

อิทธิพลของค่าโมดูลัสความละเอียด ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน และปริมาณโฟมต่อ หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน

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^{1*}, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹

¹ วิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Piyathida Yoosuk^{1*}, Cherdsak Suksiripattanapong¹

¹ 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@rmu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-7240-5300

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

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความละเอียดต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน โดยใช้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6, 1.45 และ 1.3, ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย, ปริมาณโฟมเท่ากับ ร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทรายเท่ากับ 1, อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 50:50 ผลการทดสอบพบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน และอัตราส่วนฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดที่ 1.6, ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ปริมาณโฟมเท่ากับร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ค่ากำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย เท่ากับ 1.45 กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกกว้าง และลดความกว้างของรอยแตก และกำลังดัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 3 เนื่องจากเส้นใยที่มากเกินไปจะเกิดการขัดกันภายในตัวอย่าง หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังอัดมากกว่า 5 เมกะปาสคาล (51.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

คำสำคัญ จีโอโพลิเมอร์มวลเบา โมดูลัสความละเอียด เถ้าลอย เส้นใยโพลิโพรพิลีน

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 (Na_2SiO_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 kg/m^3 and the compressive strength was more than 5.0 MPa (51.0 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) โดยการผลิตคอนกรีตเติมฟองอากาศหรือโฟมคอนกรีต 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]

อย่างไรก็ตามการผลิตคอนกรีตมวลเบามักใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหลัก โดยอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ใช้พลังงานมาก และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูง โดยการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน ปล่อยก๊าซ 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, แก๊ลลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน และตะกอนจากเตาหลอมเหล็กซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเหล็ก เป็นต้น การใช้กากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแก๊ลลอยจีโอโพลีเมอร์ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงคุณสมบัติที่ดี ได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูง, ความหนาแน่นสูง, ความทนทานสูง, ความต้านทานการกัดกร่อนสูง และอื่น ๆ [10] แก๊ลลอยสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C618-19 ได้แก่ แก๊ลลอยแคลเซียมต่ำ (Class F) และแก๊ลลอยแคลเซียมสูง (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

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความเค้นเฉื่อยของทรายต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน โดยใช้แก๊ลลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน นำมาผสมสารละลายอัลคาไลน์ (สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลใน

การศึกษาครั้งนี้คือ โมดูลัสความเค้นเฉื่อยของทรายที่ 1.3 1.45 และ 1.6 ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแก๊ลลอย ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนแก๊ลลอยต่อทรายเท่ากับ 1 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 50:50 โดยอัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนแสดงดังตารางที่ 1

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

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ตัวแปร	อัตราส่วนผสม
โมดูลัสความเค้นเฉื่อยของทราย	1.3 1.45 และ 1.6
ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน	ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแก๊ลลอย
ปริมาณฟองโฟม	ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
อัตราส่วนแก๊ลลอยต่อทราย	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

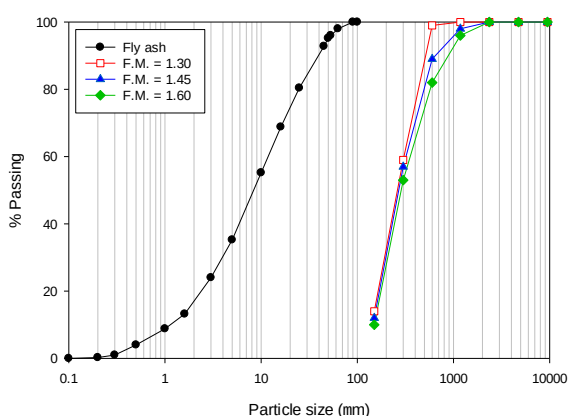
ตารางที่ 2 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

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

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

เส้นใยโพลิโพรพิลีน (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 จากนั้นเติมเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่ร้อยละ 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 จากนั้นเทจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ ที่มีขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร และแบบหล่อทรงปริซึม ที่มีขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร (รูปที่ 2(ง))



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 การผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

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

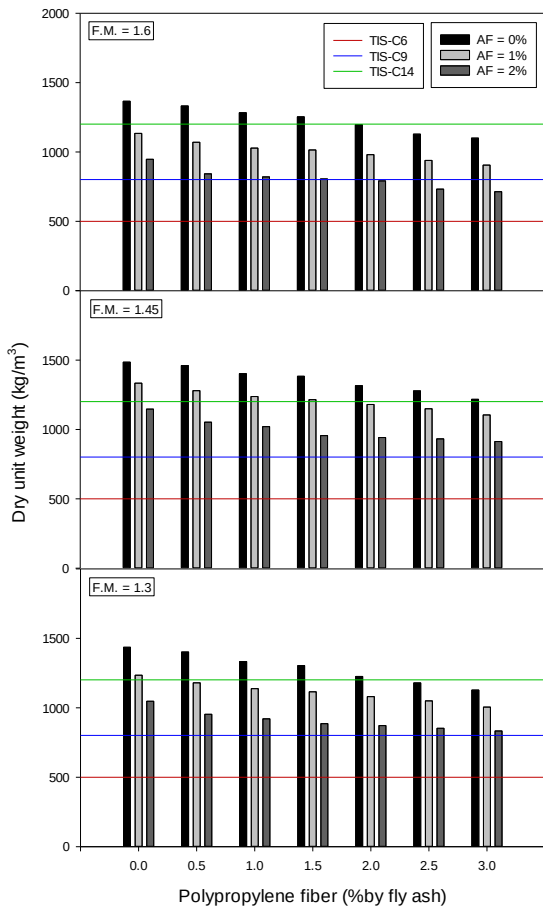
3.1 หน่วยน้ำหนักแห้ง ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลี โพรพิลีน 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] และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลี โพรพิลีนที่โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง C6-C12 โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง C9-C14 และโมดูลัสความละเอียด



ของทรายเท่ากับ 1.3 มีค่าน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง C9-C14 ตามลำดับ

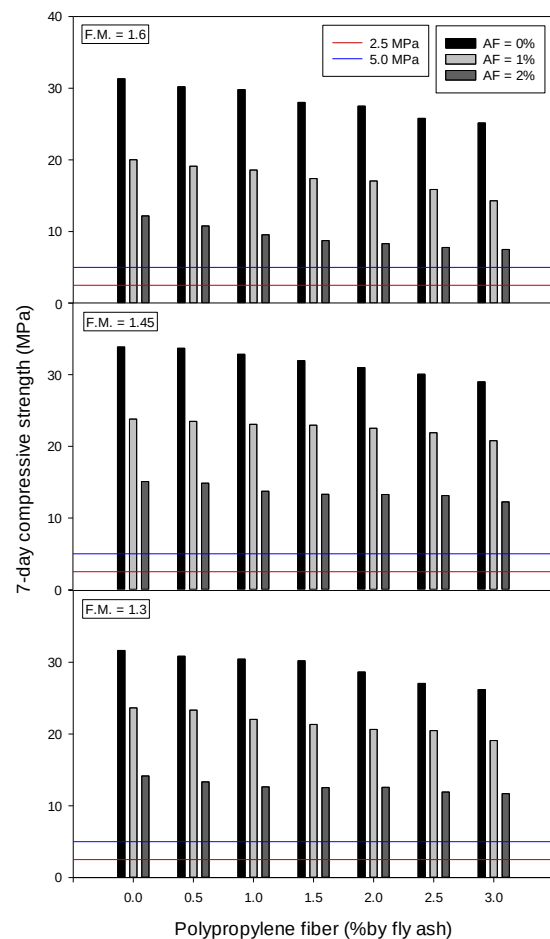


รูปที่ 3 หน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

3.2 กำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

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

ลดลงเท่ากับร้อยละ 27-30 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับทุกปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่มากเกินไปค่าที่เหมาะสม ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง ส่งผลให้ตัวอย่างมีความพรุนเพิ่มขึ้น และกำลังอัดลดลง [24] เนื่องจากเกิดความยากในการผสม และเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของเส้นใยโพลีโพรพิลีนภายในตัวอย่าง [25] และเมื่อปริมาณฟองโฟมเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดรูพรุน และช่องว่างขนาดเล็กภายในตัวอย่าง [26] ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 แสดงค่ากำลังอัดสูงสุด เนื่องจากค่าค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดที่เหมาะสม ทำให้เกิดแรงยึดเกาะของพื้นผิวของอนุภาคที่ดี [4] และขนาดอนุภาคของมวลรวมยังส่งผลต่อความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพร



ฟิล์ม เนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของมวลรวมขนาดใหญ่ [5] ทำให้จีโอโพลิเมอร์มวลเบามีความแน่นขึ้น ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.6 อนุภาคของมวลรวมละเอียดที่มีขนาดใหญ่ มีแนวโน้มขยายช่องว่างอากาศของฟองโฟม ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น และสูญเสียกำลัง [27] สังเกตได้ว่าที่ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.3 ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดมากเกินไป พื้นที่หน้าตัดมีขนาดเล็ก อาจทำให้เกิดการสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก และค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) สำหรับทุกส่วนผสม ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4 หน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

โมดูลัสความเค้นเฉือน 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 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

โมดูลัสความเค้นเฉือน 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 และกำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนแสดงในตารางที่ 4 และ 5 โดยค่าต่ำสุดพบที่ปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีนที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเฉลี่ย

จากตารางที่ 4 และ 5 เมื่อนำผลทดสอบระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) พบว่าที่ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.6 1.45 และ 1.3 สำหรับทุกส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยจำแนกชนิดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนตามปริมาณฟองโฟม 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 ชนิดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน ตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556

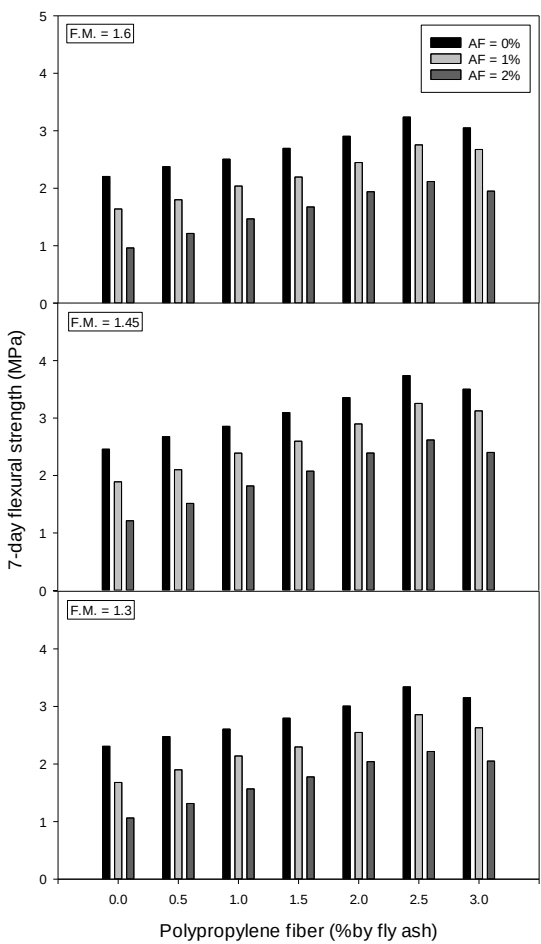
โมดูลัสความเค้นเฉือน ของทราย	ชนิด		
	ปริมาณฟองโฟม (ร้อยละ)		
	0	1	2
1.6	C12	C10	C8
1.45	C14	C12	C10
1.3	C12	C12	C9

3.3 กำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 5 พบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกกว้าง เชื่อมข้ามรอยแตก ลดจำนวนรอยแตก และความกว้างของรอยแตก [25, 28] โดยค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.45 ที่ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับ 2.46 2.68 2.86 3.10 3.36 3.74 และ 3.50 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการยึดเกาะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่ดี [4] เนื่องจากอนุภาคเล็กจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้จีโอโพลิเมอร์มวลเบามีการอัดตัวแน่น [5] ซึ่งมวลรวมที่มีความหยาบ



หรือละเอียดเกินความเหมาะสมจะทำให้ค่ากำลังอัด และกำลังดัดของตัวอย่างมีค่าลดลง [29] และพบว่ากำลังดัดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกปริมาณเส้นใยโพลีพรพิลีน กำลังดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลีพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยโพลีพรพิลีนช่วยประสานรอยแตกภายในตัวอย่าง [25] ดังนั้นค่าโมดูลัสความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ซึ่งให้ค่ากำลังอัด และกำลังดัดสูงสุดสำหรับทุกสัดส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 801-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0, 2.5 และ 5.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



รูปที่ 5 กำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีน

3.4 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีน

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Package for Social Science, SPSS) วิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ เพื่อทำนายหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีนตัวแปรที่แตกต่างกัน 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลีพรพิลีน และปริมาณฟองโฟม โดยค่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีนพบค่า Sig (P-Value) เท่ากับ 0.000 (น้อยกว่า 0.01) หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติโดยระบุนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 99 พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลีพรพิลีน และปริมาณฟองโฟมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีน 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 ของหน่วยน้ำหนักแห้งจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีน

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, ปริมาณเส้นใยโพลีพรพิลีน
AF, ปริมาณฟองโฟม

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของกำลังอัด
จีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

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 ของกำลังดัด
จีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

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

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความเค้นของ
ทราย ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณฟองโฟมต่อ
หน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์
มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน สามารถสรุปผลการทดสอบ
ได้ดังนี้

1. หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และอัตราส่วนฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น โดยหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด พบที่ค่าโมดูลัสความเค้นของทรายเท่ากับ 1.6 และปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
2. ค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความเค้นของทรายเท่ากับ 1.45 และค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) สำหรับทุกส่วนผสม ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะปาสคาล
3. กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกช้า เชื่อมข้ามรอยแตก ลดจำนวนรอยแตก และความกว้างของรอยแตก
4. ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0 เมกะปาสคาล

5. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่าค่าโมดูลัสความเค้นของทราย ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณฟองโฟม มีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน แต่ในส่วนของค่ากำลังดัดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับโมดูลัสความเค้น

5. กิตติกรรมประกาศ

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

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Masoule MS, Bahrami N, Karimzadeh M, Mohasanati B, Shoaee 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 CO₂ 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, Rüschler 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, Aygörmüş 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 Na₂SiO₃ 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.