การเสริมกำลังแผ่นเหล็กด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยรอยต่อแบบไฮบริด

ศราวุธ เรืองนุช[1*] และปิยะ โชติกไกร[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
*sarawut.ruan@ku.th

บทคัดย่อ

การเสริมกำลังโครงสร้างเหล็กด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber-reinforced polymer, CFRP) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากวัสดุ CFRP มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมและการกัดกร่อนได้ดี การติดตั้งวัสดุ CFRP กับแผ่นเหล็กปกติจะใช้อีพ็อกซี่ในการยึดประสานระหว่างวัสดุ ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังจึงขึ้นอยู่กับกำลังการยึดเหนี่ยวในชั้นอีพ็อกซี่ที่รอยต่อระหว่างวัสดุ บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังโดยการใช้รอยต่อสลักเกลียวร่วมกับการยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซี่ในรอยต่อแบบไฮบริด ผลกระทบของขนาดและตำแหน่งการบีบรัดวัสดุ CFRP กับแผ่นเหล็กที่มีต่อกำลังการยึดเหนี่ยวและพฤติกรรมการรับแรงดึงของแผ่นเหล็กได้รับการศึกษาด้วยทดสอบตัวอย่างแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แบบต่อทาบ 2 ด้าน โดยติดตั้งแต่ละด้านด้วยวัสดุ CFRP จำนวน 1 ชั้น ตัวอย่างมีการบีบรัดจากรอยต่อสลักเกลียวด้วยระดับแรงบิดในสลักเกลียว 0, 20, 40, 60 และ 80 นิวตัน-เมตร และมีตำแหน่งการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การบีบรัดที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังการยึดเหนี่ยวของชั้นอีพ็อกซี่และกำลังรับแรงดึงของระบบเสริมกำลังเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อค่าแรงบิดของสลักเกลียวเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง ถึงแม้จะเพิ่มค่าแรงบิดมากขึ้น แต่กำลังรับดึงของระบบเสริมกำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก โดยประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังมีค่าสูงมากขึ้นตามจำนวนตำแหน่งรอยต่อสลักเกลียว สำหรับตำแหน่งรอยต่อสลักเกลียวภายในระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของระบบเสริมกำลัง

คำสำคัญ: การเสริมกำลัง คอมโพสิต พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน รอยต่อไฮบริด เหล็ก

Strengthening of Steel Plate using Carbon Fiber-Reinforced Polymer with Hybrid Bonded Joint

Sarawut Ruangnuch[1*] and Piya Chotickai[1]
[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
*sarawut.ruan@ku.th

Abstract

Strengthening steel structures with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) has attracted significant attention in recent decades due to the advantages of the strengthening technology, e.g., lightweight and high resistance to corrosion and severe environments. Typically, epoxy adhesive is used to bond the CFRP material to steel structures during the CFRP installation. Therefore, the effectiveness of the strengthening system depends on the bonding strength in the epoxy layer at the interface between the materials. This paper presents the efficiency improvement of the CFRP strengthening system by using a combination of bolt connection and epoxy adhesive to form a hybrid bonded joint. The effects of the bolted-connection location and clamping force magnitude on the bond strength and tensile behavior of steel plates strengthened with CFRP were investigated. The tensile test of the double-strap joint specimens strengthened with one CFRP layer on each side was carried out with various bolted-connection locations and clamping force levels. The specimens were clamped by applying various torque levels, i.e., 0, 20, 40, 60, and 80 N-m, at the bolt connections. Three different patterns of bolt connection positions were evaluated. The experimental results showed that an increase in the clamping force increased the bonding strength of the epoxy layer and the tensile strength of the reinforcement system. However, when the bolt torque value reached a certain point, the strength in the epoxy layer did not increase any further, even if the torque value increased. The bolt connection location also affected the tensile strength of the strengthening system. The strength effectively increased with the number of bolt connections, particularly for the locations within the effective bond length of the strengthening system.

Keywords: Strengthening, Composite, Carbon fiber-reinforced polymer, Hybrid joint, Steel

1. บทนำ

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) เป็นวัสดุทางวิศวกรรมชั้นสูงที่สังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมีในอุณหภูมิสูงโดยทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลคาร์บอนเป็นเส้นยาวและมีความแข็งแรงสูง เส้นใยคาร์บอนมีความสามารถรับแรงดึงได้สูงถึง 10-15 เท่าของเหล็กกล้าที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากัน จากข้อดีของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจึงทำให้นิยมนำมาเสริมกำลังโครงสร้างอย่างกว้างขวาง งานวิจัยที่เกี่ยวกับ CFRP ส่วนใหญ่จะพิจารณาการวิบัติของการยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซี่ เนื่องจากวัสดุ CFRP จะติดตั้งด้วยกาวประสานอีพ็อกซี่ การเตรียมผิวระหว่างแผ่นเหล็กกับกาวประสานและจำนวนชั้นของแผ่น CFRP ส่งผลต่อกำลังรับแรงดึงของระบบการเสริมอย่างมีนัยสำคัญ

[1] ความหนาของชั้นกาวประสานจะมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการวิบัติ เมื่อใช้ความหนากาวน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ในการเสริมกำลังชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก การวิบัติมีแนวโน้มจะเกิดขึ้นภายในชั้นกาวประสาน แต่เมื่อใช้ความหนากาวประสานมากกว่า 2 มิลลิเมตร การวิบัติมีแนวโน้มที่จะเกิดจากการแยกชั้น (delamination) ของแผ่น CFRP ซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่ควรหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ [2] ความหนาของชั้นกาวส่งผลต่อรูปแบบการไถลของพันธะ ค่าเริ่มต้นและค่าสูงสุดของการไถลเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นกาวที่เพิ่มขึ้น [3] โดยความเครียดตามแนวกลางชั้นกาวสามารถทำนายรูปแบบการวิบัติพันธะในชั้นกาวของตัวอย่างแบบต่อทาบ 2 ด้าน (double-strap joint) ได้อย่างเหมาะสม [4] นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่พิจารณาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังด้วยรอยต่อสลักเกลียว การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้น CFRP ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึงของชิ้นตัวอย่างซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์เชิงเส้น การเสียรูปก็จะลดลงตามจำนวนชั้นของ CFRP และการยึดด้วยแหวนสลักเกลียวบนวัสดุ CFRP โดยการเพิ่มระดับแรงบิดที่สลักเกลียวมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงของชิ้นงาน [5] เทคนิคการเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP รอยต่อสลักเกลียวได้นำมาใช้ร่วมกับการยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซี่ในรอยต่อแบบไฮบริดของระบบเสริมกำลัง (HB-FRP) ของตัวอย่างแผ่นเหล็กเสริมกำลังด้วยวัสดุ CFRP แบบต่อทาบ 2 ด้าน ที่ติดตั้งแต่ละด้านด้วยวัสดุ CFRP จำนวน 1 ชั้น การบีบรัดด้วยสลักเกลียวบนวัสดุ CFRP สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึงได้ถึง 71% ในการทดลอง ซึ่งบ่งชี้ว่าเทคนิค HB-FRP สามารถปรับปรุงผลการเสริมความแข็งแรงของการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนได้ แต่เมื่อระดับแรงบิดมากขึ้นจาก 10 นิวตัน-เมตร เป็น 20 นิวตัน-เมตร การรับแรงดึงเพิ่มขึ้นเพียง 5.3 กิโลนิวตัน คิดเป็น 12% [6] อย่างไรก็ดี การศึกษาวิจัยในปัจจุบันยังขาดข้อมูลผลของรูปแบบตำแหน่งการติดตั้งและขนาดแรงบิดในสลักเกลียวที่มีต่อกำลังรับแรงดึงของระบบเสริมกำลัง การศึกษาวิจัยจึงนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังของรอยต่อแบบไฮบริดที่มีรูปแบบตำแหน่งการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ และมีขนาดแรงบิดตั้งแต่ 20 นิวตัน-เมตร ถึง 80 นิวตัน-เมตร โดยใช้การทดสอบแรงดึงของตัวอย่างแบบต่อทาบ 2 ด้าน

2. วิธีการศึกษา

การศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุ CFRP ประเภทลามิเนต (laminate) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเป็นแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสังเคราะห์ (Sika Carbodur S512) ที่มีความกว้าง 50 มิลลิเมตร และความหนา 1.2 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติตามที่ระบุโดยผู้ผลิต [7] ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วน Sikadur®-30 เป็นกาวอีพ็อกซี่ทิโซทรอปิก ชนิด 2 ส่วนประกอบสำหรับยึดติดงานโครงสร้างซึ่งเกิดจากการรวมกันของอีพ็อกซี่เรซินและสารเพิ่มเติมพิเศษ เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิระหว่าง +8 °C ถึง +35 °C อัตราส่วนการผสมของอีพ็อกซี่โดยน้ำหนักคือ ส่วนประกอบ A : ส่วนประกอบ B เท่ากับ 3 : 1

แผ่นเหล็ก ที่ใช้ในการทดสอบหนา 6 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร เกรดวัสดุเหล็ก SS400 มาตรฐาน JIS G3101 มีความหนาแน่น 7,860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น กำลังคราก และกำลังรับแรงดึงของเหล็กดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับเหล็กโครงสร้างเกรด SS400 คุณสมบัติของวัสดุที่รายงานโดยผู้ผลิตถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้เพราะวิศวกรต้องใช้ค่าเหล่านั้นในการออกแบบ

2.2 การเตรียมตัวอย่างและรูปแบบการทดสอบ

การเตรียมผิวของแผ่นเหล็กใช้วิธีการพ่นทราย และนำแผ่น CFRP ยาว 300 มิลลิเมตร หนา 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่นประกบเข้ากับแต่ละด้านของแผ่นเหล็กขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 280 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ด้วยกาวอีพ็อกซี่ โดยกำหนดให้ช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็กมีขนาดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร จำนวน 28 ตัวอย่าง ทำการบ่มในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ปลายด้านหนึ่งของตัวอย่างติดตั้งด้วยรอยต่อสลักเกลียวจำนวน 4 ชุด โดยใช้ระดับแรงบิดในสลักเกลียว 80 นิวตัน-

เมตร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติในปลายด้านนี้ และควบคุมให้เกิดการวิบัติในอีกด้านหนึ่งระหว่างการทดสอบแรงดึงของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของแผ่นเหล็ก แผ่น CFRP และกาวอีพ็อกซี่ [7]

วัสดุ	โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	กำลังคราก (MPa)	กำลังรับแรงดึง (MPa)	ระยะยืด
เหล็กแผ่น	200,000	205-245	400 - 510	17%
แผ่น CFRP	165,000	N/A	2,900	1.8%
กาวอีพ็อกซี่	4,482	N/A	24.8	1%

การศึกษาทำการทดสอบตัวอย่างแบบต่อทาบ 2 ด้าน ที่มีตำแหน่งการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวและระดับแรงบิดแตกต่างกันจำนวน 14 รูปแบบ แต่ละรูปแบบทำการทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 1 ตัวอย่าง SP เป็นตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียว ตัวอย่างควบคุมตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตั้งชื่อเป็น SP-1 และ SP-2 ตามลำดับ สำหรับรูปแบบอื่นมีการตั้งชื่อตัวอย่างที่ 1 และ 2 เป็น SP-XXX-XX-1 และ SP-XXX-XX-2 ตามลำดับ ตัวอย่าง SP-150-80 เป็นตัวอย่างที่ติดตั้งสลักเกลียวด้วยระดับแรงบิด 80 นิวตัน-เมตร ที่ตำแหน่ง 150 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่าง SP-45 ติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะเริ่มเกิดการวิบัติในตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่าง SP-90 ติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวห่างจากกึ่งกลาง 75 มิลลิเมตร การติดตั้งสลักเกลียวในตัวอย่างนี้มีระยะการติดตั้งห่างจากตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะเริ่มเกิดการวิบัติ แต่ยังอยู่ภายในระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของระบบเสริมกำลัง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 88 มิลลิเมตร [2] ตัวอย่าง SP-135 ติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวที่ตำแหน่ง 0 และ 75 มิลลิเมตรจากกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่าง SP-45, SP-90 และ SP-135 มีการติดตั้งสลักเกลียวที่ตำแหน่ง 150 มิลลิเมตร จากกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบด้วยระดับแรงบิด 80 นิวตัน-เมตร เพื่อควบคุมให้การวิบัติเกิดจากตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นทดสอบ โดยมีระดับแรงบิดของสลักเกลียวที่ตำแหน่งด้านใน (ระยะ 0 และ 75 มิลลิเมตร) เท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 นิวตัน-เมตร เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการติดตั้งและระดับแรงบิดในสลักเกลียวที่มีต่อกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 2 รูปแบบการทดสอบ

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ตำแหน่งรอยต่อสลักเกลียว (มิลลิเมตร)	แรงบิดในสลักเกลียว (นิวตัน-เมตร)	จำนวนตัวอย่างทดสอบ
1	SP	-	-	2
2	SP-150-80	150	80	2
3	SP-45-20	0	20	2
4	SP-45-40	0	40	2
5	SP-45-60	0	60	2
6	SP-45-80	0	80	2
7	SP-90-20	75	20	2
8	SP-90-40	75	40	2
9	SP-90-60	75	60	2
10	SP-90-80	75	80	2

ตารางที่ 2 รูปแบบการทดสอบ(ต่อ)

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ตำแหน่งรอยต่อสลักเกลียว (มิลลิเมตร)	แรงบิดในสลักเกลียว (นิวตัน-เมตร)	จำนวนตัวอย่างทดสอบ
11	SP-135-20	0, 75	20	2
12	SP-135-40	0, 75	40	2
13	SP-135-60	0, 75	60	2
14	SP-135-80	0, 75	80	2
6	SP-45-80	0	80	2
7	SP-90-20	75	20	2
8	SP-90-40	75	40	2
9	SP-90-60	75	60	2
10	SP-90-80	75	80	2
11	SP-135-20	0, 75	20	2
12	SP-135-40	0, 75	40	2
13	SP-135-60	0, 75	60	2
14	SP-135-80	0, 75	80	2

(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

ภาพที่ 1 รูปแบบการทดสอบ (ก) ตัวอย่างควบคุม, (ข) ตัวอย่าง SP-150, (ค) ตัวอย่าง SP-45, (ง) ตัวอย่าง SP-90 และ (จ) ตัวอย่าง SP-135

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

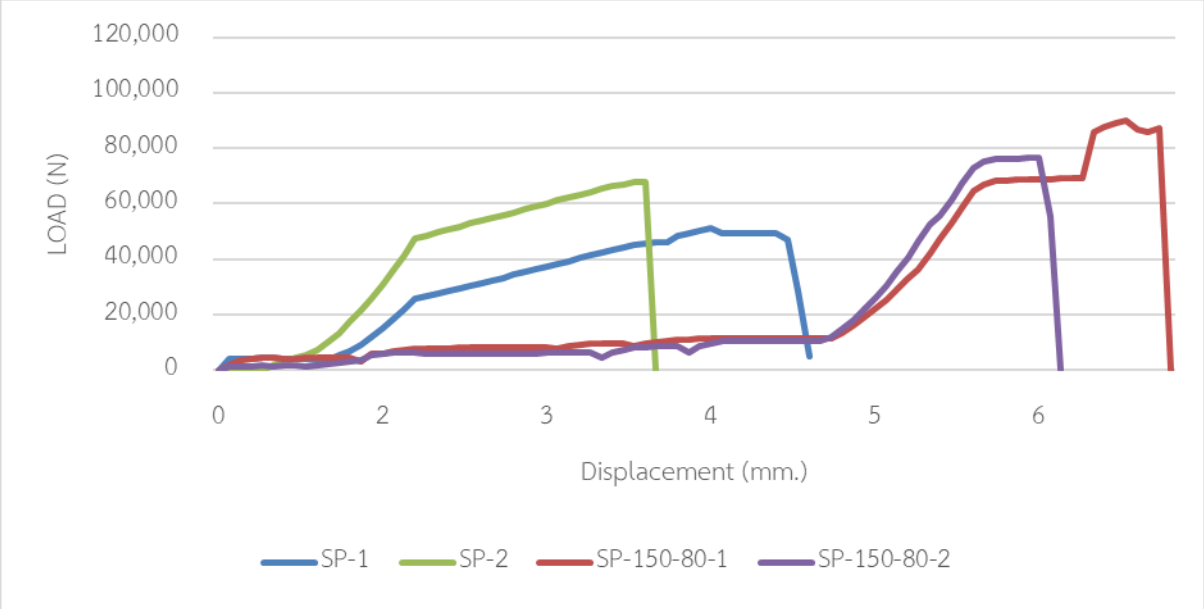
ตัวอย่างทดสอบได้รับการทดสอบกำลังรับแรงดึงด้วยเครื่อง universal testing machine ด้วยอัตราการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที จนกว่าแผ่น CFRP กับแผ่นเหล็กจะแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

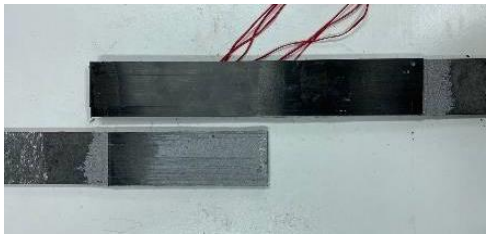
ผลการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้

3.1 ผลของการติดตั้งสลักเกลียวที่ปลายแผ่น (ตัวอย่าง SP-150-80)

ผลการทดสอบตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่มีการบีบรัดสลักเกลียวที่ปลายด้วยระดับแรงบิด 80 นิวตัน-เมตร แสดงตามภาพที่ 2 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 ตัวอย่างควบคุมทดสอบได้กำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 59.90 กิโลนิวตัน และเมื่อมีการบีบรัดด้วยสลักเกลียวที่ปลายด้วยระดับแรงบิด 80 นิวตัน-เมตร จะได้ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยสูงขึ้นที่ 83.27 กิโลนิวตัน คิดเป็น 39% ของตัวอย่างควบคุม กำลังรับแรงดึงที่สูงขึ้นนี้เกิดจากผลของแรงเสียดทานที่บริเวณรอยต่อสลักเกลียวในการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของระบบเสริมกำลัง [8] พฤติกรรมการรับแรงดึงของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่มีการบีบรัดสลักเกลียวที่ปลายสามารถดูได้จากกราฟแสดงในภาพที่ 2 และการวิบัติของตัวอย่างควบคุมและ SP-150-80 เกิดการหลุดออกของแผ่น CFRP ในชั้นกาวประสาน ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง SP และตัวอย่าง SP-150-80



ภาพที่ 3 การวิบัติของตัวอย่าง SP และ SP-180-80

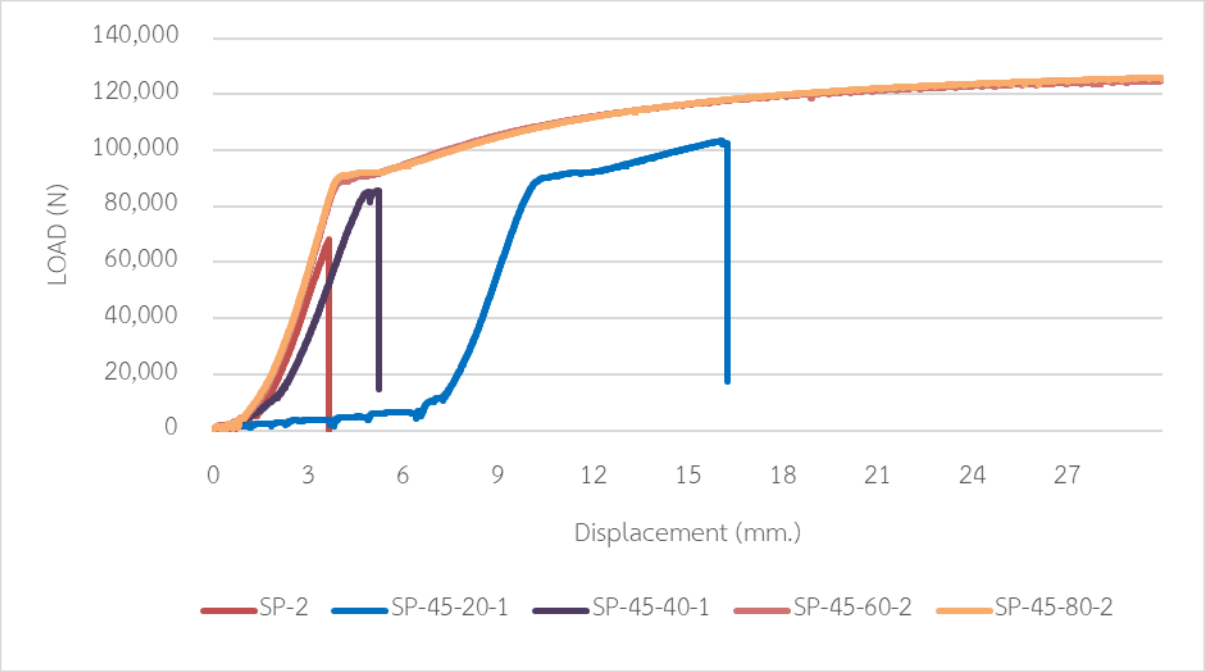
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบ

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (Pult) (kN)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังรับแรงดึง (kN)	การเพิ่มของกำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (%)	รูปแบบการวิบัติ*
1	SP	59.90	8.20	-	C
2	SP-150-80	83.27	6.76	39.03	C
3	SP-45-20	102.61	0.67	71.32	C
4	SP-45-40	85.63	0.00	42.97	C
5	SP-45-60	107.24	18.11	79.05	C, CR
6	SP-45-80	118.09	8.92	97.16	C, D
7	SP-90-20	87.71	5.00	46.43	C
8	SP-90-40	106.15	10.48	77.23	C
9	SP-90-60	92.05	3.96	53.68	C, CR
10	SP-90-80	104.35	20.11	74.17	C
11	SP-135-20	104.74	0.00	74.87	C
12	SP-135-40	113.68	1.18	89.80	C
13	SP-135-60	116.59	1.49	94.80	C, CR
14	SP-135-80	119.19	1.03	99.00	C

*C = Cohesive failure, CR = CFRP Crack, D = Debonding between steel and adhesive

3.2 ผลการติดตั้งสลักเกลียวที่ตำแหน่งเริ่มเกิดการวิบัติ (ตัวอย่าง SP-45)

ตัวอย่าง SP-45-80 ทดสอบได้กำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 118.09 กิโลนิวตัน และเมื่อมีการบีบรัดด้วยสลักเกลียวที่ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการวิบัติ (debond) ในตัวอย่างทดสอบด้วยระดับแรงบิดตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 นิวตัน-เมตร จะได้ค่ากำลังรับแรงดึงเริ่มต้น 102.61 กิโลนิวตัน คิดเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงดึงประมาณ 71.32% ของตัวอย่างควบคุม จนได้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ 118.09 กิโลนิวตัน ที่ระดับแรงบิดสลักเกลียว 80 นิวตัน-เมตร ตามแสดงในตารางที่ 3 พฤติกรรมการรับแรงดึงของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่มีการบีบรัดสลักเกลียวตามรูปแบบ SP-45 สามารถดูได้จากกราฟ แสดงในภาพที่ 4 และการวิบัติของตัวอย่างรูปแบบนี้เกิดการหลุดออกของแผ่น CFRP ในชั้นกาวประสาน แผ่น CFRP มีการฉีกขาดตามแนวยาวเมื่อระดับแรงบิดสูงขึ้น และมีการหลุดออกของกาวประสานระหว่างแผ่นเหล็กกับกาว เมื่อแรงบิดสูงขึ้น ดังแสดงการวิบัติในภาพที่ 5 นอกจากนี้ เมื่อระดับแรงบิดที่สลักเกลียวเพิ่มขึ้นจาก 20 นิวตัน-เมตร เป็น 80 นิวตัน-เมตร ในรอยต่อสลักเกลียวรูปแบบนี้ ค่ากำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น 71.32% ถึง 97.16% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้ระดับแรงบิด 20 นิวตัน-เมตร จะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดึงได้อย่างมาก โดยอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงดึงจะน้อยลงสำหรับขนาดแรงบิดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก การบีบรัดของรอยต่อสลักเกลียวที่ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการวิบัติจะช่วยต้านทานหน่วยแรงดึงตั้งฉาก (normal tensile stress) ที่ตำแหน่งนี้ และป้องกันการวิบัติ (debond) ซึ่งอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงดึงจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของการบีบรัดของรอยต่อสลักเกลียวสูงกว่าขนาดของหน่วยแรงดึงตั้งฉาก [9]



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง SP และตัวอย่าง SP-45

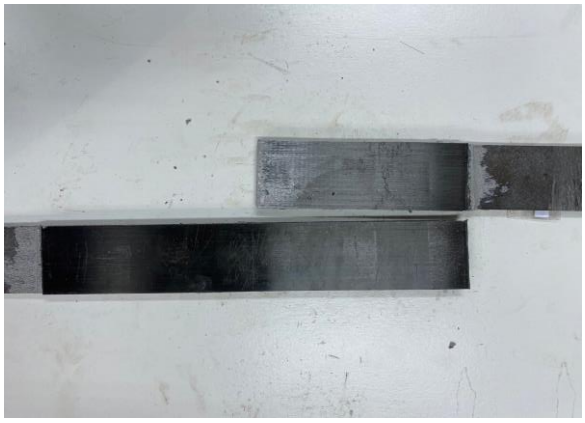
ภาพที่ 5 การหลุดออกระหว่างแผ่นเหล็กกับกาวประสานในตัวอย่าง SP-45-80

3.3 ผลการติดตั้งสลักเกลียวห่างจากตำแหน่งเริ่มเกิดการวิบัติ (ตัวอย่าง SP-90)

ตัวอย่าง SP-90-80 ทดสอบได้กำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 104.32 กิโลนิวตัน และเมื่อมีการบีบรัดด้วยสลักเกลียวด้วยระดับแรงบิดตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 นิวตัน-เมตร จะได้ค่ากำลังรับแรงดึงเริ่มต้น 87.71 กิโลนิวตัน คิดเป็นประมาณ 46.43% ของตัวอย่างควบคุมจนได้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ 104.35 กิโลนิวตัน ที่ระดับแรงบิดสลักเกลียว 80 นิวตัน-เมตร ตามแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นว่าสำหรับการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวรูปแบบนี้ เมื่อระดับแรงบิดในสลักเกลียวเกิน 40 นิวตัน-เมตร จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงไม่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การวิบัติของตัวอย่างรูปแบบนี้เกิดการหลุดออกของแผ่น CFRP ในชั้นกาวประสาน และแผ่น CFRP มีการฉีกขาดตามแนวยาวเมื่อระดับแรงบิดสูงขึ้นเช่นเดียวกับตัวอย่าง SP-45 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงดึงของตัวอย่าง SP-45 และ SP-90 จะพบว่า ตัวอย่าง SP-45 มีแนวโน้มในการให้ค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าตัวอย่าง SP-90 ที่แรงบิดระดับต่าง ๆ ทั้งนี้ เนื่องจากการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวห่างจากตำแหน่งที่เริ่มเกิดการวิบัติ (debond) จะไม่ช่วยในการต้านทานหน่วยแรงดึงตั้งฉากที่เกิดขึ้นในชั้นอีพ็อกซี่ และการมีขนาดรอยแตกเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นในชั้นอีพ็อกซี่ จะทำให้รอยแตกสามารถขยายผ่านรอยต่อสลักเกลียวได้ง่ายขึ้น [6] ซึ่งจะส่งผลในการลดประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังแบบไฮบริด

3.4 ผลการติดตั้งสลักเกลียวที่ตำแหน่งเริ่มเกิดการวิบัติและห่างจากตำแหน่งเริ่มเกิดการวิบัติ (ตัวอย่าง SP-135)

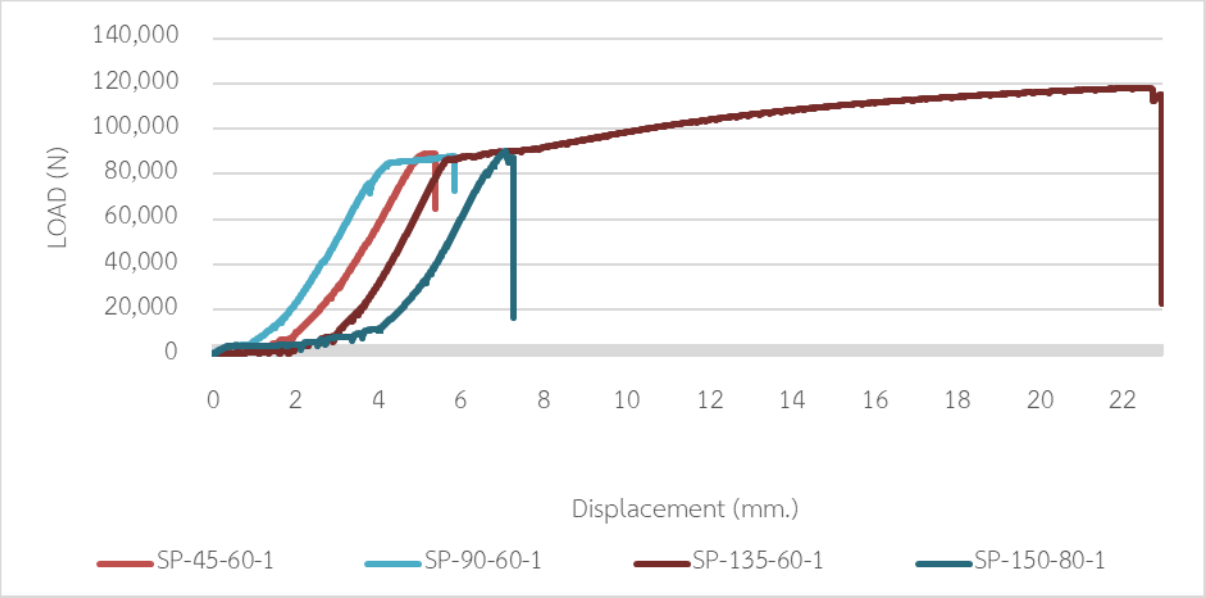
ผลการทดสอบตัวอย่างที่มีการบีบรัดด้วยสลักเกลียวตามรูปแบบ SP-135 ได้กำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 119.19 กิโลนิวตัน เมื่อมีการบีบรัดด้วยสลักเกลียวด้วยระดับแรงบิดตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 นิวตัน-เมตร จะได้ค่ากำลังรับแรงดึงเริ่มต้น 104.74 กิโลนิวตัน คิดเป็นประมาณ 74.87% ของตัวอย่างควบคุม จนได้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ 119.19 กิโลนิวตัน ที่ระดับแรงบิดสลักเกลียว 80 นิวตันเมตร ตามแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นว่าในรูปแบบ SP-135 เมื่อค่าการบีบรัดด้วยสลักเกลียวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มว่ากำลังรับแรงดึงจะไม่เพิ่มขึ้นตามค่าการบีบรัดของสลักเกลียวเมื่อถึงค่าใดค่าหนึ่ง และการวิบัติของตัวอย่างรูปแบบนี้ เกิดการหลุดออกของแผ่น CFRP ในชั้นกาวประสาน และแผ่น CFRP มีการฉีกขาดตามแนวยาวเมื่อระดับแรงบิดที่ 60 นิวตันเมตร ดังแสดงในภาพที่ 6 การวิบัติรูปแบบนี้คาดว่าเกิดจากผลของการบีบรัดที่สูงของรอยต่อสลักเกลียวทำให้เกิดการเสียรูปของแผ่น CFRP และทำให้การวิบัติมีการเปลี่ยนตำแหน่งจากชั้นอีพ็อกซี่มาเป็นการวิบัติในวัสดุแผ่น CFRP



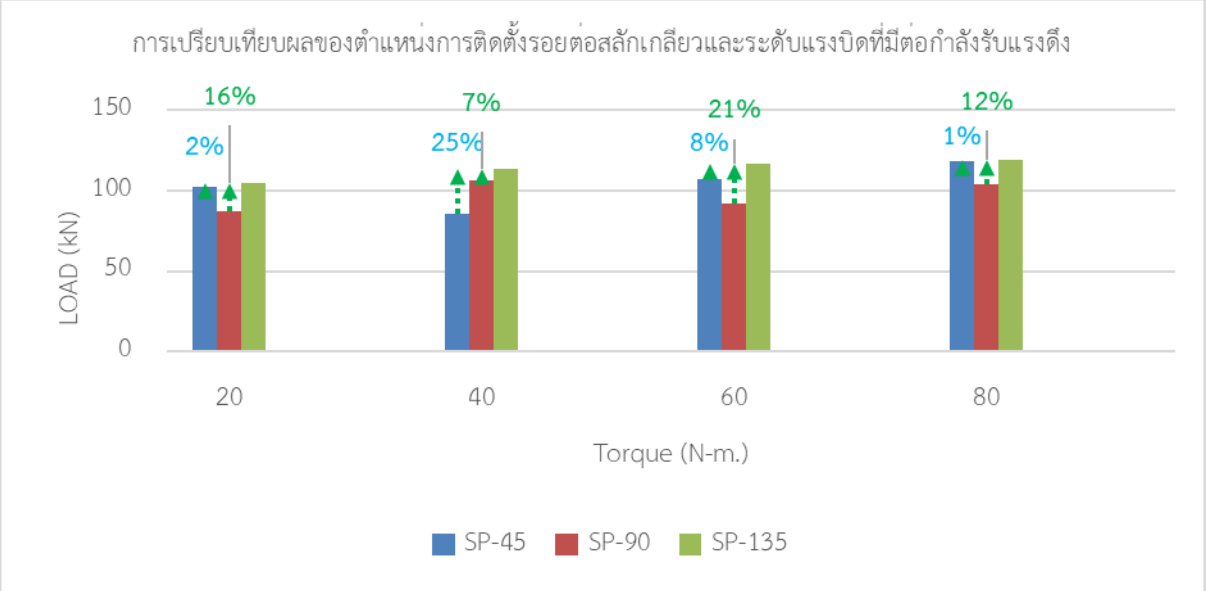
ภาพที่ 6 การวิบัติของตัวอย่าง SP-135-60

3.5 ผลของรูปแบบการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวและระดับแรงบิดในสลักเกลียว

ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับการเสียรูปที่ค่าการบีบรัดด้วยสลักเกลียวที่ 60 นิวตัน-เมตร สำหรับการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียว 3 รูปแบบ เมื่อพิจารณาที่จุดที่กำลังรับแรงดึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว จะเห็นว่ารูปแบบ SP-45-60 จะมีค่าการเสียรูปของการเสริมโครงสร้างมีค่าน้อยที่สุด ตามด้วยรูปแบบ SP-90-60 และรูปแบบที่มีการบีบรัดด้วยสลักเกลียวที่ปลาย (SP-150-80) และรูปแบบ SP-135-60 มีค่าการเสียรูปของการเสริมโครงสร้างก่อนจะวิบัติมากที่สุด 23 มิลลิเมตร นอกจากนี้ทั้ง 3 รูปแบบมีค่ากำลังรับแรงดึงใกล้เคียงกันก่อนการวิบัติแบบสมบูรณ์



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบพฤติกรรมการรับแรงดึงตัวอย่างแบบต่อทาบ 2 ด้าน ของตัวอย่างที่ 1 ที่มีรูปแบบการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวแตกต่างกันด้วยค่าแรงบิด 60 นิวตัน-เมตร



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบผลของตำแหน่งการติดตั้งรอยต่อสลักเกลียวและระดับแรงบิดที่มีต่อกำลังรับแรงดึง

ผลของการศึกษาและเปรียบเทียบการบีบรัดด้วยสลักเกลียวทั้ง 3 รูปแบบ (ภาพที่ 8 และตารางที่ 3) พบว่า สำหรับรูปแบบ SP-45 และรูปแบบ SP-135 เมื่อค่าขันแน่นการบีบรัดด้วยสลักเกลียวมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงดึงของการเสริมกำลังเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่จะเพิ่มขึ้นประมาณ 2-10% และเมื่อเทียบค่าแรงบิดที่ 60 นิวตัน-เมตร และ 80 นิวตัน-เมตร มีแนวโน้มว่าเมื่อค่าขันแน่นการบีบรัดด้วยสลักเกลียวมากขึ้นไปเรื่อย ๆ ถึงค่าใดค่าหนึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงของระบบเสริมโครงสร้างไม่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนรูปแบบ SP-90 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อค่าขันแน่นบีบรัดด้วยสลักเกลียวมากขึ้นเกินระดับแรงบิด 40 นิวตันเมตร ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงลดลง หรือคงที่ไม่เพิ่มขึ้นตามค่าแรงบิดที่สลักเกลียว นอกจากนี้เมื่อเทียบการบีบรัดด้วยสลักเกลียวทั้ง 3 รูปแบบ ที่ระดับแรงบิดที่ 40 นิวตัน-เมตร รูปแบบ SP-135 มีค่ากำลังรับแรงดึงมากกว่ารูปแบบ SP-45 คิดเป็น 25% และมีค่ากำลังรับแรงดึงมากกว่ารูปแบบ SP-90 คิดเป็น 7% ตามแสดงในภาพที่ 8

4. ผลสรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาสรุปว่ารูปแบบทั้ง 3 สามารถใช้ในการเสริมโครงสร้างเหล็กได้ โดยรูปแบบที่ดีที่สุดของการทดสอบนี้ คือ รูปแบบ SP-135 โดยที่มีระยะจับยึดสลักเกลียวที่ปลายแผ่น CFRP ที่ตำแหน่งเริ่มเกิดการวิบัติและภายในระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผล โดยให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 119.19 กิโลนิวตัน คิดเป็น 99% ของตัวอย่างควบคุมที่ได้ไม่การเสริมกำลังด้วยการบีบรัดด้วยสลักเกลียว และมีการเสียรูปได้มากกว่าทุกรูปแบบ นอกจากนี้ค่าการบีบรัดสลักเกลียวมากขึ้น มีแนวโน้มจะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงไม่เพิ่มตามหากถึงค่าใดค่าหนึ่ง เนื่องจากค่าแรงบิดในสลักเกลียวที่ 60 และ 80 นิวตัน-เมตร ค่ากำลังรับแรงดึงของระบบเสริมโครงสร้างเพิ่มขึ้นต่างกันเพียงเล็กน้อยประมาณ 2-10% เท่านั้น

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นที่มีกำลังรับน้ำหนักสูง รอยต่อแบบไฮบริดที่ใช้ในการศึกษาสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึงของระบบเสริมกำลังและทำให้ใช้งานวัสดุได้เต็มประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น ดังรูปแบบการเสริมกำลังแผ่นเหล็ก SP-135 ของการทดสอบ ซึ่งรูปแบบที่ดีที่สุดในการเสริมกำลังแผ่นเหล็กของการศึกษานี้ รอยต่อแบบไฮบริดสามารถนำไปประยุกต์ในใช้การเสริมกำลังโครงสร้างเหล็กชิ้นส่วนที่รับแรงดึงเป็นหลักถ้าหากพื้นที่ในการติดกาวประสาน CFRP ไม่เพียงพอสามารถใช้รอยต่อยึดด้วยสลักเกลียวเข้ามาช่วยในการเสริมกำลัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเสริมกำลังได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ศรา รีโนเวชั่น แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ และขอขอบคุณ นายธีรภัทร กำธร, คุณนภัสวรรณ อนุรักษ์สินทวี และคุณพรพรรณ สุขวิจิตร ที่ให้ความช่วยเหลือระหว่างการทดสอบ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Penagos-Sanchéz, D.M., Légeron, F., Demers, M., Langlois, S. (2015). *Strengthening of the Net of Steel Elements under Tensile Loads with Bonded CFRP Strips*, 19(6), 1-11.

[2] Xia, S.H, Teng, J.G. (2005). *Behavior of FRP-to-steel bonded joints,* Proceedings of International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures, 411-418.

[3] Fawzia, S., Zhao, X., Al-Mahaidi, R. (2010). *Bond-slip models for double strap joint strengthened by CFRP,* Composite Structure 92, 2137-2145.

[4] Razavi, S.M.J., Ayatollahi, M.R., Majidi, H.R., Berto, F. (2018). *A strain-based criterion for failure load prediction of steel/CFRP double strap joints*, Composite Structure 206, 116-123.

[5] Wang, Z.Y., Zhang, N., Wang, Q.Y. (2016). *Tensile behavior of open-hole and bolted steel plates reinforced by CFRP strips,* Composites Part B 100, 101-113

[6] Zhou, Y., Jiang, K., Gou, M., Li, N., Zhu, P., Wang, D., Qu, Z. (2014), *Prediction of debonding strength of tensile hybrid bonded joints using fracture mechanics,* Materials and Design 61 (2014) 87–100

[7] Sika (Thailand) Limited.https://tha.sika.com/th/construction/structural-strengthening/carbon-fiber-reinforcedpolymercfrp.html

[8] Wang, H.T., Wu, G., Dai, Y.T., He, X.Y. (2016), *Experimental Study on Bond Behavior between CFRP Plates and Steel Substrates Using Digital Image Correlation,* American Society of Civil Engineers.

[9] Chen, C., Wang, X., Sui, L., Xing, F., Chen, X., Zhou, Y. (2018) *Influence of FRP thickness and confining effect on flexural performance of HB-strengthened RC beams*, Composites Part B 161, 55-67.