

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสสำหรับโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers for Non-Prestressed Concrete Structures (GFRP)

อนุพนธ์ แต้สกุล^{1,*} ไพโรจน์ แซ่จิ๋ว¹ ภาณุพงศ์ เจริญรักษ์¹ สุภาวดี ปังฉิม¹ สรร อาดกวอด¹ เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์¹ และ การันต์ คล้ายฉำ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นครปฐม

*Corresponding author; E-mail address: anupon.t@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยเริ่มนำวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) มาใช้ทดแทนเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับเหล็กเสริม มีต้นทุนที่ใกล้เคียง มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน และมีความทนทานสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ GFRP และสร้างความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง การทดสอบประกอบด้วยการหาขนาดหน้าตัดขวาง (CAN/CSA-S806) การทดสอบความต้านทานแรงดึงตามแนวยาว (ASTM D7205/D7205M) ความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว (ACI440.3R Test method B.3) ความต้านทานแรงเฉือนตามขวาง (ACI440.3R Test method B.4) และความทนทานต่อต่างในสารละลายที่มีค่า pH สูง (ACI440.3R Test method B.6) ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง GFRP ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก. 2973-2562) ในทุกการทดสอบที่ดำเนินการ ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทนเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตได้

คำสำคัญ: วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส, คุณสมบัติเชิงกล, การเสริมกำลัง

Abstract

Currently, Thailand has begun to adopt glass fiber reinforced polymer (GFRP) as a replacement for steel reinforcement in reinforced concrete structures, particularly for non-prestressed concrete applications. This shift is driven by GFRP's mechanical properties, which are comparable to those of steel reinforcement, its similar cost, high corrosion resistance, durability, and environmental friendliness. This

study aims to evaluate the mechanical properties of GFRP and establish its reliability for use in non-prestressed concrete structures. The testing procedures include determining the cross-sectional dimensions (CAN/CSA-S806), tensile strength along the longitudinal axis (ASTM D7205/D7205M), bond strength (ACI 440.3R Test Method B.3), transverse shear strength (ACI 440.3R Test Method B.4), and alkali resistance in high pH solutions (ACI 440.3R Test Method B.6). The test results indicate that the GFRP samples meet the product standard requirements (TIS 2973-2562) in all conducted tests, demonstrating its suitability as a viable alternative to steel reinforcement in concrete structures.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), Mechanical Properties, Reinforcement.

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมจะมีการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมเนื่องจากเหล็กได้รับความชื้นจากหลายขั้นตอนในการก่อสร้าง หรืออยู่ในสภาวะที่อาจก่อให้เกิดสนิม อีกทั้งเหล็กเส้นยังมีราคาสูงและกระบวนการผลิตที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีการปล่อยก๊าซและสารเคมีระหว่างการผลิต จึงเริ่มมีการใช้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสสำหรับโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) ผลิตจากเส้นใยแก้วทดแทนเหล็กเส้น ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีทั้งในด้านความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Properties) น้ำหนักเบา ทนทานต่อการกัดกร่อนและมีต้นทุนการผลิตที่คุ้มค่า ไฟเบอร์กลาสมักถูกใช้ร่วมกับวัสดุเรซิน ซึ่งให้ความแข็งแรง และความทนทานสูง ในปัจจุบันเริ่มมีการนำ GFRP มาใช้กับโครงสร้างส่วนที่สัมผัสความชื้นจากพื้นดิน ทั้งนี้ วัสดุ GFRP จะต้องเผชิญปัญหาของการเกิดสนิม อีกทั้งยังลดต้นทุนการก่อสร้างได้ในภาพรวม แต่การใช้วัสดุ GFRP ยังไม่เป็นที่ยอมรับในโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรงมากนัก เนื่องจากวิศวกรผู้ออกแบบและผู้ใช้งานไม่เชื่อมั่นในตัวของ GFRP จึงมีงานศึกษาวิจัยของ Alsuhaibani และคณะ [1] ที่ทดสอบเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลของ GFRP เพื่อแก้ไขพฤติกรรมและประสิทธิภาพที่ยังไม่แน่นอน เช่น การรับ

แรงอัด และการยึดเกาะกับคอนกรีต ซึ่งผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่า GFRP มีศักยภาพในการใช้งาน และแนะนำให้มีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาการใช้งานและเพิ่มความมั่นใจว่าวัสดุจะสามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบและรองรับเงื่อนไขการใช้งานในสภาวะต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม ด้วยเหตุนี้จึงทำการทดสอบ GFRP ให้ได้คุณสมบัติเชิงกลตรงตามมาตรฐาน มอก.2973-2562 [2]

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสสำหรับโครงสร้างคอนกรีตแบบไม่อัดแรง (GFRP) ตามมาตรฐานที่มอก.2973-2562 [2] กำหนด ได้แก่ การทดสอบหาขนาดหน้าตัดขวาง (CAN/CSA-S806) การทดสอบความต้านแรงดึงตามแนวยาว (ASTM D7205/D7205M) การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว (ACI 440.3R) การทดสอบความต้านแรงเฉือนตามขวาง (ACI 440.3R) และการทดสอบความทนด่างในสารละลายที่มีค่า pH สูง (ACI 440.3R)

3. กระบวนการวิจัย

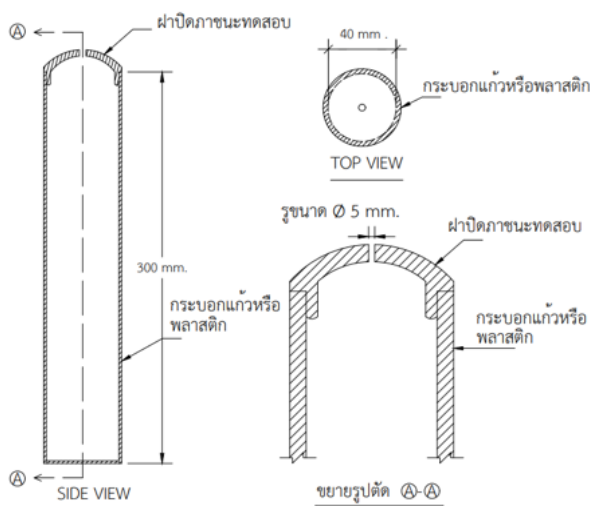
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm

3.2 การทดสอบหาขนาดหน้าตัดขวาง (Cross-Sectional) จำนวน 9 ตัวอย่าง

3.2.1 การเตรียมการทดสอบ

- กระบอแก้วหรือพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm พร้อมฝาปิดที่มีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ดังรูปที่ 1 [2]



รูปที่ 1 ภาชนะตัวอย่างสำหรับวัดปริมาตรชิ้นทดสอบ

3.2.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

- (1) วัดความยาวชิ้นทดสอบที่ปรับสภาพแล้ว (L) ค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้ต้องไม่เกิน $\pm 0.5\%$ โดยจำนวนชิ้นทดสอบมีข้อกำหนดดังตารางที่ 1

1

- (2) เช็ดภาชนะและฝาปิดให้แห้งและชั่งน้ำหนักพร้อมทั้งบันทึกผล น้ำหนักเป็นหน่วยกรัม ดังรูปที่ 2(ก) จากนั้นเติมน้ำลงในภาชนะจนถึงระดับด้านบนของรูฝาปิด ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ จากนั้นชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ดังรูปที่ 2(ข) พร้อมทั้งบันทึกผลความแตกต่างระหว่างน้ำหนักทั้งสองที่วัดได้คือ ปริมาตรของภาชนะ (V_0) ในหน่วย มิลลิลิตร (ml)
- (3) วางชิ้นทดสอบลงในภาชนะที่แห้ง โดยไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดยื่นออกมาเหนือขอบด้านบนของภาชนะ จากนั้นชั่งน้ำหนักพร้อมทั้งบันทึกผล



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ชั่งน้ำหนักภาชนะ

- (4) เติมน้ำลงในภาชนะให้ต่ำกว่าขอบ 10 mm โดยไม่ต้องปิดฝา เขย่าภาชนะเบาๆ เพื่อไล่ฟองอากาศที่ก่อตัวขึ้น และเติมน้ำลงในภาชนะจนเต็มถึงขอบบนของรูที่ฝาภาชนะ จากนั้นชั่งน้ำหนัก
- (5) ส่วนต่างของน้ำหนักที่วัดได้กับน้ำหนักที่วัดได้จากข้อ 4 คือปริมาตรของน้ำในภาชนะ (V_1) ดังนั้นส่วนต่างของปริมาตร (V_0) และ (V_1) คือปริมาตรของชิ้นทดสอบ สูตรหาขนาดหน้าตัดขวางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [3] โดย A คือพื้นที่หน้าตัดขวางระบุ V_0 คือปริมาตรของภาชนะ และ V_1 คือปริมาตรน้ำที่มีชิ้นทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบมีข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนดังตารางที่ 1

$$A = \frac{V_0 - V_1}{L} \times 1000 \quad (1)$$

3.3 การทดสอบความต้านแรงดึงตามแนวยาว (Longitudinal tensile strength for bars)

3.3.1 การเตรียมการทดสอบ

- (1) ความยาวของชิ้นทดสอบ (L) ไม่ควรน้อยกว่า 100 mm และไม่ควรมีน้อยกว่า 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง GFRP (40D) ดังรูปที่ 3 และตารางที่ 2
- (2) จำนวนชิ้นทดสอบ 24 ตัวอย่าง หากชิ้นทดสอบขาดหรือหลุดออกจากสมอยึดควรทำการทดสอบเพิ่มเติมกับชิ้นงานทดสอบที่ผลิตมาจากล็อตเดียวกัน [4]
- (3) เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวของแท่ง GFRP สัมผัสกับหัวจับของเครื่องทดสอบจนเกิดวิบัติก่อน จำเป็นต้องติดตั้งสมอยึดทั้ง 2 ข้างของชิ้นทดสอบตามรูปที่ 3 โดยความยาวของสมอยึดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$L_g = \frac{F_u A}{350} \quad (2)$$

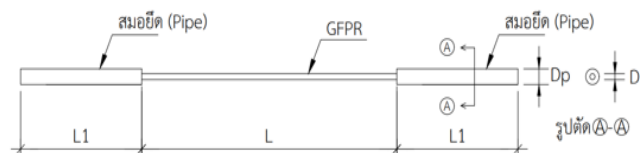
และต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 250 mm โดยที่ F_u คือ ความต้านแรงดึงสูงสุด และ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

(4) ความหนาของสมอทรงกระบอก (t) ต้องไม่น้อยกว่า 5 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสมอยึด (D) ต้องมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ GFRP (D) 10 ถึง 14 mm

3.3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

(1) ติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยให้แน่วางตามยาวของชิ้นทดสอบอยู่ในแนวเดียวกันตลอดความยาว และควรติดตั้ง

เครื่องมือวัดการยืดตัว (Extensometer) ไว้ที่กึ่งกลางของชิ้นทดสอบที่ระยะห่างจากจุดยึดอย่างน้อย 8 เท่า (8D) ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง GFRP เครื่อง Extensometer ควรอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางของความดึงเครียด ความยาวพิกัดไม่ควรน้อยกว่า 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของ GFRP (8D) หรือน้อยกว่าความยาวที่มี ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ความยาวของชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงตามแนวยาว

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดของพื้นที่หน้าตัดขวางระบุและความต้านทานแรงดึงต่ำสุดตาม มอก. 2973-2562 [7]

เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดระบุ (mm)	จำนวนชิ้นทดสอบ 290 mm สำหรับการทดสอบหาหน้าตัดขวาง	พื้นที่หน้าตัดขวางระบุ (mm ²)	ความต้านแรงดึงตามแนวยาวต่ำสุด (MPa)
4	-	12	750
5	-	19.6	750
6	8	32	750
8		50	750
9		63	750
10		71	750
12	6	113	750
13		129	650
15	3	199	650
20	1	284	600
22		387	550
25		510	550
30		645	500
32		819	450
36		1006	450

ตารางที่ 2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงดึง [7]

D (mm)	L (mm)	L ₁ (mm)	D _p (mm)
4	160	300	35
7	280	300	35
8	320	300	35
12	480	380	35
15	600	380	42
16	640	380	42

หมายเหตุ: D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสมอยึด

(2) ทดสอบระบบการเก็บข้อมูลก่อนเริ่มทดสอบดึงตัวอย่าง โดยอัตรา การดึงควรคงที่ในระหว่างการทดสอบและควรใช้อัตราดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบวิบัติภายในช่วงเวลา 1 ถึง 10 นาที

(3) เพิ่มแรงดึงจนกว่าชิ้นทดสอบจะขาด และควรบันทึกข้อมูลไปเรื่อย ๆ โดยค่ากำลังรับแรงดึงประลัย (F_u) ค่าความเครียด (ϵ) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (δ) ของชิ้นทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 [4]

$$F_u = \frac{T_u}{A} \quad (3ก)$$

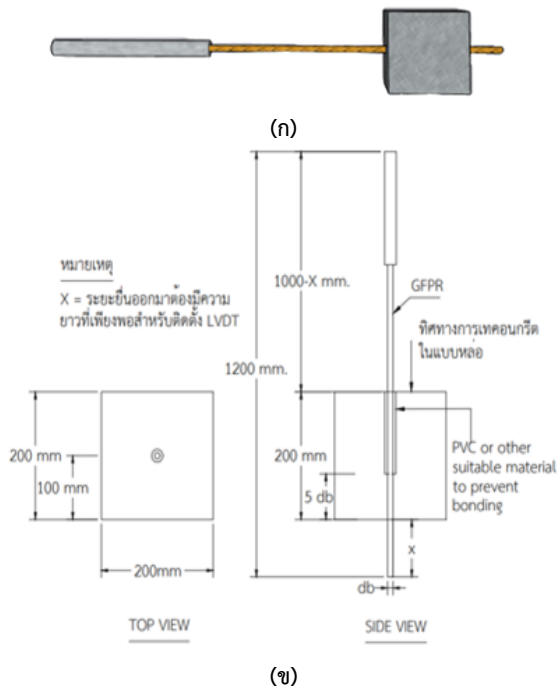
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3ข)$$

$$\delta = \frac{\Delta L_u}{L} \times 100 \quad (3ค)$$



รูปที่ 4 การติดตั้งชิ้นทดสอบหาความต้านแรงดึงตามแนวยาว

เมื่อ T_u คือแรงดึงประลัย A คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ΔL คือค่าการยืดตัว L คือความยาวเริ่มต้นหรือความยาวพิทัก ΔL_u ค่าการยืดตัวสูงสุดที่สภาวะวิบัติ ซึ่งข้อกำหนดต่างๆแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 ตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงยึดเหนี่ยวในแนวตั้ง

3.4 การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว (Bond strength)

3.4.1 การเตรียมการทดสอบ

(1) ตัดตัวอย่างแท่ง GFRP แต่ละชิ้นเป็นท่อนยาว 1200 mm และประกอบเข้ากับสมอยิตที่ปลายด้านหนึ่งตามมาตรฐาน จำนวนชิ้นทดสอบ 24 ตัวอย่าง

(2) สำหรับตัวอย่างที่ฝังชิ้นทดสอบในแนวตั้งดังรูปที่ 5(ก) และรูปที่ 5(ข) ซึ่งเป็นการเตรียมตัวอย่างการทดสอบที่จำลองแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเสริมแรงตามแนวยาวในเสา ชุดการทดสอบนี้จะประกอบด้วยลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 200 mm ซึ่งมีกำลังอัด 19.3 MPa (ตัวอย่างรูปทรงกระบอก) โดยมีแท่ง GFRP ฝังในแนวตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของก้อนคอนกรีต โดยมีส่วนยื่นออกมาจากผิวคอนกรีตด้านบนที่ยาวเพียงพอสำหรับรองรับของเครื่องทดสอบและการติดตั้ง LVDT และให้ความยาวเพียงพอต่อการยึดจับสำหรับการติดตั้งรูปที่ 9 หากเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตจำเป็นต้องใช้ลูกบาศก์ขนาด 300 mm และควรทำการทดสอบใหม่

3.4.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

(1) ติดตั้งก้อนคอนกรีตเข้ากับเครื่องทดสอบ จากนั้นติดตั้ง LVDT ที่ปลายแท่ง GFRP ด้านให้แรงดึงและที่ปลายอิสระโดยให้แนบกับผิวคอนกรีต เพื่อวัดการเคลื่อนไถลของแท่ง GFRP ดังรูปที่ 6

(2) เดินเครื่องเพื่อดึงแท่ง GFRP ด้วยอัตราการดึง 20 kN/min

(3) อ่านและบันทึกค่าแรงดึงที่ใช้และค่าการเคลื่อนตัวของ GFRP ด้วยจำนวนช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้อ่านค่าได้อย่างน้อย 15 ค่าในช่วงเวลาที่เกิดการสลิปเท่ากับ 0.25 mm ที่ปลายด้านให้แรงดึงของแท่ง GFRP การเคลื่อนไถลของปลายอิสระของ GFRP ควรบันทึกอย่างน้อยทุกๆ 0.01 mm พร้อมกับแรงดึงที่ใช้

(4) ดำเนินการดึงชิ้นทดสอบและอ่านค่าด้วยอัตราที่เหมาะสมจนกระทั่งเกิดการวิบัติที่ GFRP คอนกรีตที่หักหรือการเคลื่อนหลุดของ GFRP อย่างน้อย 2.5 mm ของระยะฝัง [5]

(5) ในกรณีที่พิจารณาว่าชิ้นทดสอบมีการดึงขาดที่สมอยิต หรือหลุดออกก่อนที่แท่ง GFRP จะเลื่อนออกจากคอนกรีต หรือในกรณีที่แรงดึงลดลงอย่างมากเนื่องจากการแตกหรือร้าวของคอนกรีตควรทำการทดสอบตัวอย่างชิ้นใหม่จนกว่าการทดสอบจะครบ โดยชิ้นทดสอบไม่ควรน้อยกว่า 5 ชิ้น โดยค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (τ) สามารถหาได้จากสมการที่ 4 [5] เมื่อ F คือ แรงดึง C_b คือเส้นรอบวงเทียบเท่าของ GFRP และ l คือความยาวของระยะฝัง

$$\tau = \frac{F}{C_b l} \quad (4)$$

3.5 การทดสอบความต้านแรงเฉือนตามขวาง (Transverse shear strength)

3.5.1 การติดตั้งตัวอย่างและการทดสอบ

(1) จำนวนชิ้นทดสอบทั้งหมด 24 ตัวอย่าง ควรติดตั้งชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางของเครื่องตัดเฉือนให้สัมผัสกับอุปกรณ์แรงกดด้านบน ดังรูปที่ 7 ไม่ควรมองเห็นช่องว่างระหว่างพื้นผิวสัมผัสของอุปกรณ์แรงกดและชิ้นทดสอบ

(2) อัตราแรงกดควรทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราระหว่าง 30 ถึง 60 MPa ต่อนาที ควรให้แรงกดอย่างสม่ำเสมอโดยไม่ทำให้เกิดแรงกระทำกับชิ้นทดสอบ



รูปที่ 6 การติดตั้งชิ้นทดสอบความแข็งแรงในการอัดเหนียว



รูปที่ 7 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบความต้านทานแรงเฉือนตามขวาง

(3) ควรให้แรงกดต่อไปจนกว่าชิ้นทดสอบจะวิบัติ [5] และบันทึกค่าแรงกดสูงสุดที่วัดได้

3.6 การทดสอบความทนด่างสารละลายที่มีค่า pH สูง (Alkali resistance in high pH solution)

3.6.1 การเตรียมการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับการทดสอบความต้านแรงดึงตามแนวยาวจำนวน 24 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 กรณี คือ ในสถานะที่มีแรงกระทำ และในสถานะที่ไม่มีแรงกระทำ [6]

3.6.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

(1) ควรวัดค่า pH ของสารละลายอัลคาไลน์ที่จุดเริ่มต้นของการทดสอบ และหลังการทดสอบความต้านทานด่าง ในระหว่างการแช่ตัวอย่างทดสอบ ควรตรวจสอบค่า pH ของสารละลายอัลคาไลน์อย่างน้อยทุก ๆ 5 วัน เพื่อรักษาค่าประกอบและค่า pH ให้เหมือนกันตลอดเวลาการทดสอบ

(2) ควรตรวจสอบลักษณะภายนอกของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานด่างเพื่อเปรียบเทียบสี สภาพพื้นผิว และการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง และตรวจสอบสภาพของหน้าตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์

(3) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นตัวอย่าง ดังนั้นก่อนจุ่มตัวอย่างควรทำให้แห้งจนกว่ามวลของน้ำจะไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับกรณีมีแรงกระทำ ให้ติดตั้งชิ้นตัวอย่าง GFRP และติดตั้งตัวอย่างจนกระทั่งชิ้นตัวอย่างเกิดความเครียดเท่ากับ 2000×10^{-6}

(4) หลังจากการแช่จุ่มรูปที่ 8 ตามช่วงเวลาที่กำหนดแล้ว (3 เดือน) ควรนำชิ้นทดสอบออกจากสารละลายอัลคาไลน์ แล้วล้างอย่างรวดเร็วน้ำปราศจากไอออน เช็ดให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู จากนั้นชั่งน้ำหนักทันที จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทดสอบหากล้างรับแรงดึงประลัย

(5) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นทดสอบ ควรทดสอบทันทีภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากนำออกจากสารละลาย วิธีทดสอบแรงดึงเป็นไปตามวิธีทดสอบ ACI440.3R Test method B.6 [7]



รูปที่ 8 การแช่อัลคาไลน์ของชิ้นทดสอบในสถานะที่มีแรงกระทำและไม่มีแรงกระทำ

โดยค่าการคงกำลังรับแรงดึง (R_{et}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) เมื่อ F_{u1} คือกำลังรับแรงดึงประลัยในสถานะปกติ และ F_{u2} คือกำลังรับแรงดึงหลังการแช่สารละลาย

$$R_{et} = \frac{F_{u2}}{F_{u1}} \times 100 \quad (5)$$

4. ผลการวิจัย

4.1 การทดสอบหาหน้าตัดขวาง (Cross-Sectional) โดยทดสอบตามมาตรฐาน CAN/CSA-S806 [3]

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบหาขนาดหน้าตัดขวางของ GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm พบว่ามีค่าขนาดหน้าตัดสูงสุดคือ 12.526 mm^2 มีค่าขนาดหน้าตัดต่ำสุดคือ 11.764 mm^2 โดยมีค่าขนาดหน้าตัดเฉลี่ยอยู่ที่ 12.043 mm^2 ซึ่งตามมาตรฐานทอมก. 2973-2562 ของ GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ต้องมีความคลาดเคลื่อน

ไม่เกิน $\pm 5\%$ จากมาตรฐานคือ 12 mm^2 ผลการทดสอบที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 4.384% และใกล้เคียงสุดอยู่ที่ 0.575% จึงสรุปได้ว่าการทดสอบหาขนาดหน้าตัดขวางทุกชิ้นทดสอบผ่านตามที่มีมาตรฐานกำหนด

4.2 การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว (Bond Strength)

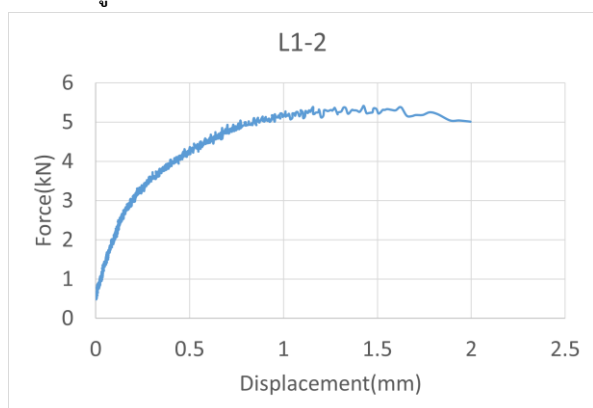
โดยทดสอบตามมาตรฐาน ACI 440.3R ดังรูปที่ 9 ซึ่งแต่ละตัวอย่างต้องมีความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวมากกว่า 8 MPa จึงจะเป็นไปตามที่มีมาตรฐาน มอก. 2973 – 2562 [2] กำหนด

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหน้าตัดขวางของแท่ง GFRP

No.	ความยาวชิ้นทดสอบ (cm)	ปริมาตรน้ำในภาชนะ V_0 (ml)	ปริมาตรน้ำที่มีชิ้นทดสอบ V_1 (ml)	พื้นที่หน้าตัดที่ได้จากการคำนวณ A (mm^2)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่หน้าตัดขวางระบุ (%)
L1	289	452.4	449	11.765	-1.961
L2	287.4	452.4	448.8	12.526	4.384
L3	288.6	452.4	449	11.781	-1.825
L4	287.3	452.4	448.9	12.182	1.52
L5	288.8	452.4	449	11.773	-1.893
L6	290	452.4	448.9	12.069	0.575
L7	292	452.4	448.8	12.329	2.74
L8	287.7	452.4	448.9	12.165	1.379
L9	288.2	452.4	449	11.797	-1.689
เฉลี่ย	288.8	452.4	448.9	12.043	-



รูปที่ 9 การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว



รูปที่ 10 ตัวอย่างผลการทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว

จากการทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวได้ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวมากที่สุดเท่ากับ 37.45 MPa และค่าต่ำสุดเท่ากับ 19.21 MPa โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.51 MPa ดังแสดงในตารางที่ 5 ทั้งนี้ผลการทดสอบชิ้นทดสอบทุกชิ้นผ่านมาตรฐาน โดยมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเลื่อนไถลของ GFRP และคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 10

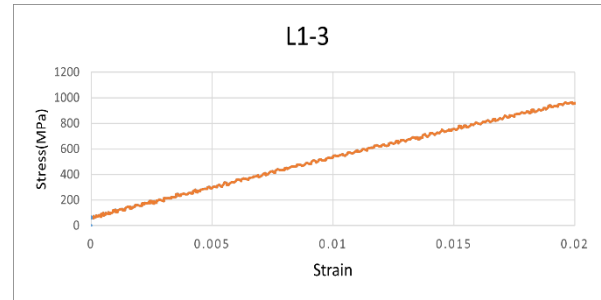
4.3 การทดสอบความต้านแรงดึงตามแนวยาว (Tensile Test) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ACI 440.3R [5]

จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงตามแนวยาวของ GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ตามมาตรฐาน (มอก. 2973-2562 ของ GFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm) ต้องมีค่าความต้านแรงดึงตามแนวยาวไม่น้อยกว่า 750 MPa ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดไม่น้อยกว่า 1.2% และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวยาวไม่น้อยกว่า 40 GPa ทั้งนี้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5 โดยมีตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์มีทั้งหมด 23 ตัวอย่าง คิดเป็น 95.8 เปอร์เซ็นต์ และมีตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ 1 ตัวอย่าง คิดเป็น 4.2 เปอร์เซ็นต์จากตัวอย่างทั้งหมด กำลังรับแรงดึงมากที่สุดคือ $1,029.45 \text{ MPa}$ ต่ำสุดเท่ากับ 651.12 MPa และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 850.14 MPa มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 2.49% ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.21% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.89% ชิ้นทดสอบทุกชิ้นผ่านตามที่มีมาตรฐานกำหนด มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวยาวสูงสุด 59.77 GPa ต่ำสุด 35.79 GPa และมีค่าเฉลี่ย 42.83 GPa สรุปได้ว่า GFRP มีความต้านทานแรงดึงตามแนวยาวสูง แต่จากกราฟทั้งหมดดัง

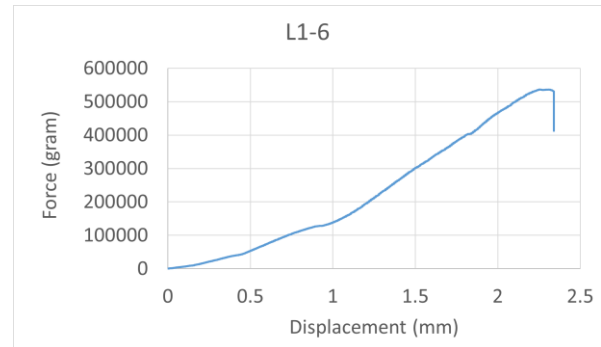
รูปที่ 12 จะพบว่า สังเกตจุดครากได้ยากหรือไม่มีการครากก่อนการแตกหักซึ่งสอดคล้องกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบนั้นมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับเหล็ก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 42.58 GPa และมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 1.91% ทั้งนี้ลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงดึงโดยส่วนใหญ่จะวิบัติตรงปลายของชิ้นทดสอบใกล้เคียงกับสมอยึดดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ลักษณะการวิบัติของการทดสอบความต้านแรงดึงตามแนวยาว



รูปที่ 12 ตัวอย่างผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงตามแนวยาว



รูปที่ 13 ตัวอย่างผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนตามขวาง

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว แรงดึงตามแนวยาว และ ความต้านทานแรงเฉือนตามขวางตามลำดับ

Test	Maximum	Minimum	Average	SD
Bond Strength (MPa)	37.45	19.21	27.51	4.68
Tensile Stress (MPa)	1029.45	651.12	850.14	87.85
Elastic Modulus (GPa)	59.77	35.79	42.83	5.88
Elongation (%)	2.49	1.21	1.89	0.29
Shear Strength (MPa)	235.02	151.41	204.41	15.21



รูปที่ 14 ลักษณะการวิบัติของการทดสอบความต้านทานแรงเฉือน

4.4 การทดสอบความต้านทานแรงเฉือนตามขวาง (Transverse Shear Strength)

จากการทดสอบตามมาตรฐาน ACI 440.3R [6] แต่ละตัวอย่างจะต้องมีความต้านทานแรงเฉือนตามขวางมากกว่า 160 MPa ตามที่

มาตรฐาน มอก. 2973 – 2562 กำหนด จากการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนตามขวางของ GFRP เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ต้องมีค่าความต้านทานแรงเฉือนไม่น้อยกว่า 160 MPa จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงเฉือนเท่ากับ 204.41 MPa โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) อยู่เท่ากับ 15.21 ซึ่งบ่งบอกว่าตัวอย่างทดสอบ GFRP มีค่าไม่แปรปรวนมาก จากการพิจารณาแรงและการเสียรูปของ GFRP ดังรูปที่ 13 มีลักษณะเชิงเส้นในช่วงแรก เมื่อให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นระยะการยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับแรงที่กระทำ จนถึงแรงกระทำสูงสุดชิ้นทดสอบเกิดการวิบัติภายใต้แรงเฉือน โดยการวิบัติส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณตรงกลางของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 14

4.5 การทดสอบความทนด่างในสารละลายที่มีค่า pH สูง (Alkali resistance in high pH solution)

จากการทดสอบตามมาตรฐาน ACI 440.3R [7] โดยจะทดสอบในสถานะมีแรงกระทำและไม่มีแรงกระทำ ซึ่งผลการทดลองแสดงในตาราง

ที่ 6 กรณีสภาวะที่มีแรงกระทำ ผลการทดสอบที่ได้มีดังนี้ ค่ากำลังรับแรงดึงมากที่สุดเท่ากับ 1356.99 MPa จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้มากกว่าข้อกำหนด โดยมีลักษณะการวิบัติโดยส่วนใหญ่บริเวณปลายของชิ้นทดสอบใกล้เคียงกับสมอ

กรณีสภาวะที่ไม่มีแรงกระทำ ผลการทดสอบที่ได้มีดังนี้ ค่ากำลังรับแรงดึงมากที่สุดเท่ากับ 1409.66 MPa จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้ค่ามากกว่ามาตรฐาน ลักษณะการวิบัติส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณปลายของชิ้นทดสอบ จากผลการทดสอบทั้งหมด ได้ข้อสรุปว่า

การแช่ชิ้นทดสอบ GFRP ในสารละลายที่มีค่า pH สูงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงและความแข็งแรงของแท่ง GFRP ลดลง โดยในสภาวะที่มีแรงกระทำค่ากำลังรับแรงดึงจะมีค่าน้อยกว่าในสภาวะที่ไม่มีแรงกระทำ โดยสรุปได้ว่าแรงกระทำมีผลต่อความแข็งแรงของ GFRP และยังมีปัจจัยอื่น เช่น อุณหภูมิ เนื่องจากการเตรียมชิ้นทดสอบต้องเตรียมในอุณหภูมิที่สูงเป็นเวลานาน โดยลักษณะการวิบัติจะเกิดที่ปลายทั้งสองข้างใกล้สมอยึดของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบความทนต่างในสารละลายที่มีค่า pH สูง

Item	With Load	SD (ส่วนเบี่ยงมาตรฐาน)	Without Load	SD (ส่วนเบี่ยงมาตรฐาน)
Specimen's Length (mm)	160	0	160	0
Max Load (kN)	10.22	0.35	9.3	2.63
Tensile Strength (MPa)	1280.25	64	733.3	203.86
Remaining (%)	170.7	8.5	97.8	27.18
Elongation (mm)	2.4	0.4	2.4	0.4

5. สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2973-2562 ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบ 5 ประเภท ได้แก่ การทดสอบหาขนาดหน้าตัดขวาง การทดสอบความต้านแรงดึงตามแนวยาว การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยว การทดสอบความต้านแรงเฉือนตามขวาง และการทดสอบความทนต่างในสารละลายที่มีค่า pH สูง ซึ่งการทดสอบพบว่า การทดสอบหาขนาดหน้าตัดขวางมีความแม่นยำแต่ต้องใช้ความละเอียดมากเนื่องจากปริมาณน้ำที่หายไปเพียงเล็กน้อยจะส่งผลต่อขนาดหน้าตัดที่ได้ วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสมีความต้านทานแรงดึงตามแนวยาวสูงเมื่อเทียบกับเหล็ก โดยมีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 850.14 MPa ความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวระหว่าง GFRP และคอนกรีตมาก โดยจะเกิดการวิบัติก่อนที่จะหลุดออกเสมอ มีค่าแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 27.51 MPa วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสมีความต้านแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกับเหล็ก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 204.41 MPa และการทดสอบความทนต่างในสารละลายที่มีค่า pH สูง พบว่ามีผลต่อแรงดึงและความแข็งแรงของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส โดยสภาวะมีแรงกระทำจะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงประลัยลดลง และปัจจัยอีกอย่างคืออุณหภูมิมีผลทำให้วัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาสมีกำลังรับแรงดึงลดลงเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงไฟเบอร์กลาส (GFRP) ตามมาตรฐานที่มอก.2973-2562 กำหนด สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และ

การสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Eyad Alsuhaibani, Mansour Alturki, Saleh M. Alogla, Omar Alawad, Mohammed K. Alkharisi, Elsaid Bayoumi and Ali Aldukail (2024). Compressive and Bonding Performance of GFRP-Reinforced Concrete Columns.
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2562). พอลิเมอร์เสริมเส้นใยสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตไม่อัดแรง (มอก.2973-2562).
- [3] Canadian Standards Association (2002). Design and Construction of Building Structures with Fiber-Reinforced Polymers (CAN/CSA-S806), pp. 69-72.
- [4] ASTM International (2021). Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars (ASTM D7205/D7205M).
- [5] American Concrete Institute (2012). Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures (ACI440.3R), pp. 6-9.
- [6] American Concrete Institute (2012). Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures (ACI440.3R), pp. 9.

[7] American Concrete Institute (2012). Guide Test
Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete
and Masonry Structures (ACI440.3R), pp. 11-13.