

การใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติก พียูที เป็นส่วนผสมในคอนกรีต

Utilization of PET Plastic Waste as Mixture in Concrete

เวชสุวรรณค์ หล้ากาต^{1*} คุณธรรม สันติธรรม¹ ภควดี โอสภาพร¹ ณัฐพงษ์ ฮีรานโน¹Wechsawan Lakas^{1*} Kunnatham Santitham¹ Pakawadee Osataporn¹ Nutapong Hirano¹¹ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่¹Department of Industrial Technology, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ

รับเมื่อ: 13 ธันวาคม 2567

แก้ไขเมื่อ: 02 มกราคม 2568

ตอบรับเมื่อ: 10 มกราคม 2568

เผยแพร่ออนไลน์:

20 มกราคม 2568

คำสำคัญ

ขยะพลาสติก

รีไซเคิล

คุณสมบัติรับกำลังอัด

พียูที

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

อีเมล:

drpow.greenroad@gmail.com

(เวชสุวรรณค์ หล้ากาต)

บทคัดย่อ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติก ความทนทานต่อการกัดกร่อนและความแข็งแรง สามารถขึ้นรูปทรงได้หลากหลายตามความต้องการ และที่สำคัญเป็นวัสดุที่สามารถทดแทนวัสดุธรรมชาติได้ในทางตรงกันข้ามถึงแม้พลาสติกจะมีประโยชน์มากมาย แต่หากบริหารจัดการไม่ดีแล้วก็จะผลเสียในระยะยาวได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น การเกิดโรคมะเร็งในมนุษย์เนื่องมาจากการสะสมไมโครพลาสติก หรือการปนเปื้อนของพลาสติกในน้ำอุปโภคบริโภคและการเกิดภาวะโลกร้อนจากการเผาขยะพลาสติก อย่างไรก็ตาม การกำจัดขยะพลาสติกสามารถทำได้หลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ให้ผลดีต่อทั้งสิ่งแวดล้อมและสิ่งแวดล้อมคือการรีไซเคิล ขยะพลาสติกซึ่งในการรีไซเคิลเพื่อให้ขยะลดปริมาณลงมากที่สุดคือการนำมาแทนที่วัสดุก่อสร้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ขยะพลาสติกที่มีปริมาณมากอย่างเช่นขยะพลาสติกประเภท PET ที่เกิดขึ้นในช่วงสถานการณ์โควิด 19 มาทดแทนวัสดุก่อสร้างในคอนกรีตโดยทยอยผ่านเครื่องบดพลาสติกให้มีขนาดเล็กลงและแทนที่ทรายซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างในการงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนที่ 1 จะใช้อัตราส่วนการแทนที่ขยะพลาสติก 0%, 10% , 20% และ 30% โดยปริมาตร และทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดในรูปแบบมอร์ต้าจากนั้นนำช่วง อัตราส่วน ที่เหมาะสมไปใช้ออกแบบในขั้นตอนที่ 2 ในรูปแบบของคอนกรีตลูกบาศก์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบที่ได้ ค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนคอนกรีตที่เหมาะสมในรูปแบบมอร์ต้าคือ 10% ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเพียง 8.7% และทดสอบในขั้นตอนที่ 2 ให้กำลังรับแรงอัดลดลง 10.06% ดังนั้นในการนำขยะไปใช้ในการออกแบบแทนที่วัสดุทรายจะใช้ การออกแบบที่อัตราส่วน 10% โดยปริมาตร

ARTICLE INFO

Article History

Received: 12 December 2024

Revised: 2 January 2025

Accepted: 10 January 2025

Available online:

20 January 2025

ABSTRACT

Plastic is a useful material in the construction industry and is widely used due to its properties of being resistant to acids and bases, its strength, and its ability to be molded into various shapes as needed. Importantly, it is a material that can replace natural materials. However, despite its many benefits, if poorly managed, plastic can also have long-term negative effects, such as the development of cancer in humans

Keywords:

Plastic Waste

Recycle

Compressive Strength

PET

Corresponding author*Email address:**drpow.greenroad@gmail.com

(W. Lakas)

due to the accumulation of microplastics, contamination of drinking water with plastics, and global warming caused by burning plastic waste. Nevertheless, plastic waste can be disposed of in various ways, with recycling being the most beneficial for both living organisms and the environment. In recycling, to reduce waste volume the most, plastic waste can replace construction materials. Therefore, in this research, we used a large amount of plastic waste, such as PET plastic waste that increased during the COVID-19 situation, to replace construction materials in concrete by grinding it through a plastic grinder to reduce its size and replace sand, which is a construction material. This research project is divided into two phases: Phase 1 will use a plastic waste replacement ratio of 0%, 10%, 20%, and 30% by volume to test for compressive strength in the form of mortar. The appropriate ratio will then be used for design in Phase 2 in the form of cubic concrete to find its compressive strength. The test results showed that the appropriate compressive strength for the concrete ratio in the form of mortar is 10%, which had a compressive strength reduction of only 8.7%. In testing Phase 2, the compressive strength reduced by 10.06%. Therefore, in the design of using waste to replace sand, a 10% volume ratio will be applied alone.

1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นมาเพื่อทดแทนวัสดุธรรมชาติ ที่ใช้ใน ชีวิตประจำวันของเราหลายประเภท เนื่องจากคุณสมบัติของ พลาสติกมีความคงทนต่อกรดและด่าง มีความแข็งแรงและสามารถ ขึ้นรูปทรงได้หลากหลายตามความต้องการ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ จากธรรมชาติ บางประเภทที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ รวมไปถึงการขึ้นรูปตามความต้องการยาก อีกทั้งผลิตภัณฑ์จาก พลาสติกสามารถผลิตออกมาได้ไว ราคาถูก ส่วนใหญ่จะใช้ครั้งเดียว แล้วทิ้ง จึงทำให้เราใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างแพร่หลายจากอดีต ถึงปัจจุบัน แต่เมื่อความต้องการในการใช้พลาสติกหมดไปและไม่มี การบริหารจัดการที่ดี จะก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ส่งผลกระทบโดยตรงต่อ สิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศเป็นอย่างมาก เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีการย่อยสลายเองตามธรรมชาติได้ยาก และใช้เวลานาน จึงทำให้เกิด ปัญหาขยะพลาสติกตกค้างสะสมในพื้นที่ เป็นจำนวนมากตั้งแต่ช่วงปัจจุบัน จากการศึกษผลกระทบของขยะ พลาสติกเมื่อถูกย่อยจนมีขนาดเล็กจะ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หลาย ๆ ด้าน ไม่น้อยไปกว่าตอนที่ พลาสติกมีขนาดใหญ่ เพราะพลาสติกมีขนาดเล็กในระดับไมโคร พลาสติกสามารถแพร่ไปในอากาศและส่งผลให้สัตว์บกและสัตว์น้ำเกิด ภาวะผิดปกติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไมโครพลาสติกกับเซลล์ ส่งผลทำให้อัตราการสืบพันธุ์ ของสัตว์ลดลง และยังรวมไปถึงสุขภาพ ของมนุษย์ที่แย่งเมื่อได้รับ ไมโครพลาสติกเป็นระยะเวลานานจะ ก่อให้เกิดโรคได้เร็วขึ้น ความผิดปกติในเด็กแรกเกิดเนื่องจากไมโคร พลาสติกส่งต่อจากแม่สู่ลูกผ่านเลือด และที่ร้ายแรงที่สุดอัตราการเกิด โรคมะเร็งเนื่องจาก ไมโครพลาสติกมีอัตราที่เพิ่มขึ้น [1] ถึงแม้จะมี การศึกษาในด้าน ผลกระทบของปัญหาขยะพลาสติกที่ส่งผลโดยตรงต่อ สิ่งมีชีวิตอย่าง

ชัดเจนแต่เรายังเลือกใช้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกเพื่อตอบสนอง การกินอยู่ได้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังจะเห็นได้จาก The Plastics – the Facts 2017[2] ได้ระบุไว้ว่าในปี 2016 มีความต้องการ ในการใช้ พลาสติกถึง 49.9 ล้านตันส่งผลให้เกิดปริมาณขยะ ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก นอกจากนั้นขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้ 27.3% ถูกฝังกลบ และมีเพียง 31.1% สามารถนำไปรีไซเคิลได้ ในทำนองเดียวกันประเทศไทยเองมี อัตราการเพิ่มขึ้นของขยะพลาสติกจำนวนมากโดยเฉพาะในช่วงที่เกิด โรคระบาดโควิด 19 โดยบทความ ของ บุญชนิด ว่องประพินกุล [3] ได้วิเคราะห์ปัญหาขยะพลาสติก จากธุรกิจร้านอาหาร ซึ่งในช่วงโรค ระบาดที่เกิดขึ้นผู้คนไม่สามารถออกไปทำงานได้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ จะต้องทำงานในที่พำนักเพื่อป้องกันการติดเชื้อโควิด 19 ส่งผลให้การ เพิ่มขึ้นของขยะพลาสติกที่มาจากกล่องข้าว มีปริมาณมากขึ้น

ในขณะที่ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้น ณ สถานการณ์ โควิด ที่ผ่านมา การกำจัดขยะในปริมาณที่มากและรวดเร็วอย่างเช่น การเผา ขยะพลาสติกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แม้ว่าวิธีนี้จะป็นวิธีที่ ลดปริมาณ ขยะได้รวดเร็วแต่ผลที่ตามมาจะส่งผลเสียอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อมและ สิ่งมีชีวิต โดยบทความ Rinku Verma [4] อธิบายถึงผลกระทบ เนื่องจากการเผาขยะพลาสติก ในปัจจุบันการกำจัดขยะ มูลฝอยทั้งหมด ขยะพลาสติกปริมาณ 12% จะถูกเผาเพื่อทำเป็น เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามในการเผาแต่ละครั้งจะปล่อยก๊าซพิษ เช่น ไดออกซิน ฟิวแรน พรอท และโพลีคลอรีเนตไบฟีนิล ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้การ เจริญของพืชพรรณต่าง ๆ ลดลง นอกจากนั้นเมื่อก๊าซพิษเหล่านี้ที่มาจาก การเผาเข้าสู่ร่างกาย จะส่ง ผลกระทบต่อระบบประสาทโดยตรง ทำให้ เกิดภาวะอัมพฤกษ์ ต่อร่างกาย ไม่เพียงเท่านั้นยังเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ เกิดมะเร็ง ในมนุษย์ นอกจากการเผาแล้วการกำจัดขยะพลาสติกยังมี วิธีอื่น ๆ อีก เช่น การฝังกลบ ในการกำจัดขยะแบบฝังกลบจะเป็นวิธีที่

ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดแต่หากขยะมีปริมาณมากจำเป็นจะต้องใช้พื้นที่ที่มาก ดังนั้นในอนาคตอันใกล้ พื้นที่ในการฝังกลบอาจจะไม่มีเพียงพอ ต่อปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้น วิธีที่ให้ผลดีที่สุดและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ การรีไซเคิลขยะพลาสติก Ichiro Tsuchimoto [5] บทความเกี่ยวกับการรีไซเคิลขยะพลาสติกทั้งหมด 35,519 บทความ และได้แบ่งข้อสรุปออกมาดังนี้ 1) การจะกำจัดพลาสติกอย่างยั่งยืนได้ จะให้การย่อยสลายทางชีววิทยา 2) ในบางพื้นที่จะนำขยะพลาสติกไปสร้างพลังงานโดยการ เผาในอุปกรณ์ปิดที่ไม่ส่งก๊าซออกสู่ภายนอก 3) นำขยะพลาสติก ไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากงานก่อสร้างเป็นงานระดับใหญ่ ดังนั้นการนำขยะพลาสติกไปแทนที่วัสดุก่อสร้าง จึงช่วยลด ปัญหาพลาสติกได้มาก อย่างไรก็ตาม นอกจากการนำขยะพลาสติก ไปรีไซเคิลแล้ว ผู้วิจัยยังตระหนักถึงที่มาของขยะพลาสติก โดยรณรงค์ให้ประเทศสร้างมาตรฐานควบคุมการผลิต และการบริโภคขยะพลาสติกและรับผิดชอบต่อขยะพลาสติกที่ผลิตขึ้นมา ถึงแม้ ประเทศไทยจะมีเทคโนโลยีไม่เพียงพอเท่ากับประเทศอื่น ๆ แต่ใน ประเทศไทยเองมีความตระหนักต่อการเพิ่มขึ้นของขยะพลาสติก โดย ธงชัย ทองมา [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ ชุมชนจากขยะเหลือใช้โดยเลือกพื้นที่ ตำบลคลองโยง อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม เป็นพื้นที่ศึกษา ได้เข้าไปให้ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีการนำขยะมาทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ เช่น การนำกระดาษเก่ามาทำเป็นเครื่องประดับเพื่อให้เกิดการสร้างงานในชุมชน ไม่เพียงเท่านั้นยังนำถุงพลาสติกที่ย่อยสลายได้มาทำเป็น กระเป๋าถือ กระเป๋าตุง เป็นต้น ดังนั้นการกำจัดขยะพลาสติก อย่างยั่งยืน โดยสรุปแล้ว การนำขยะพลาสติกกลับมารีไซเคิลจะมี ประสิทธิภาพมากกว่าโดยไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต

อย่างไรก็ตามการรีไซเคิลขยะพลาสติกมีวิธีการรีไซเคิลหลากหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการนำขยะพลาสติกมาเป็นวัสดุ ที่ใช้ในงานก่อสร้างซึ่งในบทความของ Pushpa Lumina [7] ได้ทำการ รีไซเคิลขยะพลาสติกโดยนำขยะพลาสติกประเภทถุงยัดมาเพิ่มลงใน คอนกรีต เพื่อกำจัดขยะพลาสติกให้ได้มากที่สุด โดยการนำขยะพลาสติกผสมลงไปในส่วนที่ 0% , 5% , 10% , 15% โยนน้ำหนัก ได้ข้อสรุปออกมาดังนี้ ยิ่งปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดยิ่งมีค่าน้อยลง แต่เนื่องจากผลของการดูดซึมน้ำ บ่งบอกว่าขยะพลาสติกสามารถทนทานให้เข้ากับก้อนตัวอย่างและ สามารถนำมาใช้แทนวัสดุได้ อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนที่นำมาใช้แทนได้นั้นจะอยู่ในช่วง 5 - 10% เท่านั้น วัสดุจึงจะยังมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ยอมรับได้ หรือในงานวิจัยของ เวชสวรรค์ หล้ากาศ [8] ได้นำขยะพลาสติกประเภท HDPE หรือถุงก๊อบแก๊ป นำมาเป็นส่วนผสมเพิ่มเข้าไปในการก่อสร้างแอสฟัลท์ คอนกรีต ซึ่งทำให้แอสฟัลท์คอนกรีตมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น 2 เท่าเมื่อ เปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมขยะพลาสติก ไม่เพียงเท่านั้น Batayneh et al. [9] ได้แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ขยะพลาสติก

ในปริมาณที่ 5% จะทำให้ กำลังรับแรงอัดลดลงถึง 23% นอกจากนี้ Belmokaddem et al. [10] ยังใช้ขยะพลาสติกแข็งประเภท PVC ซึ่งนำขยะพลาสติกแข็ง เหล่านี้มาบดละเอียดจากนั้นนำขยะพลาสติกเหล่านี้แทนที่ทรายโดย แทนที่ในอัตราส่วน 25%, 50%, 75% ผลปรากฏว่ายิ่งแทนที่ อัตราส่วนมากขึ้นค่ากำลังอัดจะยิ่งมีค่าลดลง และเมื่อแทนที่ พลาสติกแข็ง 25% ค่ากำลังอัดจะลดลงไป 16% ดังนั้นช่วงที่สามารถนำขยะพลาสติกมาแทนที่ได้จะอยู่ในช่วง 5 -10% โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาที่ผ่านมาการใช้ขยะพลาสติกมาเป็นส่วนผสมแทนวัสดุการก่อสร้างมีมาอย่างกว้างขวางแต่เป็นเพียงการนำขยะมาผสมโดยไม่ได้อัดดัดแปลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำขยะพลาสติกมาแทนที่วัสดุก่อสร้างโดยใช้การบดละเอียดให้มีขนาดเล็ก เทียบเท่ากับเม็ดทรายในวัสดุก่อสร้าง ซึ่งพลาสติกดังกล่าวเป็นพลาสติกประเภท PET (Polyethylene Terephthalate) ดังนั้นหากแทนที่ทรายเข้าไปด้วยพลาสติกจะช่วยให้การลดลงของปริมาณพลาสติกในปัจจุบันอย่างมากเนื่องจากงานก่อสร้างเป็นงานขนาดใหญ่ การใช้วัสดุก่อสร้างจึงจำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่มาก โดยเริ่มต้นในงานวิจัยจะใช้การหาอัตราส่วนจากการทดสอบก้อนตัวอย่างในรูปแบบมอร์ต้าเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นนำไปออกแบบอัตราส่วนคอนกรีตต่อไป ทั้งนี้คอนกรีตนี้จะใช้เป็นตัวอย่างในรูปแบบการทดสอบคอนกรีตลักษณะลูกบาศก์ ซึ่งจะต้องมีกำลังรับแรงอัดอย่างน้อย 24 MPa โดยจะเริ่มจากกำลังรับแรงอัดดังกล่าวเพื่อหาส่วนผสมคอนกรีตและใช้อัตราส่วนการแทนที่ของขยะพลาสติกมาร่วมกับอัตราส่วนของก้อนตัวอย่าง คอนกรีตลักษณะลูกบาศก์ แต่ถึงแม้ว่าการแทนที่อาจจะทำให้เกิดการลดลงของกำลังรับแรงอัด หากกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วงที่ยังรับได้ จะช่วยลดปริมาณขยะลงได้จากการเพิ่มขึ้นของขยะพลาสติก

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นวัสดุที่จัดหาได้ในพื้นที่ซึ่งมีการนำไปใช้ในการผลิตบล็อกปูพื้นปกติทั่วไปได้แก่ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย แต่วัสดุที่แตกต่างออกไปคือขยะพลาสติกประเภท PET (Polyethylene Terephthalate) ประเภทบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและ เครื่องดื่ม เช่น กล่องอาหาร แก้วพลาสติก ขวดพลาสติกที่มีสี ข้อนล่อมพลาสติก ที่ไม่สามารถนำไปขายได้ราคา จึงนำมาเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

(1) ขยะพลาสติก

ในงานวิจัยจะใช้ขยะพลาสติกประเภท PET (Polyethylene Terephthalate) เป็นวัสดุผสมเพิ่มเข้ามาในตัวอย่างการทดสอบ โดยขยะพลาสติกส่วนใหญ่จะเป็นประเภทบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและ

เครื่องตีบ เช่น ถ้วยพลาสติก แก้วน้ำพลาสติก และ ข้อนล่อมพลาสติก ซึ่งขยะพลาสติกประเภท PET จำพวกนี้จะมีจำนวนมาก และมีความแข็งแรงกว่าขยะพลาสติกประเภทอื่น ๆ ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมีความหนาแน่น 1.38 g/cm^3 และจุดหลอมเหลวประมาณ 260°C โดยขยะพลาสติก PET จะถูกย่อยโดยเครื่องย่อยพลาสติก ซึ่งมีรายละเอียดของเครื่องดังนี้ มอเตอร์: 1.5/2.2 kW / 3 HP / 220 V สามารถย่อยพลาสติกได้ 50-100 kg/hr. ขนาดชิ้นงานที่ถูกย่อยมีขนาด 2-6 mm ดังภาพที่ 1 ซึ่งในงานวิจัยจะใช้ขยะพลาสติกที่มีขนาดเล็กประมาณ 2-4 mm และขนาดคละของมวลรวม ดังภาพที่ 2

(2) มวลรวมและสารเชื่อมประสาน

มวลรวมในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยมวลละเอียด และมวลหยาบ ซึ่งมวลละเอียดที่ใช้จะเป็นประเภททรายแม่น้ำ เป็นวัสดุทั่วไปที่ใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย มีความแข็งแรง และมีขนาดคละที่ดี ส่วนมวลหยาบที่ใช้ในการทดสอบ จะเป็นหินคลุกซึ่งมีขนาดโตสุดเท่ากับ 12.7 mm (1/2 นิ้ว) ภาพที่ 3 แสดงผลการหาขนาดคละของมวลรวมและขยะพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM C136 [11] และมีความคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมดัง ตารางที่ 1

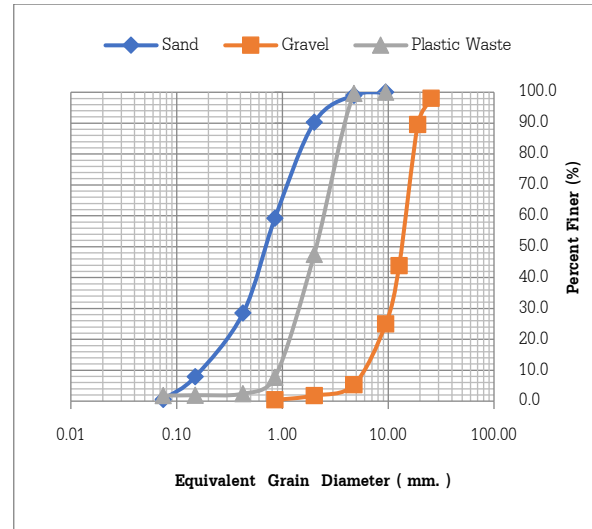
ในส่วนของสารเชื่อมประสานจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นสารเชื่อมประสาน โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15



ภาพที่ 1 รูปแสดงวัสดุที่ใช้ในโครงการวิจัย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และขยะพลาสติกประเภท PET



ภาพที่ 2 เครื่องย่อยพลาสติก



ภาพที่ 3 รูปแสดงการหาขนาดคละของมวลรวมและขยะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบ

2.2 ออกแบบส่วนผสม

งานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1) ทดสอบตัวอย่างในรูปแบบของมอร์ต้าเพื่อหาอัตราส่วนของขยะ พลาสติก และมวลรวม 2) ทดสอบตัวอย่างในรูปแบบคอนกรีตเพื่อหาค่า กำลังรับแรงอัดมากที่สุด

อัตราส่วนของมอร์ต้าที่ผสมขยะพลาสติกประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และขยะพลาสติก โดยใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์: ทราย:น้ำ โดยปริมาตรเท่ากับ 1:2:0.5 และใช้ขยะพลาสติกเพิ่มเข้าไปแทนที่ทรายในอัตราส่วน 0%, 10%, 20% และ 30% โดยปริมาตร กำหนดจำนวนตัวอย่างชุดการทดสอบละ 3 ตัวอย่าง หลังจากนั้นจะนำตัวอย่างไปบ่มน้ำเป็นเวลา 7, 14, 28 วัน และ นำก้อนตัวอย่างไปทดสอบ หาค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 [12] ดังแสดงใน ตารางที่ 2 โดยใช้สัญลักษณ์ แทนตัวอย่างดังนี้ Mortar PET 0% โดยที่ Mortar PET แทนการทดสอบในรูปแบบมอร์ต้า และ 0% แทนปริมาณขยะพลาสติกที่แทนที่ทราย

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของมวลรวม

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (%)	ขนาดอนุภาค D50 (mm)
ทราย	2.62	0.79	0.7
หินคลุก	2.73	0.55	10.5
ปูนซีเมนต์	3.15	-	-
พลาสติก PET	1.38	0.1-0.2	-

ตารางที่ 2 ตารางแสดงอัตราส่วนในการทดสอบมอร์ต้า

อัตราส่วนผสม	ปริมาณวัสดุโดยปริมาตร			
	ขยะพลาสติก (m ³)	ทราย (m ³)	ปูนซีเมนต์ (m ³)	น้ำ (m ³)
Mortar PET 0%	0.0	4.0	1	1/2
Mortar PET 10%	0.8	3.2	1	1/2
Mortar PET 20%	1.6	2.4	1	1/2
Mortar PET 30%	2.4	1.6	1	1/2

เมื่อทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดจากก้อนตัวอย่างในรูปแบบมอร์ต้าแล้ววิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงไม่เกิน 10% ของกำลังรับแรงอัดที่ได้ผสมขยะพลาสติกเพื่อนำอัตราส่วนนี้มาใช้เป็นอัตราส่วนขบกับก้อนตัวอย่าง คอนกรีตทรงลูกบาศก์ต่อไปโดยแทนที่ของขยะพลาสติกที่ได้จากการทดสอบในรูปแบบของมอร์ต้ามาผสมกับมวลรวมเพื่อ ทดสอบในรูปแบบของคอนกรีต กำหนดจำนวนการทดสอบ ของก้อนตัวอย่างเป็น 3 ก้อนต่อชุดการทดสอบ โดยใช้ มาตรฐาน มทข. 101-2561 มาตรฐานงานคอนกรีต และคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลต่างของกำลังอัดที่มี กำลังต่ำสุดกับค่าที่กำหนดต้องไม่เกินร้อยละ 10 [13] เป็น อัตราส่วนในการออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ ตาม**ตารางที่ 3** และใช้สัญลักษณ์แทนเป็น Concrete 0% โดยที่ Concrete แทนการทดสอบตัวอย่างในรูปแบบคอนกรีตทรงลูกบาศก์ และ 0% แทนอัตราส่วนที่ขยะพลาสติกที่แทนที่ทราย

2.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบมอร์ต้าในขั้นตอนแรกจะทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยมีแบบตัวอย่างเป็นรูปลูกบาศก์ ขนาด 50 x 50 x 50 mm ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างให้ผสมขยะพลาสติก ทราย และปูนซีเมนต์ เข้าด้วยกันก่อนในกรณีใช้ขยะพลาสติกแทนที่ทราย จากนั้นผสมน้ำในอัตราส่วนที่กำหนดลงไป เมื่อผสมส่วนผสมตามอัตราส่วนทั้งหมดที่คลุกเคล้าเข้ากันดีแล้วจากนั้นนำไปเทลงแบบและพักทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดระยะเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว จึงนำตัวอย่างออกจากแบบหล่อและนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำต่อ ทิ้งก้อนตัวอย่างไว้เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดในระยะเวลา 7, 14, 28 วัน

ตารางที่ 3 การออกแบบตามมาตรฐานกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

อัตราส่วนผสม	ปริมาณน้ำหนักวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ					
	ขยะพลาสติก (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	w/c Ratio
Concrete	0.0	3.556	3.155	1.375	0.751	0.54
Concrete 10%	0.355	3.193	3.155	1.375	0.751	0.54



ภาพที่ 4 รูปแสดงแบบบาศก์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้า

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในขั้นตอนที่สองจะใช้ส่วนผสมของมอร์ต้าที่ให้กำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมเป็นอัตราส่วน ผสมในการผสมอัตราส่วนในรูปแบบคอนกรีตทรงลูกบาศก์ 15x15x15 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS1881 [14] โดยผสม ปูนซีเมนต์ ทราย และ ขยะพลาสติก ให้เข้ากันและเป็นเนื้อเดียวกันก่อน จากนั้นนำหินผสมเข้าไปและคลุกเคล้าให้เข้ากันอีกครั้ง เสร็จแล้วนำน้ำผสมเข้าไปในอัตราส่วนที่กำหนด เมื่อเสร็จสิ้นการผสมตัวอย่างให้นำคอนกรีตสดเทลงในแบบตัวอย่างทรงลูกบาศก์ จากนั้นทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากแบบหล่อและนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำต่อ ทิ้งก้อนตัวอย่างไว้เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดในระยะเวลา 7, 14, 28 วัน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยประกอบไปด้วย 1) เป็นผลการทดสอบการหาค่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ใช้ขยะพลาสติก แทนที่วัสดุทราย 2) ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดจากคอนกรีต ที่ใช้ขยะพลาสติกแทนที่วัสดุทราย

3.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า

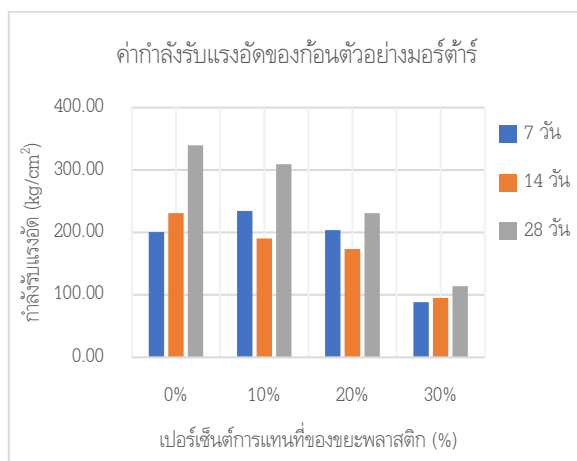
จากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าให้ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ย ดัง**ตารางที่ 4** และ**ภาพที่ 5** โดยสรุปได้ว่า ค่ากำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขยะพลาสติกไปแทนที่ทราย โดยในอัตราส่วนที่ทรายถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกใน 10% โดยปริมาตร จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงไป 8.7 % เนื่องจากขยะพลาสติกที่ถูกย่อยนั้นเมื่อคุณสมบัติความแข็งแรงน้อยกว่าทรายไม่เพียงเท่านั้นขยะที่เข้าไปแทนที่ยังทำให้เกิดช่องว่างระหว่างก้อนตัวอย่างเพิ่มขึ้น เมื่อช่องว่างของก้อนตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ามีค่าลดลง [15]

ในช่วงระยะเวลาการบ่มที่ 28 วันให้กำลังรับแรงอัดได้ มากที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เป็นสารเชื่อมประสาน มีค่าความแข็งแรงที่มาก ในทำนองเดียวกันการเพิ่มขยะพลาสติก เข้าไปแทนที่ทรายก็ให้ผลการรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม

ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งหมดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าจึงสรุปได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อแทนที่ทรายด้วยขยะพลาสติกที่อัตราส่วน 10% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง 8.7% และที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยขยะพลาสติก 30% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง 66.4% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Batayneh et al. [9] ที่ดำเนินการแทนที่ขยะพลาสติกในลักษณะเป็นชั้นขนาดใหญ่ในปริมาณที่ 5% จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงถึง 23% เนื่องจากมีช่องว่างในก้อนตัวอย่างมาก อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของขยะพลาสติกเข้าไปมีแนวโน้มที่ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง โดยมีสมการการลดลงคือ $y = -755x + 361.8$ ในระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ดังภาพที่ 6 ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วน เพื่อเป็นอัตราส่วนของคอนกรีตจะใช้อัตราส่วนการแทนที่ของขยะพลาสติกแข็งในช่วง 0-10 %

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า

อัตราส่วนผสม	กำลังอัดสูงสุดของมอร์ต้า (kg/cm ²)		
	ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน	ระยะเวลาบ่มที่ 14 วัน	ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน
Mortar PET 0%	200.48	231.06	339.79
Mortar PET 10%	234.45	190.28	309.20
Mortar PET 20%	203.87	173.29	231.06
Mortar PET 30%	88.35	95.14	114.17



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบของค่ากำลังรับแรงอัดของการทดสอบมอร์ต้า ในระยะเวลาการบ่มที่ 7, 14, 28 วัน



ภาพที่ 6 รูปแสดงสมการการทดสอบแรงอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าใน ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน



ภาพที่ 7 รูปแสดงตัวอย่างการบ่มมอร์ต้า

3.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์

จากการทดสอบการหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าจะใช้อัตราส่วนการแทนที่ทรายในช่วง 10 % เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัด ลดลงเพียง 8.7% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zainab Z.(2008) [16] ที่ได้นำขยะพลาสติก PET และ PS มาแทนที่ทราย ซึ่งผลสรุป คือค่ากำลังอัดจะลดลงตามแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของปริมาณขยะพลาสติก เนื่องจากวัสดุพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ไม่ทั่วถึงและเกิดเป็นช่องว่างภายในก้อนตัวอย่าง จึงเป็นที่มาของการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัด อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ยังเป็นค่ากำลังรับแรงอัดที่อยู่ในเกณฑ์ไม่ต่ำกว่า 10% ของค่ากำลังรับแรงอัดทั่วไป ดังนั้นการออกแบบอัตราส่วนผสมที่จะใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตจึงเป็นไปตามตารางที่ 5

อัตราส่วนในการออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ตามตารางที่ 5 จะใช้อัตราส่วนของขยะพลาสติก เข้าไปแทนที่ทรายเป็น 0% และ 10% เมื่อทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยเฉลี่ย

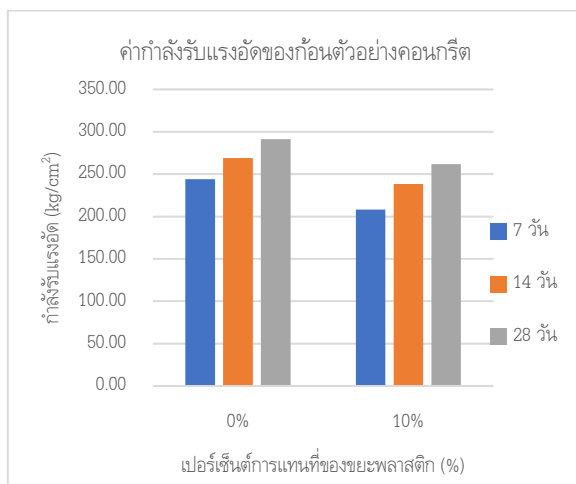
จากตัวอย่างชุดการทดสอบทั้งหมดจะได้ผลการทดสอบตามระยะเวลาการบ่มออกมาได้ตามตารางที่ 6 และ ภาพที่ 8 ผลที่ได้สามารถสรุปได้ 2 ประเด็นคือ 1) เมื่อเพิ่มปริมาณขยะพลาสติกที่แทนที่ทรายมากขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงโดย ที่ 10% มีค่าลดลง 10.06 % นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงอัดขั้นต่ำของการผสมขยะพลาสติกยังมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดขั้นต่ำของมาตรฐานคอนกรีตที่ยอมรับได้ (240 kg/cm^2) 2) ประเด็นต่อมาเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงแรกปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดปฏิกิริยาที่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์ดังนั้นเมื่อผ่านช่วงเวลาไปค่ากำลังรับแรงอัดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 ตารางแสดงอัตราส่วนของการแทนที่ทรายด้วยขยะพลาสติกในการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต

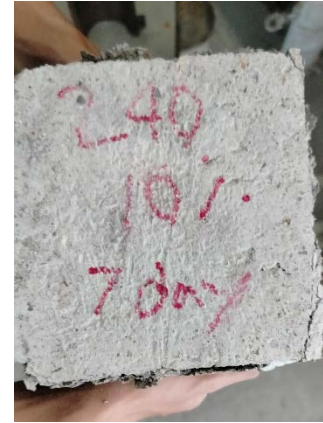
อัตราส่วนผสม	ปริมาณน้ำหนักวัสดุต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร					
	ขยะพลาสติก ก (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	ปูนซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	W/C Ratio
Concrete 0%	0.000	3.556	3.155	1.375	0.751	0.54
Concrete 10%	0.355	3.193	3.155	1.375	0.751	0.54

ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

อัตราส่วนผสม	กำลังอัดสูงสุดของมอร์ต้า (kg/cm^2)		
	ระยะเวลาบ่มที่	ระยะเวลาบ่มที่	ระยะเวลาบ่มที่
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
12	244.10	269.06	291.31
Concrete 10%	208.40	238.44	262.00



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบของค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในระยะเวลาการบ่มที่ 7, 14, 28



ภาพที่ 9 รูปแสดงก้อนตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 10 รูปแสดงการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต

4. สรุปผล

การนำขยะพลาสติกประเภท PET มาย่อย โดยใช้เครื่องย่อยขยะพลาสติกให้มีขนาดเล็กและนำมาแทนที่วัสดุ ก่อสร้างประเภททรายสามารถทำได้เนื่องจากขนาดของขยะพลาสติกที่ ย่อยแล้วนั้นมีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทราย และมีแหลมมุม ให้ปูนซีเมนต์ยึดเกาะได้ จากผล การทดสอบก้อนตัวอย่าง เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่มี อัตราส่วนการแทนที่ของ ขยะพลาสติกเป็น 0%, 10%, 20% และ 30% โดยปริมาตร พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของขยะพลาสติก PET มากขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลดลง แต่การลดลงของค่ารับแรงอัดยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ ไม่เกิน 10% ของค่ากำลังรับแรงอัดที่ไม่มี การแทนที่ด้วยขยะพลาสติก ตามมาตรฐาน มทข. 101-2561 มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งในการทดสอบการแทนที่ของขยะพลาสติก PET ในอัตราส่วนที่ 10% จะทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง 8.7% หากเกินกว่านี้ จะทำให้กำลังอัดลดลงมากกว่าเกณฑ์กำหนด ซึ่งสาเหตุหลัก เกิดจากขยะพลาสติกเข้าไป

แทนที่วัสดุทรายแล้วเกิดช่องว่างในมวลรวมเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้การรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าลดลง

หลังจากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า เรียบร้อยแล้วและได้ช่วงอัตราส่วนที่เหมาะสม คือการแทนที่ ทรายด้วยขยะพลาสติกเท่ากับ 10% นำอัตราส่วนดังกล่าว ไปออกแบบส่วนผสมเป็นคอนกรีตโดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตชั้นต่ำที่ยอมรับได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 240 kg/cm² ตาม มาตรฐานงานทดสอบคอนกรีต ใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีต 2 ชุด แต่ละชุดมีอัตราส่วนของขยะพลาสติก PET เข้าไป แทนที่ทรายเป็นอัตราส่วน 0% และ 10 % โดยปริมาตร จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีระยะเวลาในการบ่มนานขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีขยะพลาสติกเข้าไปแทนที่ทราย 10% จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง 10.06% ดังนั้นเมื่อนำขยะพลาสติก PET ไปผสมในงานคอนกรีตจะต้องใช้อัตราส่วนการแทนที่ของขยะพลาสติกในวัสดุทรายที่ 10% จึงจะเป็นอัตราส่วนที่ยอมรับได้ในการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและควรเป็นงานก่อสร้างที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดเป็นพิเศษ อย่างเช่น งานบล็อกรูปพื้นทางเดินหรืองานผนังก่ออิฐ เป็นต้น เพราะนอกจากจะช่วยทำให้ประหยัดวัสดุก่อสร้างประเภททรายแล้วยังสามารถลดขยะพลาสติกที่ตกค้างสะสมได้อีกด้วย

จากข้อสรุปที่ได้จากการแทนที่ขยะพลาสติกประเภท PET ที่ถูกบดย่อยโดยเครื่องย่อยพลาสติก อัตราส่วนผสมที่สามารถนำไปผสมได้อยู่ในช่วงอัตราการผลิตที่ 10% โดยน้ำหนักของทราย อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดในช่วง 0-10% นี้สามารถนำไปเป็นอัตราส่วนเพื่อแทนที่ได้โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zainab Z.(2008) [15] แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่ต้องการลดขยะใน ปริมาณที่มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนการผสมขยะพลาสติกที่ 10% ของน้ำหนักทรายเป็นอัตราส่วนผสมหลัก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pilapitiya, N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). *The world of plastic waste: A review*. Cleaner Materials, Elsevier, (11), e100220. Retrieved From <https://journals.elsevier.com/cleaner-materials> <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- [2] Plastics Europe Association of Plastics Manufacturers. (2018). Plastics - the Facts 2017. Avenue E. van Nieuwenhuysse 4/3 1160 Brussels – Belgium.
- [3] บุญชนิต ว่องประพินกุล และ สุจิตรา วาสนาดารงดี. (2564). ขยะพลาสติกจากการสั่งอาหารออนไลน์สถานการณ์ปัญหาและแนวทางแก้ไข. สิ่งแวดล้อม, 25(1),
- [4] Verma,R.,Singh,S.,&Choudhary,M.(2016). *Toxic pollutants from plastic waste - A review*. Procedia Environmental Sciences, 35, 701-708. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.069>
- [5] Tsuchimoto, I. and Y. Kajikawa. (2022). *Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis*. Sustainability 14(24), e16340. <https://doi.org/10.3390/su142416340>
- [6] ธงชัย ทองมา, ธีระวัฒน์ จันทิก และจิตราวดี รุ่งอินทร์ กันกา. (2564). การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ชุมชนจากขยะเหลือใช้สู่การจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์โดยการมีส่วนร่วมของกลุ่มผู้สูงอายุและชุมชน กรณีศึกษา ตำบลคลองโยง อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม. วารสารวิชาการการตลาดและการจัดการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี, 8(1), 1-10.
- [7] Lumina, P., Pallavi, G A., Bhavya, C H., Vanishree, S., & Supriya, C B. (2022, June, 8-9). *Use of waste plastic as fine aggregate substitute in concrete*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bengaluru. India. 1255(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1255/1/012010>
- [8] เวชสวรรค์ หล้ากาศ. (2018). *การประยุกต์ใช้ถนนแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกในชุมชน : กรณีศึกษาถนนทางเข้าวัดแม่ สาทหลวง จังหวัดเชียงใหม่*. วารสารวิทยาศาสตร์ มช, 46(4), 812-821.
- [9] Batayneh, M., Soroushian, P., & Fayad, M. (2007). *Use of selected waste materials in concrete mixes*. Waste Management, 27(12), 1870-1876.
- [10] Belmokaddem, M., Mahi, A., Senhadji, Y., & Pekmezci, Y. (2020). *Physical and Mechanical Properties of Concrete Containing PVC Waste as Aggregate*. In Senhadji, Y. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Materials and Sustainable Development*. 48-56. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43211-9_5
- [11] ASTM International. (2001). *ASTM C 136 - 01:Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/1554/242c3c8a36ab47f1b436b8741a368b09/ASTM-C136-01.pdf>

- [12] American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C 39-01: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-99
- [13] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท. (ม.ป.ป.). มทช. 101-2561 มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก. <https://drive.google.com/file/d/1Fuvd3Bc6oSPpvk-JVLXRrRJNHct2dJni/view>
- [14] British Standard Institution. (1970). *BS 1881:Part 3. Testing Concrete part 3 Methods for analysis of hardened concrete*. British Standard House.
- [15] Haach, V. G., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2980–2987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.034>
- [16] Zainab Z. Ismail,Z., Enas A., & AL-Hashmi. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *waste management*, 28(11),2041–2047 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>