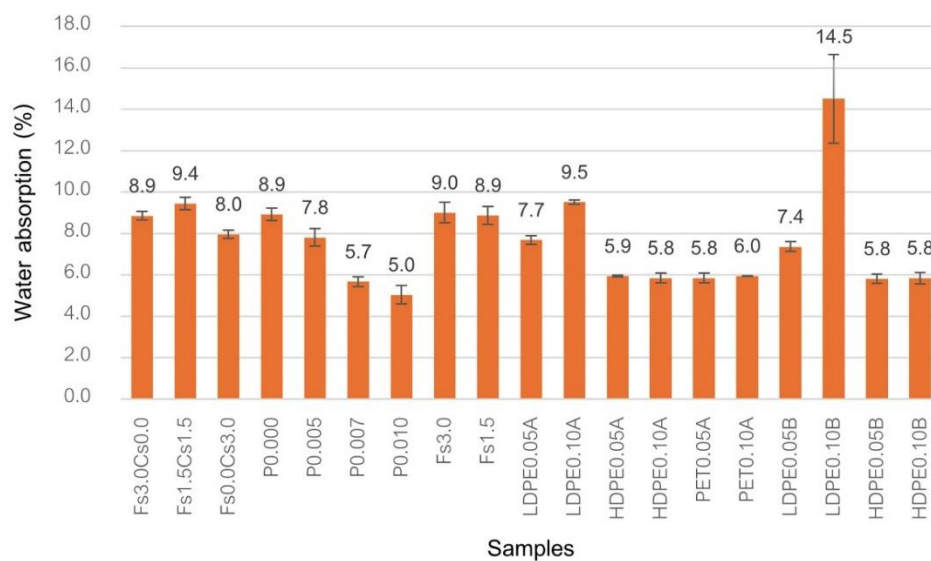


Figure 9 Water absorption of mortar specimens at 28 days

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและมิติของบล็อกปูพื้นสองชั้นที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดมือ โดยใช้สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักตามรายละเอียดใน Table 5 (เจาะจงการทดลองในกลุ่มเศษพลาสติก HDPE และ PET ขนาดเล็กกว่า 5 mm) ผลการทดลองพบว่า สามารถดำเนินการขึ้นรูปขึ้นงานได้สมบูรณ์ทั้ง 2 รูปแบบ ดังแสดงใน Figure 10 โดยขึ้นงานบล็อกปูพื้นสองชั้นทั้งหมดตรวจพบค่าความคลาดเคลื่อนทางมิติไม่เกิน ± 2 mm ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 827-2531 ระบุไว้ ในการประเมินสมบัติทางกลและพฤติกรรมการแตกร้าวเสียหายเชิงโครงสร้างภายใต้แรงกดทำลาย ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดดังแสดงใน Figure 11(a) พบว่า ในกลุ่มขึ้นงานที่ผลิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแยกส่วน ขึ้นงานตัวอย่าง HDPE0.1-2LA และ PET0.1-2LA แสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่ต่ำกว่าเกณฑ์ควบคุมขั้นต่ำของมาตรฐาน มอก. 827-2531 เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติที่พบหลังการทดสอบใน Figure 12 พบว่าเกิดการแตกและแยกตัวออกจากกันอย่างชัดเจนตามระนาบแนวรอยต่อระหว่างโครงสร้างชั้นในและชั้นนอก โดยเฉพาะบริเวณส่วนชั้นนอกที่เกิดการหลุดแยกตัวออกมาเป็นแผ่น แต่ในขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปพร้อมกัน ขึ้นงานตัวอย่าง HDPE0.1-2LB และ PET0.1-2LB มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 481.6 ksc และ 499.2 ksc สอดคล้องตามข้อกำหนดของมาตรฐานโดยฐานการวิบัติของขึ้นงานแสดงให้เห็นรอยแตกร้าวที่ลุกลามลึกเข้าไปทะลุผ่านระนาบผิวสัมผัสเข้าไปในโครงสร้างส่วนเนื้อชั้นในจนสามารถสังเกตเห็นเศษพลาสติกได้อย่างชัดเจน โดยไม่เกิดการแยกชั้นหลุดร่อนเฉพาะส่วนเปลือกนอกเพียง

อย่างเดียว สำหรับผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้นแสดงไว้ใน Figure 11(b) โดยผลการทดลองยืนยันว่า ชิ้นงานตัวอย่าง HDPE0.1-2LB และ PET0.1-2LB ที่ผลิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปพร้อมกันมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำโดยน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 4.4 และ 3.7 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 5 ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนักตามมาตรฐาน มอก. 2035-2543 (Thai Industrial Standards Institute (TISI), 2000)

Table 5 Composition of inner and outer layers in dual-layer paving block specimens

Layer	Hydraulic cement (kg)	Water (kg)	Aggregate (kg)			Type of plastic	Plasticizer (kg)
			Fine sand	Coarse sand	Plastic		
Inner layer	1	0.35	-	2.90	0.10	HDPE, PET	0.007
Outer layer	1	0.35	-	3.00	-	-	0.007



Figure 10 Dual-layer paving blocks fabricated via hand compaction: (a) perspective view, (b) top view, and (c) side view

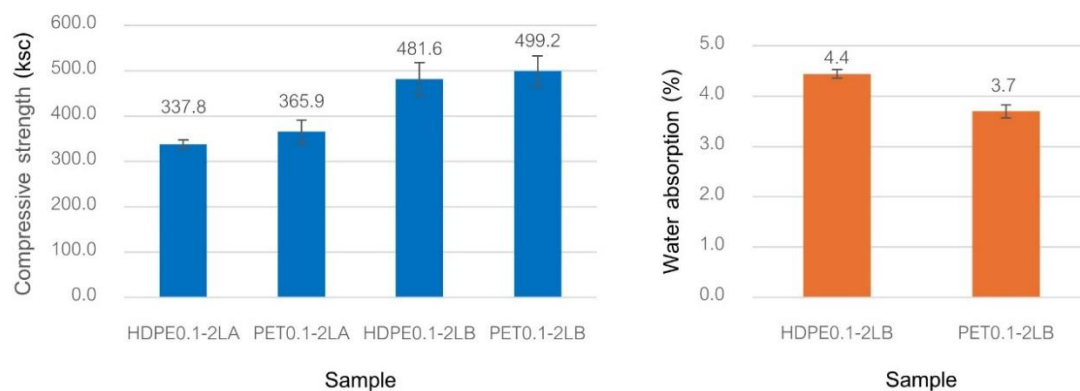


Figure 11 (a) Compressive strength and (b) water absorption of dual-layer paving blocks with plastic-incorporated inner layers, fabricated using the simultaneous casting method

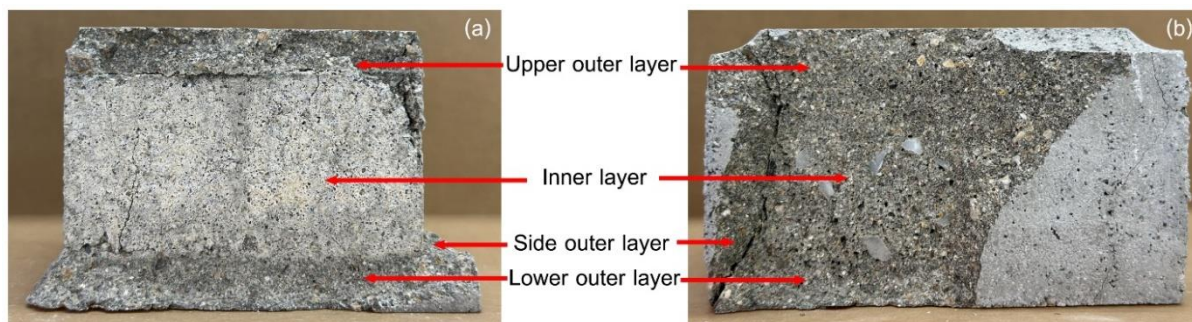


Figure 12 Failure patterns of dual-layer paving blocks after compressive strength testing: (a) specimen produced by sequential casting, and (b) specimen produced by simultaneous casting

Discussion

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า มวลรวมที่เป็นทรายหยาบมีอิทธิพลเชิงบวกต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของชิ้นงานมากกว่าทรายละเอียด ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของทรายหยาบที่มีช่วงการกระจายตัวที่เหมาะสมตามทฤษฎีการจัดเรียงตัวของมวลรวม และลักษณะทางกายภาพของมวลรวมทั้งสองชนิดที่มีความเหลี่ยมคมและพื้นผิวขรุขระ จึงช่วยส่งเสริมกลไกการยึดเกาะเชิงกลบริเวณผิวสัมผัสได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในโครงสร้างมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนผสมที่ออกแบบในระยะเริ่มต้นนี้ยังมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยที่ไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดขั้นต่ำที่มาตรฐานกำหนดไว้ ข้อมูลสัดส่วนผสมนี้จึงถูกจัดไว้เป็นอัตราส่วนฐานเพื่อนำไปสู่กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลในระยะถัดไป โดยการประยุกต์ใช้สารลดน้ำพิเศษในกลุ่มโพลีคาร์บอกซีเลท ซึ่งมีศักยภาพในการปรับลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำลง โดยกลไกดังกล่าวจะช่วยลดปริมาตรช่องว่างอิสระภายในซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นและพัฒนาค่ากำลังความแข็งแรงให้สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมในลำดับต่อไป

ในขั้นตอนการประเมินผลของสารลดน้ำพิเศษ การลดลงของกำลังต้านทานแรงอัดในสัดส่วนควบคุมที่ไม่ใช้สารลดน้ำพิเศษและสัดส่วนที่ใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ภายหลังการปรับลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ลงเหลือ 0.35 นั้น สามารถอธิบายได้ว่าการลดปริมาณน้ำอิสระในระบบที่ปราศจากสารช่วยกระจายตัวหรือมีไม่เพียงพอ ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ดำเนินไปได้อย่างไม่สมบูรณ์และลดทอนประสิทธิภาพเชิงกลของชิ้นงาน แต่ในขณะที่ระดับการใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 0.7 และร้อยละ 1.0 การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงอัด มาจากกลไกการผลักดันเชิงสเตอริกของโมเลกุลของสารลดน้ำพิเศษซึ่งช่วยสลายการรวมกลุ่มของอนุภาคปูนซีเมนต์ ส่งผลให้น้ำอิสระภายในระบบเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์แม้ในสถานะที่มีปริมาณน้ำต่ำ สอดคล้องกับข้อค้นพบของ Suweero & Khamput (2020) ที่ระบุว่า การลดอัตราส่วน W/C ควบคู่กับการใช้สารลดน้ำพิเศษ สามารถเพิ่มกำลังอัดของวัสดุผสมพลาสติกได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นปัจจัยให้ชิ้นงานทดสอบมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดได้สูงกว่าเกณฑ์ควบคุมของมาตรฐาน มอก. 827-2531 อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการยึมน้ำและความอ่อนตัวของมอร์ตาร์ที่ตรวจพบในระดับการใช้สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.0 บ่งชี้ถึงสถานะอิ่มตัวของสารเติมแต่ง ซึ่งส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์และน้ำอิสระแยกตัวลอยสูงขึ้นสู่ผิวน้ำในระหว่างการขึ้นรูป ส่วนผสมที่มีความเหลวสูงในลักษณะนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกปูพื้นด้วยเทคนิค

การอัดมือที่ต้องการการคงรูปทรงทันทีหลังถอดแบบ แต่อาจมีศักยภาพหรือความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการขึ้นรูปรูปแบบอื่น เช่น วิธีการหล่อในแบบเพื่อรอการแข็งตัว หรือในงานโครงสร้างที่ต้องการคอนกรีตที่มีความสามารถในการไหลตัวสูง นอกจากนี้ คุณลักษณะของมวลรวมมีอิทธิพลร่วมต่อคุณสมบัติทางกล โดยค่ากำลังต้านทานแรงอัดแปรผันตามปริมาณของทรายอย่างชัดเจน ซึ่งอธิบายได้จากค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายละเอียดที่มีค่าไม่เหมาะสมสำหรับงานวิศวกรรมโครงสร้างตามเกณฑ์มาตรฐานที่ควรอยู่ระหว่าง 2.30 - 3.20 (CPAC Concrete Academy, 2000) ผลลัพธ์ดังกล่าวจึงยืนยันถึงความสำคัญของการควบคุมสัดส่วนคละละเคละเกิดของมวลรวม ร่วมกับการใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่สมดุล เพื่อสร้างความหนาแน่นเชิงโครงสร้างที่ช่วยส่งเสริมให้ชิ้นงานสามารถพัฒนากำลังความแข็งแรงสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐาน

ในส่วนของพฤติกรรมทางกลของชิ้นงานมอร์ตาร์ผสมพลาสติก จากผลค่ากำลังต้านแรงอัดและหลักฐานทางโครงสร้าง สามารถนำมาอภิปรายกลไกความแข็งแรงและพฤติกรรมของวัสดุได้ดังนี้ กลไกการยึดเกาะและความต้านทานแรงอัดที่ลดลงแปรผันตรงตามสัดส่วนการแทนที่ด้วยเศษพลาสติกที่เพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้จากพื้นผิวภายนอกของเศษพลาสติกมีความเรียบ ลื่น และเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้แรงยึดเกาะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเศษพลาสติกและซีเมนต์เพสต์เป็นเพียงกลไกการขัดประสานทางกายภาพเป็นพันธะเชิงกลที่ไม่สมบูรณ์ เกิดพื้นที่ระนาบอ่อนแอภายในเนื้อวัสดุผสม พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับข้อค้นพบในงานวิจัยของ Suweero & Khamput (2020) รวมถึง Khamput *et al.* (2024) ที่ระบุว่าการเพิ่มปริมาณขยะพลาสติกในอิฐบล็อกส่งผลกระทบโดยตรงต่อการลดลงของความสามารถในการรับแรงอัด ในด้านของขนาดและการกระจายตัวของเศษพลาสติก เศษพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 mm มีลักษณะการกระจายตัวภายในชิ้นงานได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอมากกว่า ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเข้าไปแทรกตัวเต็มเต็มช่องว่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ความหนาแน่นเชิงโครงสร้างของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม เศษพลาสติกที่มีขนาดใหญ่ในช่วง 5 – 15 mm มักจะขวางทางกายภาพขัดขวางการไหลตัวของซีเมนต์เพสต์ในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป ก่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความบกพร่องและสร้างโพรงอากาศภายใน ซึ่งโพรงอากาศเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าวเชิงโครงสร้างขึ้นในที่สุด

เมื่อพิจารณาอิทธิพลในส่วนชนิดของเศษพลาสติก พบว่าเศษพลาสติกชนิด HDPE และ PET มีลักษณะพื้นฐานเป็นแผ่นแข็งและมีความหนาแข็งมิดิที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดความเสถียรทางรูปร่างสูงภายใต้แรงอัดเชิงกลในขั้นตอนการขึ้นรูป และเอื้อให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเข้าไปหล่อลื่นได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ โดยธรรมชาติของวัสดุ HDPE และ PET มีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า LDPE จึงส่งผลให้เกิดกลไกการถ่ายเทแรงร่วมกับเนื้อมอร์ตาร์รอบข้างภายในวัสดุผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้าม ชิ้นงานที่ผสมเศษพลาสติก LDPE แสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานอย่างชัดเจน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่เป็นแผ่นฟิล์มบางและมีพื้นผิวที่เรียบมัน ซึ่งขัดขวางการก่อตัวและการพัฒนาความหนาแน่นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพลาสติกและมอร์ตาร์ สอดคล้องกับข้อค้นพบของ Saikia & de Brito (2012) ยิ่งไปกว่านั้น ในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป เศษพลาสติก LDPE มักเกิดพฤติกรรมการพับตัวและเกิดการคลายตัวยืดหยุ่นกลับเมื่อแรงอัดภายนอกสิ้นสุดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้เกิดโพรงอากาศขนาดเล็กที่มีซีเมนต์เพสต์หล่อลื่นอย่างเบาบางบริเวณรอยพับ ทำให้เกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ที่แยกตัวบริเวณรอยต่อสัมผัส และกลายเป็นจุดกำเนิดความเค้นที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกด

ทั้งนี้ ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคได้ช่วยยืนยันกลไกการยึดเกาะแบบพันธะเชิงกลที่เกิดขึ้นจากการหล่อหุ้มเศษพลาสติก โดยเนื้อมอร์ตาร์ได้ดี และการขัดหุ้มประสานบริเวณปลายรีวของเศษพลาสติกที่เกิดจากแรงตัดเฉือนในกระบวนการบดย่อยเชิงกล ซึ่งทำหน้าที่สร้างจุดยึดตรึงเชิงโครงสร้าง ส่งผลให้ชิ้นงานผสม HDPE และ PET สามารถรับแรงอัดได้ในระดับสูง สำหรับในชิ้นงานผสม LDPE การตรวจพบผลึกเอททรีนโกต์ในปริมาณมากภายในช่องว่าง เป็นข้อบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการพัสดุและการเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ตั้งแต่ช่วงแรกของการอัดขึ้นรูป ทำให้เกิดพื้นที่ว่างที่ส่งเสริมการตกตะกอนของผลึกเอททรีนโกต์แทนที่จะเกิดการก่อตัวทางโครงสร้างที่สมบูรณ์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Saikia & de Brito (2012) ที่ระบุว่าเขตเชื่อมต่อที่กว้างเกินไปในวัสดุผสมพลาสติก จะเป็นจุดอ่อนที่ทำให้กำลังต้านแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอธิบายได้ว่าทำไม LDPE ถึงเป็นพลาสติกเพียงชนิดเดียวที่ไม่ผ่านเกณฑ์ควบคุมมาตรฐานในงานวิจัยนี้ แม้จะใช้อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักและกระบวนการผลิตที่เป็นระบบเดียวกัน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน พฤติกรรมการเจริญเติบโตเชิงกลที่พุ่งสูงตั้งแต่อายุการบ่มระยะแรก (7 วัน) ชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันหลักของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการบ่ม ก่อให้เกิดโครงสร้างผลึกเชื่อมประสานหลักที่แข็งแรงตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ก่อนที่อัตราความเร็วของปฏิกิริยาจะชะลอตัวลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัดที่สุดในกลุ่มชิ้นงานที่มีการใช้สารลดน้ำพิเศษ

ในส่วนของการวิเคราะห์การทดสอบการดูดซึมน้ำ ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sripumun *et al.* (2016) ที่ระบุว่าการประยุกต์ใช้สารลดน้ำพิเศษมีส่วนช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการปรับปรุงความหนาแน่นทางโครงสร้างภายใน ปรากฏการณ์ดังกล่าวสังเกตพบพฤติกรรมได้อย่างเด่นชัดในกลุ่มชุดตัวอย่าง P0.000, P0.005, P0.007 และ P0.010 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำและค่ากำลังต้านทานแรงอัดของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่มีระดับกำลังต้านทานแรงอัดสูงจะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อโครงสร้างมอร์ตาร์มีความหนาแน่นสูงและมีช่องว่างน้อยลง จะส่งผลให้จุดอ่อนภายในเนื้อวัสดุลดลง ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถรับและกระจายแรงกดภายนอกได้เพิ่มขึ้น การประยุกต์ใช้สารลดน้ำพิเศษจึงเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยยกระดับคุณสมบัติทั้งสองด้านพร้อมกัน ปรากฏการณ์เชิงความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมในกรณีของชิ้นงานผสมเศษพลาสติก LDPE ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดได้อย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างภายในมีช่องว่างขนาดใหญ่ที่เกิดจากพฤติกรรมของการพัสดุของแผ่นฟิล์มพลาสติกและการยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์บริเวณระนาบผิวสัมผัสเชื่อมต่อระหว่างมอร์ตาร์กับพลาสติก ช่องว่างในโครงสร้างเหล่านี้นอกจากจะทำหน้าที่เป็นพื้นที่กักเก็บน้ำอิสระ ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำพุ่งสูงขึ้น แล้วยังทำหน้าที่เป็นจุดศูนย์รวมความเค้นที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวและเร่งการวิบัติของชิ้นงานให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ชิ้นงานผสมเศษพลาสติก LDPE มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ต่ำกว่าเกณฑ์ควบคุมมาตรฐานอย่างรุนแรง แม้จะมีการนำสารลดน้ำพิเศษเข้ามารวมด้วยก็ตาม

สำหรับการขึ้นรูปบล็อกปูพื้นสองชั้น ผลการทดสอบเชิงกลพบว่า เทคนิคการขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงาน โดยสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแยกส่วนแสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดต่ำกว่าเกณฑ์ควบคุมมาตรฐานนั้น สามารถอธิบายได้จากการเกิดรอยต่อคอนกรีตเย็นระหว่างโครงสร้างแกนในที่ผ่านการแข็งตัวล่วงหน้าแล้วกับมอร์ตาร์ชั้นเปลือกนอกที่หล่อขึ้นใหม่ ลักษณะพื้นผิวที่เรียบและแข็งตัวแล้วของแกนใน ส่งผลให้เกิดระนาบผิวสัมผัสเชื่อมต่อที่อ่อนแอและมีแรงยึดเกาะต่ำ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกดภายนอกจึงเกิดการ

สะสมความเค้นบริเวณรอยต่อและเกิดการแยกตัวหลุดร่อนออกจากกัน ก่อนที่วัสดุทั้งสองชั้นจะสามารถรับแรงอัดร่วมกันได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้าม เทคนิคการขึ้นรูปพร้อมกันช่วยสร้างพันธะการยึดเกาะแบบเนื้อเดียว เนื่องจากวัสดุทั้งสองชั้นเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและพัฒนาโครงสร้างผลึกเชื่อมประสานไปพร้อมกัน ซึ่งช่วยขจัดโอกาสการเกิดฟิล์มน้ำอิสระหรือสิ่งปนเปื้อนบริเวณผิวสัมผัส ซึ่งมักทำหน้าที่เป็นจุดอ่อนทางโครงสร้าง สอดคล้องกับการศึกษาของ Beushausen & Alexander (2008) ที่ระบุว่าประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างระนาบชั้นคอนกรีตจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อวัสดุทั้งสองส่วนมีอายุการก่อตัวที่ใกล้เคียงกัน พฤติกรรมดังกล่าวได้รับการยืนยันด้วยลักษณะการวิบัติของชิ้นงานที่รอยแตกร้าวมีการลุกลามลึกเข้าไปถึงโครงสร้างชั้นแกนในโดยไม่ปรากฏรอยแยกชั้น แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทแรงที่ดีกว่า และเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ชิ้นงานมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ ค่าการดูดซึมน้ำในระดับต่ำที่สามารถผ่านเกณฑ์ควบคุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับงานหนัก เป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมถึงความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีศักยภาพในการช่วยลดโอกาสที่น้ำและปัจจัยอื่นจากสภาวะแวดล้อมภายนอกจะซึมผ่านเข้าไปถึงชั้นแกนผสมพลาสติกด้านใน โดยโครงสร้างชั้นเปลือกนอกที่ไม่มีการแทนที่ด้วยพลาสติกจะทำหน้าที่ช่วยปกป้องเศษพลาสติกภายในจากการเสื่อมสภาพทางแสงด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต และการกัดเซาะทางกายภาพ กลไกการกักเก็บนี้จึงชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้และศักยภาพของชิ้นงานในการช่วยลดแนวโน้มการปลดปล่อยไมโครพลาสติกทุติยภูมิสู่ระบบนิเวศระหว่างการใช้งานจริงได้ งานวิจัยนี้จึงพิสูจน์ได้ว่าเทคนิคการขึ้นรูปพร้อมกันเป็นแนวทางที่มีความน่าจะเป็นสูงในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ควบคู่กับการคงไว้ซึ่งคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่น่าเชื่อถือสำหรับการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน เช่น การนำไปใช้เป็นวัสดุทำทางเดินหรือลานกิจกรรมในชุมชน

Conclusions

จากผลงานวิจัย สามารถพิสูจน์ความเป็นไปได้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดมีร่วมกับการประยุกต์ใช้สารลดน้ำพิเศษกลุ่มโพลีคาร์บอกซีเลท โดยโครงสร้างบล็อกปูพื้นแบบสองชั้น ช่วยกักเก็บเศษพลาสติกไว้ภายในโครงสร้างแกนกลาง เพื่อลดแนวโน้มการปลดปล่อยขยะไมโครพลาสติกสู่ระบบนิเวศระหว่างการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาพบว่า สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างชั้นผิวนอก (ไม่มีเศษพลาสติกผสม) คือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก:น้ำ:ทรายหยาบ:สารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 1:0.35:3.00:0.007 ซึ่งให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์ควบคุมมาตรฐาน มอก. 827-2531 อย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของโครงสร้างชั้นในที่ผสมเศษพลาสติก มีพลาสติกชนิด HDPE และ PET ขนาดเล็กกว่า 5 mm เท่านั้นที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ทดแทนมวลรวม โดยจำกัดสัดส่วนการแทนที่มวลรวมที่เหมาะสมไว้ที่ร้อยละ 1.67 และร้อยละ 3.33 โดยน้ำหนักของมวลรวม (เทียบเท่าสัดส่วนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามลำดับ) แต่ปริมาณการแทนที่พลาสติกที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมีค่าลดลงในทุกชุดทดลอง และเทคนิคการขึ้นรูปพร้อมกันเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกปูพื้นสองชั้นที่ผสมเศษพลาสติก HDPE และ PET ที่สัดส่วนการแทนที่ร้อยละ 3.33 โดยน้ำหนักของมวลรวม มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดและอัตราการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกปูพื้นกำหนด และเพื่อยกระดับองค์ความรู้ให้มีความสมบูรณ์ขึ้น แนวทางการศึกษาในอนาคตจึงควรมุ่งเน้นไปที่การทดสอบความคงทนระยะยาวของผลิตภัณฑ์ เช่น ความทนทานต่อสภาวะการขัดสีทางกล และการประเมินอัตราการหลุดร่อนเชิงอนุภาคของ

ไมโครพลาสติกภายใต้สภาวะเร่งเร้าทางสิ่งแวดล้อมจริง ร่วมกับการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปให้มีอัตราการผลิตที่รวดเร็วขึ้น ขยายโอกาสในการนำไปประยุกต์ใช้งานเชิงพาณิชย์ในโครงสร้างพื้นฐานระดับชุมชนอย่างยั่งยืน

Acknowledgments

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) งบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2567 กลุ่มกรีนโรด (Green Road) ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือเพื่อประกอบการวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รวมทั้งคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนและส่งเสริมอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

References

- American Society for Testing and Materials. (2008). ASTM C33-08: Standard Specifications for Concrete Aggregates. Annual book of ASTM standards 2008, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM C136/136M: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual book of ASTM standards 2014, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM C109/C109M: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). Annual book of ASTM standards 2021. West Conshohocken, PA, USA.
- Beushausen, H., & Alexander, M. G. (2008). Bond strength development between concretes of different ages. *Magazine of Concrete Research*, 60(1), 65-74. <https://doi.org/10.1680/mac.2007.00108>
- CPAC Concrete Academy (2000). *Concrete Technology*.
<https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063> (in Thai)
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Microplastics, standardisation and spatial distribution. *Microplastic Pollutants*. 101-130. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809406-8.00005-0>
- Ghuge, J., Surale, S., Patil, B. M., & Bhutekar, S. B. (2019). Utilization of waste plastic in manufacturing of paver blocks. *System*, 6(04), 1967-1970.
- Janpetch, N., & Kokkamhaeng, W. (2016). The test of the compressive strength of an interlocking block of Thailand. *RMUTSB Academic Journal*, 4(2), 196-206. (in Thai)

- Khamput, P., Haruehansapong, S., Sittigool, W., Prasertsri, T., Yoddumrong, P., & Sanit-in, P. (2024). Development of Paving Interlocking Block from Plastic Bottle Wastes with Dust Stone. *The Journal of KMUTNB*, 34(3), 1–13. (in Thai)
- Ministry of Industry. (2022). Ministry of Industry Announcement No. 6819 (B.E. 2565) on hydraulic cement as an industrial material for concrete and cement product group. https://www.tisi.go.th/data/news/139_282_1110166.pdf. (in Thai)
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2023). *Thailand state of environment report 2023* (pp. 264–265). Ministry of Natural Resources and Environment. <https://www.onep.go.th/book/soe2566/> (in Thai)
- Panyayong., P. (2025). *Plastic waste*. Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. Retrieved February 8, 2025, <https://www.onep.go.th/ขยะพลาสติก> (in Thai)
- Phatthara, K., Surasak, N., Thanagrit, N., Arnuwat, P. (2022). Interlocking Brick with Plastic Scrap. *Industrial Technology Journal*, 7(2), 137-148. <https://doi.org/10.14456/journalindus.2022.19>. (in Thai)
- Pollution Control Department. (2021). Policy on waste reduction and segregation in government agencies (Workshop on implementation guidelines for waste reduction and segregation measures in government agencies, fiscal year 2022). https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2021/11/pcdnew-2021-11-23_08-29-17_914529.pdf. (in Thai)
- Prasittisopin, L., Ferdous, W., & Kamchoom, V. (2023). Microplastics in construction and built environment. *Developments in the Built Environment*, 15, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100188>
- Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D., & Schmitt-Jansen, M. (2017). Impacts of Biofilm Formation on the Fate and Potential Effects of Microplastic in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(7), 258-267. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00164>
- Saikia, N., & de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385–401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Saikia, N., & de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>

- Sarang, G. (2019). Replacement of stabilizers by recycling plastic in asphalt concrete. In F. Pacheco-Torgal, J. Khatib, F. Colangelo, & R. Tuladhar (Eds.), *Use of recycled plastics in eco-efficient concrete* (pp. 307–325). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00014-1>
- Sripumun, A., Cheerarot, R., & Chaimoon, K. (2016). The Effect of Superplasticizer on the Physical Properties of Cellular Concrete Containing Bottom Ash. *Journal of Industry Technology Lampang Rajabhat University*, 9(1), 116–127. (in Thai)
- Suweero, K., & Khamput, P. (2020). Development of Interlocking Concrete Paving Block Product Mixed with Colored Polyethylene Terephthalate Plastic Bottle from Post-Consumer Waste. *Journal of Engineering, RMUTT*, 18(1), 81-90.
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). (1974). *Standard methods for sampling and testing of masonry materials made of concrete (TIS 109-1974)*. Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). (1982). *Methods of test for compressive strength of concrete specimens (TIS 409-1982)*. Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). (1988). *Concrete paving blocks (TIS 827-1988)*. Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). (2000). *Interlocking concrete paving blocks for heavy-duty use (TIS 2035-2000)*. Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). (2016). *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency (TIS 2752 Part 17)*. Bangkok. (in Thai)
- Waroonkun, T., Puangpinyo, T., & Tongtuam, Y. (2017). The Development of a Concrete Block Containing PET Plastic Bottle Flakes. *Journal of Sustainable Development*, 10, 186.
- Zhang, K., Hamidian, A. H., TubiĆ, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>.