



## อิทธิพลของค่าโมดูลัสความละเอียด ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณโฟมต่อ หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

### Influence of Fineness Modulus Values, Polypropylene Fibers Contents, and Air Foam Contents on Dry Unit Weight and Strengths of Lightweight Geopolymer Reinforced Polypropylene Fibers

ปิยธิดา อยู่สุข<sup>1\*</sup> เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงษ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Piyathida Yoosuk<sup>1\*</sup>, Cherdsak Suksiripattanapong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of  
Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

\* ผู้รับผิดชอบบทความ: Piyathida.yo@rmuti.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-7240-5300

Received: 23 November 2023, Revised: 1 February 2024, Accepted: 24 February 2024

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความละเอียดต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน โดยใช้เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6, 1.45 และ 1.3, ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย, ปริมาณโฟมเท่ากับร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทรายเท่ากับ 1, อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เท่ากับ 50:50 ผลการทดสอบพบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และอัตราส่วนโฟมที่เพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดที่ 1.6, ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ปริมาณโฟมเท่ากับร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ค่ากำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกกว้าง และลดความกว้างของรอยแตก และกำลังดัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 3 เนื่องจากเส้นใยที่มากเกินไปจะเกิดการขัดกันภายในตัวอย่าง หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังอัดมากกว่า 5 เมกะปาสคาล (51.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

**คำสำคัญ** จีโอโพลีเมอร์มวลเบา โมดูลัสความละเอียด เถ้าลอย เส้นใยโพลีโพรพิลีน

#### Abstract

This paper investigated the influence of fineness modulus on dry weight, compressive strength and flexural strength of lightweight geopolymer reinforced polypropylene fibers. Geopolymer fly ash was used as a



cementitious material. The fineness modulus of sand was determined at 1.6, 1.45, and 1.3, polypropylene fibers contents of 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, and 3% by weight of fly ash, air foam contents (AF) of 0, 1, and 2% by weight of binder, fly ash to sand ratio was 1, the alkaline solution to binder ratio was 0.55, and the sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) to sodium hydroxide solution (NaOH) was 50:50. The results showed that the dry weight decreased with increasing polypropylene fiber contents and air foam contents. The lowest dry weight was found at a fineness modulus of 1.6, a polypropylene fiber content of 3% by weight of fly ash, and an air foam content of 2% by weight of binder. The maximum compressive strength and flexural strength were found at a fineness modulus of 1.45. The flexural strength increased by the enhancement of polypropylene fiber content due to fiber-controlling cracks and reduced crack width. The flexural strength decreased by increasing the polypropylene fiber contents up to 3% by weight of fly ash because the excess fibers induced the friction in sample. The dry weight and compressive strength of lightweight geopolymer reinforced polypropylene fibers was by the Thai Industrial Standards (TIS 2601-2013). The dry weight was between 701-1,600  $\text{kg/m}^3$  and the compressive strength was more than 5.0 MPa ( $51.0 \text{ kg/cm}^2$ ).

**Keywords:** Lightweight Geopolymer, Fineness Modulus, Fly Ash, Polypropylene Fibers

### 1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งจะช่วยลดภาระน้ำหนักของโครงสร้าง เป็นฉนวนกันเสียง [1] และกันความร้อนได้ดี [2] โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบา มีหน่วยน้ำหนักแห้งประมาณ 320-1,920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [3] คอนกรีตมวลเบาแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามวัสดุผสม ได้แก่ คอนกรีตมวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete), คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (No-fines Concrete) และคอนกรีตเติมฟองอากาศ (Aerated Concrete) โดยการผลิตรคอนกรีตเติมฟองอากาศหรือโฟมคอนกรีต จำแนกออกเป็น 2 ระบบ คือคอนกรีตมวลเบาแบบบ่มด้วยไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete, AAC) และคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส (Cellular Lightweight Concrete, CLC) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ง่าย รวดเร็ว และใช้พลังงานน้อย [2]

ตัวแปรสำคัญที่มีบทบาทต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และการเพิ่มปริมาณของมวลรวม การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ลักษณะพื้นผิว ปริมาณ ขนาดใหญ่สุด และแร่ธาตุต่าง ๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมวลเบา โดยคอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวมขนาด

ใหญ่มีความต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก และมวลรวมละเอียดมีขนาดคละไม่เหมาะสม มีส่วนละเอียดมากเกินไป จะทำให้มีความต้องการน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดคละดี โดยค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) จะบ่งบอกถึงลักษณะของทรายหยาบหรือละเอียด ค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำของมวลรวมจะทำให้เกิดการยึดเกาะของพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคที่สูง [4] นอกจากนี้ขนาดของมวลรวมยังมีผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากอนุภาคเล็กจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้คอนกรีตมวลเบามีการอัดตัวแน่น [5]

อย่างไรก็ตามการผลิตคอนกรีตมวลเบา มักใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหลัก โดยอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ใช้พลังงานมาก และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในปริมาณที่สูง โดยการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน ปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  ประมาณ 0.9 ตัน คิดเป็นประมาณร้อยละ 5-8 ของการปล่อยก๊าซทั่วโลก [6] เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศ จึงทำให้การผลิตบล็อก CLC ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงมีการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับเป็นวัสดุประสาน [2] ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ได้จากแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เป็นของแข็ง



ประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ผสมเข้ากับสารอัลคาไลไฮดรอกไซด์/สารอัลคาไลซิลิเกต ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ‘จีโอโพลีเมอร์’ [7, 8] โดยจีโอโพลีเมอร์เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างสามมิติแบบอสัณฐาน ประกอบด้วยพันธะซิลอกโซ-เซียเลต (Si-O-Si-O-Si-O-Al) [9] แหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ เมตาคาโอลินซึ่งเกิดจากการเผาดินขาวคาโอลินที่อุณหภูมิสูง, ฝั่ลลยซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน และตะกรันจากเตาหลอมเหล็กซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเหล็ก เป็นต้น การใช้กากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตฝั่ลลยจีโอโพลีเมอร์ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงคุณสมบัติที่ดี ได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูง, ความหนาแน่นสูง, ความทนทานสูง, ความต้านทานการกัดกร่อนสูง และอื่น ๆ [10] ฝั่ลลยสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C618-19 ได้แก่ ฝั่ลลยแคลเซียมต่ำ (Class F) และฝั่ลลยแคลเซียมสูง (Class C) โดยมีปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18 และมีผลรวมของ  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  มากกว่าร้อยละ 50 [11]

โดยทั่วไปจีโอโพลีเมอร์จะทนทานต่อการทำปฏิกิริยาจากสารเคมีและมีความเปราะ ทำให้เกิดรอยร้าว หากเสริมเส้นใย จีโอโพลีเมอร์จะต้านทานแรงดึงได้ดีกว่า และมีแนวโน้มลดการแตกร้าว ปัจจุบันมีการนำเส้นใยหลายประเภท ได้แก่ เส้นใยโพลีโพรพิลีน เส้นใยคาร์บอน เส้นใยหินบะซอลต์ เส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และเส้นใยเหล็ก เป็นต้น มาปรับปรุงความแข็งแรงในการรับแรงดัด การดูดซับพลังงานและความทนทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] โดยเส้นใยโพลีโพรพิลีนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้นทุนต่ำ ทนต่อการกัดกร่อน [12] การนำความร้อนต่ำ น้ำหนักเบา และทนต่อการทำปฏิกิริยาของกรดและด่าง [13]

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความละเอียดของทรายต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน โดยใช้ฝั่ลลยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน นำมาผสมสารละลายอัลคาไลน์ (สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลใน

การศึกษาคั้งนี้คือ โมดูลัสความละเอียดของทรายที่ 1.3 1.45 และ 1.6 ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักฝั่ลลย ปริมาณฟองโม่ที่ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนฝั่ลลยต่อทรายเท่ากับ 1 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 50:50 โดยอัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนแสดงดังตารางที่ 1

วิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [14] เริ่มจากนำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 8 16 30 50 100 และรองด้วยถาดมาวางซ้อนกัน วางตะแกรงมาตรฐานเบอร์ใหญ่อยู่ข้างบนสุด เรียงกันลงมาตามลำดับ เททรายลงบนตะแกรง และนำเข้าเครื่องร่อน โดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ตัวแปร	อัตราส่วนผสม
โมดูลัสความละเอียดของทราย	1.3 1.45 และ 1.6
ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน	ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักฝั่ลลย
ปริมาณฟองโม่	ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
อัตราส่วนฝั่ลลยต่อทราย	1
อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน	0.55
อัตราส่วนผสมระหว่าง $Na_2SiO_3:NaOH$	50:50

งานวิจัยนี้นำผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดตัวอย่างของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนมาเทียบเคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) [15] เนื่องจากไม่มีมาตรฐานจีโอโพลีเมอร์มวลเบา โดย มอก. 2601-2556 กำหนดรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศสำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนัก คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบ่งตามหน่วย



น้ำหนักแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง และความต้านทานแรงอัดออกเป็น 8 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2

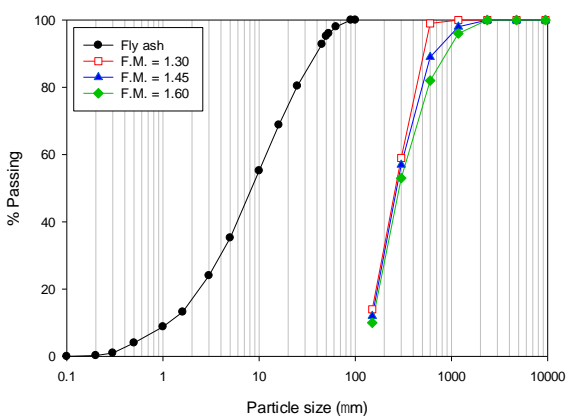
ตารางที่ 2 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิด	หน่วยน้ำหนักแห้ง (กก./ลบ.ม.)	ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า
C6	500-600	2.0 เมกะปาสคาล
C7	601-700	(20.4 กก./ตร.ซม.)
C8	701-800	
C9	801-900	2.5 เมกะปาสคาล
C10	901-1000	(25.5 กก./ตร.ซม.)
C12	1001-1200	
C14	1201-1400	5.0 เมกะปาสคาล
C16	1401-1600	(51.0 กก./ตร.ซม.)

### 2.1 วัสดุ

เถ้าลอย (FA) เป็นผลพลอยได้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน แม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.39 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) เท่ากับ 8.41 ไมครอน ขนาดคละของเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 1 จำแนกเป็น Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [4] (ปริมาณ  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , และ  $Fe_2O_3$  เท่ากับร้อยละ 63.41, และ CaO เท่ากับร้อยละ 31.41) และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแสดงดังตารางที่ 3

ทราย (S) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.57 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.6 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างตะแกรงเบอร์ 16), 1.45 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างตะแกรงเบอร์ 30) และ 1.3 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างตะแกรงเบอร์ 50) ตามลำดับ ขนาดคละของทรายแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดคละของทราย และเถ้าลอย

เส้นใยโพลีโพรพิลีน (PPF) ได้รับความอนุเคราะห์จาก Ningyang Bangneng Engineering Materials Co., Ltd. มีลักษณะเป็นเส้นตรง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 ไมครอน, ความยาวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ค่า aspect ratio เท่ากับ 333.3 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 910 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 500 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (ร้อยละ)
$SiO_2$	45.44
$Al_2O_3$	10.53
$Fe_2O_3$	7.44
CaO	31.41
$SO_3$	2.02
$K_2O$	2.20
LOI*	0.96

\*LOI, Loss of Ignition

สารอัลคาไลน์ (L) เป็นส่วนประกอบระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $Na_2SiO_3$ ) มีอัตราส่วนระหว่าง  $Na_2O$  และ  $SiO_2$  เท่ากับร้อยละ 9 และ 30 ตามลำดับ และงานวิจัยนี้เลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ เนื่องจากคำนึงถึงความปลอดภัยในการผสม ระหว่างการผสมอาจเกิดไอระเหยและการเดือดของสารละลายได้ [2] และอัตราส่วน  $Na_2SiO_3:NaOH$  เท่ากับ 50:50 เนื่องจากหากใช้  $Na_2SiO_3$  ในปริมาณที่สูงจะทำให้ส่วนผสมมีความหนืด ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานลดลง [16]

ฟองโฟม (AF) อัตราส่วนสารเพิ่มฟองโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:40 มีความหนาแน่นอยู่ที่ 40-45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

### 2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

นำเถ้าลอยกับทรายที่อัตราส่วนเท่ากับ 1 ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ผสมส่วนผสมแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที (รูปที่ 2(ก)) และนำมาผสมกับสารอัลคาไลน์ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง  $Na_2SiO_3:NaOH$  เท่ากับ 50:50, ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ และอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน

ที่ 0.55 สารอัลคาไลน์ผสมกับส่วนผสมแห้งเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (รูปที่ 2(ข)) จากนั้นเติมฟองโฟมลงในส่วนผสม โดยกำหนดอัตราส่วนผสมเพิ่มฟองโฟมต่อน้ำ 1:40 (รูปที่ 2(ค)) เติมนลงในเครื่องฉีดโฟมแบบอัดแรงดัน อัดแรงดันจนน้ำและสารเพิ่มฟองโฟมรวมตัวกัน เทฟองโฟมลงในส่วนผสม ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 4 นาที เสร็จสิ้นกระบวนการผสม จากนั้นเทจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ ที่มีขนาด  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร และแบบหล่อทรงปริซึม ที่มีขนาด  $4 \times 4 \times 16$  เซนติเมตร (รูปที่ 2(ง))



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 การผสมตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

หลังจากนั้นตัวอย่างพร้อมแบบหล่อจะถูกห่อด้วยพลาสติกจนครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบ และห่อด้วยพลาสติก บ่มที่อุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิประมาณ  $27-30^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 7 วัน และทำการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM C138 [17] ทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109 [18] และทดสอบกำลังดัด ตามมาตรฐาน ASTM C348 [19]

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

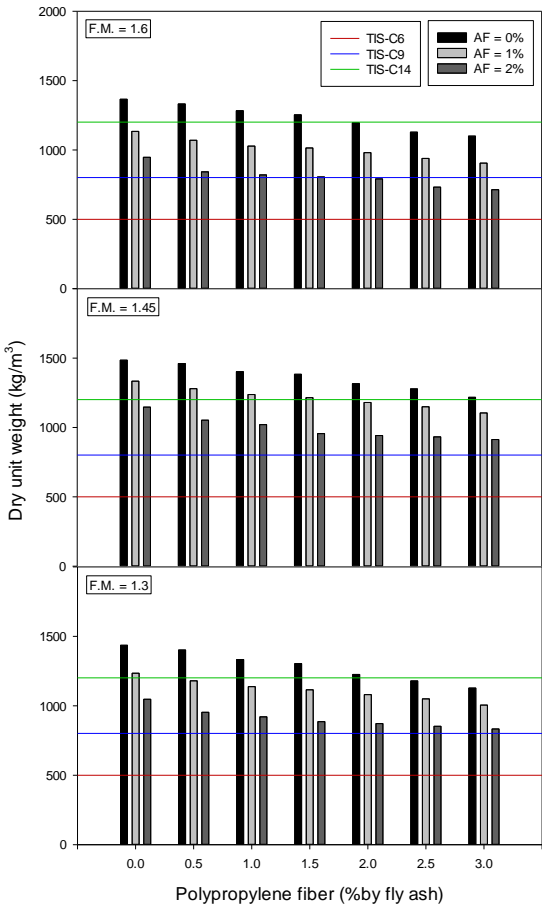
#### 3.1 หน่วยน้ำหนักแห้ง ของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และอัตราส่วนผสมฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น โดยหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด พบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6 ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแห้งลอย และปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับ 947.1 842.7 820.3 805.9 791.5 732.0 และ 713.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เนื่องจากค่าโมดูลัสความละเอียดที่สูง มีอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดช่องว่างภายในตัวอย่าง ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งลดลง ในขณะที่โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด เนื่องจากค่าโมดูลัสความละเอียดที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการยึดเกาะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่ดี [4] อนุภาคเล็กจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ โดยค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ที่โมดูลัสความละเอียดของทรายที่ 1.3 และ 1.45 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ 1.6 เท่ากับร้อยละ 5-17 และร้อยละ 8-28 ตามลำดับ

ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลง เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ต่ำกว่า [20] และเกิดการก่อตัวของช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมาก [21] ช่องว่างอากาศที่อยู่ติดกันจะรวมตัวกันและสร้างช่องว่างอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้น [22] ส่งผลให้มีความพรุนเพิ่มขึ้น และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งลดลงเมื่อปริมาณฟองโฟมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณโฟมจะทำให้เกิดโครงสร้าง รูพรุนภายในตัวอย่าง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chung et al. (2019) ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักแห้งเริ่มต้นประมาณ 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [23] และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง C6-C12 โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง C9-C14 และโมดูลัสความละเอียด



ของทรายเท่ากับ 1.3 มีค่าน้ำหนักน้ำหนกอยู่ในช่วง C9-C14 ตามลำดับ

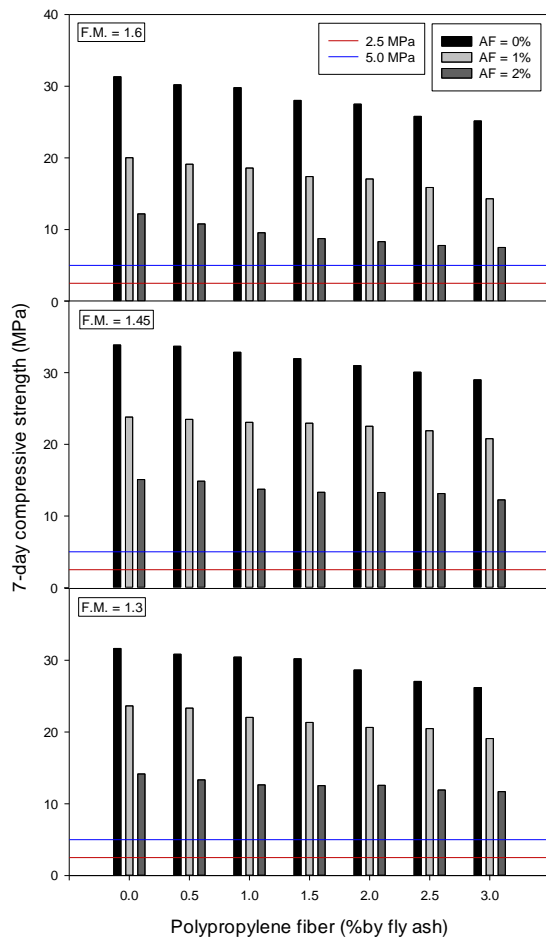


รูปที่ 3 หน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

### 3.2 กำลังอัด ของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4 โดยค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแก้วลอย และปริมาณฟองโม่ที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับ 33.87 33.69 32.85 31.96 31.00 30.08 และ 29.00 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยค่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และอัตราส่วนฟองโม่ที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ปริมาณฟองโม่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัด

ลดลงเท่ากับร้อยละ 27-30 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณฟองโม่ที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับทุกปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่มากกว่าค่าที่เหมาะสม ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง ส่งผลให้ตัวอย่างมีความพรุนเพิ่มขึ้น และกำลังอัดลดลง [24] เนื่องจากเกิดความยากในการผสม และเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของเส้นใยโพลีโพรพิลีนภายในตัวอย่าง [25] และเมื่อปริมาณฟองโม่เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดรูพรุน และช่องว่างขนาดเล็กภายในตัวอย่าง [26] ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 แสดงค่ากำลังอัดสูงสุด เนื่องจากค่าค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดที่เหมาะสม ทำให้เกิดแรงยึดเกาะของพื้นผิวของอนุภาคที่ดี [4] และขนาดอนุภาคของมวลรวมยังส่งผลต่อความหนาแน่นของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพร



ฟิล์ม เนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของมวลรวมขนาดใหญ่ [5] ทำให้จีโอโพลีเมอร์มวลเบาที่มีความแน่นขึ้น ค่าโมดูลัสความเค้นดัดของทรายเท่ากับ 1.6 อนุภาคของมวลรวมละเอียดที่มีขนาดใหญ่ มีแนวโน้มขยายช่องว่างอากาศของฟองโฟม ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น และสูญเสียกำลัง [27] สังเกตได้ว่าที่ค่าโมดูลัสความเค้นดัดของทรายเท่ากับ 1.3 ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดมากเกินไป พื้นที่หน้าตัดมีขนาดเล็กอาจทำให้เกิดการสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก และค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) สำหรับทุกส่วนผสม ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4 หน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

โมดูลัสความเค้นดัด ของทราย	หน่วยน้ำหนักแห้ง (กก./ลบ.ม.)		
	ปริมาณฟองโฟม (ร้อยละ)		
	0	1	2
1.6	1100.0	905.0	713.2
1.45	1218.0	1105.0	913.2
1.3	1128.0	1005.0	833.2

ตารางที่ 5 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

โมดูลัสความเค้นดัด ของทราย	กำลังอัด (เมกะปาสคาล)		
	ปริมาณฟองโฟม (ร้อยละ)		
	0	1	2
1.6	25.16	14.29	7.49
1.45	29.00	20.78	12.25
1.3	26.20	19.09	11.69

ค่าต่ำสุดเริ่มต้นของผลทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนแสดงในตารางที่ 4 และ 5 โดยค่าต่ำสุดพบที่ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเฉลี่ย

จากตารางที่ 4 และ 5 เมื่อนำผลทดสอบระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) พบว่าที่ค่าโมดูลัสความเค้นดัดของทรายเท่ากับ 1.6 1.45 และ 1.3 สำหรับทุกส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยจำแนกชนิดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนตามปริมาณฟองโฟม ออกเป็น 5 ชนิด ได้แก่ C8 C9 C10 C12 และ C14 โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0 2.5 และ 5.1 เมกะปาสคาลตามลำดับ

ตารางที่ 6 ชนิดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556

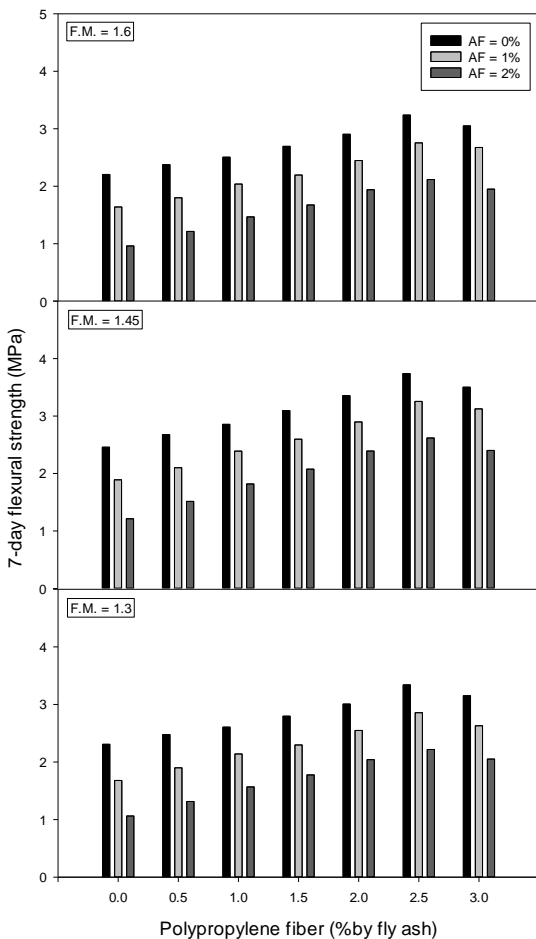
โมดูลัสความเค้นดัด ของทราย	ชนิด		
	ปริมาณฟองโฟม (ร้อยละ)		
	0	1	2
1.6	C12	C10	C8
1.45	C14	C12	C10
1.3	C12	C12	C9

3.3 กำลังดัด ของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ผลการทดสอบกำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 5 พบว่ากำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกกว้าง เชื่อมข้ามรอยแตก ลดจำนวนรอยแตก และความกว้างของรอยแตก [25, 28] โดยค่ากำลังดัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความเค้นดัดของทรายเท่ากับ 1.45 ที่ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับ 2.46 2.68 2.86 3.10 3.36 3.74 และ 3.50 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสความเค้นดัดที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการยึดเกาะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่ดี [4] เนื่องจากอนุภาคเล็กจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้จีโอโพลีเมอร์มวลเบามีการอัดตัวแน่น [5] ซึ่งมวลรวมที่มีความหยาบ



หรือละเอียดเกินความเหมาะสมจะทำให้ค่ากำลังอัด และกำลังดัดของตัวอย่างมีค่าลดลง [29] และพบว่ากำลังดัดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนฟองโม่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน กำลังดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยโพลีโพรพิลีนช่วยประสานรอยแตกภายในตัวอย่าง [25] ดังนั้นค่าโมดูลัสความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ซึ่งให้ค่ากำลังอัด และกำลังดัดสูงสุดสำหรับทุกสัดส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 801-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0, 2.5 และ 5.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



รูปที่ 5 กำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

3.4 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Package for Social Science, SPSS) วิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ เพื่อทำนายหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนตัวแปรที่แตกต่างกัน 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณฟองโม่ โดยค่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณแสดงในตารางที่ 7 8 และ 9 ตามลำดับ

ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนพบค่า Sig (P-Value) เท่ากับ 0.000 (น้อยกว่า 0.01) หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติโดยระบุนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 99 พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณฟองโม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน แต่ในส่วนของค่ากำลังดัดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับโมดูลัสความละเอียดของทราย โดยสามารถเขียนสมการทำนายดังนี้

หน่วยน้ำหนักแห้ง (U) โดยมีค่า  $R^2 = 0.882$

$$U=1829.675 -283.810(FM) -78.527(PPF) -196.082(AF) \quad (1)$$

กำลังอัด (CS) โดยมีค่า  $R^2 = 0.957$

$$CS=45.498 -9.416(FM) -1.442(PPF) -8.950(AF) \quad (2)$$

กำลังดัด (FS) โดยมีค่า  $R^2 = 0.896$

$$FS=2.741 -0.301(FM) +0.389(PPF) -0.547 (AF) \quad (3)$$

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของหน่วยน้ำหนักแห้งจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

Model component	Coefficients	Sta. error	t value	Sig.
Constant	1829.675	104.267	17.548	0.000
FM	-283.810	70.720	-4.013	0.000
PPF	-78.527	8.661	-9.066	0.000
AF	-196.082	10.608	-18.484	0.000

FM, โมดูลัสความละเอียดของทราย

PPF, ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน

AF, ปริมาณฟองโม่



ตารางที่ 8 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของกำลังอัดจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

Model component	Coefficients	Sta. error	t value	Sig.
Constant	45.498	2.502	18.186	0.000
FM	-9.416	1.697	-5.549	0.000
PPF	-1.442	0.208	-6.940	0.000
AF	-8.950	0.255	-35.164	0.000

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของกำลังตัดจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

Model component	Coefficients	Sta. error	t value	Sig.
Constant	2.741	0.317	8.650	0.000
FM	-0.301	0.215	-1.399	0.167
PPF	0.389	0.026	14.784	0.000
AF	-0.547	0.032	-16.953	0.000

#### 4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณฟองโพนต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังตัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และอัตราส่วนฟองโพนที่เพิ่มขึ้น โดยหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด พบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6 และปริมาณฟองโพนที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
2. ค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 และค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) สำหรับทุกส่วนผสม ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะปาสคาล
3. กำลังตัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกเร็ว เชื่อมข้ามรอยแตก ลดจำนวนรอยแตก และความกว้างของรอยแตก
4. ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0 เมกะปาสคาล

5. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณฟองโพน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน แต่ในส่วนของค่ากำลังตัดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับโมดูลัสความละเอียด

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สัญญาเลขที่ NRCT5-RRI63008 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา สำหรับเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Masoule MS, Bahrami N, Karimzadeh M, Mohasanati B, Shoaie P, Ameri F, et al. Lightweight geopolymer concrete: A critical review on the feasibility, mixture design, durability properties, and microstructure. *Ceram Int.* 2022; 48(8):10347-71.

[2] Yoosuk P, Suksiripattanapong C, Sukontasukkul P, Chindaprasirt P. Properties of polypropylene fiber reinforced cellular lightweight high calcium fly ash geopolymer mortar. *Case Stud Constr Mater.* 2021; 15:e00730.

[3] Akers DJ, Gruber RD, Ramme BW, Boyle MJ, Grygar JG, Rowe SK, et al. Guide for structural lightweight-aggregate concrete. ACI 213R-03. American Concrete Institute (ACI), Michigan. 2003.

[4] Zebua WS. The influence of PET plastic waste gradations as coarse aggregate towards compressive strength of light concrete. *Procedia Eng.* 2017; 171:614-9.



- [5] Chaitongrat C, Siwadamrongpong S. Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete. *Songklanakarin J Sci Technol.* 2018; 40(1).
- [6] Als Salman A, Assi LN, Kareem RS, Carter K, Ziehl P. Energy and CO<sub>2</sub> emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete. *Cleaner Environ Syst.* 2021; 3:100047.
- [7] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JS. Geopolymer technology: the current state of the art. *J Mater Sci.* 2007; 42:2917-33.
- [8] Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal Calorim.* 1991; 37(8):1633-56.
- [9] Tchakouté HK, Rüscher CH, Kong S, Kamseu E, Leonelli C. Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. *Constr Build Mater.* 2016; 114:276-89.
- [10] Guo X, Xiong G. Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles. *Constr Build Mater.* 2021; 269:121326.
- [11] ASTM International. ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019.
- [12] Xin CL, Wang ZZ, Zhou JM, Gao B. Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining. *Tunn Undergr Space Technol.* 2019; 88:1-5.
- [13] Das CS, Dey T, Dandapat R, Mukharjee BB, Kumar J. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater.* 2018; 189:649-59.
- [14] ASTM International. ASTM C33-18, Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2023.
- [15] Thai Industrial Standards Institute (TISI). TIS no. 2601-2556, Cellular lightweight concrete blocks using preformed foam. TIS; 2013. Thai.
- [16] Rattanasak U. Geopolymer. Thailand Concrete Association; 2019. Thai.
- [17] Standard AS. C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air-Content (Gravimetric) of Concrete. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.
- [18] ASTM International. ASTM C109/109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2020.
- [19] ASTM International. ASTM C348-21, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2021.
- [20] Bellum RR. Influence of steel and PP fibers on mechanical and microstructural properties of fly ash-GGBFS based geopolymer composites. *Ceram Int.* 2022; 48(5):6808-18.
- [21] Wongkvanklom A, Posi P, Kasemsiri P, Sata V, Cao T, Chindaprasit P. Strength, thermal conductivity and sound absorption of cellular lightweight high calcium fly ash geopolymer concrete. *Eng Appl Sci Res.* 2021; 48(4).



- [22] Wang Y, Zheng T, Zheng X, Liu Y, Darkwa J, Zhou G. Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. *Constr Build Mater.* 2020; 251:118960.
- [23] Chung SY, Abd Elrahman M, Kim JS, Han TS, Stephan D, Sikora P. Comparison of lightweight aggregate and foamed concrete with the same density level using image-based characterizations. *Constr Build Mater.* 2019; 211:988-99.
- [24] Ranjbar N, Talebian S, Mehrali M, Kuenzel C, Metselaar HS, Jumaat MZ. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Compos Sci Technol.* 2016; 122:73-81.
- [25] Al-Mashhadani MM, Canpolat O, Aygörmez Y, Uysal M, Erdem S. Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Constr Build Mater.* 2018; 167:505-13.
- [26] Suksiripattanapong C, Krosoongnern K, Thumrongvut J, Sukontasukkul P, Horpibulsuk S, Chindaprasirt P. Properties of cellular lightweight high calcium bottom ash-portland cement geopolymer mortar. *Case Stud Constr Mater.* 2020; 12:e00337.
- [27] Song Y, Lange D. Influence of fine inclusions on the morphology and mechanical performance of lightweight foam concrete. *Cem Concr Compos.* 2021; 124:104264.
- [28] Mohseni E. Assessment of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites. *Constr Build Mater.* 2018; 186:904-11.
- [29] Ammari MZ, Fowler R. Grading of fine crushed stone and its effect on concrete properties used in the United Arab Emirates. *Int J Civ Eng Technol.* 2017; 8:259-67.