

USE OF STEEL FIBER IN FLY ASH BASED GEOPOLYMER MORTAR

การใช้เส้นใยเหล็กในเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ศักดิ์ชัย แน่นอุดร¹ อ่ำพล วงศ์ษา² วันชัย สะตะ³ ปริญา จินดาประเสริฐ⁴

¹นักศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²นักวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ
ภาคีสมาชิก ราชบัณฑิตยสภา สนามเสือป่า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

ARTICLE INFO:

Received: January 22, 2019

Received Revised Form:

February 11, 2019

Accepted: February 12, 2019

ABSTRACT:

This study investigated the mechanical and physical properties of fly ash geopolymer mortar containing steel fiber (SF). Hooked end steel fiber was used in geopolymer mortar at rate of 0, 0.5, 1.0 and 1.5% by volume. The properties of mortar including flow table test, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, porosity, water absorption, density and ultrasonic pulse velocity were tested. The results revealed that the flow value of steel fiber geopolymer mortar gave almost the same which varied between 129-132%. The use of steel fiber in geopolymer mortar exhibited to improve mechanical properties as well as cement mortar and also increased as fiber content increasing. The 1.0% steel fiber geopolymer mortar had higher compressive, splitting tensile, and flexural strength than those of without fiber about 33%, 157%, and 183%, respectively. In addition, the use of steel fiber less than 1.5% tended to decrease the porosity of geopolymer mortars.

*Corresponding Author,

Email address:

vanca@kku.ac.th

KEYWORDS: Geopolymer, mortar, Steel fiber, Fly ash

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณคุณสมบัติทางกลและกายภาพของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ในส่วนผสม โดยใช้เส้นใยเหล็กแบบงอปลายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การไหลแผ่ กำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก กำลังดัด ปริมาณโพรง การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านก้อนตัวอย่าง ผลทดสอบพบว่าค่าการไหลแผ่ของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 129 ถึง 132 การใช้เส้นใยเหล็กในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้เช่นเดียวกับซีเมนต์มอร์ตาร์และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้เส้นใย โดยการใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 สามารถเพิ่มกำลังอัดได้ร้อยละ 33 เพิ่มกำลังดึงผ่าซีกได้ร้อยละ 157 และเพิ่มกำลังดัดได้ร้อยละ 183 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เส้นใยเหล็กในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่เกินร้อยละ 1.5 มีแนวโน้มทำให้ปริมาณโพรงลดลงตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ:จีโอโพลิเมอร์, มอร์ตาร์, เส้นใยเหล็ก, เถ้าลอย

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการก่อสร้างได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง การใช้งานวัสดุก่อสร้างมีทิศทางที่เปลี่ยนไป มุ่งเน้นไปในด้านการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยปูนซีเมนต์ยังเป็นวัสดุหลักที่ถูกเลือกนำมาใช้ในงานก่อสร้างเป็นอันดับต้นๆ อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์นั้นเป็นอุตสาหกรรมที่ปลดปล่อยของเสียเป็นอันดับต้นๆเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยรวมแล้วการผลิตปูนซีเมนต์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมามากถึง 1 ตันต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) [1] จึงมีแนวคิดการนำวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ เช่น วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan) ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง (By Product) จากโรงงานอุตสาหกรรม มาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน สังเคราะห์ขึ้นจากสารที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (Silica, SiO₂) และอลูมินา (Alumina, Al₂O₃) ที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) โดยการกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูง (Alkali solution) เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) , โพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃)

เป็นต้น เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ทำให้ส่วนผสมสามารถก่อตัว แข็งตัวและรับกำลังอัดได้คล้ายกับปูนซีเมนต์คอนกรีต ทนความร้อนได้ดี ทนทานต่อสารเคมีได้ดีกว่าคอนกรีต [2-4] แต่ในขณะเดียวกันจีโอโพลิเมอร์ก็เป็นวัสดุที่รับแรงดึงได้ต่ำคล้ายกับคอนกรีต กล่าวคือ กำลังดึงต่ำเมื่อเทียบกับกำลังอัด โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 6.9-13.7 ของกำลังอัด [5]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงดึงให้แก่จีโอโพลิเมอร์ โดยจะใช้เส้นใยเหล็ก ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร ทำการศึกษาคูณคุณสมบัติเชิงกล และกายภาพ ผลที่ได้เปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ไม่ใช้เส้นใยเหล็ก และซีเมนต์มอร์ตาร์

2. วิธีดำเนินการวิจัย**2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย**

ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium fly ash, HCF) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง เป็นวัสดุตั้งต้นหลักในการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีองค์ประกอบของ SiO₂ และ Al₂O₃ เท่ากับร้อยละ 39.4 และ 20.8 ตามลำดับ และมีองค์ประกอบของ CaO ร้อยละ 14.5 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 1.5 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.17

และมีร้อยละของน้ำหนักที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ 44 ในการสังเคราะห์จีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากการเตรียมโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Commercial grade) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O , SiO_2 และ H_2O ร้อยละ 12.53, 30.24 และ 57.23 ตามลำดับ และมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำ (RS) ที่มีโมดูลัสความละเอียด 2.9

เส้นใยเหล็ก (Steel fiber, SF) ใช้เส้นใยเหล็กแบบงอปลายที่มีความยาว 35 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.62 มิลลิเมตร มีหน่วยน้ำหนัก 7,850 กก./ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 1 และมีคุณสมบัติอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 แสดงเส้นใยเหล็ก (Steel fiber, SF)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ*

คุณสมบัติ	เส้นใยเหล็ก
ความยาว (มิลลิเมตร)	35
เส้นผ่าศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	620
หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	7,850
กำลังดึง (เมกะปาสคาล)	1,270
โมดูลัสความยืดหยุ่น (เมกะปาสคาล)	210,000

*จากผู้ผลิต

2.2 สัดส่วนผสมและขอบเขตงานวิจัย

การสังเคราะห์จีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นคงที่เท่ากับ 10 โมลาร์ ใช้อัตราส่วน

ระหว่างสารละลายต่างต่อแก้วลอยเท่ากับ 0.75 และใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 เป็นส่วนผสมควบคุม [6] การใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมของจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์นั้น จะใช้เส้นใยเหล็ก ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตร

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยสัดส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์จะกำหนดอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยชื่อของส่วนผสมจะถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์ เช่น 100SFG หมายถึง ส่วนผสมของจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ 100SFC หมายถึง ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เป็นต้น

2.3 ขั้นตอนการผลิตจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ขั้นตอนการผลิตจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน จะเริ่มจากผสมแก้วลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลงเครื่องผสมมอร์ตาร์แล้วผสมให้เข้ากันด้วยเวลา 5 นาที จากนั้นเติมทรายและเส้นใย ผสมให้เข้ากันด้วยเวลา 5 นาที ขั้นตอนสุดท้ายเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และผสมให้เข้ากันอีก 5 นาที หลังจากนั้นทำการบรรจุตัวอย่างในแบบหล่อ แล้วหุ้มผิวตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกฟิล์มเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากตัวอย่าง นำไปบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาแล้วจึงทำการถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง 22-25 องศาเซลเซียส และรักษาความชื้นที่ร้อยละ 50-55 จนตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน จึงนำไปทดสอบคุณสมบัติ

การผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ จะเริ่มจากผสมปูนซีเมนต์และน้ำในเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที เติมทรายและเส้นใยเหล็ก ผสมให้เข้ากันด้วยเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการบรรจุตัวอย่างในแบบหล่อ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อนำก้อนตัวอย่างลงแช่ในน้ำ จนตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน จึงนำไปทดสอบคุณสมบัติต่อไป

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ส่วนผสม	เถ้าลอย	ปูนซีเมนต์	ทราย	โซเดียมไฮดรอกไซด์	โซเดียมซิลิเกต	น้ำ	เส้นใยเหล็ก
CGM*	455	-	1252	171	171	-	-
050SFG	455	-	1252	171	171	-	39.2
100SFG	455	-	1252	171	171	-	78.5
150SFG	455	-	1252	171	171	-	117.8
CCM**	-	540	1252	-	-	270	-
100SFC	-	540	1252	-	-	270	78.5

* CGM คือ อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่ไม่ใช้เส้นใยในส่วนผสม

** CCM คือ อัตราส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่ใช้เส้นใยในส่วนผสม

2.4 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

ทำการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก กำลังดัด ค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง ค่าปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาด รูปร่าง และทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยการทดสอบหาความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ จะใช้วิธีการทดสอบชุดโต๊ะการไหล (Flow table test) ตาม ASTM C1437 [7] เพื่อเปรียบเทียบค่าการไหลแผ่ระหว่างตัวอย่างที่ใช้เส้นใยกับตัวอย่างควบคุม

การทดสอบกำลังอัดจะใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [8]

การทดสอบกำลังดึงจะใช้วิธีการทดสอบแบบผ่าซีก โดยหล่อตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496 [9] ส่วนการทดสอบกำลังดัด จะทดสอบการดัดแบบ 3 จุด ใช้ตัวอย่างแบบคานดัด หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 4 ซม. สูง 4 ซม. ยาว 16 ซม.ตามมาตรฐาน ASTM C293 [10]

การทดสอบปริมาณโพรง การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นจะใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C642 [11] และทำการทดสอบค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เสริมเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM C597-02 [12]

ตารางที่ 3 ลักษณะของตัวอย่างและมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	รูปร่างและลักษณะของตัวอย่าง	มาตรฐานการทดสอบ
ค่าการไหลแผ่ (Flow Value)	มอร์ตาร์สด	ASTM C1437 [7]
กำลังอัด (Compressive Strength)	ทรงกระบอก, เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.	ASTM C39 [8]
กำลังดึงผ่าซีก (Splitting Tensile test)	ทรงกระบอก, เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.	ASTM C496 [9]
กำลังดัด (Bending Test)	คาน, หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 4 ซม. ยาว 16 ซม.	ASTM C293 [10]
ปริมาณโพรง (Porosity)	ทรงลูกบาศก์, กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C642 [11]
การดูดซึมน้ำ (Absorption)	ทรงลูกบาศก์, กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C642 [11]
ความหนาแน่น (Density)	ทรงลูกบาศก์, กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C642 [11]
ความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง (Ultrasonic pulse velocity Test)	ทรงลูกบาศก์, กว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม.	ASTM C597 [12]

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ค่าการไหลผ่าน

จากการทดสอบพบว่าค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กมีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุมในทุกส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนผสม 050SFG, 100SFG และ 150SFG มีค่าร้อยละการไหลเท่ากับ 133, 131, และ 129 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กจะไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานได้มากนัก

สำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสมที่ใช้เส้นใยเหล็กมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม โดยส่วนผสม 100SFG ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 มีค่าการไหลผ่านร้อยละ 108 ซึ่งลดลงร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม

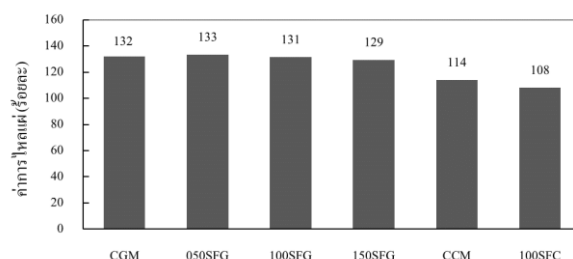
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการใช้เส้นใยเหล็กในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ พบว่าที่ปริมาณการใช้เส้นใยเหล็กเท่ากันค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการไหลผ่านที่สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ ทั้งนี้อาจเกิดจากอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเม็ดลอยในจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงกว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในซีเมนต์มอร์ตาร์ ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความชื้นเหลวมากกว่า กอปรกับอนุภาคของเม็ดลอยมีรูปร่างค่อนข้างกลมแตกต่างจากปูนซีเมนต์ที่มีความขรุขระทำให้ค่าการไหลผ่านมีค่าสูงกว่า

3.2 กำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก และกำลังดัด

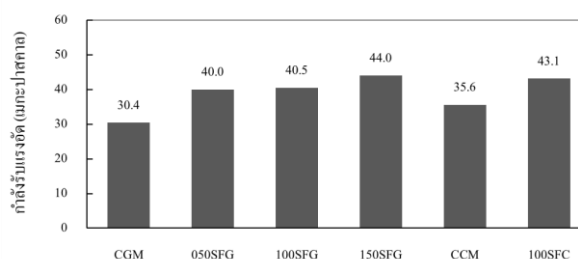
ผลทดสอบกำลังอัด จากรูปที่ 3 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม และค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการใช้เส้นใยที่เพิ่มขึ้น เป็นไปในทิศทางเดียวกับผลทดสอบของ Sukontasukkul และคณะ [13] โดยให้เหตุผลว่าการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจะเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวภายในอนุภาคของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ส่งผลให้สามารถรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดคือส่วนผสม 150SFG ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 44.0 เมกะปาสคาล หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 45 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม

ในซีเมนต์มอร์ตาร์ก็มีแนวโน้มคล้ายกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าส่วนผสม 100SFG ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 43.1 เมกะปาสคาล หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 21 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้เส้นใยเหล็กในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ พบว่าการใช้เส้นใยเหล็กปริมาณเท่ากัน ที่อัตราส่วนร้อยละ 1.0 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม และซีเมนต์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 21 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม ทั้งนี้อาจการเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเหล็กกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Al-mashhadani และคณะ [14]



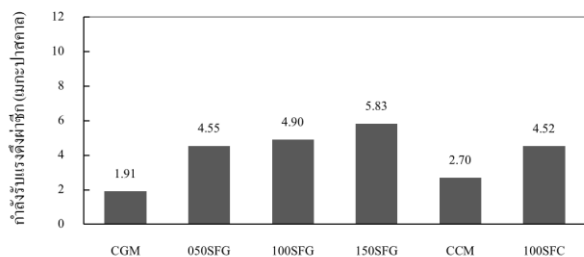
รูปที่ 2 ค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ 3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

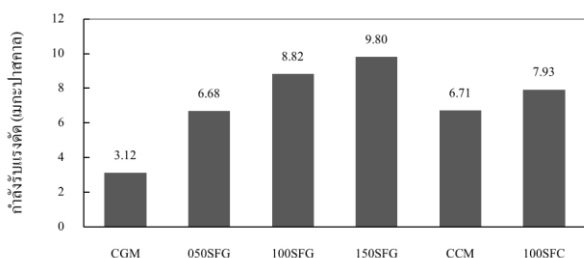
ในส่วนของกำลังดึงผ่าซีกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็ก จะมีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุม และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณการใช้เส้นใยเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 จากผลการทดลองส่วนผสม 150SFG ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 มีค่ากำลังดึงผ่าซีกสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 5.83 เมกะปาสคาล สามารถเพิ่มกำลังดึงได้ร้อยละ 205 เช่นเดียวกันกับการใช้เส้นใยเหล็กในซีเมนต์มอร์ตาร์ ค่ากำลังดึงผ่าซีกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่าเท่ากับ 4.52

เมกะปาสคาล สามารถเพิ่มกำลังดึงได้ร้อยละ 67 เมื่อเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม สอดคล้องกับผลการทดลองของ Song และคณะ [15] ที่ทำการทดลองซีเมนต์คอนกรีตผสมเส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 ซึ่งพบว่าค่ากำลังดึงผ้าซีกมีค่าเท่ากับ 8.7 เมกะปาสคาล สามารถเพิ่มกำลังดึงได้ร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับซีเมนต์คอนกรีตควบคุม



รูปที่ 4 กำลังดึงผ้าซีกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

ค่ากำลังดึงของส่วนผสมที่ใช้เส้นใยเหล็กให้ค่ากำลังสูงกว่าส่วนผสมควบคุม และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการใช้เส้นใยที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกำลังดึงผ้าซีก ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกำลังดึงของส่วนผสม 150SFG ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 จะให้ค่ากำลังดึงมากที่สุด มีค่ากำลังดึงเท่ากับ 9.80 เมกะปาสคาล หรือมากกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 214 สอดคล้องกับผลการทดลองของ Al-mashhadani และคณะ [14] ที่ทำการทดสอบจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 0.4, 0.8 และ 1.2 ซึ่งได้ผลการทดลองที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 5 กำลังดึงสูงสุดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังดึงผ้าซีกและกำลังดึง ระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ ผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์

มอร์ตาร์ทำให้ค่ากำลังดึงผ้าซีกและค่ากำลังดึง สูงกว่าการใช้เส้นใยเหล็กในซีเมนต์มอร์ตาร์ ดังจะเห็นจากตารางที่ 4 แม้ว่าส่วนผสม CGM หรือจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมจะมีค่าอัตราส่วนกำลังดึงผ้าซีกต่อกำลังอัด และอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัด น้อยกว่าส่วนผสม CCM หรือซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม แต่เมื่อใช้เส้นใยในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 เท่ากัน พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กลับมีค่าอัตราส่วนกำลังดึงผ้าซีกต่อกำลังอัด และอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัด สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยส่วนผสม 100SFG หรือจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 มีค่าอัตราส่วนกำลังดึงผ้าซีกต่อกำลังอัด และอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัด เท่ากับร้อยละ 12.1 และ 21.8 ตามลำดับ และส่วนผสม 100SFC หรือซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 มีค่าอัตราส่วนกำลังดึงผ้าซีกต่อกำลังอัด และอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัด เท่ากับร้อยละ 10.5 และ 18.4 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ให้ผลที่ดีกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์เล็กน้อย

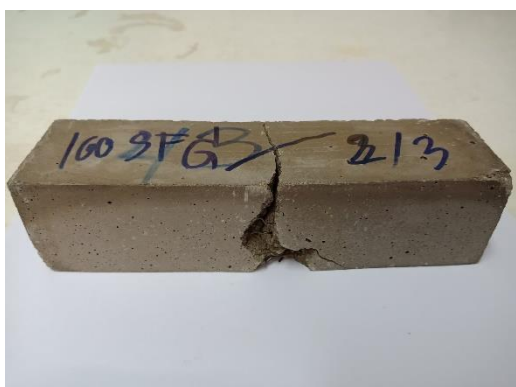
ตารางที่ 4 อัตราส่วนค่ากำลังดึงผ้าซีกต่อกำลังอัด และค่ากำลังดึงสูงสุดต่อกำลังอัด

ประเภทวัสดุ	สูงสุดต่อกำลังอัด	
	กำลังดึงผ้าซีก/ กำลังอัด (ร้อยละ)	กำลังดึงสูงสุด/ กำลังอัด (ร้อยละ)
CGM*	6.3	10.3
050SFG	11.4	16.7
100SFG	12.1	21.8
150SFG	13.25	22.3
CCM**	7.6	18.8
100SFC	10.5	18.4

จากผลทดสอบจะเห็นว่าการใช้เส้นใยเหล็กสามารถเพิ่มกำลังดึงผ้าซีกและกำลังดึงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ แต่สิ่งที่น่าสนใจและเห็นได้ชัดเจนจากการทดสอบคือ ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่าง จากรูปที่ 6 ก). จะเห็นได้ว่าตัวอย่าง CGM หรือจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่ใช้เส้นใย ลักษณะการวิบัติจะขาดออกจากกันทันที แต่ตัวอย่าง 100SFG หรือจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 ชิ้นตัวอย่างที่วิบัติจะยังยึดติดกันด้วยอนุภาคของเส้นใยที่ถูกฝังในเนื้อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แสดงดังรูปที่ 6 ข).

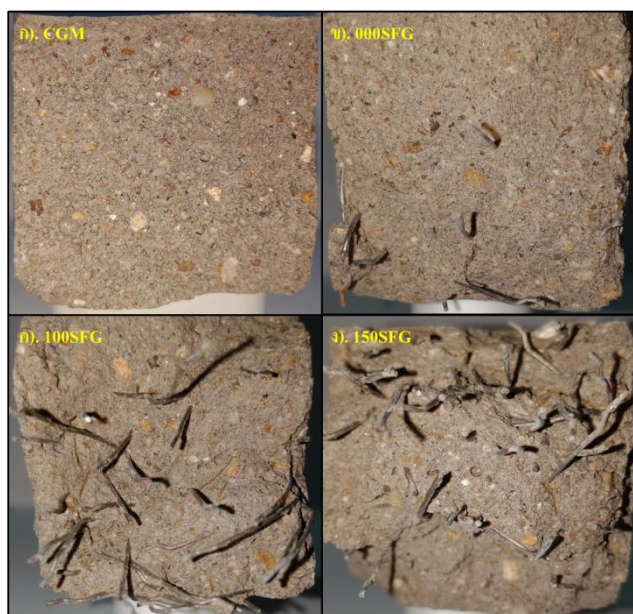


ก).ตัวอย่าง CGM หลังทดสอบกำลังดัด



ข).ตัวอย่าง 100SFG หลังทดสอบกำลังดัด

รูปที่ 6 การวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ 7 หน้าตัดของก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใย
เหล็กหลังจากการทดสอบกำลังดัด

จากผลการทดสอบกำลังดัดที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น มีความสอดคล้องกับลักษณะของก้อนตัวอย่างภายหลังจากการวิบัติแสดงดังรูปที่ 7 ภาพถ่ายหน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จะสังเกตเห็นปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ โดยสิ่งที่น่าสนใจคือ ที่ปลายของเส้นใยเหล็กจะพบเศษมอร์ตาร์เกาะติดอยู่ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับเส้นใยเหล็ก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เสริมเส้นใยเหล็กสามารถรับกำลังดัดได้มากกว่าส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม

3.3 ปริมาณโพรง

จากตารางที่ 5 พบว่าการใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมทำให้ปริมาณโพรงในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม 150SFG ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 มีค่าปริมาณโพรงต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 11.8 ปริมาณโพรงลดลงร้อยละ 13 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม ทั้งนี้อาจเกิดจากเส้นใยเหล็กเข้าไปแทนที่และปรับสภาพโพรงขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง จึงทำให้ปริมาณโพรง (Porosity) มีค่าเฉลี่ยลดลง ในขณะที่เดียวกันการใช้เส้นใยเหล็กในซีเมนต์มอร์ตาร์จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณโพรง ซึ่งจากผลการทดลองส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยเหล็กมีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณโพรงเปรียบเทียบระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมกับส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ ควบคุม พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าปริมาณโพรงสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์

3.4 การดูดซึมน้ำ

จากผลทดสอบดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบปริมาณโพรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยส่วนผสมที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด คือ 050SFG หรือจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 5.2 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เส้นใยเหล็กในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการดูดซึมน้ำ

3.5 ความหนาแน่น

จากผลทดสอบพบว่าค่าความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้เส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะสูงเท่ากับ 7.85 เมื่อใช้ในสัดส่วนที่มากขึ้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เส้นใยเหล็กในซีเมนต์มอร์ตาร์จะทำให้ความหนาแน่นของซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยส่วนผสม 100SFC หรือส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 2,260 กก./ลบ.ม

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นเปรียบเทียบระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมกับส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ ควบคุมพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าปริมาณโพรงต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มากกว่าเถ้าลอยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.17 จึงส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 5 ปริมาณโพรงอากาศ การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

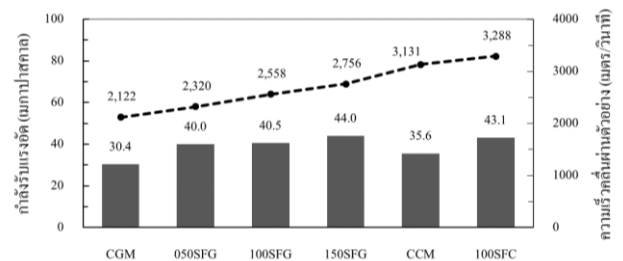
ส่วนผสม	ปริมาณโพรง (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม)
CGM*	27.1	5.1	1,890
050SFG	24.7	5.2	1,990
100SFG	23.6	5.0	2,020
150SFG	23.5	5.0	2,040
CCM**	17.6	4.3	2,220
100SFC	17.7	4.4	2,260

3.6 ความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่าง

การทดสอบความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมมีค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างมากกว่าส่วนผสมควบคุมและมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้เส้นใย ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้เส้นใยที่เพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 8 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเดินทางของคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างที่มีความหนาแน่นและมีความต่อเนื่องของอนุภาคส่วนผสมที่มากกว่า ค่า

ความเร็วของคลื่นจะมีค่ามากกว่า ในขณะที่เดียวกันส่วนผสม 100SFC หรือซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 จะมีค่าความเร็วคลื่นสูงกว่าส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างกับค่าความหนาแน่นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ พบว่าค่าความเร็วคลื่นความถี่สูงผ่านตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่น ซึ่งพบว่าตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เช่นกัน เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มากกว่าเถ้าลอยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.17 จึงส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยส่วนผสม CCM หรือซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม และส่วนผสม 100SFC หรือส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.0 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,220 และ 2,260 กก./ลบ.ม ตามลำดับ และส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีค่าความหนาแน่นสูงสุดคือ 150SFG คือส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 1.5 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,040 กก./ลบ.ม ดังแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความเร็วคลื่นผ่านตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ และซีเมนต์มอร์ตาร์

4. บทสรุป

- 1) การใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ร้อยละ 0 - 1.5 โดยปริมาตร ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ไม่มากนัก
- 2) การใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงและกำลังดัดให้แก่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเช่นเดียวกับซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจีโอ

โพลิเมอร์มอร์ตาร์ ร้อยละ 1.0 สามารถเพิ่มกำลังอัด กำลังดึงและกำลังดัด ได้เท่ากับร้อยละ 33, 157 และ 183 ตามลำดับ

3) การใช้เส้นใยเหล็กในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่เกินร้อยละ 1.5 สามารถลดปริมาณโพรงอากาศและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้

4) การใช้เส้นใยเหล็กในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ เมื่อใช้ปริมาณเส้นใยเท่ากัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืนที่สนับสนุนทุนวิจัยในการจัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ในการทดสอบและศึกษาวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Environmental Protection Agency, AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Washington, DC, 2005.

[2] K. Sothornchaiwit, W. Tangchirapat, T. Cheewaket and C. Jaturapitakkul,, "A Study of Compressive Strength and Sulfuric Acid and Magnesium Sulfate Resistance of Geopolymer Mortar Made From Low Calcium Fly Ash Blended with High Calcium Fly Ash," J. of TCA, vol. 6, no. 2, pp. 58-66, July. 2018.

[3] J. Davidovits, "Chemistry of geopolymer system, terminology," Geopolymer'99 International Conference, eds. France, 1999, pp. 9-40.

[4] D. Hardjito, and B.V. Rangan, "Development and properties of Low-calcium fly ash-based geopolymer," Research Report GC 1, Faculty of Engineering, Curtin University of technology, Australia, 2005.

[5] P. Topark-Ngarm, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Workability and Strength of High Calcium Geopolymer Cured at Room Temperature," Annual Concrete Conference 7, Rayong, Thailand, 2011.

[6] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee. and U. Rattanasak. "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers." Waste Management, Vol. 63, pp. 539-543, Aug. 2008.

[7] Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM Standard C1437, 2015.

[8] Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM Standard C39/C39M-16b, 2016.

[9] Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM Standard C496/C496M-11, 2016.

[10] Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), ASTM Standard C293, 2002.

[11] Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM Standard C642-13, 2013.

[12] Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM Standard C597, 2016.

[13] P. Sukontasukkul, P. Pongsopha, P. Chindaprasirt, and S. Songpiriyakij, "Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer," Construction and Building Materials, vol. 161, pp. 37-44, Nov. 2017.

[14] M. Al-mashhadani, O. Canpolat, Y. Aygörmez, M. Uysal, and S. Erdem, "Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites," Construction and Building Materials, vol. 167, pp. 505-513, Feb. 2018.

[15] P.S. Song, and S. Hwang, "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete," Construction and Building Materials, vol. 18, pp. 669-673, Apr. 2004.