

## ถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาจากเศษถังน้ำพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว และเม็ดพลาสติกรีไซเคิลโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

### Fly Ash Geopolymer Lightweight Concrete Containing Glass Fiber Reinforce Plastic Waste and Polypropylene Terephthalate Recycled Plastic Pellets

ฐิตาภรณ์ พอบุตรี<sup>1</sup> อธิกา วงศ์วานกลม<sup>2,\*</sup> ทศพล จตุระบุล<sup>3</sup> ภัคที คบกลาง<sup>4</sup> วิทยา ศรีสมบูรณ์<sup>5</sup> และ อมรเดช นวลมณี<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

\*Corresponding author; E-mail address: athika.w@ku.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติของถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวมละเอียดเป็นมวลรวมเบา (LWFA) ที่ได้จากผสมเศษถังน้ำพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) และเม็ดพลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) คัดเลือกส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาจำนวน 6 ส่วนผสม ควบคุมความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 15M สารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ชนิดที่ 2 ตาม มอก.433-2539 อัตราส่วน NS/NH 1.5 อัตราส่วนสารละลายต่างต่อถั่วลอย (L/A) 0.85 แปรผันปริมาณการแทนที่เฟสและ RCA ด้วย LWFA ให้มีค่าคำนวณความหนาแน่นสมดุล เท่ากับ 1497, 1431, 1401, 1378, 1340 และ 1323 kg/m<sup>3</sup> ปริมาณเฟสร้อยละ 61.8, 60.4, 59.1, 58.1, 56.4 และ 55.6 โดยปริมาตร พบว่า ความสามารถในการทำงานได้มีแนวโน้มแปรผันตามปริมาณของเฟสในส่วนผสม ปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณเฟสและความหนาแน่น กำลังรับแรงอัดค่าอยู่ระหว่าง 1.48-9.82 MPa มีแนวโน้มแปรผันตามปริมาณเฟส เมื่อลดปริมาณเฟสจากร้อยละ 61.8 เป็น 60.4, 59.1, 58.1, 56.4 และ 55.6 กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 23 29 23 85 และ 85 ตามลำดับ กำลังรับแรงดึงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.66-1.33 MPa มีแนวโน้มแปรผกผันกับปริมาณโพรง การกระจายตัวของส่วนผสมเป็นอีกปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงดึง ส่วนผสมที่คัดเลือกศึกษาทั้ง 6 ส่วนผสม ผ่านเกณฑ์ด้านการรับกำลังและปริมาตรการดูดซึมน้ำสำหรับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ตาม มอก.58-2530 และมีเพียงบางส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มอก.57-2530 ไม่มีส่วนผสมใดผ่านเกณฑ์การรับกำลังของมาตรฐาน ASTM C330/C330M คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง การศึกษานี้ส่งเสริมต่อการพัฒนาคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน

**คำสำคัญ:** จีโอโพลิเมอร์, คอนกรีตมวลเบา, มวลรวมหยาบเศษคอนกรีต, เม็ดพลาสติกรีไซเคิลชนิด PET, เศษเส้นใยแก้วเหลือทิ้ง

#### Abstract

This research focuses on studying the properties of fly ash geopolymer lightweight concrete that uses fine aggregates as lightweight aggregates (LWFA) derived from a mix of glass fiber reinforced plastic waste from water tank industry (GFRP) and recycled polyethylene terephthalate (PET) pellets. Six mixtures were selected for the study, with a controlled concentration of NaOH solution at 15M and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> type 2 solution as per Thai Industrial Standard TIS 433-2539. The NS/NH ratio was 1.5, and the ratio of alkaline solution to fly ash (L/A) was 0.85. The replacement amount of paste and RCA with LWFA was varied to achieve and calculate equilibrium density of 1497, 1431, 1401,

1378, 1340, and 1323 kg/m<sup>3</sup>, with paste volumes of 61.8%, 60.4%, 59.1%, 58.1%, 56.4%, and 55.6%. The results showed that workability tended to vary with the paste volume in the mixtures. Water absorption and porosity were not linearly related to the paste content and density. Compressive strength ranged from 1.48 to 9.82 MPa, showing a trend related to paste volume. When the paste content was reduced from 61.8% to 60.4%, 59.1%, 58.1%, 56.4%, and 55.6%, the compressive strength decreased by 23%, 29%, 23%, 85%, and 85%, respectively. The tensile strength ranged from 0.66 to 1.33 MPa, with an inverse relationship to porosity. The distribution of the mixture was another significant factor influencing tensile strength. All six mixtures passed the criteria for compressive strength and water absorption for non-load-bearing concrete blocks according to TIS 58-2530, with some mixtures passing the criteria for load-bearing concrete blocks according to TIS 57-2530. However, none of the mixtures met the strength requirements of ASTM C330/C330M for structural lightweight concrete. This study contributes to the development of environmentally friendly concrete using industrial waste materials and promotes a circular economy.

**Keywords:** Geopolymer, Lightweight concrete, RCA, recycled plastic PET, waste GFRP.

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันเรากำลังเผชิญกับปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งหนึ่งในสาเหตุสำคัญคือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยอุตสาหกรรมที่มีการปล่อย CO<sub>2</sub> ในปริมาณมากนั้นรวมถึงการผลิตปูนซีเมนต์และการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน ซึ่งอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 7-8% ของการปล่อย CO<sub>2</sub> ทั่วโลก [1-2] การลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ในภาคอุตสาหกรรมจึงเป็นเป้าหมายสำคัญระดับโลก

ทางเลือกหนึ่งในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมก่อสร้างคือการพัฒนาวัสดุประสานทางเลือกแทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์ (Fly ash Geopolymer) จัดเป็นหนึ่งในวัสดุประสานชนิดใหม่ที่มีศักยภาพ [3-4] วัสดุนี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันระหว่างถั่วลอยซึ่งมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักกับสารกระตุ้นอัลคาไลที่นิยมใช้ได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต [3-4] ข้อได้เปรียบที่สำคัญของจีโอโพลิเมอร์คือเป็นวัสดุที่

เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า โดยมีปริมาณการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำกว่าและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ [3-4] การวิจัยเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิทธิพลของความเข้มข้นของสารกระตุ้นอัลคาไลและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม ซึ่งพบว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต/มอร์ตาร์ [5-7]

นอกจากปัญหาด้านการปลดปล่อย CO<sub>2</sub> แล้ว ปัญหาขยะจากการก่อสร้าง การรื้อถอนอาคาร (Construction and Demolition Waste - C&DW) และขยะอุตสาหกรรม ก็เป็นอีกปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง การนำเศษวัสดุเหลือใช้ต่างๆ กลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้าง เช่น การนำเศษคอนกรีตมาแปรรูปเป็นมวลรวมรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate หรือ RCA) เพื่อใช้แทนที่มวลรวมธรรมชาติ เป็นแนวทางหนึ่งที่มีประโยชน์หลาย [8-10] โดยการศึกษาที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ RCA เป็นมวลรวมในคอนกรีตส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลบางประการ โดยทั่วไปยังเพิ่มสัดส่วนการใช้ RCA ทดแทนมวลรวมธรรมชาติแนวโน้มที่กำลังจะลดลง ในขณะที่งานวิจัยอื่นได้ศึกษาแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ RCA หรือการปรับปรุงกระบวนการผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ [5] ปัญหาเหล่านี้ทวีความรุนแรงขึ้นจากปริมาณของขยะที่เพิ่มสูงขึ้น และปัญหาการจัดการ เช่น การลักลอบทิ้งในพื้นที่ต่างๆ ซึ่งในบางพื้นที่ เช่น กรุงเทพมหานคร มีปริมาณขยะ C&DW จำนวนมากในแต่ละวัน

ขยะพลาสติกบางประเภท โดยเฉพาะที่รีไซเคิลได้ยากหรือต้องใช้กระบวนการเฉพาะ ก็เป็นขยะอุตสาหกรรมและขยะหลังการบริโภคที่มีปริมาณสะสมและก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญเช่นกัน ได้แก่ เศษถังน้ำพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Plastic Waste หรือ GFRP) และ เม็ดพลาสติกรีไซเคิลโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate Recycled Plastic Pellets หรือ PET) ซึ่งมีปริมาณมากและมักจัดการได้ยาก คุณสมบัติที่เด่นชัดและน่าสนใจสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวัสดุก่อสร้างของวัสดุทั้งสองชนิด คือ มีน้ำหนักเบา

นอกจากประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมและขยะวัสดุเหลือใช้แล้ว คุณสมบัติทางวิศวกรรมบางประการก็มีความสำคัญต่อการพัฒนาวัสดุที่ตรงตามการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete หรือ LWC) ซึ่งหมายถึงคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป โดยมาตรฐาน เช่น ASTM C330/C330M-17 [11] การใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาเป็นมวลรวมในการผลิต LWC ช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างโดยรวมลดขนาดองค์อาคาร ลดปริมาณเหล็กเสริม และลดภาระน้ำหนักบนฐานราก [12] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการประหยัดค่าวัสดุ ค่าขนส่ง แรงงาน และระยะเวลาในการก่อสร้าง คุณสมบัติเด่นอื่นๆ ของ LWC เช่น การเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและความสามารถในการทนไฟ ทำให้เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูป ผนัง หรือพื้น แม้จะมีการศึกษาถึงศักยภาพของแก๊สลอยจีโอโพลิเมอร์ การนำมวลรวมรีไซเคิลจากเศษคอนกรีต (RCA) กลับมาใช้ หรือการประยุกต์ใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาในคอนกรีตโดยทั่วไป แต่การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นปัญหาการจัดการอย่างเศษ GFRP และเม็ดพลาสติกรีไซเคิล PET มาใช้ร่วมกันในฐานะมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับแก๊สลอยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยมีเป้าหมายในการพัฒนาเป็นคอนกรีตมวลเบา ยังไม่พบการศึกษาอย่างครอบคลุมในอดีต บทความวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาเพื่อเติมเต็มช่องว่างองค์ความรู้ดังกล่าว และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้วัสดุเหล่านี้ในอนาคต

จากความสำคัญของการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง ผ่านการพัฒนาวัสดุประสานทางเลือก เช่น จีโอโพลิเมอร์ และการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ เช่น RCA GFRP และ PET รวมถึงความต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษอย่างคอนกรีตมวลเบา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินศักยภาพของเศษถังน้ำพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วเหลือทิ้ง (GFRP) และเม็ดพลาสติกรีไซเคิลโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ในการนำมาใช้เป็นมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับแก๊สลอยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ผสมวัสดุเหล่านี้ ภายใต้การแปรผันปริมาณรวมของมวลรวมละเอียดทดแทนและสัดส่วนระหว่าง GFRP กับ PET ที่ใช้ ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นคอนกรีตโครงสร้าง (ตามเกณฑ์ ASTM C330/C330M-17 [11]) หรือคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (มอก.57-2530 (13)) หรือคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2530 (14)) ซึ่งจะเป็นการสนับสนุนให้มีการนำวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวไปใช้งานจริงในวงกว้าง และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง

## 2. วัสดุทดลอง

แก๊สลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (FA) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 พื้นที่ผิวแก๊สลอยทั้งหมด 0.42605 m<sup>2</sup>/g สารละลาย NaOH (NH) ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ความหนาแน่น 1372 kg/m<sup>3</sup> สารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (NS) ชนิดที่ 2 ตาม มอก.433-2539 [15] มีความหนาแน่น 1301 kg/m<sup>3</sup>

มวลรวมหยาบใช้เศษคอนกรีตเหลือทิ้งจาก (RCA) ได้จากคอนกรีตเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตท่อคอนกรีตเสริมเหล็กของร้านธนวัฒน์ ขนาด 1/2" ต่อ 3/8" เท่ากับ 30:70 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.48 ปริมาณการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.15% ปริมาณเพสต์ที่ยึดเกาะมวลรวม 14.7% ค่าการสึกกร่อน 45% เตรียมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)

มวลรวมละเอียดใช้เป็นมวลรวมเบา (LWFA) จำนวน 2 ชนิด ใช้เศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมชนิดที่ 1 เม็ดพลาสติกรีไซเคิลชนิด PET เป็นขยะเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติกที่หมดอายุไม่สามารถนำไปฉีดขึ้นรูปได้ ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 8 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.89 ปริมาณการดูดซึมน้ำ 0.84% และ ชนิดที่ 2 เศษพลาสติกเสริมใยแก้วเหลือทิ้ง (GFRP) ได้จากการบดย่อยเศษเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเศษถังน้ำพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว จะได้ขนาดเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเรซินเกาะตามผิวเล็กน้อย จากนั้นนำไปล้างน้ำเพื่อนำผงเรซินที่เกาะตามผิวออก และทำการปรับขนาดคละให้อยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C330/C330M-17 [11] โดยแบ่งเป็น 3 ชุดตามส่วนผสม คือ GFRP-1 ใช้สำหรับ Mix1 และ Mix2 GFRP-2 ใช้สำหรับ Mix3 และ Mix4 และ GFRP-3 ใช้สำหรับ Mix5 และ Mix6 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.33, 1.30 และ 1.24 และปริมาณการดูดซึมน้ำ 6.73%, 4.99% และ 6.62% ตามลำดับ เตรียมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)



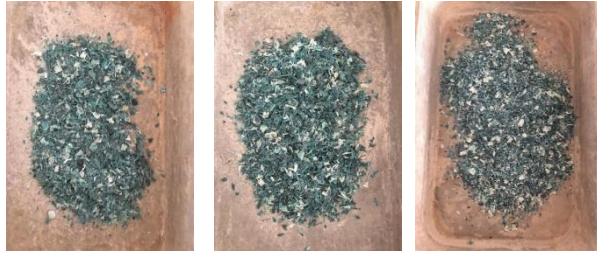
(ก) RCA 1/2"



(ข) RCA 3/8"



(ค) PET



(ง) GFRP-1

(จ) GFRP-2

(ฉ) GFRP-3

รูปที่ 1 มวลรวม

### 3. ขั้นตอนการศึกษา

#### 3.1 ออกแบบการทดลอง

อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อเกลือลอย (L/A) เท่ากับ 0.85 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.5 ออกแบบส่วนผสมตามเกณฑ์ของค่าคำนวณความหนาแน่นสมดุล (Calculate equilibrium density) ของคอนกรีตโดยคำนวณได้ตาม ASTM C567/C567M-19 [16] ดังสมการที่ (1) และ (2) ด้วยวิธีลองแทนค่า (Trial) ส่วนผสมของเกลือลอย ปรับปริมาณมวลรวมหยาบให้ลดลง และเพิ่มปริมาณมวลรวมละเอียดมวลเบา (LWFA) มาแทนที่เพิ่มขึ้น เมื่อต้องการปรับความหนาแน่นออกแบบให้ลดลง จนได้ส่วนผสมที่มีความหนาแน่นตามเกณฑ์ตามที่ต้องการทดสอบอยู่ที่ 1323-1497 kg/m<sup>3</sup> แสดงดังตารางที่ 1 โดยมวลรวมในส่วนผสมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง นำส่วนผสมในตารางที่ 1 มาคำนวณร้อยละโดยปริมาตรของเฟส มวลรวมหยาบ RCA และมวลรวมละเอียดมวลเบา (LWFA) โดยใช้ค่าความถ่วงจำเพาะของ FA RCA GFRP และ PET ความหนาแน่นของสารละลาย NH และ NS ในการแปลงน้ำหนักของวัสดุแต่ละชนิดในหน่วย kg เป็น m<sup>3</sup> จากนั้นหากด้วยปริมาตรคอนกรีต 1 m<sup>3</sup> คูณ 100 จะได้ปริมาณวัสดุแต่ละชนิดในหน่วยร้อยละโดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 2 ผสมคอนกรีตและทดสอบความสามารถในการทำงานได้ คุณสมบัติกายภาพและทางกลของเกลือลอยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบา

$$O = (M_{df} + M_{dc} + 1.2 M_{ct})/V \quad (1)$$

$$E = O + 50 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

เมื่อ O คือ ค่าคำนวณความหนาแน่นแห้งของคอนกรีต (kg/m<sup>3</sup>), E คือ ค่าคำนวณความหนาแน่นสมดุลของคอนกรีต (kg/m<sup>3</sup>), M<sub>df</sub> คือ น้ำหนักมวลรวมละเอียดสภาพแห้ง (kg), M<sub>dc</sub> คือ น้ำหนักมวลรวมหยาบสภาพแห้ง (kg), 1.2 คือ แฟกเตอร์ของการเกิดไฮเดรชันของน้ำ (เลือกใช้ค่าตามเกณฑ์ของคอนกรีต OPC ไม่พิจารณาเป็นสารละลายต่างเกิดปฏิกิริยากับเกลือลอย เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลส่วนนี้), M<sub>ct</sub> คือ น้ำหนักของวัสดุประสาน (kg) และ V คือ ปริมาตรผลิตภัณฑ์คอนกรีตต่อชุดทดสอบ (m<sup>3</sup>)

ตารางที่ 1 สัดส่วนส่วนผสมของเกลือลอยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวมเบา GFRP และ PET (kg/m<sup>3</sup>)

| ส่วนผสม | FA  | NH  | NS  | RCA | GFRP* | PET | E**  |
|---------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|------|
| Mix1    | 663 | 225 | 338 | 398 | 159   | 106 | 1497 |
| Mix2    | 632 | 215 | 322 | 229 | 242   | 161 | 1431 |
| Mix3    | 618 | 210 | 315 | 172 | 312   | 134 | 1401 |
| Mix4    | 607 | 206 | 310 | 118 | 343   | 147 | 1378 |
| Mix5    | 589 | 200 | 301 | 42  | 274   | 274 | 1340 |
| Mix6    | 581 | 198 | 296 | -   | 291   | 291 | 1323 |

\* GFRP-1 (Mix1 Mix2), GFRP-2 (Mix3 Mix4) และ GFRP-3 (Mix5 Mix6)

\*\*ค่าคำนวณความหนาแน่นสมดุล (Calculate equilibrium density) ที่ออกแบบ

ตารางที่ 2 ปริมาณเฟส มวลรวมหยาบ RCA และมวลรวมละเอียดมวลเบา (LWFA) (ร้อยละโดยปริมาตร)

| ส่วนผสม | เฟส      | RCA   | LWFA  |       |          |
|---------|----------|-------|-------|-------|----------|
|         | FA+NH+NS |       | GFRP  | PET   | GFRP+PET |
| Mix1    | 61.8%    | 12.9% | 15.4% | 9.9%  | 25.3%    |
| Mix2    | 60.4%    | 9.7%  | 18.2% | 11.7% | 29.9%    |
| Mix3    | 59.1%    | 7.3%  | 23.9% | 9.7%  | 33.6%    |
| Mix4    | 58.1%    | 5.0%  | 26.3% | 10.6% | 36.9%    |
| Mix5    | 56.4%    | 1.8%  | 22.0% | 19.8% | 41.8%    |
| Mix6    | 55.6%    | 0.0%  | 23.4% | 21.0% | 44.4%    |

#### 3.2 การผสมและทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

เติมเกลือลอย GFRP PET และมวลรวมหยาบ RCA ในเครื่องผสม ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 5 นาที เติมหาสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมอีก 5 นาที เติมหาสารละลายโซเดียมซิลิเกต ผสมอีก 2 นาที แล้วปิดเครื่อง

ทดสอบความสามารถในการทำงานได้ด้วยวิธี Slump Flow ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1611/C1611-18 [17] วิธี B ทันทีหลังผสมเสร็จ จำนวน 3 ครั้งต่อส่วนผสม วัดค่าระยะเยียด 1 มม. หาค่าเฉลี่ยของ Slump flow โดยควบคุมให้ความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 ของค่าเฉลี่ย

#### 3.3 การหล่อและบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

นำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมาเข้าแบบหล่อขึ้นรูปตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C192/C192M-19 [18] สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความหนาแน่น ปริมาณการดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรง การบรรจุส่วนผสมในแบบหล่อจะใช้การกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กพร้อมกับการใช้ตะขอย่ำหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชม. จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตออกจากแบบหล่อนำไปหุ้มด้วยแผ่นพลาสติก แล้วเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องจนครบอายุทดสอบที่ 28 วัน

#### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

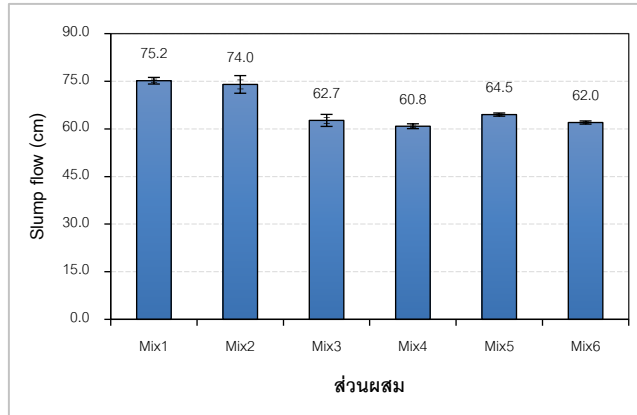
การทดสอบหาค่าความหนาแน่น ปริมาณการดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรง ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มม. ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642-21 [19] ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพถ่ายตัวอย่างหลังทดสอบกำลังอัดในการอภิปรายผลรวมด้วย การทดสอบกำลังอัดและกำลังรับแรงดึง ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 150×300 มม. ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-21 [20] และ ASTM C496/C496M-17 [21] ตามลำดับ ทุกคุณสมบัติทดสอบที่อายุ 28 วัน ใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนต่อชุดการทดสอบ หาค่าเฉลี่ย โดยควบคุมความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบให้ไม่เกินร้อยละ 10 ของค่าเฉลี่ย ประเมินศักยภาพของแต่ละส่วนผสมสำหรับใช้งานในแต่ละแอปพลิเคชัน เช่น งานโครงสร้าง วัสดุก่อผนังรับแรง หรือวัสดุก่อผนังไม่รับแรง เป็นต้น

### 4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

#### 4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้

ความสามารถในการทำงานได้ที่วัดด้วยค่ายุบตัวไหลแผ่ (Slump flow) ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า Slump flow มีค่าอยู่ระหว่าง 60.8-75.2 ซม. โดยส่วนผสม Mix1 มีความสามารถในการทำงานได้สูงสุด จะเห็นได้ว่าเมื่อลดปริมาณเฟสและมวลรวมหยาบ RCA ลง เพิ่มปริมาณ LWFA มาแทนที่

คอนกรีตมีแนวโน้มของความสามารถในการทำงานได้ลดลง ส่วนผสม Mix3 Mix4 Mix5 และ Mix6 มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มสัดส่วน LWFA มีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงดังตัวอย่างซีรีส์ A ที่มีปริมาณ LWFA เฉลี่ยต่ำและมี LWFA ต่ำสุดจึงมีความสามารถในการทำงานได้สูงสุด

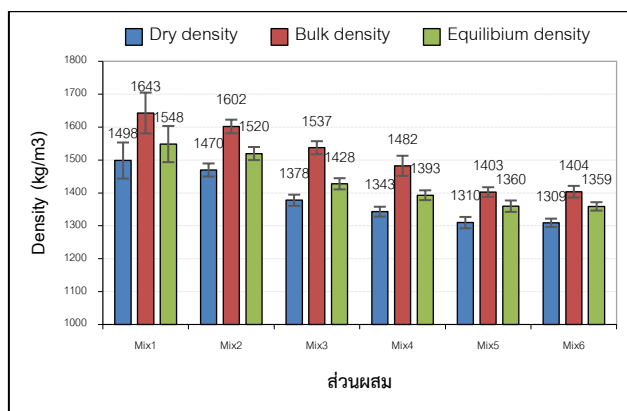


รูปที่ 2 ค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (Slump flow)

#### 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

##### 4.2.1 ความหนาแน่น

จากรูปที่ 3 พบว่าประมาณของความหนาแน่นสมดุล (Calculate equilibrium density) ซึ่งคำนวณจากความหนาแน่นแห้ง (Dry density) ที่ได้จากการทดลองตามสมการที่ (2) พบว่า Mix1 Mix2 Mix3 Mix4 Mix5 และ Mix6 มีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าออกแบบประมาณร้อยละ 3.4, 6.2, 1.9, 1.1, 1.5 และ 2.7 ตามลำดับ ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) มีแนวโน้มเช่นเดียวกับความหนาแน่นแห้งและความหนาแน่นสมดุลมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ LWFA ที่เพิ่มขึ้น เมื่อลดปริมาณเสท์จากร้อยละ 61.8 เป็น 60.4, 59.1, 58.1, 56.4 และ 55.6 ความหนาแน่นแห้งและความหนาแน่นสมดุล (คำนวณจากความหนาแน่นแห้งบวกด้วย 50 kg/m<sup>3</sup>) ลดลงร้อยละ 2 8 10 12 และ 13 ความหนาแน่นปรากฏลดลงร้อยละ 2 6 10 15 และ 15 ตามลำดับ

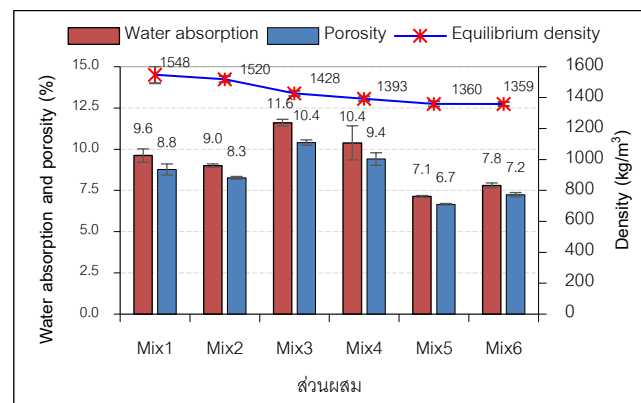


รูปที่ 3 ความหนาแน่น (เอา label ออก)

##### 4.2.2 ปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรง

จากรูปที่ 4 พบว่าปริมาณการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และปริมาณโพรงช่องว่าง (Porosity) ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความหนาแน่นสมดุลของคอนกรีต Mix3 มีปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงสูงสุด รองลงมาคือ Mix4 Mix1 Mix2 Mix6 และ Mix5 ตามลำดับ โดยมีค่า

ปริมาณการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 7.1-11.6 และปริมาณโพรงอยู่ระหว่างร้อยละ 6.7-10.4 เมื่อปริมาณเสท์และมวลรวมหยาบ RCA ในส่วนผสมลดลง LWFA มีปริมาณเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2) เกิดจากคอนกรีตเกิดการแยกตัวหลังการหล่อขึ้นรูป มีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของ LWFA ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ โดยเฉพาะเม็ดพลาสติก PET (ความถ่วงจำเพาะ 0.89) มีผิวเรียบลื่น (รูปที่ 1(ค)) ระหว่างกระบวนการก่อตัวคอนกรีตจะมีความเหลวของซีเมนต์เสท์ที่ไม่เหนียวพอที่จะยึดเกาะมวลรวมเบาไม่ให้อยู่ตัวขึ้นในแนวตั้ง ทำให้คอนกรีตเกิดการแยกชั้น โดยผิวด้านบนสุดของตัวอย่างมีความหนาแน่นของมวลรวม LWFA และบริเวณก้นตัวอย่างมีเสท์และ RCA ที่หนาแน่น ส่งผลให้คอนกรีตไม่สม่ำเสมอทั้งก่อน จะเห็นได้จากตัวอย่างคอนกรีตก่อน-หลังทดสอบกำลังรับแรงอัดดังแสดงในรูปที่ 5 จึงเป็นเหตุให้ปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความหนาแน่นเนื่องจากมีอิทธิพลของความไม่สม่ำเสมอของการกระจายขนาดของส่วนผสมรวมด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลค่อนข้างมาก



รูปที่ 4 ปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรง



(ก) Mix1 (A)

(ข) Mix2 (A)



(ค) Mix3 (B)

(ง) Mix4 (B)



(ฉ) Mix5 (C)

(ข) Mix6 (C)

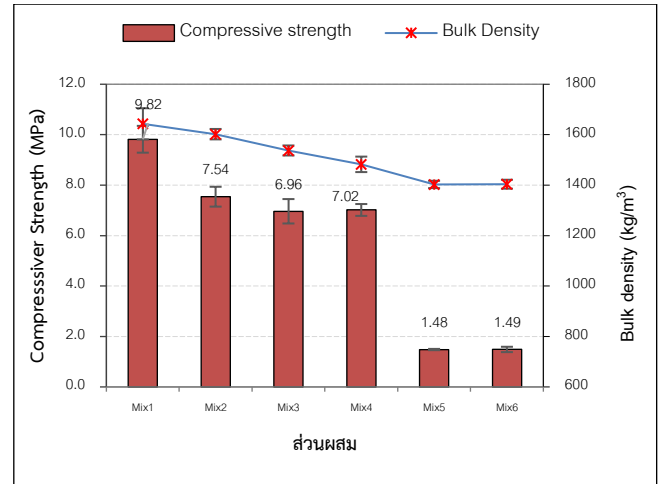
รูปที่ 5 ตัวอย่างก่อนและหลังทดสอบกำลังอัด

#### 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

##### 4.3.1 กำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มแปรผันตามความหนาแน่นของคอนกรีต ส่วนผสม Mix1 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 9.82 MPa รองลงมาคือ ส่วนผสม Mix2, Mix3, Mix4, Mix6 และ Mix5 ตามลำดับ โดยมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าส่วนผสม Mix1 คิดเป็นร้อยละ 23 29 23 85 และ 85 ตามลำดับ หากพิจารณาถึงอัตราการลดลงของความหนาแน่นปรากฏด้วย พบว่าส่วนผสม Mix2, Mix3, Mix4, Mix6 และ Mix5 ค่าความหนาแน่นลดลงจาก Mix1 คิดเป็นร้อยละ 2 6 10 15 และ 15 ตามลำดับ จะเห็นว่า Mix1 และ Mix2 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันแต่กลับมีกำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หากพิจารณาการกระจายตัวของส่วนผสมคอนกรีตดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าส่วนผสม Mix1 แยกเป็น 3 ชั้น โดยบนและล่างมีมวลรวม LWFA ที่หนาแน่น และชั้นกลางเป็นเพสต์ ส่วนผสม Mix2 มวลรวมกระจายในเนื้อคอนกรีตค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่กลับมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่า [22]

ส่วนผสม Mix5 และ Mix6 มีความหนาแน่นลดลงเพียงร้อยละ 15 แต่กำลังรับแรงอัดลดลงมากถึงร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับ Mix1 ทั้งนี้เกิดจากส่วนผสมดังกล่าวมีปริมาณเพสต์ที่น้อยมากจนไม่เพียงพอสำหรับยึดเกาะกับมวลรวม ดังตารางที่ 2 ที่แสดงปริมาณเพสต์/อัตราส่วนมวลรวม-เพสต์ [23] LWFA ที่สูงในส่วนผสม การลดลงอย่างมีนัยสำคัญมากใน Mix5 และ Mix6 คาดว่าเป็นผลมาจากการใช้มวลรวมน้ำหนักเบา หรือ LWFA ซึ่งได้จากเศษ GFRP และ PET ที่มีคุณสมบัติโดยเนื้อแท้คือมีความแข็งแรงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำกว่ามวลรวมทั่วไป [24-25] ประกอบกับปัญหาการยึดเกาะระหว่างผิวของมวลรวมพลาสติก/เส้นใยแก้ว ซึ่งมีความเรียบ และอาจมีการดูดซึมต่ำ กับเมทริกซ์ Geopolymer paste ซึ่งทำให้ความสามารถในการถ่ายแรงผ่านบริเวณ Interfacial Transition Zone (ITZ) ลดลง [25-26] ปัจจัยเหล่านี้ร่วมกับปริมาณเพสต์ที่น้อยมากจนไม่เพียงพอสำหรับยึดเกาะมวลรวมที่มีในปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้การกระจายตัวของส่วนผสมคอนกรีตดังรูปที่ 5 แสดงการจัดเรียงตัวที่ไม่เหมาะสม หรือการแยกชั้นในระดับหนึ่ง [22-23] ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดโดยรวมของคอนกรีตในกลุ่ม Mix5 และ Mix6 ต่ำลงอย่างมาก ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัด

##### 4.3.2 กำลังรับแรงดึง

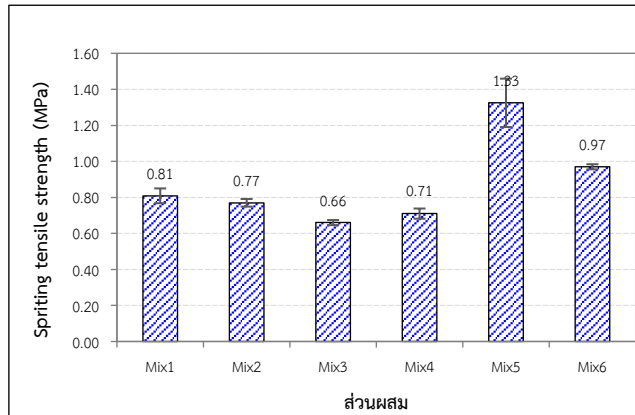
จากรูปที่ 7 จะเห็นว่ากำลังรับแรงดึงทดสอบด้วยวิธีผ่าซีก (Splitting tensile strength) จะเห็นว่ากำลังรับแรงดึงของส่วนผสมต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 0.66-1.33 MPa. ส่วนผสม Mix5 ให้ค่ากำลังดึงสูงสุดที่ 1.33 MPa [ตามรูปที่ 7], รองลงมาคือ ส่วนผสม Mix1 (0.97 MPa), Mix2 (0.81 MPa), Mix4 (0.77 MPa), Mix3 (0.71 MPa) และ Mix6 (0.66 MPa) ตามลำดับจะเห็นว่ากำลังรับแรงดึงไม่มีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัด ส่วนผสมที่มีกำลังรับแรงดึงสูงสุด [Mix5] กลับรับแรงอัดได้ต่ำสุด

เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของส่วนผสมจากตารางที่ 2 พบว่าส่วนผสม Mix5 ซึ่งมีปริมาณเพสต์น้อย ประมาณ 56.4% โดยปริมาตร และมีการแทนที่มวลรวมด้วยมวลรวมละเอียดน้ำหนักเบา (LWFA) ซึ่งมีความยืดหยุ่นตัวได้สูงกว่าเพสต์และมวลรวมหยาบ RCA เมื่อมีในปริมาณมากขึ้น จึงที่ประกอบด้วย GFRP และ PET ในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 41.8 โดยปริมาตร) แสดงแนวโน้มที่กำลังรับแรงดึงแยกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ โดยเฉพาะส่วนผสมที่มี LWFA ในปริมาณต่ำ เช่น Mix1 และ Mix2 ก็มีแนวโน้มสูงกว่า Mix3, Mix4, Mix6 ดังแสดงในรูปที่ 7 การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของกำลังดึงในกลุ่มส่วนผสมที่มีปริมาณ LWFA ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะ Mix5 ที่มีสัดส่วนของ GFRP ร้อยละ 22.0 มวลรวม PET ร้อยละ 19.8 โดยปริมาตร คาดว่าเป็นผลมาจากส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว (Glass Fiber) ที่แข็งแรงซึ่งอยู่ในเศษ GFRP [24-25] เส้นใยเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรงและช่วยในการต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงดึง ทำให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตสูงขึ้น [24-25] นอกจากนี้สัดส่วนระหว่าง GFRP และ PET ที่เหมาะสม อาจมีส่วนช่วยในการจัดเรียงตัว หรือการทำงานของเส้นใยเหล่านี้ในเมทริกซ์

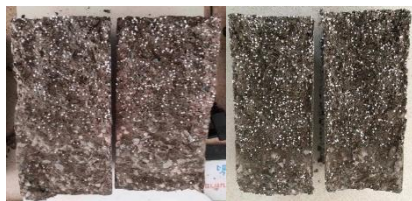
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพอย่างปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรง ดังรูปที่ 4 และการสังเกตลักษณะการกระจายตัวของส่วนผสมคอนกรีต ดังรูปที่ 8 พบว่าโดยทั่วไป กำลังรับแรงดึงมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงอย่างเห็นได้ชัด [27] ปริมาณโพรงที่สูงภายในเนื้อคอนกรีต มักลดประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับเมทริกซ์ ให้อัตราการถ่ายแรงลดลง [23]

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าส่วนผสม Mix1 และ Mix2 เกิดการแยกชั้นของคอนกรีต เนื่องจากปริมาณเพสต์ในส่วนผสมที่มากเกินไปมีส่วนลดความชื้นเหลวของเพสต์ที่ยึดเกาะมวลรวมเบาไม่ให้อยู่ตัวลง ด้วยความไม่สม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตนี้จึงเป็นสาเหตุให้ขณะคอนกรีตรับแรงดึง ส่วนที่อ่อนแอมากที่สุดจึงเริ่มวิบัติไปก่อนเมื่อรับแรงดึง [22] ในทางตรงกันข้าม ส่วน

Mix3 และ Mix4 มีการกระจายตัวของเนื้อคอนกรีตที่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับ Mix1 และ Mix2 แต่ปัจจัยเรื่องปริมาณโพรง และ/หรือ ความแข็งแรงและการยึดเกาะของมวลรวม อาจจำกัดความสามารถในการรับแรงดึง ทำให้กำลังไม่สูงเท่าที่ควร [25] ส่วนผสม Mix6 ที่ให้กำลังดึงต่ำสุด ก็มีค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงค่อนข้างสูง ตามรูปที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์แบบผกผันที่พบ



รูปที่ 7 กำลังดึงของคอนกรีต



(ก) Mix1

(ข) Mix2

(ค) Mix3



(ง) Mix4

(ฉ) Mix5

(ช) Mix6

รูปที่ 8 ตัวอย่างหลังทดสอบกำลังดึง (วิธีดึงผ่าซีก)

#### 4.4 ประเมินประสิทธิภาพของส่วนผสมคอนกรีตสำหรับนำไปใช้งาน

เกณฑ์คุณสมบัติของคอนกรีตที่นำมาใช้ในการพิจารณาส่วนผสม เลือกใช้เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง ASTM

C330/C330M-17 [11] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 57-2530 คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก [13] และ มอก. 58-2530 มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก [14]

ส่วนผสมทั้ง 6 ส่วนผสมที่เลือกมาศึกษาที่มีความหนาแน่นสมดุลไม่เกิน 1680 kg/m<sup>3</sup> กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C330/C330M-17 [11] คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยกไม่น้อยกว่า 17 MPa และ 2.1 MPa ตามลำดับ และมีเพียงส่วนผสม Mix1, Mix2 และ Mix4 ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติด้านการรับกำลังของมาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มอก.57-2530 [13] ชั้นคุณภาพ ก ข และ ค (กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 7.7 และ 5 MPa แต่ละก่อนไม่ต่ำกว่า 5.5, 5.5 และ 4 MPa ปริมาณการดูดซึมน้ำไม่เกิน 240 280 kg/m<sup>3</sup> และไม่กำหนด ตามลำดับ) Mix3 ผ่านเกณฑ์ชั้นคุณภาพ ค (กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและแต่ละก้อนไม่ต่ำกว่า 5 และ 4 MPa ตามลำดับ) และทั้ง 6 ส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ประเภทน้ำหนักเบาตาม มอก.58-2530 [14] ซึ่งกำหนดให้รับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 2.5 MPa ปริมาณการดูดซึมน้ำไม่เกิน

#### 5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษถังน้ำพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) เม็ดพลาสติกรีไซเคิลโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) เป็นมวลรวมละเอียดน้ำหนักเบา (LWFA) และมวลรวมหยาบเศษคอนกรีตเหลือทิ้ง (RCA) มาผสมเป็นมวลรวมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบา ประเมินศักยภาพของเศษถังน้ำพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วเหลือทิ้ง (GFRP) และเม็ดพลาสติกรีไซเคิลโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) ในการนำมาใช้เป็นมวลรวมน้ำหนักเบาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นคอนกรีตโครงสร้าง หรือคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก หรือคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก โดยแปรผันค่าความหนาแน่นสมดุลออกแบบ 1497, 1431, 1401, 1378, 1340 และ 1323 kg/m<sup>3</sup> ด้วยการลดสัดส่วนปริมาตรเพสต์ และ RCA และแทนที่ด้วยปริมาตรของ LWFA ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ความสามารถในการทำงานได้วัดด้วยค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (Slump flow) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเพสต์ในคอนกรีต

5.2 ความหนาแน่นสมดุลโดยประมาณที่คำนวณจากความหนาแน่นแห้งจากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าออกแบบเพียงร้อยละ 1.1-6.2 ความหนาแน่นแห้งและความหนาแน่นปรากฏแปรผันตามปริมาณเพสต์ในส่วนผสม

5.3 ปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรงไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของคอนกรีต สัดส่วนมวลรวมแต่ละชนิดที่เหมาะสมจะช่วยลดปริมาณการดูดซึมน้ำให้มีความทึบน้ำและมีความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีต และส่งผลโดยตรงกับการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวของเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับกำลังรับแรงดึง

5.4 กำลังรับแรงอัดแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่น ส่วนผสมที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเพียงเล็กน้อยกลับมีความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่สูงมากเป็นผลมาจากความเหมาะสมของสัดส่วนมวลรวมแต่ละชนิดในส่วนผสม

5.5 กำลังรับแรงดึงแปรผกผันกับปริมาณการดูดซึมน้ำและปริมาณโพรง แต่ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นและกำลังอัด การกระจายตัวอย่างที่สม่ำเสมอเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังรับแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

5.6 ส่วนผสมทั้ง 6 ส่วนผสมที่เลือกศึกษาผ่านเกณฑ์การรับกำลังและปริมาณการดูดซึมน้ำของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.58-2530 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก และมีเพียงบางส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์ มอก.57-2530 คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ไม่มีส่วนผสมใดผ่านเกณฑ์การรับกำลังของมาตรฐาน ASTM C330/C330M-17 คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง

แนวทางในการพัฒนาองค์ความรู้เพื่อนำเอาเศษเหลือทิ้ง GFRP และเม็ดพลาสติกเหลือทิ้ง PET มาใช้ประโยชน์เพื่อการต่อยอดการศึกษานี้ ได้แก่ การปรับความสามารถในการทำงานได้ให้เหมาะสมกับมวลรวมเบาที่เลือกใช้เช่นการเพิ่มหรือลดความชื้นเหลวของคอนกรีต ระยะเวลาก่อตัว เป็นต้น ออกแบบส่วนผสมที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นโดยอยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในงานโครงสร้าง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ พื้นที่ ตลอดจนบุคลากรในการดำเนินโครงการ นิสิตเก่าหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา นายณัฐกานต์ โยธานัน นายธนวัฒน์ คะปัญญา และนายพลกร ดาวเศรษฐ์ สำหรับการสนับสนุนการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Andrew RM. (2018). Global CO2 emissions from cement production, 1928–2017. Earth Syst Sci Data [Internet]. 2018 Dec 10;10(4): 2213–39. Available from: <https://essd.copernicus.org/articles/10/2213/2018/>
- [2] Shukla P., Skea J, Slade A, Al Khourdajie A, van Diemen R, McCollum D, et al. (2022). Summary for Policymakers in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. 2023.
- [3] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. Cement and concrete research, 114, pp. 40-48.
- [4] Davidovits, J. (2008). Geopolymer chemistry and applications. Geopolymer Institute.
- [5] ชรินทร์ เสนาวงษ์ และ วิเชียร ชาลี. (2556). การแทรกซึมของคลอไรด์ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จากเก้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [6] วิเชียร ชาลี. (2559). ผลของอุณหภูมิสัมพัทธ์กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเก้าถ่านหิน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [7] ปริญา จินดาประเสริฐ. (2559). แก้วลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). สมาคมคอนกรีตไทย.
- [8] เทอดศักดิ์ สายสุทธิ. (2555). RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต, การประชุมวิชาการแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [9] คณุตม์ สมบูรณ์ปัญญา, ภูษิต บุญยฤทธิ์, วงศกร สิมมา และ ชัยณพงศ์ สุธรรมะ. (2563). การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้

คอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิล. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

- [10] วิศวินทร์ อัครปัญญาธร. (2561). ค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมใช้แล้วแทนมวลรวมหยาบและหินฝุ่นแทนมวลรวมละเอียด. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- [11] ASTM C330/C330M-17. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. Vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standard; 2017.
- [12] Mehta PK, Paulo J. M. Monteiro. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4 Edition. McGraw-Hill Education. 2014.
- [13] มอก.57-2530: คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2530.
- [14] มอก. 58-2530: คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [15] มอก. 433-2539: โขี้เหล็กเคลือบผิวสำหรับอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [16] ASTM C567/C567M-19. Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete. Vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standard; 2019.
- [17] ASTM C1611/C1611M-18. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. Vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standard; 2018.
- [18] ASTM C192/C192M-19. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standard; 2019.
- [19] ASTM C642-21. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standard; 2021.
- [20] ASTM C39/C39M. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standard; 2021.
- [21] ASTM C496/C496M-17. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Vol. 04.02, Annual Book of ASTM Standard. Annual Book of ASTM Standard; 2017.
- [22] Solak, A. M., et al. (2020). Segregation and compressive strength of lightweight aggregate concrete. Materials Today: Proceedings, 33, 2818-2823.
- [23] Sideris, K. K., et al. (2007). Effect of paste volume and aggregate packing on the compressive strength of concrete. Cement and Concrete Composites, 29(7), 468-475

- [24] Alqahtani, F. K., et al. (2021). Mechanical and durability performance of concrete containing recycled plastic as aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 301, 124330.
- [25] Liu, Q., et al. (2019). Bond performance between recycled plastic aggregate and cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103406.
- [26] Huang, B., et al. (2016). Microstructure of Interfacial Transition Zone in Concrete with Recycled Plastic Aggregate. *Construction and Building Materials*, 123, 634-643.
- [27] Guo, C., & Lu, Z. A 3D FEM mesoscale numerical analysis of concrete tensile strength behaviour. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, Article ID 5538477, 1–14.