



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยที่มีเส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นส่วนผสม

Fly Ash Based Geopolymer Mortar Containing Sisal Fiber

รณกฤต กุลธวัชวงศ์¹ อัมพล วงศ์ษา¹ วันชัย สะตะ^{1*} ปริญญญา จินดาประเสริฐ¹

¹ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Ronnakrit Kunthawatwong¹ Ampol Wongsas¹ Vanchai Sata^{1*} Prinya Chindaprasirt¹

¹ Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Khon Kaen University, Mueang, Khon Kaen 40002

* Corresponding author.

E-mail: vancsa@kku.ac.th; Telephone: 08 1592 8191

วันที่รับบทความ 25 มกราคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 8 พฤษภาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 2 21 พฤษภาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 3 19 กรกฎาคม 2562; วันที่ตอบรับบทความ 19 กรกฎาคม 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลและกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) โดยเส้นใยใช้อัตราส่วนร้อยละ 0 (จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม) 0.50 0.75 และ 1.00 โดยปริมาตรสำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์; ร้อยละ 0 (ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม) และ 0.75 โดยปริมาตรสำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์ ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ ได้แก่ การไหลแผ่ กำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก กำลังดัด อัตราส่วนโพรงอากาศ การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านก่อนตัวอย่าง ผลทดสอบพบว่าการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ทำให้ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ลดลง ขณะที่กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นร้อยละ 9-14 เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม การใช้เส้นใยในอัตราส่วนร้อยละ 1.00 โดยปริมาตร ทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 34 กก./ตร.ซม.และ 67 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 79 และ 109 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้เสริมเส้นใยที่อัตราส่วนร้อยละ 0.75 ให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมและสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเท่ากัน ค่ากำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เส้นใยจะส่งผลให้อัตราส่วนโพรงอากาศและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ

จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ คุณสมบัติเชิงกล กำลังอัด เส้นใยธรรมชาติ เถ้าลอย

Abstract

This study investigated the mechanical and physical properties of geopolymer mortar and cement mortar reinforced with sisal fiber (SF). Fiber was used at the rate of 0 (control geopolymer mortar), 0.50, 0.75 and 1.00% by volume for geopolymer mortar; 0 (control cement mortar) and 0.75% by volume for cement mortar. The mechanical and physical

properties including flow, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, porosity, water absorption, density and ultrasonic pulse velocity were tested. The results indicated that the used of sisal fiber reduced the flow of geopolymer and cement mortars, while the compressive strength of geopolymer mortar increased about 9-14% of control geopolymer mortar. The use of sisal fiber at the rate of 1.00% by volume had the highest splitting tensile and flexural strengths of geopolymer mortar at 34 kg/cm² and 67 kg/cm² or about 79% and 109% of control geopolymer mortar, respectively. For cement mortar, the compressive strength of 0.75% of sisal fiber mix gave nearly the same as control cement mortar and slightly higher than that of geopolymer mortar with same fiber content. Similar to geopolymer mortar, the used of sisal fiber in cement mortar increased the splitting tensile and flexural strengths. In addition, it was found that the porosity and water absorption of geopolymer and cement mortars tend to increase with fiber contents.

Keywords

geopolymer mortar; mechanical properties; compressive strength; natural fiber; fly ash

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมก่อสร้างได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความต้องการที่เพิ่มขึ้นของประชากรโลก การเติบโตของเศรษฐกิจ และจากปัจจัยอื่น ๆ วัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างที่เป็นที่นิยมและแพร่หลายที่สุดได้แก่ คอนกรีตซึ่งมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบสำคัญ ทั้งนี้การผลิตปูนซีเมนต์ได้จากการนำหินปูนซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักไปเผาโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมาจำนวนมาก ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นเพื่อเป็นการตอบรับข้อตกลงของประชาคมโลกเรื่องการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาทดแทนเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง ความพยายามที่จะลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงนั้นได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย จนกระทั่งค้นพบการใช้สารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งจะใช้วัสดุตั้งต้น (raw materials) ที่เป็นผลพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม เช่น เถ้าลอย (fly ash) ที่มีสารซิลิกาและอลูมินาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตซึ่งเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานแบบอสัณฐาน (amorphous phase) ค้นพบโดย Davidovits นักวิศวกรรมเคมีชาวฝรั่งเศส โดยขั้นตอนการผลิตจีโอโพลิเมอร์นั้นก็จะเกิดจากการนำสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอลูมินา และซิลิกามาผสมกับสารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) และสารละลายอัลคาไลซิลิเกต (alkali silicate) เช่น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate, Na₂SiO₃) ใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะไปละลายสารตั้งต้นให้เกิดการแตกตัวของออลิโกซิลิกาและอลูมินา จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (polymerization) ของออลิโกทั้งสองกับออลิโกออกซิเจนได้เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต แข็งตัวและรับแรงได้ในที่สุด [1]

ถึงแม้วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะทนความร้อนและมีกำลังอัดที่สูง อีกทั้งกระบวนการผลิตยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็มีข้อด้อยที่คล้ายกับซีเมนต์คอนกรีต คือ มีกำลังดึงที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดทำให้มีการวิจัยเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้โดยการเสริมเส้นใยในส่วนผสม เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีราคาถูก, น้ำหนักเบา และมีคุณสมบัติทางกลที่ดี จึงได้มีนักวิจัยนำมาศึกษาในงาน



รูปที่ 1 เส้นใยป่านครนารายณ์

คอนกรีตจำนวนมาก เช่น Rahman และคณะ [2] พบว่าการใช้ใยไฟเบอร์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตได้ และ Andic-Cakir และคณะ [3] พบว่าการเสริมเส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์มอร์ตาร์ร้อยละ 0.40–0.75 จะทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดสูงขึ้นเช่นกัน ถึงแม้จะมีการวิจัยการเสริมเส้นใยธรรมชาติในงานซีเมนต์คอนกรีตอย่างแพร่หลาย แต่ในส่วนของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ยังถือว่าน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการใช้เส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยป่านครนารายณ์ เป็นส่วนผสม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.43 เป็นวัสดุตั้งต้นหลักในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 36.2, 19.9, 11.9 และ 14.2 ตามลำดับ ร้อยละน้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 34.8 ใช้สารละลาย 2 ชนิดได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH)

เตรียมโดยการใช้ น้ำกลั่นทำละลายเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ซึ่งจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) มีองค์ประกอบของ Na_2O , SiO_2 และ H_2O ร้อยละ 12.3, 30.3 และ 57.3 ตามลำดับ มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำ (RS) ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.9 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด น้ำสำหรับผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ใช้น้ำประปา เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยป่านครนารายณ์ (Sisal fiber, SF) แสดงในรูปที่ 1 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1

2.2 สัดส่วนผสมและขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีเสริมเส้นใยธรรมชาติคือเส้นใยป่านครนารายณ์ (SGM) กับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม (CGM), ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม (CCM) และซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใย (SCM) จากงานวิจัยของ Andic-Cakir และคณะ [3] พร้อมกับการทดลองผสมจึงเลือกอัตราส่วนการใช้เส้นใยป่านครนารายณ์สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีอยู่ 3 อัตราส่วน ได้แก่ ร้อยละ 0.50 0.75 และ 1.00 โดยปริมาตร สำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์จะผสมเส้นใยอัตราส่วนเดียวเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลคือร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร โดยตัวอย่างที่เป็นจีโอโพลิเมอร์จะใช้อัตราส่วนสารละลาย (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	เส้นใยป่านครนารายณ์
ความยาว (มม.)	40
เส้นผ่าศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)*	207
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)**	1,500
กำลังรับแรงดึง (กก./ตร.ซม.)**	5,210-6,475
โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)**	95,853-224,338

* Bisanda และ Ansell [4]

** Faruk และคณะ [5]

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (กิโลกรัม)

ส่วนผสม	เถ้าลอย	ปูนซีเมนต์	ทราย	โซเดียมไฮดรอกไซด์	โซเดียมซิลิเกต	น้ำ	เส้นใยป่านครนารายณ์
CGM	455	-	1251	171	171	-	-
50SGM	455	-	1251	171	171	-	7.25
75SGM	455	-	1251	171	171	-	10.88
100SGM	455	-	1251	171	171	-	14.51
CCM	-	544	1496	-	-	264	-
75SCM	-	544	1496	-	-	264	10.88

ไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต) ต่อเถ้าลอยคงที่เท่ากับ 0.75 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตคงที่เท่ากับ 1.00 และอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อเถ้าลอยคงที่เท่ากับ 2.75 (ปรับส่วนผสมจากงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ [6]) สำหรับตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์มอร์ตาร์จะใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.485 ซึ่งสัดส่วนผสมจะแสดงในตารางที่ 2 โดยจะใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรและตัวเลขเพื่อแสดงถึงสัดส่วนผสมต่าง ๆ เช่น 75SGM ตัวเลขข้างหน้าหมายถึงอัตราส่วนการใส่เส้นใยเท่ากับร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร ตัวอักษรข้างหลังหมายถึงจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยป่านครนารายณ์

2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเนื่องจากในการวิจัยมีทั้งตัวอย่างที่เป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ซึ่งจะมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน โดยการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะเริ่มจากการผสมเถ้าลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องผสมเป็นระยะเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการเติมมวลรวมละเอียดเข้าไปในส่วนผสมและผสมต่ออีก 5 นาที สุดท้ายจะทำการเติมโซเดียมซิลิเกตและเส้นใยป่านครนารายณ์ (ถ้ามี) ผสมต่ออีก 5 นาที เป็นอันจบขั้นตอนการผสม เมื่อผสมตัวอย่างเสร็จจะทำการ

การเทส่วนผสมลงแบบหล่อ ซึ่งจะมีการกระทุ้งและจี้เขย่าโดยใช้โต๊ะเขย่าเพื่อไล่ฟองอากาศ แล้วทำการหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการเสียความชื้น ก่อนจะบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นบ่มตัวอย่างต่อในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจนครบอายุทดสอบที่ 7 วัน สำหรับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นจะมีขั้นตอนการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305 [7] เมื่อผสมเสร็จจะทำการเทเข้าแบบซึ่งจะทำการกระทุ้งและใช้โต๊ะเขย่าเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แล้วทำการหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นฟิล์มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปบ่มต่อในน้ำจนครบอายุทดสอบที่อายุ 7 วัน

2.4 คุณสมบัติของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่าง ได้แก่ หาค่าการไหลแผ่ กำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก กำลังดัด ความเร็วคลื่นความถี่สูงที่ผ่านตัวอย่าง ร้อยละการดูดซึมน้ำ อัตราส่วนโพรง และความหนาแน่น หลังจากผสมตัวอย่างเสร็จจะทำการทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์สด ก่อนที่จะเทตัวอย่างลงแบบหล่อโดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาด รูปร่างและวิธีการทดสอบแตกต่างกันไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับการทดสอบหาความเร็วคลื่นความถี่สูงที่ผ่านตัวอย่างจะทำการทดสอบก่อนแล้วจึงนำตัวอย่างชิ้นเดียวกันนั้นไปทดสอบหาค่า

ตารางที่ 3 ลักษณะของตัวอย่างและมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	รูปร่างและลักษณะของตัวอย่าง	มาตรฐานการทดสอบ
ค่าการไหลแผ่	จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์สด	ASTM C1437 [8]
กำลังอัด	ทรงลูกบาศก์ กว้าง 5 ซม. ยาว 5 ซม. สูง 5 ซม.	ASTM C109 [9]
กำลังดึงผ่าซีก	ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.	ASTM C496 [10]
กำลังดัด	คาน หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 4 ซม. ยาว 16 ซม.	ASTM C348 [11]
การดูดซึมน้ำ	ทรงลูกบาศก์ กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C642 [12]
อัตราส่วนโพรง	ทรงลูกบาศก์ กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C642 [12]
ความหนาแน่น	ทรงลูกบาศก์ กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C642 [12]
ความเร็วคลื่น	ทรงลูกบาศก์ กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C597 [13]

การดูดซึมน้ำ อัตราส่วนโพรง และความหนาแน่น โดยทุก ๆ ผลการทดสอบจะได้จากค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่าง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

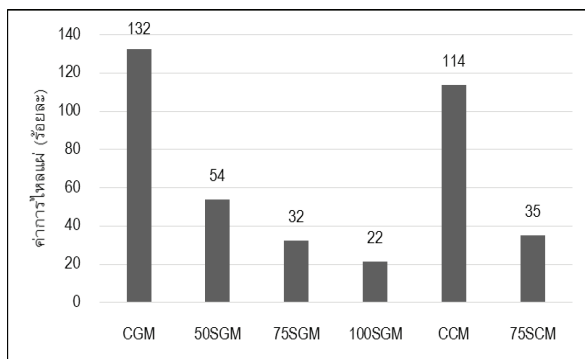
3.1 ค่าการไหลแผ่

ค่าการไหลแผ่แสดงดังในรูปที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยป่านศรนารายณ์จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ลดลง โดยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมมีค่าการไหลแผ่สูงที่สุดร้อยละ 132 และลดลงตามการเสริมเส้นใยที่เพิ่มขึ้นได้แก่ร้อยละ 54 32 และ 22 ลดลงจากจีโอโพลิเมอร์ควบคุมร้อยละ 59 76 และ 83 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการทดสอบของ Andic-Cakir และคณะ [3] ซึ่งรายงานว่าการให้ค่าการไหลแผ่เท่าเดิมจำเป็นต้องใช้สารลดน้ำมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์มอร์ตาร์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติและการผสมเส้นใยเข้าไปในส่วนผสมทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นในเนื้อมอร์ตาร์จนเป็นผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง สำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยร้อยละ 0.75 (75SCM) มีค่าการไหลแผ่ลดลงเป็นร้อยละ 35 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการเสริมเส้นใยในอัตราส่วนเดียวกัน (75SGM)

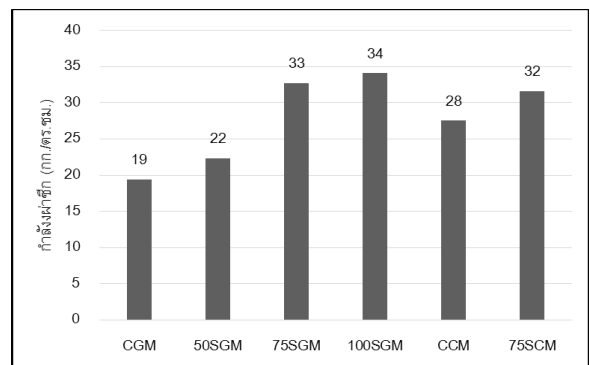
3.2 กำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก และกำลังดัด

ผลการทดสอบกำลังอัด แสดงในรูปที่ 3 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีกำลังอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุม แต่เมื่ออัตราส่วนการผสมเส้นใยสูงขึ้นกำลังอัดจะลดลง โดยส่วนผสม 50SGM มีกำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 354 กก./ตร.ซม. สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 14 และลดลงต่ำที่สุดในส่วนผสม 100SGM ที่ค่ากำลังอัดเท่ากับ 338 กก./ตร.ซม. แต่ยังคงมีค่ากำลังอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม และในส่วนของซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าการเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ในส่วนผสม 75SCM มีกำลังอัดเท่ากับ 361 กก./ตร.ซม. ใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ [14] ที่รายงานว่ากำลังอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยกัญชงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนการผสมเส้นใยกัญชงน้อยกว่าร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่านี้

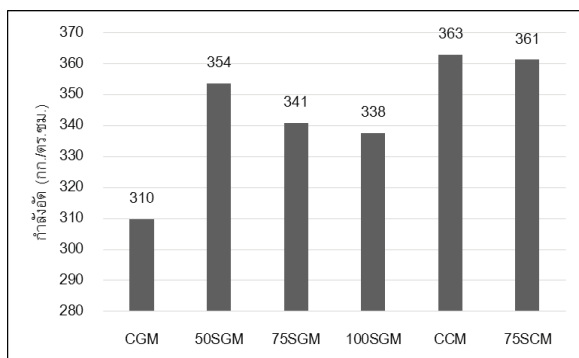
การที่ขึ้นตัวอย่างมีกำลังอัดที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากการถ่ายเทแรงที่ขึ้นตัวอย่างได้รับผ่านเนื้อมอร์ตาร์ไปสู่เส้นใย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการผสมเส้นใยในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจะเป็นผลให้เส้นใยมีโอกาสเกาะกลุ่มกันเป็นกระจุกจนทำให้เกิดโพรงขึ้นในเนื้อมอร์ตาร์ซึ่งจะทำให้กำลังอัดลดลงในที่สุด



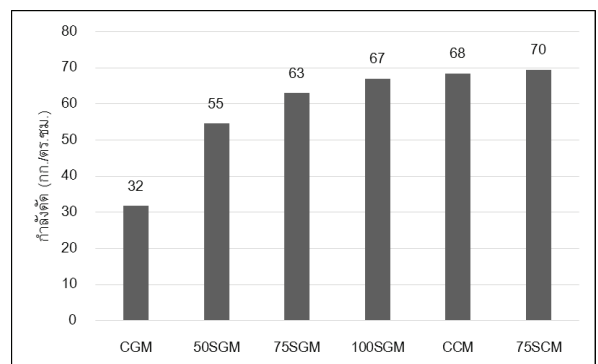
รูปที่ 2 ค่าการไหลแผ่ของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ 4 ค่ากำลังดึงผิวของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ 3 ค่ากำลังอัดของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ 5 ค่ากำลังดัดของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

ในส่วนของการดึงผิวของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ แสดงในรูปที่ 4 พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอีโพลีเมอร์ควบคุมและสูงขึ้นตามอัตราส่วนการผสมเส้นใย ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Kumar และ Roy [15] ที่ทำการเสริมเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยเหล็กและเส้นใยป่านศรนารายณ์ในคอนกรีตไหลเข้าแบบ โดยอัตราส่วนผสมเส้นใยเหล็กคงที่แต่จะปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ในอัตราส่วนร้อยละ 0.50, 1.00 และ 1.50 โดยปริมาตร พบว่าการดึงผิวจะสูงขึ้นเมื่อมีการเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ในอัตราส่วนผสมที่สูงขึ้น โดยส่วนผสม 100SGM ในการศึกษาครั้งนี้มีการดึงผิวสูงที่สุดเท่ากับ 34 กก./ตร.ซม. สามารถเพิ่มการดึงผิวได้สูงขึ้นร้อยละ 79 และซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยส่วนผสม 75SCM ก็มีค่าการดึงผิวที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมเช่นกัน

ค่าการดึงผิวของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ แสดงในรูปที่ 5 พบว่ามีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราส่วนการผสมเส้นใยที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับค่าการดึงผิว โดยส่วนผสม 100SGM มีการดึงผิวสูงที่สุดเท่ากับ 67 กก./ตร.ซม. สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 109 เมื่อเปรียบเทียบกับอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม และในซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าการเสริมเส้นใยในส่วนผสม 75SCM ตัวอย่างมีการดึงผิวเท่ากับ 70 กก./ตร.ซม. สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม สาเหตุที่ทำให้การดึงผิวและการดึงดัดมีค่าสูงขึ้นเป็นผลมาจากเส้นใยมีการกระจายเข้าไปในเนื้อมอร์ตาร์ เมื่อขึ้นตัวอย่างได้รับแรงดึงและแรงดัดก็จะถ่ายเทแรงที่ได้รับไปที่เส้นใยและด้วยการที่เส้นใยมีการดึงที่สูงทำให้ชิ้นตัวอย่างได้รับข้อดีนี้ด้วย และจากรูปที่ 6 ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6 การกระจายตัวของเส้นใยในเนื้อมอร์ตาร์ (ก) (ข) และ (ค) เป็นการเสริมเส้นใยในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ร้อยละ 0.50 0.75 และ 1.00 โดยปริมาตร ตามลำดับ (ง) เป็นการเสริมเส้นใยในซีเมนต์มอร์ตาร์ร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร

เสริมเส้นใยจะทำให้เส้นใยกระจายตัวเข้าไปในเนื้อมอร์ตาร์มากขึ้น ส่งผลให้มีกำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดที่สูงขึ้นเช่นกัน

จากการเปรียบเทียบในอัตราส่วนการผสมเส้นใยร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนการผสมเส้นใยที่มีทั้งในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าค่ากำลังอัด, กำลังดึงผ่าซีก และกำลังดัดในซีเมนต์มอร์ตาร์ส่วนผสม 75SCM มีค่าสูงกว่าในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ส่วนผสม 75SGM เป็นผลมาจากกำลังในส่วนผสมควบคุมของซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่า

สูงกว่าในส่วนผสมควบคุมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อมีการเสริมเส้นใยในอัตราส่วนผสมเดียวกันจึงทำให้ค่ากำลังอัด, กำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดมีค่าสูงตามไปด้วย แต่ถ้าหากพิจารณาค่าอัตราส่วนกำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดต่อกำลังอัดตามตารางที่ 4 พบว่าค่าอัตราส่วนกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดและค่าอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ส่วนผสม 75SGM เปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุมมีค่าใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์ส่วนผสม 75SCM เมื่อเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4 ค่าอัตราส่วนกำลังดึงผ้าซีกต่อกำลังอัดและค่าอัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

ส่วนผสม	อัตราส่วนกำลังดึงผ้าซีกต่อกำลังอัด (ร้อยละ)	อัตราส่วนกำลังดัดต่อกำลังอัด (ร้อยละ)
CGM	6.13	10.32
50SGM	6.21	15.54
75SGM	9.68	18.48
100SGM	10.06	19.82
CCM	7.71	18.73
75SCM	8.86	19.39

กับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งให้เห็นว่าการเสริมเส้นใยธรรมชาติชนิดนี้ในจีโอโพลิเมอร์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดึงผ้าซีกและกำลังดัดได้เช่นเดียวกันกับในซีเมนต์มอร์ตาร์

3.3 อัตราส่วนโพรงอากาศ การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบอัตราส่วนโพรงอากาศ, การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ CGM (ร้อยละ 27.1) และ 50SGM (ร้อยละ 26.9) มีอัตราส่วนโพรงอากาศใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มของอัตราส่วนโพรงอากาศเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการเสริมเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Alomayri และคณะ [16] ซึ่งรายงานว่จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำเสริมเส้นใยฝ้ายจะมีอัตราส่วนโพรงอากาศเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการเสริมเส้นใยฝ้ายเพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม 100SGM มีอัตราส่วนโพรงอากาศสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 27.5 และเมื่อพิจารณาในอัตราส่วนผสมเส้นใยร้อยละ 0.75 สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีอัตราส่วนโพรงอากาศที่สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ ทั้งนี้เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีกระบวนการบ่มร้อนซึ่งอาจทำให้เกิดการระเหยของของเหลวในส่วนผสมจึงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีอัตราส่วนโพรงอากาศมากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์

สำหรับผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำพบว่าเมื่ออัตราส่วนการเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซึมน้ำก็จะสูงขึ้น

ตามไปด้วย โดยส่วนผสม 100SGM มีร้อยละการดูดซึมน้ำสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 5.6 เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนี้ซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยส่วนผสม 75SCM ก็มีร้อยละการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมโดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 7 แต่ก็มีค่าน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการผสมเส้นใยในอัตราส่วนผสมเดียวกัน เช่นเดียวกับผลการทดสอบอัตราส่วนโพรงอากาศ

สาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนโพรงอากาศสูงขึ้นเป็นผลมาจากโครงสร้างของเส้นใยที่มีลักษณะเป็นโพรงภายใน เมื่อนำมาผสมทั้งในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์จึงส่งผลให้ตัวอย่างมีอัตราส่วนโพรงอากาศที่สูงขึ้น และโพรงอากาศนี้เองจะเป็นเส้นทางในการลำเลียงของเหลวเข้าสู่ชิ้นตัวอย่าง ผนวกกับเส้นใยธรรมชาติมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่สูงจึงทำให้ร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน บ่งชี้ได้จากร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะตามอัตราส่วนโพรงอากาศ

ในส่วนของการทดสอบความหนาแน่นพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่ใช้เส้นใยและมีการใช้เส้นใยร้อยละ 0.50 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการผสมเส้นใยเพิ่มมากขึ้น สำหรับอัตราส่วนการผสมเส้นใยร้อยละ 0.75 ทั้งจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นต่ำกว่าส่วนผสมควบคุม เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังนั้นเมื่อมีการใช้เส้นใยธรรมชาติในอัตราส่วนการผสมที่มาก

ตารางที่ 5 ค่าอัตราส่วนโพรงอากาศ การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

ส่วนผสม	อัตราส่วนโพรงอากาศ (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
CGM	27.1	5.1	1885
50SGM	26.9	5.5	1900
75SGM	27.3	5.5	1877
100SGM	27.5	5.6	1853
CCM	17.6	4.3	2223
75SCM	22.3	4.6	2134

ขึ้นตัวอย่างจึงมีความหนาแน่นต่ำลง โดยในส่วนผสม 75SCM ที่เป็นซีเมนต์มอร์ตาร์จะมีความหนาแน่นสูงกว่าในส่วนผสม 75SGM ที่เป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นผลมาจากการที่ปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นสูงกว่าเถ้าลอย

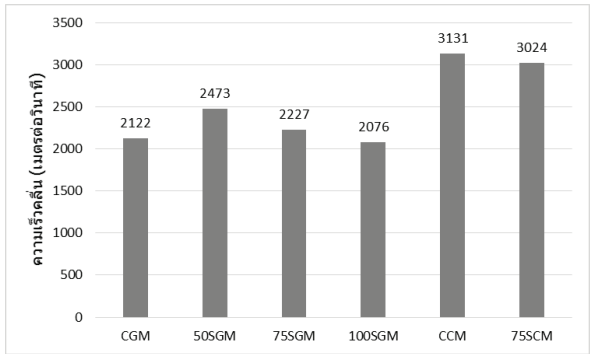
3.4 ความเร็วคลื่นความถี่สูงที่ผ่านตัวอย่าง

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นความถี่สูงที่ผ่านชิ้นตัวอย่างแสดงในรูปที่ 7 ตัวอย่างที่เป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งจะมีอัตราส่วนการผสมเส้นใยปานศรณารายณ์ 3 อัตราส่วน พบว่าความเร็วคลื่นความถี่สูงที่ผ่านตัวอย่างจะมีค่าสูงในอัตราส่วนผสมเส้นใยร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรและเริ่มลดลงเมื่ออัตราส่วนการผสมเส้นใยเพิ่มขึ้น สำหรับในส่วนของซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าการเสริมเส้นใยทำให้ความเร็วคลื่นความถี่สูงที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งผลการทดสอบทั้งหมดนี้สอดคล้อง

กับผลการทดสอบกำลังอัด โดยคลื่นจะเคลื่อนที่ได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่มีอนุภาคสมบูรณ์ต่อเนื่องและความหนาแน่นมากกว่า แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนการผสมเส้นใยที่มากเกินไปเป็นผลให้เนื้อของชิ้นตัวอย่างมีความต่อเนื่องและความหนาแน่นลดลง จึงทำให้ความเร็วคลื่นที่เคลื่อนผ่านมีลดลงเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าความเร็วคลื่นความถี่สูงที่ผ่านตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ทั้งนี้เพราะซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากกว่าจากการที่ปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าลอย จึงส่งผลกระทบต่อความเร็วคลื่นที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างดังผลการทดลองข้างต้น

4. บทสรุป

- 1) การใช้เส้นใยปานศรณารายณ์ทำให้ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าลดลง เมื่อใช้อัตราส่วนเส้นใยเท่ากันยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยปานศรณารายณ์มีค่าการไหลแผ่ใกล้เคียงกัน
- 2) สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ การใช้เส้นใยปานศรณารายณ์ทำให้กำลังอัดสูงขึ้น แต่จะลดลงเมื่อเส้นใยมีอัตราส่วนมากขึ้น โดยการใช้เสริมเส้นใยที่ร้อยละ 0.50 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดคือ 354 กก./ตร.ซม. ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เสริมเส้นใยปานศรณารายณ์ที่ร้อยละ 0.75 มีกำลังอัดเป็น 361 กก./ตร.ซม. ซึ่งมี



รูปที่ 7 ค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านชิ้นตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

ค่ามากกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเท่ากัน

- 3) กำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยการใช้เส้นใยปานศรณารายณ์ร้อยละ 1.00 โดยปริมาตร จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดสูงที่สุดเป็น 34 กก./ตร.ซม. และ 67 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ หรือสูงขึ้นถึงร้อยละ 79 และ 109 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม

นอกจากนั้นการใช้เส้นใยปานศรณารายณ์ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีกำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยการใช้เส้นใยร้อยละ 0.75 ได้กำลังดึงผ่าซีกและกำลังดัดเป็น 32 กก./ตร.ซม. และ 70 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เล็กน้อยเมื่อใช้อัตราส่วนเส้นใยเท่ากัน

- 4) การใช้เส้นใยปานศรณารายณ์ทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีอัตราส่วนโพรงอากาศและร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มหาวิทยาลัยขอนแก่นและสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ภายใต้งบทุนองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (BRG6080010) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการทดสอบและศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. วัสดุจีโอโพลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย; 2560.
- [2] Rahman MM, Rashid MH, Hossain MA, Hasan MT, Hasan MK. Performance evaluation of bamboo reinforced concrete beam. *International Journal of Engineering & Technology*. 2011; 11(4): 113–118.
- [3] Andic-Cakir O, Sarikanat M, Tufekci HB, Demirci C, Erdogan UH. Physical and mechanical properties of randomly oriented coir fiber-cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*. 2014; 61: 49–54.
- [4] Bisanda ETN, Ansell MP. The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites. *Composites Science and Technology*. 1991; 41(2): 165–178.
- [5] Faruk O, Bledzki AK, Fink H, Sain M. Biocomposites reinforced with natural: 2000–2010. *Progress in Polymer science*. 2012; 37(11): 1552–1596.
- [6] Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymers. *Cement & Concrete Composites*. 2007; 29: 224–229.
- [7] American Society for Testing and Materials. *Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency*. ASTM C305-14. Annual Book of ASTM Standards. 2014; 4(1).
- [8] American Society for Testing and Materials. *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM C1437-15. Annual Book of ASTM Standards. 2015; 4(1).
- [9] American Society for Testing and Materials. *Standard test method for compressive strength*

- of hydraulic cement mortars (using 2-in or (50 mm) cube specimens). ASTM C109/C109M-99. Annual Book of ASTM Standards. 2001; 4(1).*
- [10] American Society for Testing and Materials. *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.* ASTM C496-96. Annual Book of ASTM Standards. 2001; 4(2).
- [11] American Society for Testing and Materials. *Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars.* ASTM C348-97. Annual Book of ASTM Standards. 2001; 4(1).
- [12] American Society for Testing and Materials. *Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete.* ASTM C642-06. Annual Book of ASTM Standards. 2006; 4(2).
- [13] American Society for Testing and Materials. *Standard test method for pulse velocity through concrete.* ASTM C597-16. Annual Book of ASTM Standards. 2016; 4(2).
- [14] Li Z, Wang L, Wang X. Compressive and flexural properties of hemp fibre reinforced concrete. *Fiber Polymer.* 2004; 5(3): 187–197.
- [15] Kumar P, Roy R. Study and experimental investigation of flow and flexural properties of natural fiber reinforced self-compacting concrete. *Procedia Computer Science.* 2018; 125: 598–608.
- [16] Alomayri T, Shaikh FUA, Low IM. Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering.* 2013; 50: 1–6.