

กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุจีโอโพลีเมอร์ หรือคอนกรีตและเหล็กเสริม

Bond strengths between fly ash-based geopolymer or concrete and reinforcing steel

ตะวัน หงษ์อุบล^{1,*} อรุณ เพชรเชิดชู²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร

² ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: s5901081811032@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาเกี่ยวกับกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีต และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่างคอนกรีตจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ คอนกรีตที่ออกแบบมี 2 กำลังอัดเหล็กเสริมข้ออ้อยขนาด 12 16 และ 20 มิลลิเมตรและแต่ละตัวอย่างใช้ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน จากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดหรือเมื่อลดขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมลงตามที่คาดการณ์ไว้ กำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นผลมาจากระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง แต่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มกำลังอัด กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดสูงกว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อยเนื่องจากระยะเวลาที่ใช้บ่ม อย่างไรก็ตามค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับขนาดของเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: กำลังยึดเหนี่ยว, เหล็กข้ออ้อย, คอนกรีต, จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย, ระยะเวลาบ่ม

Abstract

This research is part of a study the bonding strength between deformed steel bar and concrete. Several parameters are varied to compare between ordinary Portland cement (OPC) concrete and Class C fly-ash geopolymer concrete (GPC). These concretes are designed to have two different compressive strength, and each of them is cured at 28 days. The diameter of reinforcement is selected as 12, 16 and 20 mm with deformed type. From the study, it is found that the bond strength increase with increasing the compressive strength, while with decreasing the diameter of reinforcement, as expected. The bond strength of OPC

embedded with smaller reinforcement is more sensitive to the increase of the curing time. However, its bond strength is significantly less sensitive to the compressive strength. The bond strength of GPC with higher design compressive strength is more sensitive to the increase of the curing time. However, its bond strength is significantly less sensitive to the diameter of reinforcement.

Keywords: Bond Strength, Deformed Bar, Concrete, Fly-ash base Geopolymer, Curing time

1. คำนำ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุที่มีบทบาทอย่างมากในงานวิศวกรรมโยธา เนื่องด้วยคุณสมบัติที่เป็นตัวเชื่อมประสานหินทรายเข้าด้วยกันให้กลายเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ แม้ว่าภาวการณ์ใช้งานปูนซีเมนต์จะเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางแต่การวิจัยและพัฒนาวัสดุทางเลือกอื่นก็ยังมีอยู่เรื่อยมาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการในส่วนของการสร้างมูลค่าเพิ่มและสร้างทางเลือกให้รองรับการเจริญเติบโตในด้านการก่อสร้างที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ด้วยการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจผนวกกับความตระหนักในปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาเรือสากวาะโลกร้อนและการหมดไปของทรัพยากรธรรมชาติ ทำให้มีการริเริ่มที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจากหลายภาคส่วน โดยในส่วนของงานก่อสร้างนั้น กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณมาก ทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโลกในปริมาณสูง อีกทั้งยังใช้ทรัพยากรธรรมชาติในกระบวนการผลิตที่สูง ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าวอาจสามารถทำได้จากการคิดค้นเชิงนวัตกรรมใหม่ๆ เพื่อที่จะช่วยตอบสนองต่อความต้องการที่จะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงเทคโนโลยีหรือการจัดการของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ รวมทั้งการคิดค้นพัฒนาวัสดุใหม่ที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างปลอดภัยต่อทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งมีชีวิตต่างๆ

จีโอพอลิเมอร์ คือวัสดุชนิดหนึ่งซึ่งได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จีโอพอลิเมอร์จะสามารถเข้ามาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เนื่องจากมีคุณสมบัติในด้านกำลังอัดที่คล้ายกันกับปูนซีเมนต์ โดยวัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นมีองค์ประกอบหลักที่จำเป็นทางเคมีไม่ต่างกับปูนซีเมนต์ คือ อะลูมินา และ ซิลิกา ซึ่งเป็นส่วนประกอบในถ้ำลอยถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักที่นำมาผสมเป็นจีโอพอลิเมอร์ โครงสร้างทางโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่โพลิเมอร์นั้นเป็นผลผลิตจากการเกิดของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งเกิดขึ้นจากการผสมสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาและซิลิกาเป็นหลักเข้ากับสารละลายที่เป็นต่างสูงแล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อก่อให้เกิดการแข็งตัวและสามารถให้กำลังอัดได้ การนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์มาใช้ในงานในโครงสร้างจริงจำเป็นต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับขีดความสามารถในคุณสมบัติด้านต่างๆ เปรียบเทียบกันกับคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [1]

สำหรับประเทศไทย ยังไม่มีรายงานของการผลิตหรือใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากยังเป็นเทคโนโลยีใหม่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยหลากหลายในประเทศไทยที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ มาทำจีโอพอลิเมอร์ เช่น ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ถ้ำกลบ ถ้ำปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้ได้มีการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิในการบ่มวัสดุจีโอพอลิเมอร์, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al เป็นต้น ซึ่งเป็นการศึกษาในลักษณะที่เป็นเพสต์ หรือ มอร์ตาร์ [2] ทั้งนี้สามารถสังเกตเพิ่มเติมได้ว่า การใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ชนิดถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถช่วยในการสนับสนุนการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แล้ว ยังมีส่วนช่วยในการสนับสนุนการนำถ้ำลอยซึ่งเป็นกากของเสียที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมถ้ำไฟฟ้านี้มาใช้เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าให้กลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่อีกครั้ง รวมทั้งยังช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานเพื่อทดสอบการใช้งานวัสดุจีโอพอลิเมอร์เหมือนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต จำเป็นที่จะต้องอ้างอิงกับมาตรฐานของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [3]

เมื่อกล่าวถึงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กลไกสำคัญของชิ้นส่วนที่รับแรง อาทิ คานและเสานั้นคือกลไกการทำงานระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกภายนอก โดยพื้นฐานแล้วชิ้นส่วนรับน้ำหนักบรรทุกอยู่นั้นเหล็กเสริมจะมีการยึดติดตัวโดยประมาณเท่ากับคอนกรีตที่ห่อหุ้มอยู่ เนื่องจาก “แรงยึดเหนี่ยว” ระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงดัดจำเป็นต้องคำนึงถึงแรงยึดเหนี่ยวหรือความต้านทานต่อการลื่นไถลของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีต แรงต้านทานนี้เกิดจากการยึดติดกันระหว่างเหล็กเสริมกับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และมีความสำคัญในการกำหนดระยะฝังเพิ่มของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดย

กำลังยึดเหนี่ยวในคอนกรีตจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของการยึดติดดังกล่าว กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทาน และการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นสำคัญ แรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวนั้นนอกจากจะขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตแล้ว ยังขึ้นกับคุณภาพของเหล็กเสริมตลอดจนตำแหน่งของเหล็กเสริมด้วย [4]

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 วัสดุ

2.2.1 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยนี้ออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 180 และ 280 กก./ตร.ซม. ที่ระยะการบ่ม 28 ตามมาตรฐาน ACI 211.1 [5] โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 มวลรวมหยาบหรือหินปูน ขนาด 20 มิลลิเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.6 และความหนาแน่นเท่ากับ 1450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7 การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.98 และมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Finesse modulus) เท่ากับ 2.70

2.2.2 จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete)

วัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตจากจีโอพอลิเมอร์ในครั้งนี้ประกอบไปด้วยถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ชนิดที่ 2 ตาม มอก.433-2539 [6] มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ดตาม มอก. 150-2518 [7] โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ [8] และออกแบบคอนกรีตจากจีโอพอลิเมอร์ให้มิกำลังอัดประลัยเท่ากับ 180 และ 280 กก./ตร.ซม. ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของถ้ำถ่านหิน [9]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	LOIFA
Fly Ash	36.02	20.58	15.91	18.75	2.24	0.07

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต [10]

Property		
Sodium Oxide (Na ₂ O)	%(w/w)	16.26
Silicon Dioxide (SiO ₂)	%(w/w)	34.52
Mole Ratio (Na ₂ O : SiO ₂)		01:02.2
Specific Gravity (At 20°C)		1.638
Density (At 20°C)	Baume'	546.5

2.2.3 เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar)

เหล็กข้ออ้อยขนาด 12 16 และ 20 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD40 สามารถรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 500 เมกะปาสคาล และรับแรงดึงประลัยสูงสุดเท่ากับ 70 เมกะปาสคาลตามมาตรฐาน ASTM A996 [11]

2.2 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยนี้ออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 180 และ 280 กก./ตร.ซม. ในการออกแบบส่วนผสมของวัสดุโพลิเมอร์ คอนกรีตที่ก้ำกั้ว 180 และ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรให้ใช้ล้า ลอยแทนที่ในส่วนของปูนซีเมนต์และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ สารละลายโซเดียมซิลิเกตแทนที่ในส่วนของน้ำ ในส่วนของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดใช้ในปริมาณที่เท่ากับกับคอนกรีต การออกแบบ ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ก้ำกั้ว 180 และ 280 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 14 โม ลาร์และอัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยแทนที่ชื่อของชนิดตัวอย่างคอนกรีตกำลัง 180 ksc, 280 ksc ด้วย OPC1, OPC2 และแทนที่ชื่อของชนิดตัวอย่างจีโอ โพลิเมอร์กำลัง 180 ksc, 280 ksc ด้วย GPC1, GPC2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสม	ปริมาณของส่วนผสม (kg/m ³)	
	กำลังอัด 180 ksc (OPC1)	กำลังอัด 280 ksc (OPC2)
น้ำ	210	210
หิน	945	945
ทราย	893	790
ปูนซีเมนต์	292	373

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสม	ปริมาณของส่วนผสม (kg/m ³)	
	กำลังอัด 180 ksc (GPC1)	กำลังอัด 280 ksc (GPC2)
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	105	105
สารละลายโซเดียมซิลิเกต	105	105
หิน	945	945
ทราย	893	790
ปูนซีเมนต์	292	373

2.3 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

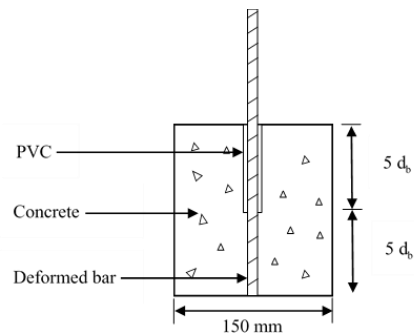
เตรียมแบบหล่อตัวอย่างทดสอบรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอกให้ ขนาดตัวอย่างทดสอบ เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของ RILEM [12] โดยขนาดของตัวอย่างทดสอบจะแปรผันตามขนาดของเหล็ก ข้อ้อยที่ใช้ โดยก้อนตัวอย่างมีด้วยกัน 3 ขนาดได้แก่ 15 x 15 x 12 ซม. 15 x 15 x 16 ซม. และ 15 x 15 x 20 ซม. โดยที่ตัวอย่างของเหล็กข้อ้อย ขนาด 20 มม. จะมีการเสริมเหล็กปลอกขนาด 9 มม. เพื่อลดการแตกร้าว ของก้อนตัวอย่างขณะทำการทดสอบ ซึ่งการแตกร้าวอาจส่งผลให้ค่ากำลัง ยึดเหนี่ยวของก้อนตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง และในก้อนตัวอย่าง

ของเหล็กข้อ้อยขนาด 16 มม. จะมีทั้งใส่เหล็กปลอกและไม่ใส่เหล็กปลอก เพื่อที่จะใช้เปรียบเทียบว่าการใส่เหล็กปลอกเข้าไปในก้อนตัวอย่างนั้นจะไป ให้ผลทดสอบของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเกิดความผิดเพี้ยนหรือไม่

ตารางที่ 5 ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต	
	กำลังอัดประลัย (ksc)	
	180	280
DB12 (15 x 15 x 12 ซม.)	3	3
DB16 (15 x 15 x 16 ซม.)	3	3
DB16 ใส่เหล็กปลอก (15 x 15 x 16 ซม.)	3	3
DB20 ใส่เหล็กปลอก (15 x 15 x 20 ซม.)	3	3
รวม 24		
ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	ตัวอย่างทดสอบจีโอโพลิเมอร์	
	กำลังอัดประลัย (ksc)	
	180	280
DB12 (15 x 15 x 12 ซม.)	3	3
DB16 (15 x 15 x 16 ซม.)	3	3
DB16 ใส่เหล็กปลอก (15 x 15 x 16 ซม.)	3	3
DB20 ใส่เหล็กปลอก (15 x 15 x 20 ซม.)	3	3
รวม 24		

หลังจากเตรียมแบบสำหรับหล่อตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้วนำส่วนผสม ของคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จัดเตรียมไว้มาทำการผสมตาม ขั้นตอนโดยใช้เครื่องมือผสม จากนั้นนำคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วมาเทเข้าแบบหล่อโดยแบ่งเทให้ได้ 3 ชั้นเท่าๆกัน โดยกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งชั้นละ 30 ครั้งและปาดผิวหน้าของชั้นสุดท้าย ให้เรียบแล้วนำก้อนตัวอย่างไปทำการสั่นบนโต๊ะสั่น (Vibrating Table) เป็นเวลา 1-2 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศในเนื้อวัสดุให้เหลือน้อยที่สุด แล้วทา การหุ้มก้อนตัวอย่างด้วยแผ่นฟิล์มใสทั้งแบบหล่อเพื่อป้องกันการระเหยของ น้ำ แล้วทำการบ่มตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุทดสอบที่ 28 วัน แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล



รูปที่ 1 การติดตั้งเหล็กเส้นกับก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน RILEM



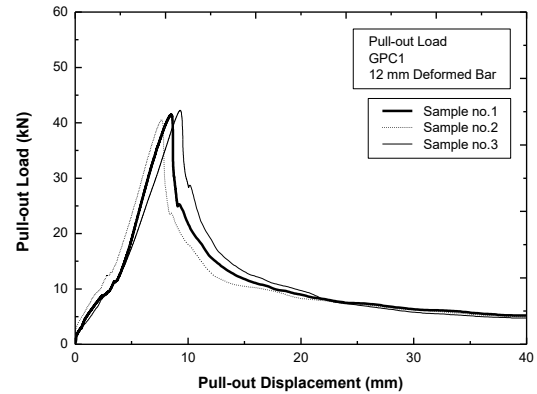
รูปที่ 2 การติดตั้งเหล็กปลอกในก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3 การติดตั้งก้อนตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

หลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบก้อนตัวอย่างทั้งหมด นำเอาค่าผลทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับระยะเลื่อนไกลของก้อนตัวอย่าง จากภาพตัวอย่างที่ได้แสดงในรูปที่ 3 เป็นรูปความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับระยะเลื่อนไกลของก้อนตัวอย่าง จีโพลิเมอร์ที่ฝังเหล็กข้ออ้อย DB12 ที่กำลังอัด 180 ksc ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

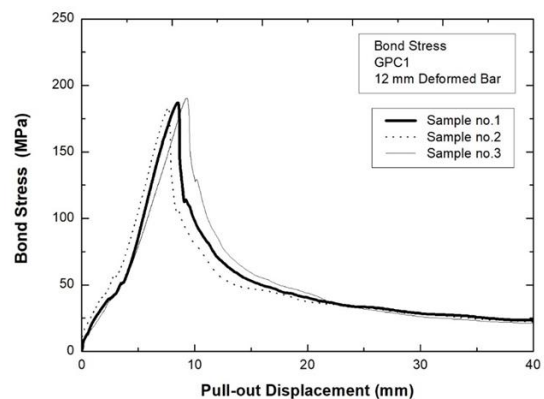


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load(kN) และ Displacement(mm) ของตัวอย่าง จีโพลิเมอร์ DB12 ทั้ง 3 ตัวอย่าง

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยว และระยะการเลื่อนไกลของเหล็กข้ออ้อยสามารถคำนวณได้โดยการคูณระยะที่ทำการฝังเหล็กข้ออ้อยกับพื้นที่รอบรูปของเหล็กข้ออ้อยที่ถูกฝังกับก้อนตัวอย่าง ดังที่แสดงในสมการที่ (1)

$$\tau = \frac{P}{\pi d_b l} \quad (1)$$

จากสมการข้างต้น P คือแรงดึงที่กระทำกับเหล็กข้ออ้อย d_b คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กข้ออ้อย และ l คือระยะที่ทำการฝังเหล็กข้ออ้อยกับก้อนตัวอย่าง ซึ่งหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับก้อนตัวอย่าง ทั้งสามตัวอย่างสามารถนำไปคำนวณตามสมการที่ 1 เพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยว และระยะการเลื่อนไกลของเหล็กข้ออ้อยได้ดังที่แสดงในรูปที่



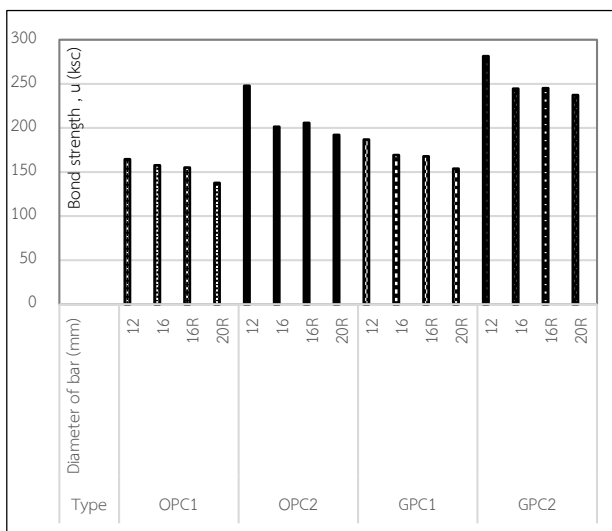
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Bond Stress (ksc) และ Displacement (mm) ของตัวอย่าง จีโพลิเมอร์ DB12 ทั้ง 3 ตัวอย่าง

จากรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยว และระยะการเลื่อนไกลของเหล็กข้ออ้อยดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3 สามารถนำค่าแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่ามากที่สุดของทั้งสามตัวอย่างมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย และจากตัวอย่างของก้อนตัวอย่างจีโพลิเมอร์ที่ได้ทำการฝังเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตรที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน สามารถหาค่าเฉลี่ยหน่วยแรงยึด

เหนียวของทั้งสามตัวอย่างได้เท่ากับ 186.80 ksc เมื่อเรากำหนดตามวิธีข้างต้นกับก้อนตัวอย่างที่เหลือจะได้ค่าหน่วยแรงยึดเหนียวของก้อนตัวอย่างทั้งหมดดังที่แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 หน่วยแรงยึดเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

Type	Diameter of bar (mm)	Curing time (day)	Pull-out load (kN)			Bond strength, u (ksc)
			No.1	No.2	No.3	
OPC1	12	28	35.0	36.9	37.6	164.5
	16		62.2	61.4	62.7	157.5
	16R		61.2	60.5	61.9	155.1
	20R		85.3	86.7	82.6	137.7
OPC2	12	28	54.9	53.2	56.8	247.8
	16		81.6	78.3	78.3	201.3
	16R		80.0	81.9	81.5	205.7
	20R		120.1	118.2	116.5	192.0
GPC1	12	28	41.5	40.6	42.2	186.8
	16		63.6	68.8	67.8	169.2
	16R		65.9	68.8	63.7	167.7
	20R		94.1	93.2	96.8	153.7
GPC2	12	28	62.6	64.1	60.7	281.5
	16		94.5	97.0	97.7	244.5
	16R		93.8	97.5	98.7	245.1
	20R		150.8	144.7	143.0	237.3



รูปที่ 6 แผนภูมิค่าเฉลี่ยกำลังยึดเหนียวของก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 7 ค่ากำลังอัดทรงกระบอกของตัวอย่าง

Type	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก/ตร.ซม.)
OPC1	28	183.96
OPC2		278.37
GPC1	28	199.54
GPC2		282.91

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จีโพลีเอสเตอร์คอนกรีตจากถั่วลันเตานั้นสามารถนำมาใช้งานแทนคอนกรีตทั่วไปได้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจีโพลีเอสเตอร์คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังอัดและกำลังยึดเหนียวได้ดีไม่แพ้คอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

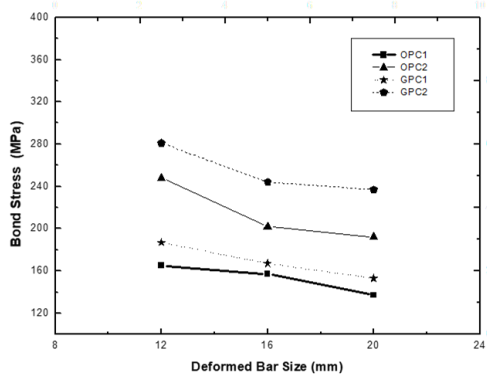
2. จากการทดสอบพบว่า การนำวัสดุจีโพลีเอสเตอร์มาใช้แทนคอนกรีตนั้นจะต้องมีการปรับปรุงในเรื่องระยะเวลาในการแข็งตัวเนื่องจากการแข็งตัวของจีโพลีเอสเตอร์เกิดขึ้นเร็วกว่าคอนกรีตธรรมดาอยู่พอสมควร อาจทำให้เกิดผลเสียกับงานที่ใช้วัสดุนี้ได้ เช่นวัสดุเกิดการแข็งตัวก่อนเทลงแบบหล่อเสร็จ

3. เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6 ค่าหน่วยแรงยึดเหนียวมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (2) ตามมาตรฐาน ACI [13]

$$u \propto \frac{\sqrt{f'c'}}{d_b} \quad (2)$$

จากสมการข้างต้น $f'c'$ คือหน่วยแรงอัดและ u คือหน่วยแรงยึดเหนียวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหรือในอีกนัยหนึ่งคือหน่วยแรงยึดเหนียวเป็นสัดส่วนโดยตรงของรากที่สองของหน่วยแรงอัดกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ในขณะที่ผกผันกับขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริม

4. เมื่อนำค่าหน่วยแรงยึดเหนียวที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับขนาดของเหล็กเสริม จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อทำการพิจารณาที่เหล็กขนาดเดียวกัน ก้อนตัวอย่างที่มีกำลังอัดสูงกว่าย่อมมีความสามารถในการรับแรงดึงได้มากกว่า และจะสังเกตเห็นได้ว่าที่กำลังอัดเดียวกันวัสดุจีโพลีเอสเตอร์จะมีความสามารถในการรับแรงดึงที่มากกว่าวัสดุคอนกรีตอยู่พอสมควร และอีกหนึ่งผลสรุปเราจะเห็นว่ายิ่งเหล็กเสริมมีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่ก็จะมีค่าหน่วยแรงยึดเหนียวที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กเสริมกับวัสดุต่ำลง กล่าวได้ว่าหน่วยแรงยึดเหนียวมีค่าผกผันกับขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริม ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7 และจากรูปที่ 6 จะพบว่าค่ากำลังรับแรงยึดเหนียวระหว่างตัวอย่างของเหล็ก DB16 ที่เสริมและไม่เสริมเหล็กปลอกกันร้าวมีของทั้งสองวัสดุมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงอาจสรุปได้ว่าการเสริมเหล็กปลอกกันร้าวเข้าไปในก้อนตัวอย่างนั้นไม่ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงยึดเหนียวที่วัดได้เกิดความผิดเพี้ยน



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเทียบกับขนาดของเหล็กเสริม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบและทุนที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณกองปฏิบัติการลำเลียงถ่านหินและยิปซัม โรงไฟฟ้าแม่เมาะที่อนุเคราะห์ตัวอย่างถ่านล่อยที่นำมาใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2017) หนังสือวัสดุซีโอโพลิเมอร์
- [2] Chindaprasit P, Chareerat T, Sirivivananon V (2007) Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. Cement and concrete Composites 29(3) 224-229
- [3] เขียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ (2549) ผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิต่อกำลังอัดของซีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน
- [4] มงคล จีระวัชรเดช (2557) การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก มีวิธีการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง Strength Design Method สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [5] [5] ACI 211.1-91, 1991. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. American Concrete Institute.
- [6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม . มอก.433-2539, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมซีเมนต์ชนิดพิเศษ.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม . มอก.150-2518, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมซีเมนต์ไฮดรอกไซด์.
- [8] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakul, P. Chindaprasit., 2010. "Compressive Strength and Degree of

Reaction of Biomass and Fly Ash-Based Geopolymer." Construction and Building Materials. 24 : 236-240.

- [9] S. Songpiriyakij, T. Pulngern, 2011. "Anchorage of Steel Bars in Concrete by Geopolymer Paste." Materials and Design. 32 : 3021-3028.
- [10] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม . มอก.150-2518, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมซีเมนต์ไฮดรอกไซด์.
- [11] ASTM A996, 2016. Standard Specification for Rail-Steel and Axle-Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement. American society for testing and materials. Volume 01.04.
- [12] RILEM Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton: essai par traction. Mater Struct 1970;3(3):175-8
- [13] ACI 318 Code Provisions, ACI Structural Journal, V. 90, No. 4, July-Aug., pp. 374-384