

แรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายละเอียด Bond Strength of GFRP Rebars in Geopolymer Concrete Using Fine Sand

ณรงค์พล พัตตร¹ ประทักษ์ ชิมทิม² เรืองฤทธิ์ ปุริทัต³ ปิโยรส ทะเสนฮต^{4*} พัฒนศักดิ์ ชัยพรธนา⁵ นัฐวุฒิ เหมะธลิน⁶ และ พุฒิพัทธ์ ราชคำ⁷

^{1,2,3} นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จ.สกลนคร

^{4,5,6,7} สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จ.สกลนคร

*Corresponding author; E-mail address: piyoros.ta@mmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายละเอียด ตัวแปรต้นกำลังรับแรงอัดที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนมวลรวมของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 ถึง 2.5 อัตราส่วนมวลรวมต่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 2.5 ถึง 4.5 และโมดูลัสความละเอียดทรายเท่ากับ 1.90 และ 2.65 โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อสารตั้งต้นเท่ากับ 0.65 และขนาดโตสุดของหินเท่ากับ 20 มิลลิเมตร สำหรับแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 6 ถึง 20 มิลลิเมตร ผลทดสอบพบว่า อัตราส่วนมวลรวมต่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 และ 1.5 ตามลำดับ เมื่อใช้ทรายละเอียด เป็นสัดส่วนที่สามารถนำไปใช้งานได้เหมาะสม เมื่อพิจารณาสมบัติด้านกำลังและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์กลาสรีบาร์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเท่ากับ $3.43\sqrt{f_c}/D$ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน วสท. จะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 24

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด, แรงยึดเหนี่ยว, จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต, ทรายละเอียด, วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส

Abstract

This article presents compressive strength and bond strength of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) in geopolymer concrete using fine sand. Parameters of compressive strength consisted of sodium silicate to sodium hydroxide solution ratio of 1.0 to 2.5, ratios of aggregate to geopolymer paste of 2.5 to 4.5 sand fineness modulus of 1.90 and 2.65 with sodium hydroxide solution concentration of 10 molar, ratio of solutions to substrate of 0.65, and maximum coarse aggregate size of 20 mm. Bond strengths of GFRP rebars in geopolymer concrete were tested with diameters between 6 to 20 mm. The results found that ratios of aggregate to geopolymer paste and sodium

silicate to sodium hydroxide solution of 2.5 and 1.5, respectively can be used appropriately when consider compressive strength, workability, and environmental friendliness properties. The bond strength of $3.43\sqrt{f_c}/D$ compared to EIT standard, it is less than 24%.

Keywords: Compressive Strength, Bond Strength, Concrete Geopolymer, Fine Sand, GFRP

1. คำนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานประเภทหนึ่งที่น่าจะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ เป็นที่ทราบกันดีว่า ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งต่อการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีส่วนผสมของวัสดุพอลิซิลานที่มีสารประกอบหลักๆ คือซิลิกา (Silica, SiO_2) และอลูมินา (Alumina, Al_2O_3) ทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง จากนั้นใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นโมเลกุลลูกโซ่เชื่อมต่อกัน โครงสร้างดังกล่าวมีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีคุณสมบัติทางกลและมีความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี [2] อย่างไรก็ตามเถ้าลอยในประเทศไทยส่วนใหญ่มีสารประกอบของแคลเซียมค่อนข้างสูงเมื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการก่อตัวที่ค่อนข้างเร็ว [3]

ปัจจุบันได้เริ่มมีการศึกษาและนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้วัสดุเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส [4-6] มาใช้งานจริงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นด้าน ความสามารถรับแรงดึง น้ำหนักเบา รวมถึงความทนทานต่อการใช้งานต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมรุนแรง แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อควรพิจารณาในการใช้งาน เช่น โมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำเมื่อเทียบกับเหล็กเส้น ความสามารถรับแรงอัด ความเปราะของวัสดุ ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยคว่าได้รับการพิจารณา นอกจากนั้นความสามารถในการติดตั้งจะส่งผลกระทบต่อของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับวัสดุเสริมแรง เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะการใช้งาน คอนกรีตและเสริมเหล็ก

จะทำงานร่วมกันเพื่อต้านทานแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง สำหรับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแรงยึดเหนี่ยวถูกอธิบายในรูปแบบของระยะฝัง (development length) มาตรฐานการออกแบบ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) [7] กำหนดหน่วยแรงยึดเหนี่ยวอยู่ในฟังก์ชันหน่วยแรงอัดประลัยและเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้น [7-8] อย่างไรก็ตามวัสดุโพลิเมอร์ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการใช้งานเหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ฉะนั้นผลลัพธ์ของวิจัยครั้งนี้คาดหวังว่าจะเกิดประโยชน์ สำหรับการใช้เป็นแนวทางการสร้างหรือประยุกต์มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อกำหนดค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในวัสดุโพลิเมอร์คอนกรีต เพื่อนำไปสู่การใช้งานวัสดุโพลิเมอร์เป็นทางเลือกใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ประกอบด้วย กำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ตัวแปรที่ศึกษาด้านกำลังรับแรงอัดประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างเพสต์ต่อวัสดุมวลรวม และอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโมดูลัสความละเอียดของทราย โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายต่อสารตั้งต้นเท่ากับ 0.65 ตัวอย่างได้รับการบ่มที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอ้างอิงส่วนผสมของกำลังคอนกรีตเท่ากับ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ถูกออกแบบตามมาตรฐานของ ACI [9] โดยใช้วัสดุมวลรวมของคอนกรีตทั้งคู่เท่ากัน รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 สัดส่วนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่รับกำลังอัดสูงสุดจะถูกนำไปใช้สำหรับการหล่อตัวอย่างทดสอบแรงยึดเหนี่ยวต่อไป

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 เถ้าลอย ได้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

2.1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์

2.1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะสีขาวขุ่นมีองค์ประกอบของ Na_2O 15.32% , SiO_2 32.87% และน้ำ 51.87% โดยมวล

2.1.4 ทรายแม่น้ำแหล่งที่ 1 อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดนครราชสีมา และ ทรายแหล่งที่ 2 จังหวัดหนองคาย นำทรายทั้งคู่มาล้างเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจนสะอาด นำทรายที่เปียกมาผึ่งให้แห้งดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วร่อนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 4 จากนั้นแช่น้ำ 24 ชั่วโมงให้อิ่มตัว พร้อมปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) แล้วบรรจุใส่ถุงพลาสติกป้องกันความชื้น และทดสอบโมดูลัสความละเอียดของทรายจากแหล่งที่ 1 และ 2 เท่ากับ 2.65 และ 1.9 ตามลำดับ

2.1.5 หินขนาดโตสุดเท่ากับ 3/4 นิ้ว ทำการเก็บตัวอย่างจากกองและแบ่งตัวอย่างตามมาตรฐานเดียวกันกับทราย แล้วนำหินมาล้างเอาส่วนที่เป็น

สิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจนสะอาด จากนั้นปรับหินให้ อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ดังแสดงในรูปที่ 1 และบรรจุใส่ถุงพลาสติกป้องกันความชื้น

2.1.6 วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6, 12, 16 และ 20 มิลลิเมตร ตัดเป็นท่อนๆ ละ 80 เซนติเมตร

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ร้อยละ)

ตัวอย่าง	เถ้าลอย	NaOH	Na_2SiO_3	ทราย1	ทราย2	หิน
A1_B1_F1	10.47	3.40	3.40	34.19	-	43.62
A2_B1_F1	11.79	3.83	3.83	34.19	-	43.62
A3_B1_F1	13.46	4.36	4.36	34.19	-	43.62
A3_B1_F2	13.46	4.36	4.36	-	34.19	43.62
A3_B2_F2	13.46	3.49	5.23	-	34.19	43.62
A3_B3_F2	13.46	2.50	6.24	-	34.19	43.62
A4_B2_F2	15.73	4.07	6.11	-	34.19	43.62
A5_B2_F2	18.86	4.88	7.40	-	34.19	43.62

A1, A2, A3, A4, A5 หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 4.5, 4.0, 3.5, 3.0, 2.5 ตามลำดับ

B1, B2, B3 หมายถึง อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0, 1.5, 2.5 ตามลำดับ

F1, F2 หมายถึง โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.65 และ 1.9 ตามลำดับ

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.2.1 เตรียมวัสดุมวลรวมลงในเครื่องผสม

2.2.2 นำเถ้าลอยใส่ถังเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วใช้ใบพายปั่นสารตั้งต้นและสารละลายเป็นเวลา 5 นาที

2.2.3 นำจีโอโพลิเมอร์เพสต์เทลงในเครื่องโม่ เพื่อผสมกับมวลรวม จากนั้นทำการปั่นเครื่องโม่เป็นเวลา 3 นาที

2.2.4 เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตลงในเครื่องโม่ ปั่นเครื่องโม่เพิ่ม 2 นาที จากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่ในแบบหล่อแล้วปาดหน้าให้เรียบ

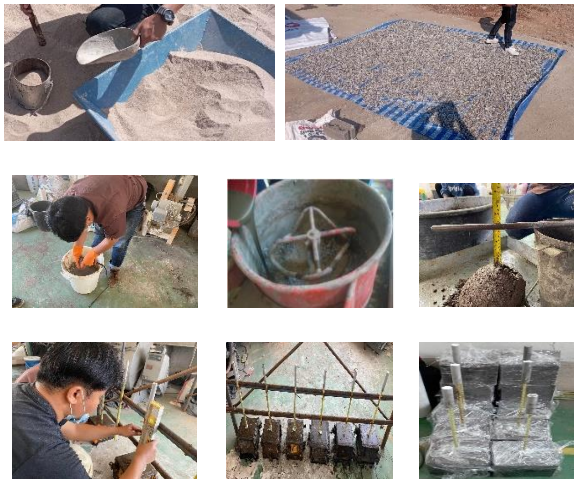
2.2.5 เทจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใส่ในแบบหล่อ จากนั้นนำวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่ตัดไว้ความยาว 80 เซนติเมตรที่มี เส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 12, 20, 25 มิลลิเมตรที่ถูกหล่อที่ปลายด้วยอิพ็อกซี่ขาว 10 เซนติเมตรเพื่อยึดกับเหล็กประกับในเครื่องทดสอบ เสียลงไปแบบหล่อที่ความลึก 10 เซนติเมตร จากนั้นตรวจระดับและตั้งด้วยระดับน้ำ ดังแสดงใน รูปที่ 1

2.2.6 ทำการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยการนำพลาสติกหุ้ม จากนั้นทดสอบทั้งกำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 2

2.3 การทดสอบ

กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ทดสอบที่อายุครบ 7, 14, และ 28 วัน สำหรับการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์รีบาร์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จะทดสอบโดยดึงไฟเบอร์รีบาร์ที่ฝังในคอนกรีตออกมาในอัตราไม่เกิน 22 กิโลนิวตันต่อหน้า ที่ จากนั้นบันทึกค่าแรงดึงและระยะวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่เลื่อนออกจากคอนกรีตโดยแบ่งช่วงเท่าๆ กัน จนกระทั่งคอนกรีตแตกออกจากกัน หรือระยะวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเลื่อนออกเกิน 2.5 มิลลิเมตร สำหรับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทำได้โดยการนำพื้นที่ผิวทั้งหมดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่

ฝังอยู่ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหารด้วยแรงที่ใช้ดึงวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์
กลาสสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2



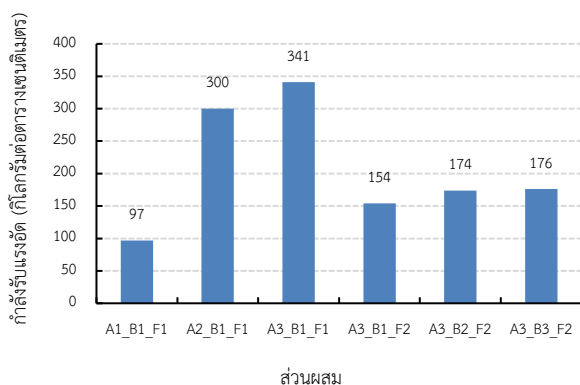
รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยว



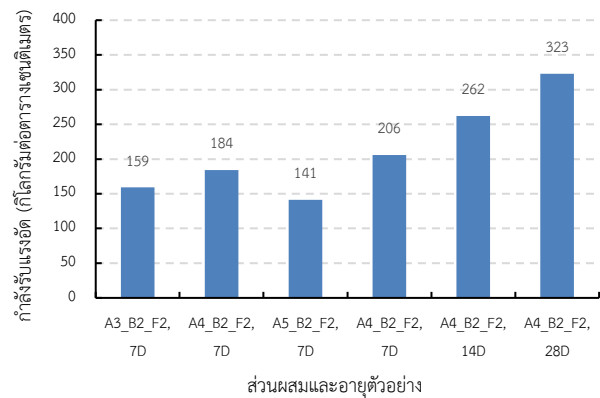
รูปที่ 2 ทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยว

3. ผลทดสอบ

กำลังต้านทานแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่พิจารณาค่าโมดูลัส
ความละเอียดของทราย อัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อจีโอโพลิเมอร์เฟส
และอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่
ต่างกัน ตัวอย่างทดสอบถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่
3 และ 4 ตามลำดับ

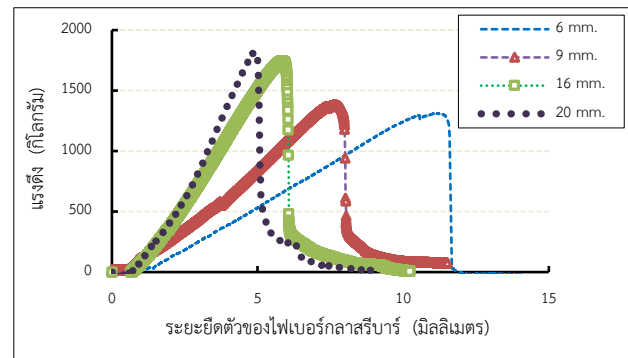


รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเมื่อโมดูลัสความละเอียดและ
อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน ที่อายุ 7
วัน



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วนมวลรวมต่อเฟส
และอายุต่างกัน

รูปที่ 5 และ 6 แสดงพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวและลักษณะการวิบัติของ
วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่ฝังในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต สำหรับรูปที่ 7
และ 8 แสดงการเปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส
ในจีโอโพลิเมอร์เมื่อพิจารณาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเสริมแรงไฟ
เบอร์กลาสและกำลังรับแรงอัดต่างกัน สำหรับรูปที่ 9 แสดงการ
เปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส, เหล็กข้ออ้อยใน
จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต [10] กับมาตรฐาน วสท. [7]



รูปที่ 5 แรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
ต่างกัน ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

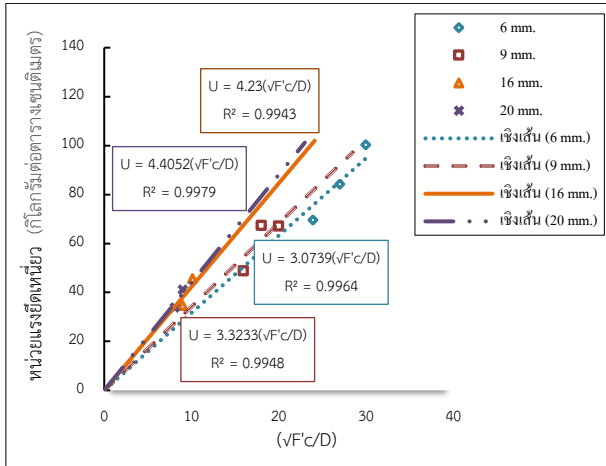


รูปที่ 6ก ไฟเบอร์รีบาร์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่

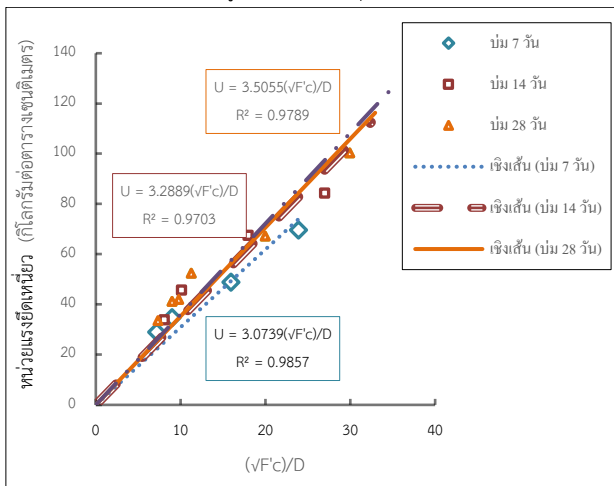


รูปที่ 6ข ไฟเบอร์รีบาร์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก

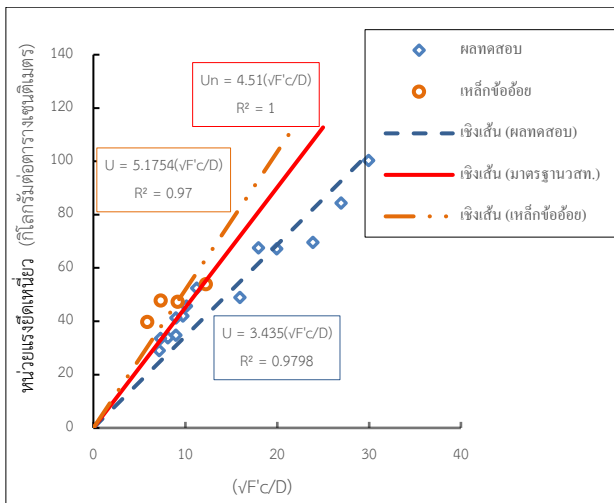
รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเส้น
ผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ฝังในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



รูปที่ 7 เปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสต่างกัน



รูปที่ 8 เปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเมื่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างต่างกัน



รูปที่ 9 เปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส, เหล็กข้ออ้อยในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับมาตรฐาน วสท.

4. อภิปรายผลทดสอบ

4.1 กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 3 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมต่อจีโอโพลิเมอร์เฟสดี กำลังรับแรงอัดจะลดลงสำหรับการเพิ่มอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมากที่สุดเท่ากับ 1.5 และเมื่อพิจารณาโมดูลัสความเค้นของทรายพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสความเค้นของทรายเท่ากับ 2.65 จะให้กำลังรับแรงอัดมากกว่าอย่างชัดเจน ฉะนั้นภูมิภาคในพื้นที่ต่างๆที่มีเฉพาะทรายละเอียด ค่าโมดูลัสความเค้นของทรายควรได้รับการพิจารณาในการออกแบบส่วนผสม เมื่อพิจารณาสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมถึงความประหยัด โดยการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตให้ต่ำพบว่า ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มี อัตราส่วนมวลรวมต่อจีโอโพลิเมอร์เฟสดีและอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 และ 1.5 ตามลำดับ เมื่อใช้ทรายละเอียดจะถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน พบว่ามีค่าเท่ากับ 206, 262 และ 323 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

4.2 แรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

รูปที่ 5 แสดงแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสขนาดต่างกัน ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตระยะเวลาการบ่ม 7 วัน พบว่า ขนาดหน้าตัดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสมากขึ้นส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางลดลงพบว่าการยืดตัว (elongation) มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง โดยการวิบัติแบบทันทีทันใดจะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่ฝังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 16 และ 20 มิลลิเมตร ขณะที่การวิบัติที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่ฝังด้วยวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 และ 9 มิลลิเมตร มีลักษณะค่อยๆ เกิดการหลุดของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสหลุดออกจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและมีความกว้างของรอยแตกกว้างน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่เท่ากับ 16 และ 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสแต่ละขนาดในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยแต่ละขนาดจะพิจารณา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์อายุเท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน พบว่า สมการของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ $4.40VF^2/CD$, $4.23VF^2/CD$, $3.32VF^2/CD$ และ $3.07VF^2/CD$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20, 16, 9 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มลดลงตามเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสที่ลดลง สำหรับรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของไฟเบอร์รีบาร์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างต่างกัน พบว่า สมการของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ $3.07VF^2/CD$, $3.28VF^2/CD$ และ $3.50VF^2/CD$ ที่อายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 206 ถึง 323

ก็โลกริมต่อตารางเซนติเมตร จากผลทดสอบพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสมีผลต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวมากกว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ และรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสและเหล็กข้ออ้อย [10] ในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตกับมาตรฐาน วสท. [7] พบว่าสมการหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ $5.17\sqrt{f_c}/D$ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน วสท. จะมีค่าสูงกว่าร้อยละ 14 ขณะที่สมการหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสเท่ากับ $3.43\sqrt{f_c}/D$ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน วสท. จะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 24 ฉะนั้นเมื่อนำวัสดุประเภทวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสไปใช้งานในโครงสร้าง หน่วยแรงยึดเหนี่ยวควรได้รับการพิจารณาเพิ่มเติม

5. สรุปผลทดสอบ

5.1 โมดูลัสความละเอียดของทรายส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ฉะนั้นการออกแบบส่วนผสม ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายควรได้รับการพิจารณา

5.2 สมการหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่กำลังอัดปกติเท่ากับ $3.43\sqrt{f_c}/D$

5.3 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่กำลังอัดปกติเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน วสท. จะให้ผลที่ต่ำกว่าร้อยละ 24

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางที่ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุเถ้าลอย ขอขอบคุณ บริษัท เซลล์ลูล่า บีม (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2561

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits J., (1991). Geopolymers-Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), pp. 1633-1656.
- [2] Bakharev T., (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp. 1233-1246.
- [3] Chindapasirt P., De Silva P., Sagoe-Crentsil K., and Hanjitsuwan S., (2012). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, 47(12), pp. 4876-4883.
- [4] Mand Kamal AskarAli, Falyeh HassanYaman and S.S. Al-Kamak, (2022). Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01189.
- [5] R. Guo, et al., (2021). Experimental study on flexural shear strengthening effect on low-strength RC beams by using FRP grid and ECC. *Engineering Structures*, 227, 111434.
- [6] A. Saribiyik, N. Caglar, (2016). Flexural strengthening of RC beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP. *Struct. Eng.*, 58 (5), pp. 825-845.
- [7] คณะอนุกรรมการมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (2564) *มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- [8] ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมณา และ วิเชียร ชาลี (2553). กำลังอัดและกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, ปี15, ฉบับที่ 1, หน้า 13-22.
- [9] ACI Committee 211 (2022). *ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High Density-Concrete – Guide*. ISBN: 9781641951869, pp.6-13.
- [10] อเนก ชันธุ์และคณะ (2562). *แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง*. ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร, ประเทศไทย.