สมบัติเชิงกลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

Mechanical Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Incorporating Polypropylene Fiber

ทศพร ศรีคำมา[1,*] ฉัตรฑริกา เพียงพิมาย[2] กิตติ แสงนิล[3] ขัตติย ชมพูวงศ์[4] ชุดาภัค เดชพันธ์[5] ศตคุณ เดชพันธ์[6] และ ธนากร ภูเงินขำ[7]

[1,2,3,4,5,6,7] *หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา*

**Corresponding author; E-mail address: tuta27182@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดและกำลังดัดของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและกากดินล้างเป็นวัสดุตั้งต้น โดยเส้นใยโพลีโพรพิลีนถูกเพิ่มในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร สารละลายด่างในงานวิจัยนี้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และใช้สารกันซึมต่อวัสดุประสานเท่ากับ 5.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีเส้นใย นอกจากนี้เส้นใยโพลีโพรพิลีนยังสามารถช่วยเพิ่มความเหนียวและการดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติได้ซึ่งสามารถช่วยชะลอการวิบัติแบบทันทีทันใดได้

คำสำคัญ: เถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์, เส้นใยโพลีโพรพิลีน, กำลังอัด, กำลังดัด

Abstract

This article examines the compressive strength and flexural strength of High-Calcium Fly Ash geopolymer mortar containing Palm Oil Fuel Ash (POFA) and Clay Residue (CR) as the starting materials. The polypropylene fiber (PF) was added in geopolymer mortar at the rates of 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1.0% by volume fraction. The liquid alkaline was composed of 10 molar sodium hydroxide (NH) solution and sodium silicate (NS) solution with a constant NS-to-NH ratio of 1.0. A constant sand-to-binder ratio of 0.50 and waterproof-to-binder ratio of 5.0 were used in all mixtures. The test results showed that the incorporation of polypropylene fiber to geopolymer mortar improved its mechanical properties in comparison to mortar without PF. In addition, geopolymer mortar containing PF could increase the toughness modulus and energy absorption prior to failure, therefore delaying the occurrence of failure.

Keywords: High-calcium fly ash geopolymer, Polypropylene fiber, Compressive strength, Flexural strength

1. คำนำ

อาคาร บ้านพักอาศัยที่พบเห็นทั่วไปในปัจจุบันจะเห็นว่าใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากการก่อสร้างที่สะดวก เป็นที่นิยมและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณที่สัมผัสกับความชื้นบ่อยๆ เช่น ห้องน้ำ ดาดฟ้า เป็นต้น จะพบเห็นการรั่วซึมอาจเนื่องจากการก่อสร้างที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือเนื่องจากวัสดุกันซึมเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ดังนั้น จึงต้องมีการซ่อมแซมบริเวณรั่วซึมด้วยวัสดุกันซึม โดยวัสดุกันซึมตามท้องตลาดมีหลายประเภท มีทั้งแบบทาเคลือบ หรือซีเมนต์กันซึม อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์นั้นเป็นอุตสาหกรรมที่ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมามากถึง 1 ตันต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุให้เกิดก๊าซเรือนกระจก [1] จึงมุ่งเน้นที่จะใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อผลิตวัสดุใหม่ๆ เพื่อใช้ในอนาคต

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2SiO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้หลักการกระตุ้นซิลิกาและอลูมิน่าด้วยสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็นตัวประสาน [2] วัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นได้แก่ เถ้าลอย เป็นต้น [3] ปัจจุบันประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในแต่ละปีจะเกิดผลพลอยได้ของเถ้าลอยมากถึง 3 ล้านตัน [4] นอกจากนี้ยังมีวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมอื่น เช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) ซึ่งเป็นวัสดุผลพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า [5] จาก

การศึกษาเบื้องต้น [6] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีออกไซด์ของซิลิกอน ซึ่งเป็นออกไซด์หลักในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในปริมาณสูง

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการรับแรงดัดให้จีโอโพลิเมอร์ โดยทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาวัสดุกันซึมจากจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมการก่อสร้างในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตผงจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (GM)

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) จากจังหวัดชุมพร และกากดินล้าง (CR) จากจังหวัดลำปาง องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น ประกอบด้วย เถ้าลอย เถ้าปาล์มน้ำมัน และกากดินล้าง แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งเถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 36.93 อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 18.10 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 11.91 และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 21.41 เป็นหลัก จะเห็นว่าปริมาณผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 66.94 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จึงจัดเป็นเถ้าลอยประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย เถ้าปาล์มน้ำมันและกากดินล้าง

CHEMICAL COMPOSITIONS (%)	FA	POFA	CR
SiO_2	36.93	35.80	77.48
Al_2O_3	18.10	1.73	9.74
Fe_2O_3	11.91	1.64	2.43
CaO	21.41	11.20	0.54
MgO	2.78	4.29	0.02
K_2O	2.28	19.00	5.61
Na_2O	1.42	0.22	0.01
TiO_2	0.36	-	-
P_2O_5	0.20	-	-
SO_3	2.90	7.64	1.50
LOI	1.54	10.00	1.01

ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐาน ASTM C78 [12] โดยลักษณะตัวอย่างและการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะตัวอย่างและการทดสอบกำลังรับแรงดัด

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าระยะการก่อตัวที่รวดเร็วกว่าส่วนผสมที่ใช้กากดินล้างแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูง อาจเนื่องจากซิลิกาจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าซิลิกาจากกากดินล้าง อีกทั้งปริมาณของซิลิกาจากกากดินล้างมีค่าสูงกว่าซิลิกาจากเถ้าปาล์มน้ำมัน จึงส่งผลให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิน่ามีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt et al. [13] ได้รายงานว่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิน่าที่สูงขึ้นภายในระบบของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 และกากดินล้างร้อยละ 30 แทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์สามารถปรับปรุงระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์ได้ (ดังแสดงในตารางที่ 3) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในร้อยละ 60 แทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูง

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3 พบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยโพลีโพรพิลีน ยกตัวอย่าง เช่น ส่วนผสม 40FA30POFA30CR แปรผันเส้นใยโพลีโพรพิลีนในร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.49, 2.54, 2.77, 3.09 และ 3.21 MPa ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lihua Zhu et al. [14] ได้รายงานไว้ว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนสามารถช่วยปรับปรุงกำลังอัดและกำลังดัด เนื่องจากเส้นใยสามารถช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้ Yazan Issa Abu Abu Aisheh et al. [15] ยังรายงานไว้ว่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่ออายุบ่ม 7 วัน เนื่องจากเมื่ออายุบ่มมากขึ้น อัตราการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นแสดงว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีความหนาแน่นขึ้นและยึดเกาะกับเส้นใยได้ดี แต่อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ 0PF เนื่องจากเส้นใยโพลีโพรพิลีนมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ

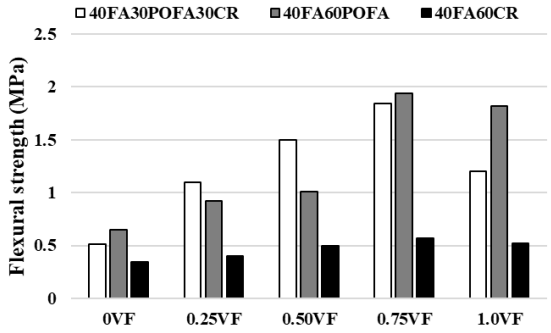
ส่วนปัจจัยการแปรผันเถ้าปาล์มน้ำมันและกากดินล้างแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูง พบว่า กำลังรับแรงอัดของเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้กากดินล้างแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูง อาจเนื่องจากกากดินล้างเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายทราย ซึ่งมีซิลิกาในปริมาณสูง แต่เป็นซิลิกาที่ไม่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา หรือเป็นซิลิกาที่มีความเฉื่อย

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

[redacted]	SETTING TIME

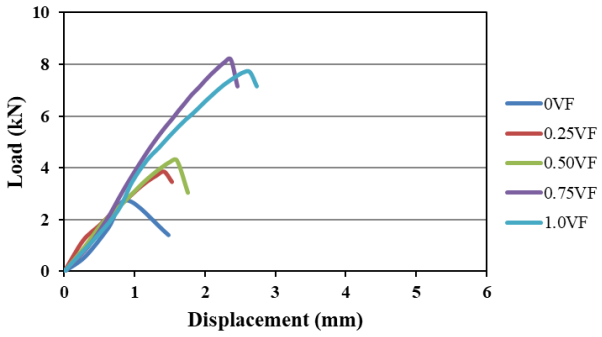
3.2 กำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยโพลีโพรพิลีน ยกตัวอย่าง เช่น ส่วนผสม 40FA30CR30POFA แปรผันเส้นใยโพลีโพรพิลีนในร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร (Volume fraction) มีค่ากำลังรับแรงดัด เท่ากับ 0.51, 1.10, 1.50, 1.84 และ 1.20 MPa ตามลำดับ ขณะที่การใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนในร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด และเมื่อปริมาณเส้นใยในร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร มีค่ากำลังรับแรงดัดลดลงอาจเนื่องจากการใช้เส้นใยที่มากเกินไปสำหรับส่วนผสมจีโอโพลิโพลิเมอร์ส่งผลให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 0 VF เส้นใยโพลีโพรพิลีนนั้นยังสามารถปรับปรุงแรงกำลังรับแรงดัดได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Omer Faruk Kuranli et al. [16]

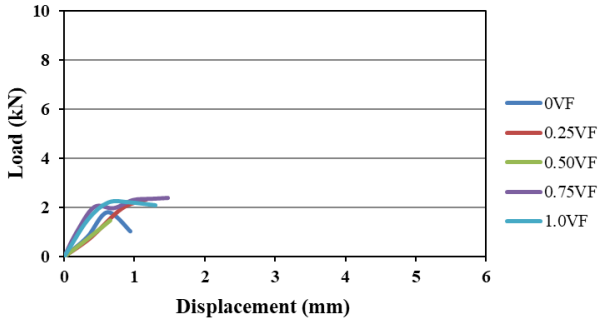


รูปที่ 2 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

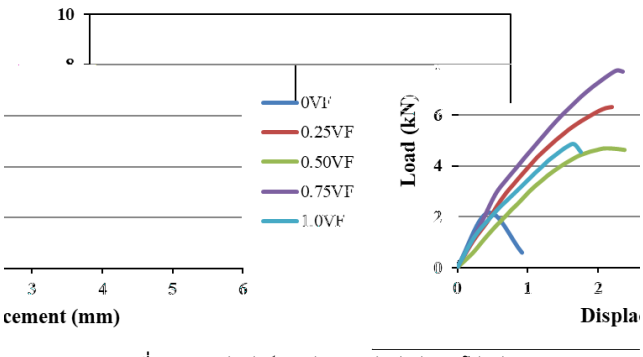
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการโก่งตัว ดังแสดงในรูปที่ 3-5 พบว่า ค่าการโก่งตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยโพลีโพรพิลีนทุกอัตราส่วนผสม และยังส่งผลให้พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ 0VF ซึ่งเส้นใยสามารถเพิ่มการโก่งตัวได้ถึง 1-1.5 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Omer Faruk Kuranli et al. [16] นอกจากนั้น Yazan Issa Abu Aished et al. [15] รายงานไว้ว่า เส้นใยสามารถปรับปรุงความเหนียวของคอนกรีตหรือจีโอโพลิเมอร์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับกับค่าการโก่งตัว (40FA60POFA)

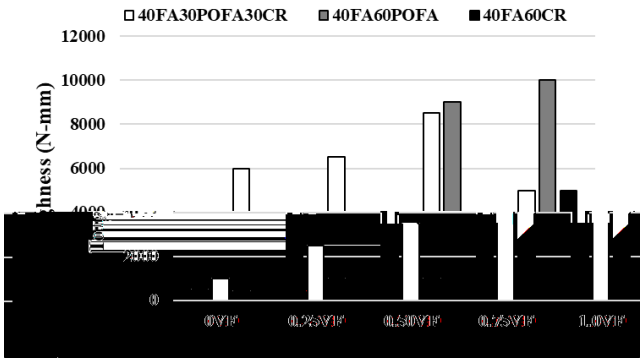


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับกับค่าการโก่งตัว (40FA60CR)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับกับค่าการโก่งตัว (40FA30POFA30CR)

ค่าการดูดซับพลังงานการแตกหักก่อนการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ค่าการดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยโพลีโพรพิลีน การใช้เส้นใยช่วยปรับปรุงแรงดัดและความเหนียวได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับ 0VF และยังส่งผลให้มีค่าความเค้นดัดสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Intarabut et al. [9] ซึ่งการดูดซับพลังงานก่อนการแตกหักนั้นเป็นสมบัติที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากของโครงสร้างคอนกรีตที่ช่วยชะลอการวิบัติแบบทันทีทันใด ซึ่งลักษณะการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ค่าการดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใย



ก) 0 VF



ข) 0.25 VF



ค) 0.50 VF



ง) 0.75 VF



จ) 1.0 VF

รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1) ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าระยะการก่อตัวที่รวดเร็วกว่าส่วนผสมที่ใช้กากดินล้างแทนที่ในเถ้าลอยแคลเซียมสูง เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิน่า
2) กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยโพลีโพรพิลีนทุกอัตราส่วนผสม
3) กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเส้นใยโพลีโพรพิลีน เนื่องจากเส้นใยสามารถช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นและยังสามารถช่วยชะลอการวิบัติแบบทันทีทันใดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใต้กราฟ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) NRCT5-RRI63008 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน (SUSCON LAB) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดสอบงานวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] ศักดิ์ชัย แน่นอุดร, อำพล วงศา, วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2019). การใช้เส้นใยเหล็กในเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, หน้า 30-38.

[2] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, ธนากร ภูเงินขำ และปริญญา จินดาประเสริฐ. วัสดุจีโอโพลิเมอร์: ทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง. วารสารคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชาลี, วราภรณ์ คุณาวนากิจ (2548). สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ. วิศวกรรมสาร มข, ปีที่ 32, ฉบับที่ 5, หน้า 715-724.

[4] Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites. 29, pp.224-229.

[5] Wisakha Phoochinda. (2018). Conceptual Framework of the Green Economy for Oil Palm Sustainable Development. 11, pp.25-33.

[6] Tay JH. (1990). Ash from Oil-Palm Waste as a Concrete Material. Journal of Materials in Civil Engineering. 2, pp.94-105.

[7] ASTM C 618-17a (2017). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02.

[8] บริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด. (2565). สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต ประเภทสารลดน้ำและกันซึม (ออนไลน์). สืบค้นจาก : https://www.tha.sika.com (12 มิถุนายน 2565)

[9] Intarabut D, Sukontasukkul P, Phoo-ngernkham T, Zhang H, Doo-Teol Yoo, Limkatanyu S and Chindaprasirt P (2022). Influence of Graphene Oxide Nanoparticles on Bond-Slip Reponses between Fiber and Geopolymer Mortar. Nanomaterial, 12, pp.943.

[10] ASTM C191. (2021). Standard test method for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

[11] ASTM C109. (2020). Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01.

[12] ASTM C 78. (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01.

[13] Chindaprasirt P, Paisitsrisawat P, Rattanasak U. (2014). Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite. Advanced Powder Technology. 25, pp.1087-1093.

[14] Lihua Zhu, Taihong Wen and Long Tian (2022). Size effects in compressive and splitting tensile strengths of polypropylene fiber recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. 341, pp.1-12.

[15] Yazan Issa Abu Aisheh, Dawood Sulaiman Atrushi, Mahmoud H. Akeed, Shaker Qaidi and Bassam A. Tayeh (2022). Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. Case Studies in Construction Materials. 17, pp.1-11.

[16] Omer Faruk Kuranli, Mucteba Uysal, Mele Tidjani Abbas, Turgay Cosgun, Anil Nis, Yurdakul Aygormez, Orhan Canpolat and Mukhallad M. Al-mashhadani (2022). Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. Construction and Building Materials. 325, pp.1-20.