

การศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม Study on Properties of Mortar Mixed Fiber Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Bottles

มีศักดิ์ธนา พัวพิทยธร^{1*}
Meesakthana Puapitthayadhorn^{1*}

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ ศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ทดสอบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน และใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40 โดยออกแบบส่วนผสมใช้อัตราส่วนผสมของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม คือ ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งใช้ขวดขวดน้ำดื่มตัดเป็นชิ้น 3 ขนาด ดังนี้ ขนาดที่ 1 กว้าง 1-2 มม. ยาว 5-10 มม. ขนาดที่ 2 กว้าง 1-2 มม. ยาว 15-20 มม. ขนาดที่ 3 กว้าง 1-2 มม. ยาว 25-30 มม. โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดมาผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใย: แผ่นเรียบ จากผลการทดสอบ พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ควบคุม มีค่าเฉลี่ยที่ 407.31- 470.35 กก./ตร.ซม. เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มมีกำลังรับแรงอัดลดลง ค่าเฉลี่ยที่ 309.43 – 466.38 กก./ตร.ซม. ส่วนค่าโมดูลัสแตกร้าวพิจารณาทุกอัตราส่วนที่อายุ 28 วัน ค่าโมดูลัสแตกร้าวเฉลี่ย 47.19-70.00 กก./ตร.ซม. ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ โดยมีค่าโมดูลัสแตกร้าวไม่น้อยกว่า 40 กก./ตร.ซม. ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด (มอก.1427-2561) สามารถนำไปผลิตเป็นซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบได้ ค่าการนำความร้อนเฉลี่ย 0.450-0.468 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ที่อายุ 28 วัน สามารถทำเป็นฉนวนกันความร้อนได้ การทดสอบด้านความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน พิจารณาทุกอัตราส่วนมีค่าเฉลี่ย 1.887-1.944 ก./ลบ.ซม. ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม การทดสอบการรั่วซึมจากการทดสอบจะเห็นได้ว่ามีคราบน้ำแต่ไม่มีหยดน้ำ

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ เส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม แผ่นซีเมนต์เส้นใย กำลังรับแรงอัด โมดูลัสแตกร้าว

Abstract

The objective of this research was to study the properties of fiber mortar from drinking bottle fragments, tested at 7, 14, and 28 days by using a water-cement ratio (W/C) of 0.40. Drinking water bottle fragments were 1, 2, and 3 percent by weight of cement. The drinking water bottles were cut into 3 sizes as follows: size 1) width 1-2 mm., length 5-10 mm., size 2) width 1-2 mm., length 15-20 mm., and size 3) width 1-2 mm., length 25-30 mm. The best mix ratio was determined to produce fiber cement board: flat sheet. Based on the test results, it was found that the compressive strength of the control mortar had an average at 407.31- 470.35 kg/cm²., when compared to the fiber-filled mortar from bottled water bottles which had a lower compressive strength at the average of 309.43 – 466.38 kg/cm². As for the modulus of rupture, all ratios were taken into account at the age of 28 days. The mean modulus of rupture was 47.19-70.00 kg/cm². which passed the fiber cement standard. According to the specified standard (TIS 1427-2561), a rupture modulus of not less than 40 kg/cm². was passed and can be used to produce flat fiber cement sheets. A thermal conductivity average of 0.450-0.468 W/m-K at 28 days can be used as insulation. The density test at 28 days, considering all ratios, averaged 1.887-1.944 g/cm³, which was lower than the control mortar. The leak test from the test showed that there were water stains but no water droplets.

Keywords: mortar, polyethylene terephthalate (PET) bottle waste, fiber cement, compressive strength, flexural strength

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

¹ Faculty of Engineering Mahasarakham University, Maha Sarakham, 44150

*Corresponding author: e-mail: Meesakthana.p@msu.ac.th

Received: January 26, 2022, Accepted: May 23, 2022, Published: January 15, 2023



บทนำ

ปัจจุบันสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้มีการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาปฏิบัติการด้านวัสดุก่อสร้าง ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี และปริญญานิพนธ์ตามโครงสร้างของหลักสูตรที่อยู่ภายใต้การกำกับของสภาวิศวกร ซึ่งผู้วิจัยมีบทบาทหน้าที่รับผิดชอบดูแลช่วยเหลือในรายวิชาดังกล่าว โดยหัวข้อวิจัยดังกล่าวจากงานประจำที่ได้รับมอบหมายสามารถนำผลการศึกษาวิจัยนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นหนึ่งในหัวข้อรายวิชาปริญญานิพนธ์ (Civil Engineering Project) ซึ่งหัวข้อที่ผู้วิจัยได้ศึกษาวิจัยเป็นที่น่าสนใจสำหรับยุคปัจจุบัน และเป็นเรื่องที่น่าสนใจสามารถทำการทดลองและฝึกปฏิบัติ เพื่อทำความเข้าใจกระบวนการด้านการใช้วัสดุทดแทนในงานด้านวัสดุก่อสร้าง โดยมีแนวทางในการนำเอาขยะเหลือทิ้งหรือเส้นใยต่าง ๆ ที่ได้จากธรรมชาตินำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปแบบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยมีงานวิจัยที่ใกล้เคียงดังนี้ การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยที่มีเส้นใยป่านครนารายณ์เป็นส่วนผสม (รณกฤต และคณะ, 2563) พบว่าคุณสมบัติทางกล และกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยป่านครนารายณ์ (Sisal fiber) โดยใช้อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 0 (จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม) 0.50, 0.75 และ 1.00 โดยปริมาตร สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ร้อยละ 0 (ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม) และ 0.75 โดยปริมาตร ผลทดสอบพบว่า การใช้เส้นใยป่านครนารายณ์ทำให้ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และซีเมนต์มอร์ตาร์ลดลง ขณะที่กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นร้อยละ 9–14 เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม การใช้เส้นใยในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยปริมาตร ทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังดึงผ้าซีก และกำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 34–67 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 79 และ 109 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้เสริมเส้นใยที่อัตราส่วนร้อยละ 0.75 ให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม และสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเท่ากัน ค่ากำลังดึงผ้าซีก และกำลังดัดมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้เส้นใยจะส่งผลให้อัตราส่วนโพรงอากาศ และการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และซีเมนต์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับงานวิจัยการศึกษาสมบัติในการกันเสียงของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ (ภูษิต และกนกวรรณ, 2558) โดยส่วนผสมของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน น้ำ ทราาย เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยกาบมะพร้าว และกากเยื่อไผ่ปาล์ม ที่อัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และสารลดปริมาณน้ำ เพื่อให้เส้นใยกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอแล้วทำการผลิตตัวอย่างแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ซึ่งมีความหนา 8, 12 และ 16 มม. ผลการศึกษา พบว่า การแทนที่ของเส้นใยธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์มีความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดลดลง โดยที่วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยมะพร้าวมีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลดีกว่าแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ผสมเส้นใยปาล์ม ต่อมา (พัทธนันท์ และคณะ, 2562) ได้ทำการศึกษาพัฒนาการผลิตแผ่นเส้นใยซีเมนต์จากหญ้าเนเปียร์ที่มีค่าแรงต้านแรงดัดสูงทดแทนแผ่นผ้าแพดาน ผลการวิจัย พบว่า ความชื้นในเส้นใยอย่างน้อยร้อยละ 50 มีผลให้แผ่นเส้นใยซีเมนต์มีค่าต้านแรงดัดสูงขึ้น ชนิดของสารเคมีที่ใช้ทุกตัวส่งผลให้แผ่นเส้นใยซีเมนต์มีค่าต้านแรงดัดสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ แต่แคลเซียมคลอไรด์ส่งผลให้ค่าต้านแรงดัดสูงที่สุด ซึ่งปริมาณที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแผ่นเส้นใยซีเมนต์ที่ได้ นอกจากนี้สัดส่วนเส้นใยที่ 0.5 เท่าของซีเมนต์ สามารถนำมาผลิตเป็นแผ่นเส้นใยซีเมนต์ที่มีค่าต้านแรงดัดสูงถึง 160.19 กก./ตร.ซม. ที่ความหนา 1 เซนติเมตร ซึ่งแผ่นเส้นใยซีเมนต์ที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแผ่นเส้นใยซีเมนต์ที่ได้มีความเป็นรูพรุน การพองตัว และการดูดซึมน้ำต่ำ ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นปรากฏ และค่าต้านแรงดัดมีค่าสูง ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 71.38 กก./ตร.ซม.

ในปัจจุบันประเทศไทยมีขยะขวดพลาสติกเป็นจำนวนมาก 2.32 ล้านตัน หรือร้อยละ 38.2 ซึ่งยากต่อการย่อยสลาย และต้องใช้เวลาในการย่อยสลายมากกว่าขยะชนิดอื่น ใช้เวลาย่อยสลายนานกว่า 450 ปี โดยปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้นจากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ พบว่า ในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย. 2564 ปริมาณขยะได้เพิ่มขึ้นเป็น 9,600 ตัน/วัน จาก 8,800 ตัน/วัน แสดงให้เห็นว่าปริมาณขยะพลาสติกมีปริมาณที่มีจำนวนมาก (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2564) สำหรับงานศึกษาวิจัย

ด้านเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มก็ใช้เป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีคุณสมบัติที่ดี และเหมาะกับการทำวิจัย เพราะเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มมีน้ำหนักเบา และสามารถผสมกับคอนกรีตได้และยังสามารถรับกำลังได้ดี งานวิจัยของภาณุวัฒน์ (2561) ได้ศึกษาการใช้พลาสติกกรีซไคเลซินิดเพท (PET) เป็นส่วนผสมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ พบว่า การใช้พลาสติกกรีซไคเลซินิดเพท (PET) เป็นส่วนผสมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ด้วยปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ ถึงแม้กำลังรับแรงดึงทางอ้อมเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าการใช้พอลิเมอร์ใหม่ด้วยปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ในทั้งสองสภาวะแต่ก็มีค่าเสถียรภาพไม่ต่างกันอีกทั้งยังมีการไหลแยกตัวของวัสดุเชื่อมประสานที่น้อยกว่า และมีค่าสัดส่วนกำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าส่งผลให้วัสดุมีโอกาสเสียหายเนื่องจากความชื้นได้น้อยกว่าการใช้พอลิเมอร์ใหม่ชนิด (Styrene Butadiene Styrene) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและ ภัทรภณ (2560) ได้ศึกษาการนำเอาขวดพลาสติกเพท (PET) มาจัดเรียงภายในคอนกรีตบล็อก เพื่อประยุกต์ใช้กับผนังภายนอกในงานสถาปัตยกรรม จากการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีขวดพลาสติกเพท (PET) เป็นส่วนประกอบมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดประมาณ 27.63 กก./ตร.ซม. ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตบล็อกที่มีขวดพลาสติกเพท (PET) เป็นส่วนประกอบ มีค่าประมาณ 1.198 ก./ลบ.ซม. และการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกที่มีขวดพลาสติกเพท (PET) เป็นส่วนประกอบมีค่าประมาณ 0.363 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ต่อมา มีการศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ผสมขวดน้ำพลาสติกใช้แล้ว ต่อมา จรัล (2563) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ผสมขวดน้ำพลาสติกใช้แล้วทดแทนมวลรวมหยาบทั้งหมด (จรัล, 2563) โดยอัตราส่วนของปริมาณพลาสติกที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตัวอย่างมีค่าร้อยละ 5, 10, 15 และ 17 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบ พบว่า ปริมาณพลาสติกที่ผสมในคอนกรีตเพื่อทดแทนมวลรวมหยาบมีผลต่อความสามารถรับกำลังอัดของคอนกรีตที่ลดลงค่าอัตราส่วนของพลาสติกผสมในคอนกรีตที่ให้กำลังอัดมากที่สุด คือ ร้อยละ 5 โดยค่ากำลังอัดสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 225 กก./ตร.ซม. ที่อายุการบ่ม 28 วัน และค่าอัตราส่วนของพลาสติกผสมในคอนกรีตที่ให้กำลังอัดน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 17 โดยค่ากำลังอัดสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 117 กก./ตร.ซม. ที่อายุการบ่ม 28 วัน ความสามารถผสม และขึ้นรูปของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพลาสติกที่ผสมในคอนกรีตไม่ควรเกินร้อยละ 15

งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ด้านการทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบโมดูลัสแตกกร้าว การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบค่าการนำความร้อน และการทดสอบการรื้อซึม และหาอัตราส่วน และขนาดที่ดีที่สุดในการนำเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มมาใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์เพื่อทำเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใย : แผ่นเรียบ (fiber-cement sheet : flat sheets) เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริงได้รวมถึงการลดขยะจากขวดพลาสติก และงานก่อสร้างยังมีวัสดุอีกมากมายหลายอย่างที่เราสามารถนำมาพัฒนาในวงการก่อสร้างเป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ ๆ มาให้มันใช้ได้เรียนรู้ และเพิ่มความหลากหลายของการทดลอง เพื่อเสริมทักษะกระบวนการของงานวิจัยรวมถึงได้พัฒนาทักษะของผู้วิจัยเองในการใช้เครื่องมือสำหรับการเรียนการสอน และการวิจัยต่อไป อีกทั้งหน่วยงานต้นสังกัดก็จะได้รับประโยชน์จากงานวิจัยครั้งนี้ซึ่งสามารถกำจัดขยะโดยที่ได้ประโยชน์ร่วมกันหลายฝ่าย และผู้วิจัยจะพัฒนางานวิจัยจากงานประจำสู่งานวิจัยที่สามารถนำไปสู่เชิงพาณิชย์เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดให้กับหน่วยงาน ทั้งด้านการเรียนการสอน และต่อยอดงานวิจัย สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น การทดสอบกำลังรับแรงอัด โมดูลัสแตกกร้าว ความหนาแน่น และการนำความร้อน ก็จะสอดคล้องกับรายวิชาปฏิบัติการที่ต้องทำการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานทางด้านวิศวกรรมกำหนด

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ด้านกำลังอัด การทดสอบโมดูลัสแตกกร้าว การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบค่าการนำความร้อน และการทดสอบการรื้อซึม
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนและขนาดที่ดีที่สุดในการนำเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มมาใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์เพื่อทำเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใย: แผ่นเรียบ (fiber-cement sheets: flat sheets)

ระเบียบวิธีวิจัย

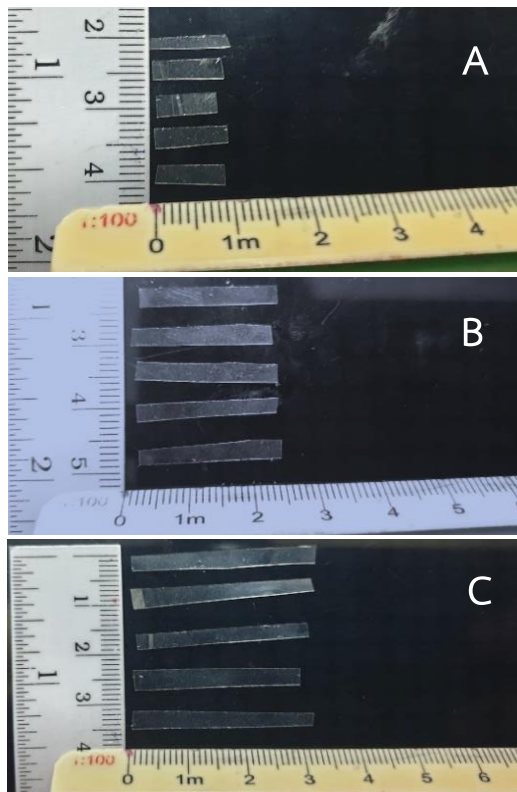
1. การเตรียมวัสดุ

1.1 เตรียมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม โดยนำขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วมาทำความสะอาด ตากให้แห้งแล้วนำมาตัดเป็นชิ้น ๆ 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดที่ 1 กว้าง 1 - 2 มม. ความยาว 5 - 10 มม. ขนาดที่ 2 กว้าง 1 - 2 มม. ความยาว 15 - 20 มม. ขนาดที่ 3 กว้าง 1 - 2 มม ความยาว 25 - 30 มม. โดยขนาดดังกล่าวได้ประยุกต์ใช้มาจากการวิจัยของ (ภูษิต และ อัญชิสสา, 2555) ซึ่งเส้นใยที่ใช้จะมีความยาวประมาณ 2.00 - 3.00 ซม. การใช้เส้นใยจากธรรมชาติเพื่อผลิตวัสดุก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 1

1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1

1.3 ทราายนํ้าขนาดไม่เกิน 4.75 มม. ความถ่วงจำเพาะ 2.64

1.4 นํ้าสะอาด



ภาพที่ 1 เตรียมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม A: กว้าง 1-2 มม. ยาว 5-10 มม., B: กว้าง 1-2 มม. ยาว 15-20 มม. และ C: กว้าง 1 - 2 มม. ยาว 25 -30 มม.

2. ออกแบบส่วนผสม

ผู้วิจัยต้องการศึกษาการใช้เส้นใยจากเศษพลาสติกมาออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ โดยเริ่มจากอัตราส่วนที่มีปริมาณเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มน้อยไปจนถึงอัตราส่วนที่มีปริมาณเส้นใยมากจำนวน 3 อัตราส่วน โดยเริ่มจากใช้เส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มร้อยละ 1 ร้อยละ 2 และร้อยละ 3 ตามลำดับ โดยใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ ต่อ ทราวย เท่ากับ 1:1 และใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) เท่ากับ 0.40 เพื่อที่จะนำส่วนผสมที่ดีที่สุดซึ่งสามารถผสมลงในส่วนผสมแล้วสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใย : แผ่นเรียบ (fiber-cement sheets) ขนาด 4x4x16 ซม. ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์ (ร้อยละ)	สัดส่วนผสม			
	ปูนซีเมนต์	ทราย	เส้นใยพลาสติก	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)
OPC (1:1)	1	1	0	0.40
S1 (1:0.01)	1	1	0.01	0.40
S2 (1:0.02)	1	1	0.02	0.40
S3 (1:0.03)	1	1	0.03	0.40
M1 (1:0.01)	1	1	0.01	0.40
M2 (1:0.02)	1	1	0.02	0.40
M3 (1:0.03)	1	1	0.03	0.40
L1 (1:0.01)	1	1	0.01	0.40
L2 (1:0.02)	1	1	0.02	0.40
L3 (1:0.03)	1	1	0.03	0.40

OPC: ตัวอย่างควบคุม, S: ขนาดเส้นใยขนาดเล็ก S1, S2, S3 ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10 มม., M: ขนาดเส้นใยขนาดกลาง M1, M2, M3 ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 15 - 20 มม., L: ขนาดเส้นใยขนาดใหญ่ L1, L2, L3 ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 25 - 30 มม., ตัวเลข 1, 2 และ 3 คือ ร้อยละการแทนที่ของเส้นใย

3. การผสมตัวอย่าง

นำเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มที่เตรียมไว้ใส่ลงในถังผสมกับปูนซีเมนต์ ทรายละเอียดและผสมให้เข้ากัน โดยสังเกตได้ด้วยตาเปล่า จากนั้นเติมน้ำสะอาดที่เตรียมไว้ลงในถังผสมและผสมให้เข้ากัน โดยแต่ละส่วนผสมให้ใช้ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 1 โดยแบ่งขนาดของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มที่ใช้ในการผสม เป็นขนาดที่ 1 กว้าง 1-2 มม. ยาว 5-10 มม. ขนาดที่ 2 กว้าง 1-2 มม. ยาว 15-20 มม. ขนาดที่ 3 กว้าง 1-2 มม. ยาว 25-30 มม.

นำส่วนผสมที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วใส่ลงในแบบหล่อซึ่งใช้ตัวอย่างขนาด 4x4x16 ซม. จำนวน 5 ตัวอย่างสำหรับแต่ละสัดส่วนผสม เพื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโมดูลัสแตกร้าว ทดสอบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน และนำส่วนผสมลงในแบบหล่อมอร์ตาร์ด้ามาตรฐานทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. โดยแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่วแบบในลักษณะวนเข้ากลาง จำนวน 32 ครั้งต่อชั้น เมื่อกระทุ้งครบแล้วปาดผิวให้เรียบและทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบแล้วนำตัวอย่างบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียความชื้นในอากาศโดยจะใช้น้ำและฟิล์มพลาสติก (Plastic wrap) ก้อนตัวอย่างเพื่อไม่ให้ตัวอย่างสัมผัสอากาศภายนอก เป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดจะนำไปทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ดังนี้

1) การทดสอบกำลังรับแรงอัด ทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C109) โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$\sigma = P/A \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ σ คือ กำลังรับแรงอัดประลัย หน่วยเป็น กก./ตร.ซม.

P คือ น้ำหนักกดประลัย หน่วยเป็น กก.

A คือ พื้นที่หน้าตัด หน่วยเป็น ตร.ซม.

โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ด้า ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละสัดส่วนผสมเพื่อทำการทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของค่ากำลังรับแรงอัด

2) การทดสอบค่าโมดูลัสแตกร้าว (มอก.1427-2561)

$$MOR = 3F_l/2be^2 \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ MOR คือ โมดูลัสแตกร้าว หน่วยเป็น กก./ตร.ซม.

F คือ แรงกดสูงสุด หน่วยเป็น กก.

l คือ ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ หน่วยเป็น ซม.

b คือ ความกว้างและความหนาของตัวอย่าง หน่วยเป็น ซม.

e คือ ค่าเฉลี่ยความหนาขึ้นทดสอบตามแนวการแตกหัก หน่วยเป็น ซม.

โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ด้า ขนาด 4x4x16 ซม. จำนวน 5 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละสัดส่วนผสมและแต่ละอายุการทดสอบเพื่อทำการทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของค่าโมดูลัสแตกร้าว

3) การทดสอบความหนาแน่น (มอก.1427-2561)

$$\rho = \frac{m_d}{m_s - m_i} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏ หน่วยเป็น ก./ลบ.ม.

m_d คือ มวลขึ้นทดสอบเมื่ออบแห้ง หน่วยเป็น ก.

m_s คือ มวลขึ้นทดสอบเมื่ออิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็น ก.

m_i คือ มวลขึ้นทดสอบเมื่อชั่งในน้ำ หน่วยเป็น ก.

โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละสัดส่วนผสมเพื่อทำการทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่น

4) การทดสอบค่าการนำความร้อน (ASTM C518)

$$k = \frac{Q L}{A \Delta T} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ k คือ สภาพนำความร้อน หน่วย วัดต่อเมตร-เคลวิน

Q คือ ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง หน่วย วัดต์

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน หน่วย ตร.ม

L คือ ความหนาของขึ้นทดสอบ หน่วย ม.

ΔT คือ อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ หน่วย เคลวิน

โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละสัดส่วนผสมเพื่อทำการทดสอบและหาค่าเฉลี่ยของค่าการนำความร้อน

5) การทดสอบความต้านทานการรั่วซึม (มอก.1427-2561) ทดสอบโดยนำตัวอย่างทดสอบมาจัดเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องทดสอบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 7 วัน วางเครื่องมือที่ใช้ทดสอบบนแผ่นซีเมนต์เส้นใย บนที่รองรับโดยห่างจากขอบแผ่นซีเมนต์เส้นใยไม่น้อยกว่า 50 มม. ยาววัสดุกันซึมตามแนวรอกกับแผ่นซีเมนต์เส้นใยเพื่อกันน้ำรั่วซึมระหว่างการทดสอบ เทน้ำลงไปใ้รอบให้ระดับน้ำสูงกว่าผิวบนของแผ่นซีเมนต์เส้นใย 20 มม. วางทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องทดสอบ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายแล้วตรวจพินิจผิวด้านล่างของตัวอย่างแผ่นซีเมนต์เส้นใย ใช้ตัวอย่างทดสอบการรั่วซึมจำนวน 3 แผ่น การรายงานผล ให้รายงานลักษณะของตัวอย่างหลังการทดสอบคือ ไม่มีคราบน้ำ มีคราบน้ำแต่ไม่มีหยดน้ำ หรือมีหยดน้ำ

ผลการวิจัย

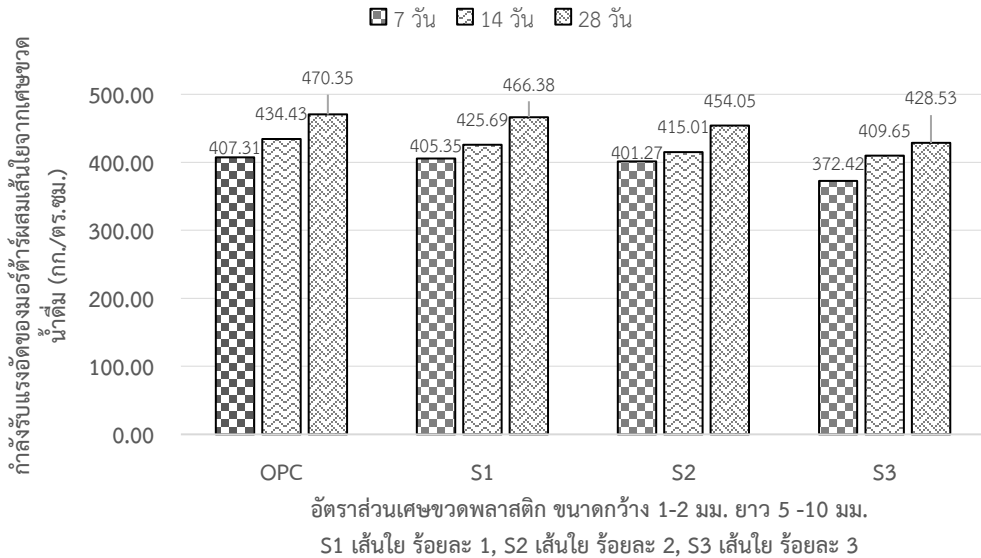
ด้านกำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ของเส้นใยจากเศษขูดน้ำตีม ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10 มม. ดังภาพที่ 2 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน กำลังอัดเฉลี่ย 407.31, 434.43 และ 470.35 กก./ตร.ซม. เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยจากเศษขูดน้ำตีม พบว่าในอัตราส่วนร้อยละ 1 (S1) อายุ 7, 14 และ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 405.35, 425.69 และ 466.38 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนร้อยละ 2 (S2) ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 401.27, 415.01 และ 454.05 กก./ตร.ซม. และในอัตราส่วนร้อยละ 3 (S3) ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 372.42, 409.65 และ 428.53 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

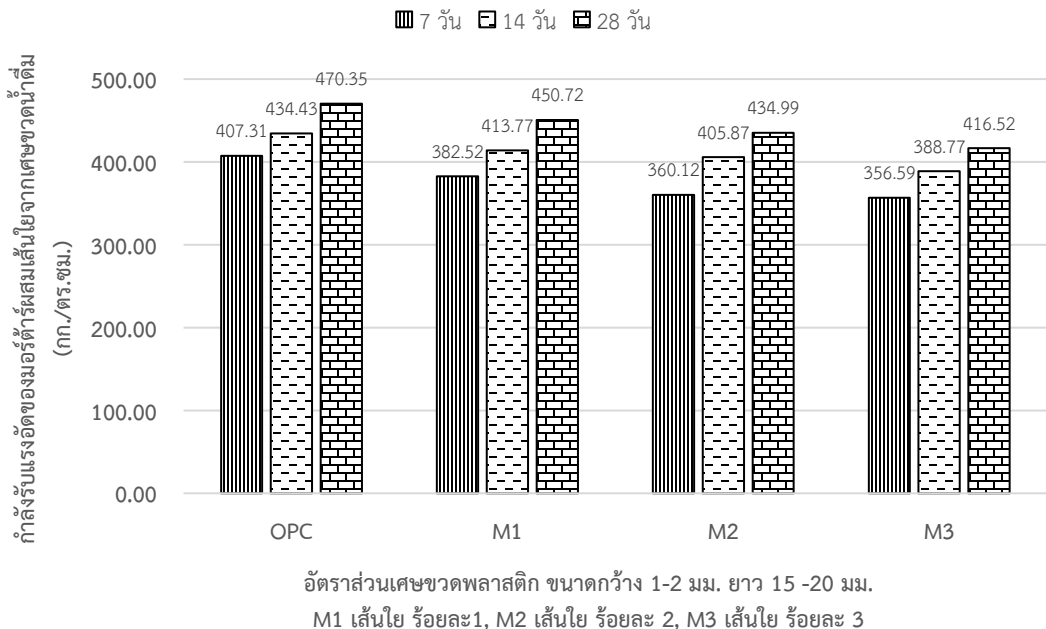
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขูดน้ำตีม (M1 - M3) ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 15 - 20 มม. ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ควบคุม และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยจากเศษขูดน้ำตีม พบว่าในอัตราส่วนร้อยละ 1 (M1) ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 382.52, 413.77 และ 450.72 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ อัตราส่วนร้อยละ 2 (M2) ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 360.12, 405.87 และ 434.99 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และในอัตราส่วนร้อยละ 3 (M3) ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 356.59, 388.77 และ 416.52 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ (ภาพที่ 3)



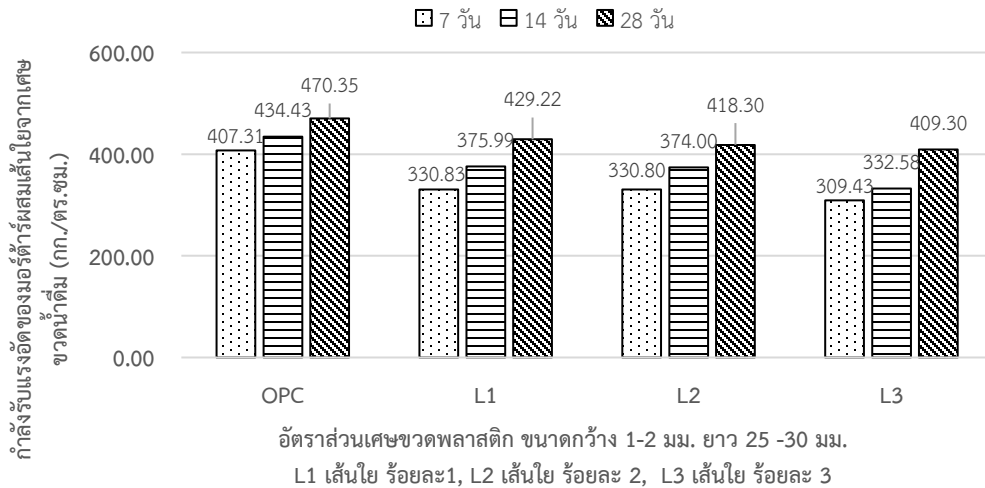
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเส้นใยจากเศษขูดน้ำต็ม ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 25 - 30 มม. กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขูดน้ำต็ม ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อัตราส่วนร้อยละ 1 - 3 (L1 - L3) ที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 330.83, 330.80 และ 309.43 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ผลการทดสอบ ที่อายุ 14 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 375.99, 374.00 และ 332.58 กก./ตร.ซม. และที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่ 429.22, 418.30 และ 409.30 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 2 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเศษขูดน้ำต็มอายุ 7, 14 และ 28 วัน ของเส้นใย ขนาดกว้าง 1-2 มม. และยาว 5-10 มม.



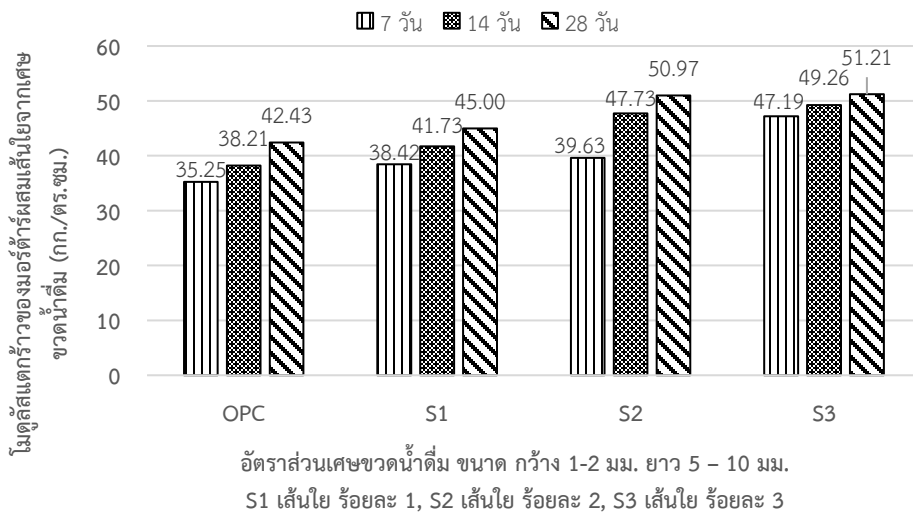
ภาพที่ 3 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเศษขูดน้ำต็มอายุ 7, 14 และ 28 วัน ของเส้นใยขนาดกว้าง 1-2 มม. และยาว 15-20 มม.



ภาพที่ 4 ผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเศษขวดน้ำดื่มอายุ 7, 14 และ 28 วัน ของเส้นใยขนาดกว้าง 1-2 มม. และยาว 25-30 มม.

ด้านโมดูลัสแตกร้าว

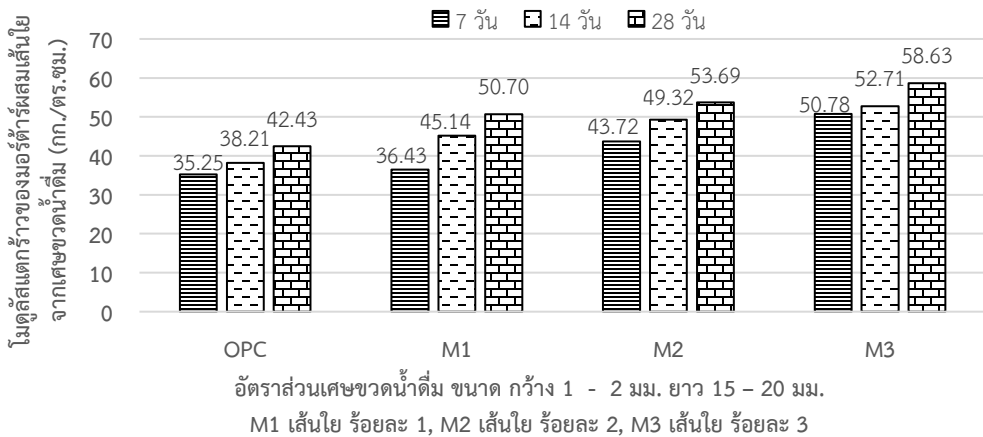
จากผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวตามมาตรฐาน (มอก.1427-2561) โดยใช้ตัวอย่างขนาด 4x4x16 ซม. สำหรับแผ่นซีเมนต์เส้นใย : แผ่นเรียบ (fiber-cement sheets : flat sheets) ซึ่งเกณฑ์โมดูลัสแตกร้าวค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 40 กก./ตร.ซม. ทดสอบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งกำลังโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์ควบคุมเท่ากับ 35.25, 38.21 และ 42.43 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10 มม. ดังภาพที่ 5 พบว่าตัวอย่างที่ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ร้อยละ 2 และร้อยละ 3 ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ค่าโมดูลัสแตกร้าวเฉลี่ยจะอยู่ที่ 38.42, 41.73 และ 45.00 กก./ตร.ซม. และในอัตราส่วนร้อยละ 2 เฉลี่ย 39.63, 47.73 และ 50.97 กก./ตร.ซม. และในอัตราส่วนร้อยละ 3 เฉลี่ย 47.19, 49.36 และ 51.21 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ



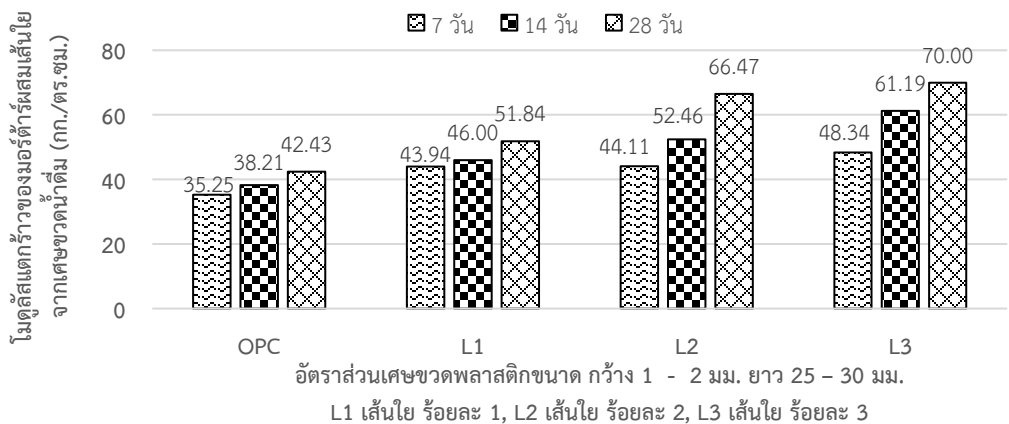
ภาพที่ 5 ผลการเปรียบเทียบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยมอร์ตาร์ควบคุม และแผ่นซีเมนต์เส้นใยผสมเศษขวดน้ำดื่ม อายุ 7, 14 และ 28 วัน ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10 มม.

จากผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย : แผ่นเรียบ ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งกำลังโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยควบคุมเท่ากับ 35.25, 38.21 และ 42.43 กก./ตร.ซม. เปรียบเทียบกับแผ่นซีเมนต์เส้นใยผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 15 - 20 มม. ดังภาพที่ 6 พบว่า อัตราส่วนที่ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2 และร้อยละ 3 โดยอัตราส่วนร้อยละ 1 ค่ากำลังโมดูลัสแตกร้าวเฉลี่ยจะอยู่ที่ 36.43, 45.14 และ 50.70 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ในอัตราส่วนร้อยละ 2 ค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 43.72, 49.32 และ 53.69 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และ ในอัตราส่วนร้อยละ 3 ค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 50.78, 52.71 และ 58.63 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

จากผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งกำลังโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ควบคุมเท่ากับ 35.25, 38.21 และ 42.43 กก./ตร.ซม. เปรียบเทียบกับส่วนผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 25 - 30 มม. ดังภาพที่ 7 พบว่าอัตราส่วนที่ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ร้อยละ 2 และร้อยละ 3 โดยโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 43.94, 46.00 และ 51.84 กก./ตร.ซม. ในอัตราส่วนร้อยละ 2 ค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 44.11, 52.46 และ 66.47 กก./ตร.ซม. และในอัตราส่วนร้อยละ 3 ค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 48.34, 61.19 และ 70.00 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ



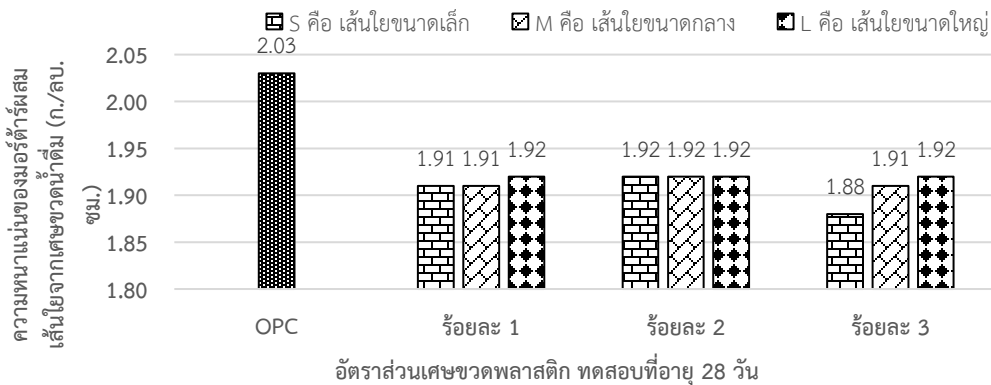
ภาพที่ 6 ผลการเปรียบเทียบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยมอร์ต้าร์ควบคุม และแผ่นซีเมนต์เส้นใยผสมเศษขวดน้ำดื่ม อายุ 7,14 และ28 วัน ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 15 - 20 มม.



ภาพที่ 7 ผลการเปรียบเทียบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยมอร์ต้าร์ควบคุม และแผ่นซีเมนต์เส้นใยผสมเศษขวดน้ำดื่ม อายุ 7, 14 และ28 วัน ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 25 - 30 มม.

ด้านความหนาแน่น

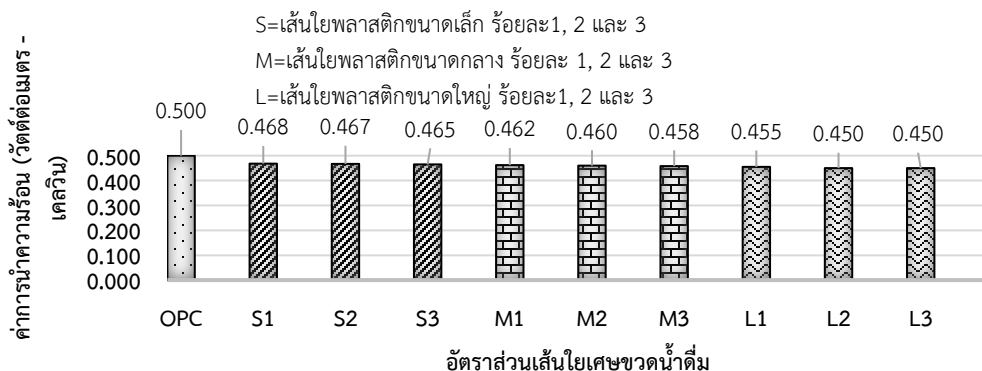
จากผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดพลาสติก ทดสอบที่อายุ 28 วัน (S=เส้นใยขนาดเล็ก ขนาดเส้นใยกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10 มม., M=เส้นใยขนาดกลาง ขนาดเส้นใยกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 15 - 20 มม. และL=เส้นใยขนาดใหญ่ ขนาดเส้นใยกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 25 - 30 มม. ดังภาพที่ 8 พบว่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย เท่ากับ 2.03 ก./ลบ.ซม. และเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยจากเศษขวดพลาสติกร้อยละ 1 ขนาดเส้นใยทั้ง 3 ขนาด คือ S, M, และ L มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน อยู่ที่ 1.91, 1.91 และ 1.92 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ และความหนาแน่นของเส้นใยที่ผสมร้อยละ 2 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่ อายุ 28 วัน อยู่ที่ 1.92, 1.92 และ 1.92 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ สำหรับความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยอัตราส่วนร้อยละ 3 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน อยู่ที่ 1.88, 1.91 และ 1.92 ก./ลบ.ซม.ตามลำดับ



ภาพที่ 8 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมเศษขวดพลาสติกอายุ 28 วัน

ด้านการนำความร้อน

ในการทดสอบการนำความร้อนโดยเลือกจากอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดของกำลังรับแรงอัดนำมาทดสอบ ขึ้นรูป ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร และทำการทดสอบด้านการนำความร้อนที่อายุ 28 วัน โดยเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม อัตราส่วนร้อยละ 1, 2 และ 3 (S1, S2, S3, M1, M2, M3, L1, L2, L3) พบว่าค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มในอัตราส่วนร้อยละ 1 จะเฉลี่ยอยู่ที่ 0.465 - 0.468 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน ในอัตราส่วนร้อยละ 2 จะเฉลี่ยอยู่ที่ 0.458 - 0.462 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน และในอัตราส่วนร้อยละ 3 เฉลี่ยอยู่ที่ 0.450 - 0.455 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 ผลการนำความร้อนของมอร์ตาร์ผสมเศษขวดพลาสติก ทดสอบที่อายุ 28 วัน



ด้านต้านทานการรั่วซึม

ในการทดสอบการต้านทานการรั่วซึมของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากเศษขวดพลาสติก พบว่า ในทุกอัตราส่วนผสมทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน ตามมาตรฐานการทดสอบ มอก.1427-2561 จากการทดสอบสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ใช้ในทดสอบจะมีคราบน้ำแต่ไม่มีหยดน้ำ ตัวอย่างดังแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ภาพตัวอย่างการทดสอบการต้านทานการรั่วซึมของแผ่นซีเมนต์เส้นใย

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย สามารถสรุปได้ว่าสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม

1. ค่ากำลังรับแรงอัดทุกอัตราส่วนผสม พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งอาจเกิดจากการผสมเส้นใยพลาสติกเข้าไปจึงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

2. สำหรับค่าโมดูลัสแตกร้าว พิจารณาที่อายุ 28 วัน ทุกอัตราส่วนสามารถนำไปทำเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยและสามารถใช้งานได้จริง ค่าโมดูลัสแตกร้าวเฉลี่ย 47.19 - 70 กก./ตร.ซม. ซึ่งผลการทดสอบผ่านเกณฑ์มาตรฐานตาม มอก.1427-2561

3. ค่าความหนาแน่นซึ่งโดยรวมทุกอัตราส่วนผสมมีค่าที่ต่างกันเล็กน้อย ซึ่งความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโพรงโดยตรง โดยความหนาแน่นต่ำสุดเฉลี่ยที่ 1.88 ก./ลบ.ซม.

4. การทดสอบค่าการนำความร้อนลดลงตามปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในส่วนผสม ซึ่งค่าการนำความร้อนต่ำสุดอัตราส่วนผสม L2 และ L3 ค่าเฉลี่ย 0.450 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน การนำความร้อนทำให้วัสดุมีสมบัติการเป็นฉนวนดีขึ้น

5. การทดสอบการต้านทานการรั่วซึม ในการทดสอบครั้งนี้ทุกอัตราส่วนผสมมีคราบน้ำเกิดขึ้นแต่ไม่พบหยดน้ำ ซึ่งจากการทดสอบสามารถระบุประเภทลักษณะการใช้งานของตัวอย่างได้ว่า ใช้งานงานฝ้าเพดานแบบผิวเรียบประเภท C ชนิดที่ 1 หมายถึง แผ่นซีเมนต์เส้นใยสำหรับใช้ภายใน โดยไม่ถูกแสงแดด และ/หรือน้ำโดยตรง

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ด้านกำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม โดยมีขนาดของเส้นใยพลาสติก ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10, 15 - 20 และ 25 - 30 มม. อัตราส่วนผสม S1, S2, S3, M1, M2, M3, L1, L2 และ L3 ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ค่า W/C เท่ากับ 0.40 ความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 309.43 ถึง 466.38 กก./ตร.ซม. เมื่อมีการเพิ่มของเส้นใยทำให้การพัฒนา กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ควบคุมค่าเฉลี่ยที่ 470.35 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ในอัตราส่วนร้อยละ 1 - 3 กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงแปรผกผันกับปริมาณของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภัทธภณ (2563) ที่กล่าวว่า การเลือกใช้งานคอนกรีตผสมพลาสติกสามารถพิจารณา ค่าการรับกำลังอัดที่ทดสอบได้ให้เหมาะสมกับการรับกำลังอัดของประเภทงานก่อสร้าง

พิจารณาที่อายุ 7 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาโดยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการพัฒนา กำลังรับแรงอัด และจะเห็นได้ว่าในแต่ละอัตราส่วนผสมเมื่อมีการใส่ปริมาณเส้นใยพลาสติกที่มากขึ้นกำลังรับแรงอัดก็จะแปรผันตามปริมาณของเส้นใยผสมเข้าไปเพราะถ้าใส่ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นโอกาสการเกิดโพรงก็มากขึ้นเช่นกันค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยในสัดส่วนผสม ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khedari *et al.* (2001)

พิจารณาที่อายุ 14 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเส้นใยพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแต่เมื่อพิจารณาตามอายุของการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาด้านกำลังเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นผลเนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นมากกว่ามวลรวมอื่น ๆ ในส่วนผสมทำให้เมื่อต้องรับแรงพลาสติกจะเกิดการยืดหยุ่นและไม่สามารถรับแรงดังกล่าวได้และความต้านทานแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเศษขวดน้ำดื่มจึงลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Jindaprasert and Jaturapitakkul, 2012)

พิจารณาที่อายุ 28 วัน พบว่า ทุกอัตราส่วนผสมจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเส้นใยเศษพลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและขนาดความยาวของเส้นใยพลาสติกก็ส่งผลให้กำลังลดลงเช่นกันสาเหตุอาจเป็นเพราะการผสมเส้นใยพลาสติกซึ่งอาจทำให้มีปริมาณโพรงมากสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dang *et al.* (2018) และอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด คือ เส้นใยขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10 มม. (S1) เพราะมีส่วนผสมเส้นใยพลาสติกที่มีปริมาณน้อยที่สุดและขนาดเล็กที่สุดอาจจะทำให้มีโพรงในก้อนตัวอย่างน้อยจึงให้การรับกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม

ด้านโมดูลัสแตกร้าว

สำหรับแผ่นซีเมนต์เส้นใย (Fiber-cement sheets : Flat sheets) ทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 1427-2561 การผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มกับมอร์ตาร์ เมื่อผสมปริมาณเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มมากขึ้น โมดูลัสแตกร้าวจะเพิ่มขึ้น โดยรวมแล้วตัวอย่างทดสอบผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำของมาตรฐานการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว ซึ่งกำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำของกำลังรับโมดูลัสแตกร้าว เท่ากับ 40 กก./ตร.ซม. เนื่องจากเส้นใยสามารถจับยึดกันได้ดีหรือเส้นใยที่ใช้ไม่มีการดูดซับน้ำจะส่งผลให้แผ่นซีเมนต์เส้นใยไม่ดูดซับน้ำจึงไม่เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์จึงทำให้เส้นใย และซีเมนต์ยึดเกาะกันได้มากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นโพรงลดลงมีแนวโน้มรับแรงดัดได้ดี ค่าโมดูลัสแตกร้าวจึงสูงขึ้น โดยอัตราส่วนผสมเรียงลำดับจากร้อยละ 3 ร้อยละ 2 และร้อยละ 1 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10, 15 - 20 และ 25 - 30 มม. ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มที่เพิ่มขึ้น

พิจารณาจากเส้นใยขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 5 - 10 มม. โดยพบว่าโมดูลัสแตกร้าวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นจาก 7, 14 และ 28 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยมีความยืดหยุ่นและทำให้ตัวอย่างไม่แตกหักง่าย โมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มทุกอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานแรงดัดต่ำสุดตามมาตรฐาน มอก.1427-2561 ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 40 กก./ตร.ซม. และมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาจากงานวิจัยของ Agopyan *et al.* (2005) ซึ่งการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนผสมของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2 ถึง 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความต้านทานแรงดัดเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

พิจารณาจากเส้นใย ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 15 - 20 มม. โดยพบว่า กำลังโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มที่เพิ่มขึ้นและมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาจากงานวิจัยของ Agopyan *et al.* (2005) ซึ่งการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นส่วนผสมของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2 ถึง 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความต้านทานแรงดัดเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

พิจารณาจากเส้นใย ขนาดกว้าง 1 - 2 มม. ยาว 25 - 30 มม. โดยพบว่าโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าการรับแรงอัดลดลงที่อัตราส่วนร้อยละ 2 และมีค่าโมดูลัสแตกร้าวเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนร้อยละ 3 จากผลการทดสอบพบว่า เส้นใยที่มีขนาดใหญ่และมีปริมาณที่มากที่สุดสามารถรับโมดูลัสแตกร้าวได้ดีที่สุดเนื่องจากมีเส้นใยเข้ามาช่วยในการรับน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมทำให้เห็นว่าทุกส่วนผสมที่อายุต่าง ๆ ให้กำลังด้านโมดูลัสแตกร้าวได้ดี และผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำของมาตรฐาน มอก.1427-2561 ผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยผสมเส้นใยพลาสติกพิจารณาที่ อายุ 28 วัน พบว่า ทุกสัดส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานแรงดัดต่ำสุดตามมาตรฐาน (มอก.1427-2561) ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 40 กก./ตร.ซม. และมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาจากงานวิจัยของ (Agopyan *et al.*, 2005)

ด้านความหนาแน่น

อัตราส่วนผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มทั้ง 3 ขนาด ทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่า เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแต่ละอัตราส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยพลาสติกมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่มีเส้นใยพลาสติก และค่าความหนาแน่นลดลงเนื่องจากการมีการใช้ปริมาณเส้นใยพลาสติกในส่วนผสมของมอร์ตาร์มากขึ้นส่งผลให้อาจเกิดปริมาณรูพรุน และความพรุนของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลงเล็กน้อย ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น (Cook et al, 1978) เนื่องจากเส้นใยพลาสติกไม่ดูดซับน้ำในการเพิ่มเส้นใยพลาสติกในส่วนผสมแต่ละอัตราส่วนผสม จะส่งผลให้มีความหนาแน่นลดลงจึงอาจทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเส้นใยกับซีเมนต์จึงทำให้เส้นใยและซีเมนต์ยึดเกาะกันได้มากขึ้น แนวโน้มความหนาแน่นของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มโดยรวมแล้วมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มเฉลี่ยที่ 1.88 - 1.94 ก./ลบ.ซม. จะเห็นได้ว่าในแต่ละอัตราส่วนจะมีค่าความหนาแน่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจะมีค่าต่ำกว่าเพราะก้อนตัวอย่างอาจจะมีฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่างมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมจึงทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าที่ต่ำกว่า

ค่าการนำความร้อน

จากผลการทดสอบค่าการนำความร้อนที่อายุ 28 วัน ของเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม พบว่า ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่ม ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ร้อยละ 2 และร้อยละ 3 โดยค่าการนำความร้อนในอัตราส่วนร้อยละ 1 อยู่ที่ 0.445 - 0.468 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน ในอัตราส่วนร้อยละ 2 อยู่ที่ 0.450 - 0.467 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน และ ในอัตราส่วนร้อยละ 3 จะอยู่ที่ 0.450 - 0.465 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน จะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อนของในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2 และ 3 มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกสัดส่วนผสม จะเห็นได้ว่าเส้นใยที่มีขนาดเล็กจะมีค่าการนำความร้อนสูงสุด ขนาดเส้นใยใหญ่สุดมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดและยังพบว่าการผสมเส้นใยในอัตราส่วนที่มากก็จะทำให้การนำความร้อนของตัวอย่างลดน้อยลงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม สำหรับตัวอย่างที่ผสมเส้นใยพลาสติกซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์โดยเฉพาะค่าความหนาแน่นที่แปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และสอดคล้องกับผลจากงานวิจัยอื่น (Khedari et al., 2001; Asasutjarit et al., 2007; Asasutjarit et al., 2009)

การทดสอบการต้านทานการรื้อซึม

ทำการทดสอบตามมาตรฐานแผ่นซีเมนต์เส้นใย : แผ่นเรียบ ตามมอก. 1427-2561 แล้วพบว่าตัวอย่างมีคราบน้ำเกิดขึ้นซึ่งอาจจะเป็นผลจากชั้นตัวอย่างที่อาจมีรอยร้าวเล็ก ๆ ที่น้ำสามารถซึมผ่านได้จึงทำให้เกิดคราบน้ำได้ ทำให้สามารถระบุจำแนกตัวอย่างประเภทการใช้งานจากการทดสอบนี้ได้ การซึ่กตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามแผนการซึ่กตัวอย่างที่กำหนด

ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำให้ทราบถึงการประยุกต์ใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากเศษขวดพลาสติกโดยการนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์บูรณาการกับการเรียนการสอนสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นหัวข้อปริญญาโทต่อไปได้ อีกทั้งยังเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการเผาและฝังกลบได้อีกทาง และยังสามารถนำประโยชน์จากงานวิจัยครั้งนี้มาจำกัดเศษขยะที่เกิดขึ้นจากการบริโภคของนิสิต และบุคลากรได้โดยนำไปเป็นส่วนผสมในด้านวิศวกรรมในการพัฒนางานวิจัยเพื่อต่อยอดไปสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

ข้อเสนอแนะการวิจัย

1. การเลือกใช้ขวดพลาสติกควรใช้ยี่ห้อเดียวกัน เพราะขวดแต่ละยี่ห้ออาจจะมีค่าความหนาแน่นและความเหนียวที่ไม่เหมือนกัน
2. เนื่องจากงานวิจัยมีอัตราส่วนผสมที่หลากหลาย ทำให้ไม่สามารถทำตัวอย่างทดสอบได้ในปริมาณมาก ๆ และทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ได้ไม่ครบถ้วน ทำให้ไม่ทราบคุณสมบัติในด้านอื่น ๆ การวิจัยครั้งต่อไปสามารถออกแบบให้เป็นการวิจัยในเชิงลึกหรือเจาะลึกส่วนผสมแต่ละประเภทโดยใช้ข้อมูลวิจัยชิ้นนี้อ้างอิงได้
3. การเตรียมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มค่อนข้างยาก เนื่องจากต้องตัดให้ได้ขนาดตามที่กำหนด ควรใช้เครื่องตัดกระดาษที่มีสเกลบอกขนาดมาใช้ในการตัดขวดพลาสติก
4. พลาสติกที่ใช้ห่อหุ้มตัวอย่างในการบ่มและขาดง่าย อาจส่งผลให้คุณสมบัติของมอร์ตาร์ ผสมเส้นใยจากเศษขวดน้ำดื่มที่ได้ออกมาไม่ดีเท่าที่ควร จำเป็นต้องใช้พลาสติกห่อหุ้มตัวอย่างหลาย ๆ ชั้นเพื่อป้องกันการขาด

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะผู้บริหาร และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชต์ ชีระโรจน์ ที่ปรึกษาโครงการวิจัย นางสาวบัว เวียงสิมา นายวีระพล ภูศิลา และ อาจารย์ทุกท่าน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ช่วยเหลือและแนะนำ จงงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2564. กาฬกอบรมการลด และคัดแยกขยะมูลฝอยภายในอาคาร กรมควบคุมมลพิษ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565. จำนวน 50 หน้า.
- จรัล รัตนโชตินันท์. 2563. การศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่ผสมขวดน้ำพลาสติกใช้แล้ว. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย. 4(3): 115-126.
- พัทธนันท์ นาถพิณีจ บริสุทธิ์ จันทรวงศ์ไพศาล โชติกา คงสมบูรณ์ และพงษ์ศักดิ์ หงษ์เจริญศร. 2562. คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยซีเมนต์จากหญ้าเนเปียร์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. 7(2): 129-146.
- ภาณุวัฒน์ งามดี. 2561. การใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิด HDPE และชนิด PET เป็นส่วนผสมในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา. 138 หน้า.
- ภัทรภณ บูรณากาญจน์. 2563. สมบัติของคอนกรีตบล็อกที่มีการใช้ขวดพลาสติก Polyethylene Terephthalate (PET) เป็นส่วนประกอบ. Thai Journal of Science and Technology. 9(1): 180-196.
- ภูษิต เลิศพัฒนารักษ์ และกนกวรรณ มะสุวรรณ. 2558. คุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อผลิตวัสดุก่อสร้าง. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 38(1): 71-86.
- ภูษิต เลิศพัฒนารักษ์ และ อัญชิสรา สันติจิตโต. 2555. คุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อวัสดุก่อสร้าง. วารสารวิจัยและสารสถาปัตยกรรม/การผังเมือง. 9(1): 113-124.
- รณกฤต กุลธวัชวงศ์ อ้าพล วงศ์ษา วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ. 2563. จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเส้นใยป่านครนารายณ์เป็นส่วนผสม. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 13(1): 90-100.
- Agopyan, V., Savastano, Jr H., John, V.M. and M.A. Cincotto. 2005. Developments on vegetable fiber-cement-based materials in São Paulo, Brazil: An overview. Cement and Concrete Composite. 27(5): 527-536.
- Asasutjarit, C., Charoenvai, S., Hirunlabh, J. and J. Khedari. 2009. Material and mechanical properties of pretreated coir-based green composites. Composites Part B: Engineering. 40(7): 633-637.
- Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghamati, B. and U.C. Shin. 2007. Development of coconut coir-based lightweight cement board. Construction and Building Materials. 21(2): 277-288.
- Cook, D.J., Pama, R.P. and H. Weerasingle. 1978. Coir fiber reinforced cement as a low-cost roofing material. Building and Environment. 13(3): 193-198.
- Dang, J., Zhao, J., Hu, W., Du, Z. and D. Goa. 2018. Properties of mortar with waste clay bricks as fine aggregate. Construction and Building Materials. 166: 898-907.
- Jindaprasert, P. and C. Jaturapitakkul. 2012. Cement, pozzolan, and concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association. (in Thai). 386 pages.
- Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., and J. Hirunlabh. 2001. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. Cement and Concrete Composites. 23(1): 65-70.