



พฤติกรรมของคานเหล็กปีกกว้างเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้การทดสอบ
การรับแรงดัด

BEHAVIOR OF WIDE-FLANGE STEEL BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP PLATES
UNDER BENDING TEST

นรวิษณุ หมั่นกิจ¹, สหสววรรษ เนื้อขาว¹, สายันต์ ศิริมนตรี¹ และชนะชัย ทองโถม^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: tchanach@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กปีกกว้างเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้การทดสอบการรับแรงดัด จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ภายใต้แรงดัดสี่ตำแหน่ง (Four-point bending) ความยาวช่วงของคานทดสอบ 1800 มิลลิเมตร ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมสมอยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และการเสริมแผ่นค้ำด้านข้าง (Steel Stiffener) เพื่อควบคุมรูปแบบการวิบัติของคาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ที่ปีกล่างของคานเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก รวมถึงลดการเสียรูปของคานในช่วงอีลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เพียงอย่างเดียวทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกบนหรือแผ่นเอวก่อนการเสียรูปในช่วงพลาสติก การเสริมแผ่นค้ำด้านข้างสามารถลดการโก่งเดาะเฉพาะที่และช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ขณะที่การเสริมสมอยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนช่วยป้องกันการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ส่งผลให้คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: พฤติกรรมการรับแรงดัด; พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน; เสริมกำลัง; คานเหล็กปีกกว้าง

ABSTRACT

This study investigates behavior of wide-flange steel beams strengthened with CFRP plates under bending test. A total of six beam specimens were tested under four-point bending. The span length of the test beams was 1800 mm. The variables considered in this study included the number of CFRP layers, the use of end anchorage for the CFRP plates, and the installation of steel stiffeners to control the failure modes of the beams. The test results show that strengthening the bottom flange of the beam with CFRP plates significantly increases the load-carrying capacity and effectively reduces beam deflection in the elastic range. However, the use of CFRP plates alone may lead to local buckling of the top flange or the web before the beam reaches the

plastic deformation stage. The installation of steel stiffeners can reduce local buckling and further improve the load-carrying capacity. Meanwhile, the use of end anchorage for the CFRP plates helps prevent premature debonding, resulting in significant improvements in both the load-carrying capacity and the ductility of the beams.

Keywords: Flexural behavior; Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP); Strengthening; Wide-flange steel beam

1. บทนำ

ในปัจจุบันการเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนขององค์อาคาร โครงสร้างเหล็กหรือสะพานเหล็กได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงของโครงสร้าง เช่น การเสื่อมสภาพของโครงสร้าง, ความผิดพลาดจากการก่อสร้าง [1, 2] อีกทั้งยังอาจประสบปัญหาการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อน ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงและระดับความปลอดภัยของโครงสร้างลดลง ซึ่งการรื้อถอนและก่อสร้างโครงสร้างใหม่มีต้นทุนสูง ใช้เวลานาน ดังนั้น แนวทางการเสริมกำลังโครงสร้างจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงและเสถียรภาพในการติดตั้งและทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

คานเหล็กที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate : CFRP Plate) ซึ่งยึดติดกับปีกคานด้านรับแรงดึง [3] พบว่าเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตได้ศึกษาการยึดติดด้วยกาวและมีความยาวไม่เต็มช่วงคาน [4] พบว่าการมีตำหนิจากการยึดติดเริ่มต้นระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและผิวเหล็กสามารถเปลี่ยนแปลงการวิบัติของคานจากการขาดของเส้นใยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (fiber rupture) เป็นการหลุดลอกของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ในช่วงกลาง (intermediate plate debonding) และปัญหาหลักของการเสริมกำลังของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมักพบว่าการหลุดลอกของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่เร็วเกินไป ดังนั้นจึงมีการศึกษาการใช้สลักเกลียวเป็นระบบสมอยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน [5] พบว่าช่วยลดความเครียดในแผ่น CFRP และลดการโก่งตัวในแนวดิ่งและลดการโก่งเคาะบิดทางด้านข้าง นอกจากนี้พบว่าการใช้ระยะสลักเกลียวที่ถี่ขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงของบริเวณปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและลดความเข้มข้นของความเค้นที่จุดวิกฤตทำให้การวิบัติของคานเปลี่ยนจากการหลุดลอกที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (end-debonding) เปลี่ยนเป็นการหลุดลอกของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนในช่วงกลาง (intermediate plate debonding) และอีกหนึ่งวิธีการเสริมกำลังคานเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนร่วมกับระบบสมอยึดที่ปลายแผ่น (End-anchored) โดยใช้ผ้าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP Sheet) [6] พบว่า ส่งผลให้เกิดการหลุดลอก (debonding) ได้ช้ากว่าการไม่ติดตั้งสมอยึด นอกจากนี้พบว่าความยาวของสมอยึดมีผลอย่างมากต่อการลดความเค้นที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาตัวแปรเพียงจำนวนชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนหรือสมอยึดที่ปลายแผ่น แต่ยังขาดการศึกษาที่พิจารณาผลร่วมกันของตัวแปรพร้อมกัน ได้แก่ จำนวนชั้นของผ้าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, แผ่นก้ำด้านข้าง (Stiffener), สมอยึดปลายแผ่น (End Anchor), แผ่นเหล็กที่ปีกบน (Steel Plate) บนคานเหล็กปีกกว้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานเหล็กปีกกว้างที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ การเสริมแผ่นก้ำด้านข้าง, จำนวนชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และการเสริมสมอยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพื่อป้องกันการหลุดลอกของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

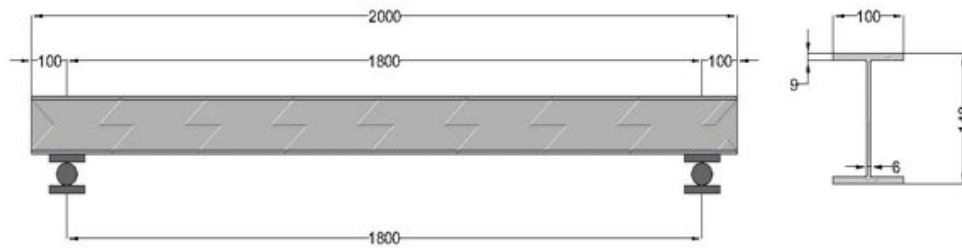
คานเหล็กโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กรูปพรรณรีดร้อน โดยมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกลเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1227-2558 [7] เหล็กเกรด SS400 ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากขั้นต่ำเท่ากับ 245 MPa กำลังรับแรงดึงสูงสุดขั้นต่ำเท่ากับ 400 MPa และมีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 210 GPa แผ่นเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลังผลิตจากเหล็กเกรด SS400 เช่นเดียวกัน มีความหนา 10 มิลลิเมตร และมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกลเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1227-2558 [7] ซึ่งเหมือนกับเหล็กรูปพรรณรีดร้อน แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP Plate) *Sika® CarboDur® S512* มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร และความกว้าง 50 มิลลิเมตร อ้างอิงจากข้อมูลของผู้ผลิต [8] ซึ่งประกอบด้วยกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 3,100 MPa โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 170 GPa โดยใช้กาวอีพ็อกซี่ *Sikadur® -30* อ้างอิงจากข้อมูลของผู้ผลิต [9] ค่ากำลังรับแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชื่อมประสาน *Sikadur® -30* มีค่าเท่ากับ 29 MPa และ 11,200 MPa ตามลำดับและผ้าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP Sheet) *SikaWrap® -230 C* อ้างอิงจากข้อมูลของผู้ผลิต [10] ความหนา 0.167 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยกำลังรับแรงดึงเท่ากับ 3,500 MPa โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 225 GPa โดยใช้กาวอีพ็อกซี่ *Sikadur® -330* อ้างอิงจากข้อมูลของผู้ผลิต [11] ค่ากำลังรับแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชื่อมประสาน *Sikadur® -330* มีค่าเท่ากับ 30 MPa และ 4500 MPa ตามลำดับ และการยึดสลักเกลียวบริเวณแผ่นเหล็กรับแรงอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SFC 8.8 เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 898-1 [12]

2.2 ตัวอย่างคานทดสอบ

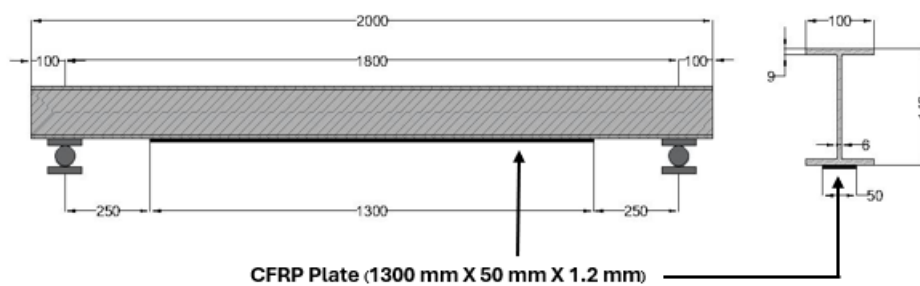
คานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ มีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 1 ตัวอย่างคานเหล็กเป็นคานปีกกว้าง W150x21.1kg/m ชั้นคุณภาพ SS400 มีความกว้างของปีก 100 มิลลิเมตร หนา 9 มิลลิเมตร ความหนาของเวบ (web) 6 มิลลิเมตร ความลึก 148 มิลลิเมตร ความยาวคานทั้งหมด 2,000 มิลลิเมตร โดยมีความยาวช่วงคานทดสอบระหว่างจุดรองรับ 1,800 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 รายละเอียดของคานตัวอย่างทดสอบ

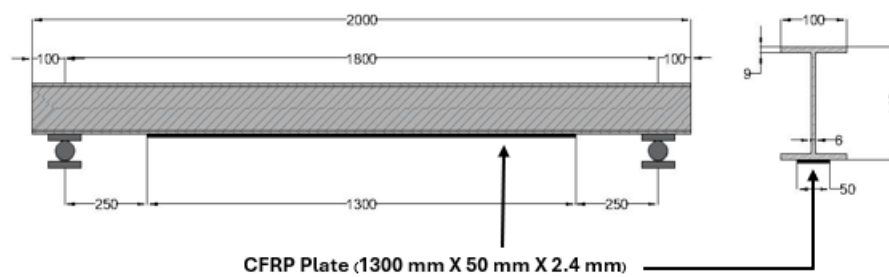
Beam	CFRP	Stiffener	End-Anchor	Bolt Cover Plate
BN	-	-	-	-
BC1	1 ชั้น	-	-	-
BC2	2 ชั้น	-	-	-
BC1S	1 ชั้น	✓	✓	-
BC2S-1	2 ชั้น	✓	✓	-
BC2S-2	2 ชั้น	✓	✓	✓



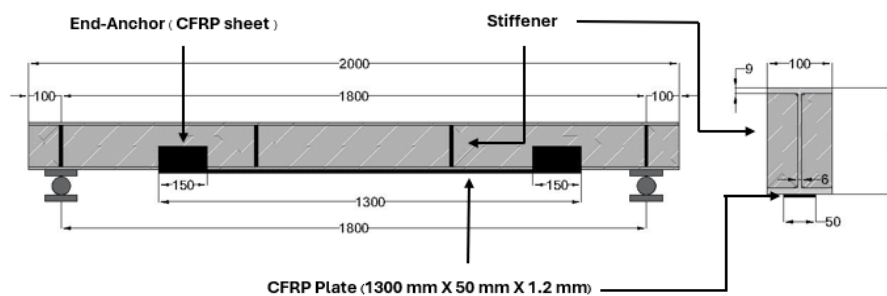
(ก) รายละเอียดตัวอย่างคาน BN



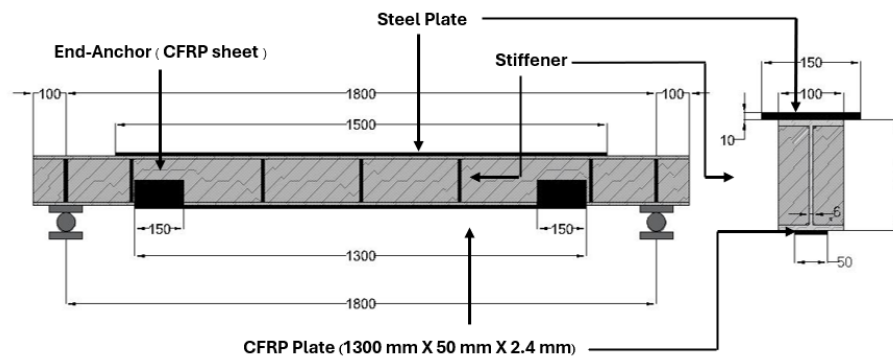
(ข) รายละเอียดตัวอย่างคาน BC1



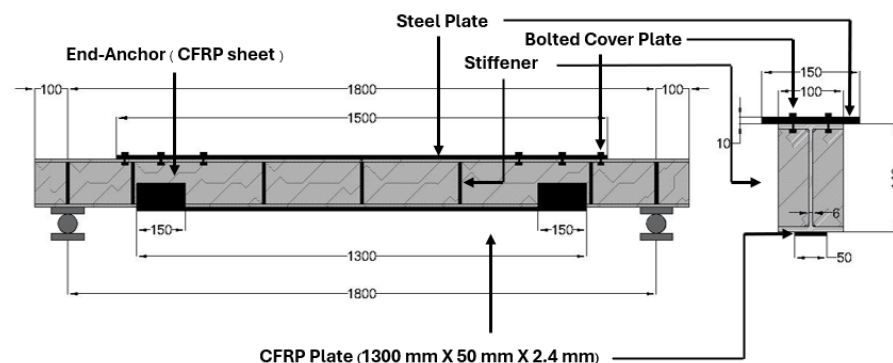
(ค) รายละเอียดตัวอย่างคาน BC2



(ง) รายละเอียดตัวอย่างคาน BC1S



(จ) รายละเอียดตัวอย่างคาน BC2S-1



(ฉ) รายละเอียดตัวอย่างคาน BC2S-2

รูปที่ 1 รายละเอียดหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบ (หน่วย : มิลลิเมตร)

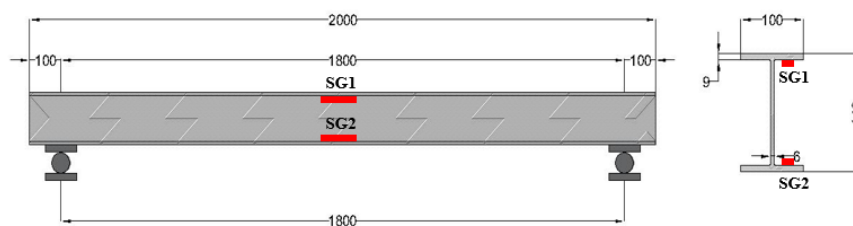
2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด

2.3.1 การเตรียมคานตัวอย่างทดสอบ

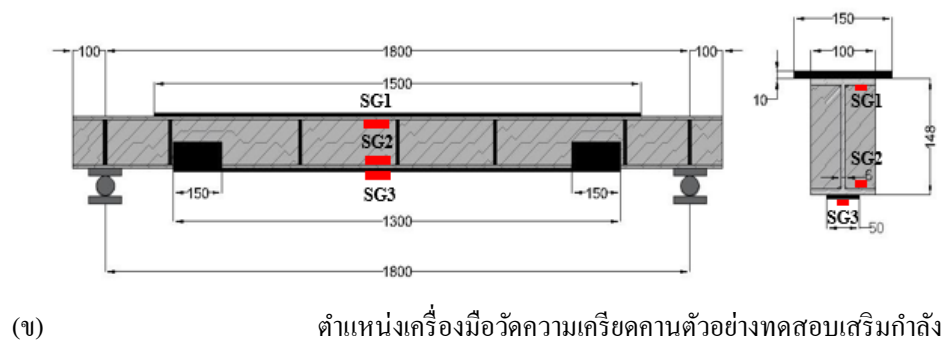
การเตรียมผิวเหล็กก่อนการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของแรงยึดติด โดยทำการเจียรผิวด้วยลูกหมูบริเวณปีกคานให้ปราศจากสนิมและสิ่งเจือปน หลังจากการเตรียมผิวเหล็กแล้ว ทำการทากาวอีพ็อกซี่ *Sikadur*[®] – 30 ปริมาณ 0.20-0.28 กก./ม. ความหนา 2-3 มิลลิเมตร จากนั้นวางแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน บนกาวที่ทาไว้แล้วให้แนบสนิท โดยใช้ลูกกลิ้งกดไล่ฟองอากาศออกจากรอยต่อจนกว่ากาวจะซึมออกมาสม่ำเสมอ ขอบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สำหรับการติดตั้งสมอยึดปลาย นำผ้าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนพันรอบบริเวณปลายทั้ง 2 ด้านของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนในทิศทางตั้งฉากกับแนวเส้นใย โดยใช้กาว *Sikadur*[®] – 330 เป็นตัวประสานและมีความยาวสมอยึด 150 มิลลิเมตรต่อด้าน การบ่มกาวอีพ็อกซี่ทำที่อุณหภูมิตามบริเวณสิ่งแวดล้อมเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 7 วัน ก่อนดำเนินการทดสอบ สำหรับคาน BC2S-1 และ BC2S-2 มีการติดตั้งแผ่นเหล็กขนาด 150x150x10 มิลลิเมตร บริเวณปีกบนของคานด้านกาวอีพ็อกซี่ *Sikadur*[®] – 30 และสำหรับคาน BC2S-2 เพิ่มการยึดด้วยสลักเกลียว M12 ชั้นคุณภาพ 8.8 ระยะห่างสลักเกลียว 100 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มการถ่ายแรงเฉือนระหว่างแผ่นเหล็กบนปีกคาน

2.3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด

การเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยการเตรียมคานตัวอย่างทดสอบไม่เสริมกำลังและคานตัวอย่างทดสอบเสริมกำลังหลังติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (strain gauges) โดยการทดสอบประกอบด้วยคานตัวอย่างทดสอบ 6 ตัวอย่าง ประกอบด้วยคานตัวอย่างทดสอบไม่เสริมกำลัง (คาน BN) จำนวน 2 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 2 (ก) และคานตัวอย่างทดสอบเสริมกำลัง (คาน BC1, BC2, BC1S, BC2S-1, BC2S-2) จำนวน 3 ตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 2 (ข)



(ก) ตำแหน่งเครื่องมือวัดความเครียดคานตัวอย่างทดสอบไม่เสริมกำลัง



(ข) ตำแหน่งเครื่องมือวัดความเครียดคานตัวอย่างทดสอบเสริมกำลัง

รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดคานตัวอย่างทดสอบ

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณคานเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและแผ่นเหล็กซึ่งเป็นคานเชิงประกอบซึ่งทำให้แกนสะเทิน (neutral axis) ของหน้าตัดไม่ผ่านจุดกึ่งกลางของหน้าตัด ในการคำนวณโมเมนต์ดัดที่จุดครากและ โมเมนต์ดัดประลัยเขียนสมการได้ดังนี้

การคำนวณโมเมนต์ดัดที่จุดครากดังสมการที่ (1-4)

$$A_{total} = \sum A_i \quad (1)$$

เมื่อ A_{total} คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ; A_i คือ พื้นที่หน้าตัดขององค์ประกอบแต่ละชิ้นส่วน

$$y_e = \frac{\sum A_i y_i}{A_{total}} \quad (2)$$

เมื่อ y_e คือ ระยะจากขอบล่างหรือขอบบนของหน้าตัดถึงแกนสะเทิน (centroid) ของหน้าตัดรวม ; y_i คือ ระยะจากขอบล่างหรือขอบบนของหน้าตัดถึงแกนสะเทินของส่วนประกอบที่ i แต่ละชิ้นส่วน

$$I_x = \Sigma(\bar{I}_i + A_i d_i^2) \quad (3)$$

เมื่อ I_x คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของหน้าตัดรอบแกนสะเทิน; $\bar{I}_i$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของส่วนประกอบที่ i รอบแกนผ่านแกนสะเทินของส่วนนั้น; d_i คือ ระยะห่างระหว่างแกนสะเทินของส่วนประกอบที่ i กับแกนสะเทินของหน้าตัดรวม

$$M_y = \frac{I_x f_y}{y_e} \quad (4)$$

เมื่อ M_y คือ โมเมนต์คราก

การคำนวณโมเมนต์ดัดประลัยดังสมการที่ (5-8)

$$A_{tens} = \frac{A_{total}}{2} = ((y_p - t_f)t_w) + (b_f t_f) \quad (5)$$

เมื่อ A_{tens} คือ พื้นที่รับแรงดึง; y_p คือ ระยะจากขอบล่างหรือขอบบนถึงแกนพลาสติก (Plastic neutral axis); t_f คือ ความหนาของปีกหน้าตัด; t_w คือ ความหนาของเอว; b_f คือ ความกว้างของปีกหน้าตัด

$$y_{tens,comp} = \frac{\sum A_i y_i}{A_{tens,comp}} \quad (6)$$

เมื่อ $y_{tens,comp}$ คือ ระยะจากขอบบนหรือขอบล่างบริเวณพื้นที่รับแรงดึงหรือแรงอัด; $A_{tens,comp}$ คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณแรงดึงหรือแรงอัด

$$d_t + d_c = d - y_{tens} - y_{comp} \quad (7)$$

เมื่อ d_t คือ ระยะของแกนสะเทินบริเวณหน้าตัดรับแรงดึง; d_c คือ ระยะของแกนสะเทินบริเวณหน้าตัดรับแรงอัด d คือ ความลึกทั้งหมดของหน้าตัด

$$M_u = f_y (A_c (d_t + d_c)) \quad (8)$$

เมื่อ M_u คือ โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด; $(d_t + d_c)$ คือ ระยะของแกนโมเมนต์ระหว่างแกนสะเทินบริเวณรับแรงดึงและแรงอัด

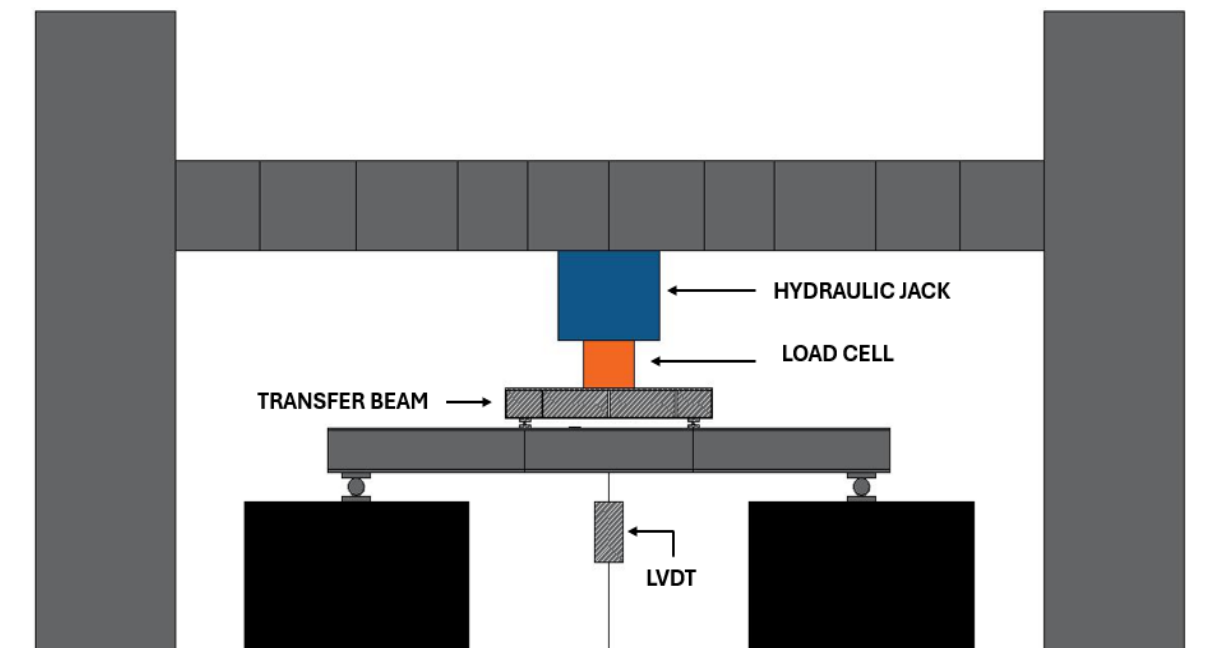
การคำนวณดัชนีความเหนียวดังสมการที่ (9)

$$DI_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad (9)$$

เมื่อ $DI_{\max}$ คือ ดัชนีความเหนียวสูงสุด; $\Delta_{\max}$ คือ การโก่งตัวสูงสุด ณ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด Δ_y คือ การโก่งตัว ณ จุดคราก

2.5 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการดัดของคานตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงดัดสี่ตำแหน่ง (Four-point bending test) โดยมีช่วงคานทดสอบ 1800 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างน้ำหนักกระทำเท่ากับ 1/3 ของความยาวช่วงทดสอบเท่ากับ 600 มิลลิเมตร ใช้แรงกระทำที่ความจุ 500 กิโลนิวตัน ติดตั้งอุปกรณ์การวัดการเสียรูปเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformers, LVDT) 1 ตำแหน่งโดยติดตั้งบริเวณกึ่งกลางคาน โดยกำหนดอัตราแรงกระทำควบคุม 0.5 ตันต่อวินาที เมื่อถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและทำการสิ้นสุดการทดสอบเมื่อน้ำหนักบรรทุกลดลงเหลือ 0.7 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วิธีการทดสอบของคานตัวอย่างภายใต้แรงดัดสี่ตำแหน่ง

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานและรูปแบบการวิบัติ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างทดสอบ BN, BC1, BC2, BC1S, BC2S-1 และ BC2S-2 แสดงดังรูปที่ 5 และตารางที่ 2 ซึ่งความแตกต่างของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกระหว่างตัวอย่างทดสอบมีความสัมพันธ์หลักกับรูปแบบการวิบัติ (failure mode) คานตัวอย่างทดสอบ BN แสดงดังรูปที่ 4 (ก) เกิดการโก่งเดาะด้านข้าง (Lateral Torsional Buckling: LTB) ทำให้คานตัวอย่างทดสอบ BN ไม่สามารถรับแรงดัดได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate : CFRP Plate) 1 ชั้นและ 2 ชั้นในคานตัวอย่างทดสอบ BC1 และ BC2 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4 (ข) และ รูปที่ 4 (ค) ซึ่งการเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนทำให้ไม่เกิดการโก่งเดาะด้านข้างแต่สาเหตุหลักของการวิบัติเป็นการโก่งเดาะที่ปีกบนแทนซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 10.4 % และ 7 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบ BN และการเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 ชั้น ของคาน BC2 มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดต่ำกว่าคาน BC1 ที่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 ชั้น ทั้งที่โดยหลักการการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนควรให้กำลังที่สูงกว่า โดยอธิบายได้ในเชิงกลศาสตร์ โดยเมื่อการเพิ่มแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเป็น 2 ชั้นส่งผลให้แรงดัดที่ปีกล่างของคานเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาสมดุลของแรงภายในหน้าตัด ปีกบนของคานจึงต้องรับแรงอัดที่สูงขึ้น เมื่อไม่มีแผ่นค้ำด้านข้าง โดยค่าอัตราส่วนความชะลูดของปีกบน (b/t) 11.1 เข้าใกล้ขีดจำกัด Local Buckling ก่อนที่คานจะพัฒนากำลังรับโมเมนต์พลาสติกได้เต็มที่ แสดงดังรูปที่ 6 (ค) แสดงให้เห็นว่าความเครียดที่

ปีกล่างของคาน BC2 ลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลจากการสูญเสียความสามารถในการรับแรงอัดของปีกบน การเสริมแผ่นค้ำที่บริเวณเอวคานด้วยผ้าพอลิเมอร์เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet : CFRP Sheet) ที่ปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนทั้ง 2 ด้านในคานตัวอย่างทดสอบ BC1S ทำให้ไม่เกิดการ Local buckling ที่บริเวณเอวและปีกบนของคาน ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 15.2 % , 4.4 % และ 7.2 % เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบ BN, BC1 และ BC2 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4 (ง) การวิบัติหลักเกิดการฉีกขาดบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Rupture of CFRP Plate) การเสริมแผ่นเหล็ก (Steel Plate) บริเวณปีกบนของคานและเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate : CFRP Plate) 2 ชั้นในคานตัวอย่างทดสอบ BC2S-1 ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 80.7 % , 63.7 % , 68.7 % และ 56.8 % เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบ BN, BC1, BC2 และ BC1S ตามลำดับ ซึ่งการเสริมแผ่นเหล็กบริเวณปีกบนของคานทำให้ไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะจุด (Local buckling) ที่บริเวณเอวและปีกบน แสดงดังรูปที่ 4 (จ) ซึ่งการวิบัติหลักเกิดการหลุดล่อนระหว่างชั้นกาวกับผิวล่างของคาน (Debonding of CFRP Plate) และเกิดการฉีกขาดของผ้าพอลิเมอร์เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (Rupture of CFRP Sheet) และการติดตั้งสลักเกลียวบริเวณปลายทั้ง 2 ด้านของแผ่นเหล็กและเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate : CFRP Plate) 2 ชั้นในคานตัวอย่างทดสอบ BC2S-2 ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 58.3 % , 43.4 % , 48 % และ 37.4 % เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบ BN, BC1, BC2 และ BC1S ตามลำดับ แต่ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง 12.4 % เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบ BC2S-1 ซึ่งไม่ได้เสริมสลักเกลียว แสดงดังรูปที่ 4 (ฉ) ซึ่งการทำให้คาน BC2S-2 มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดต่ำกว่า BC2S-1 ที่มีองค์ประกอบการเสริมกำลังเหมือนกันยกเว้นสลักเกลียวนั้น โดยการยึดสลักเกลียว M12 ระหว่างแผ่นเหล็กปีกบนทำให้คานมีลักษณะเป็น Partially-Composite Beam การถ่ายแรงเฉือนระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กและปีกบนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) บริเวณสลักเกลียว และชั้นกาวอีพ็อกซี่ แสดงดังรูปที่ 6 (ฉ) คาน BC2S-2 มีความเครียดสูงสุดที่วัดได้จาก SG3 ต่ำกว่า BC2S-1 อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้นของความเค้นดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของการหลุดล่อนของผ้าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนบริเวณสมอชิดปลายแผ่น ก่อนที่หน้าตัดจะพัฒนารับกำลังโมเมนต์ดัดได้เต็มที่ ซึ่งให้เห็นว่าระบบเสริมกำลังที่ใช้ทั้งกาวอีพ็อกซี่และสลักเกลียวพร้อมกัน การกระจายแรงเฉือนที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างกลไกการยึดทั้งสองอาจทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลง



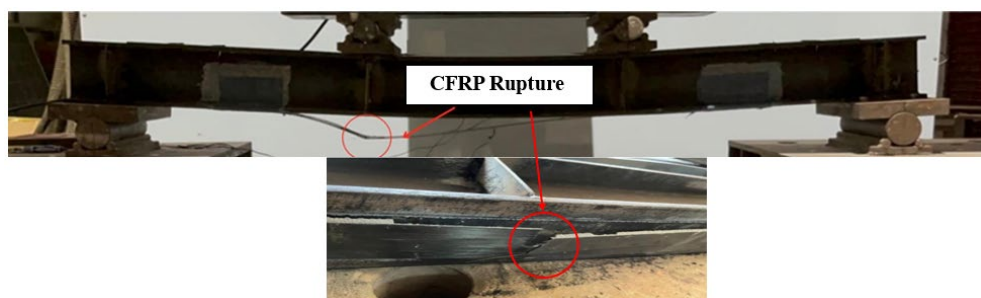
(ก)



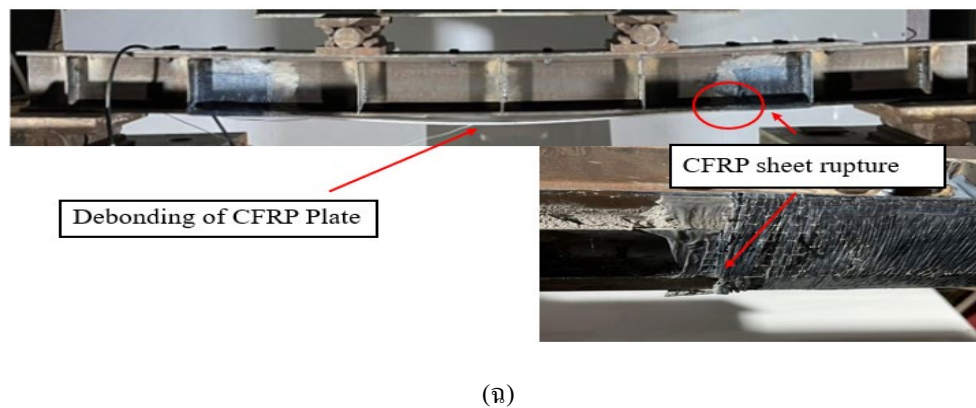
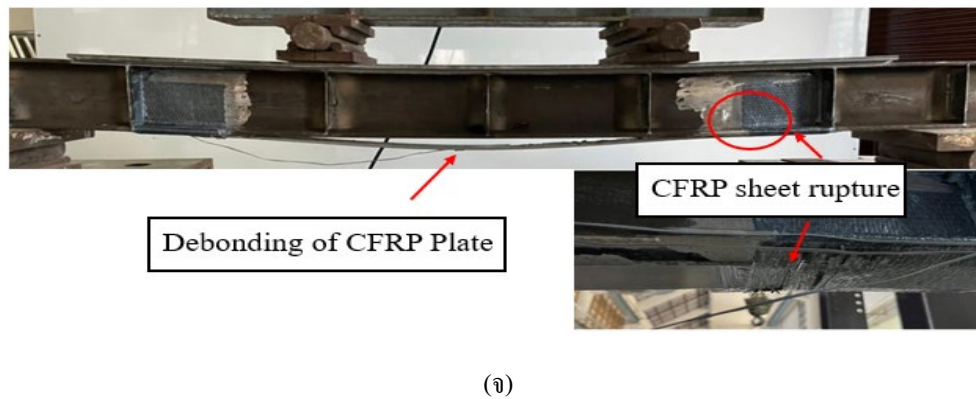
(ข)



(ค)

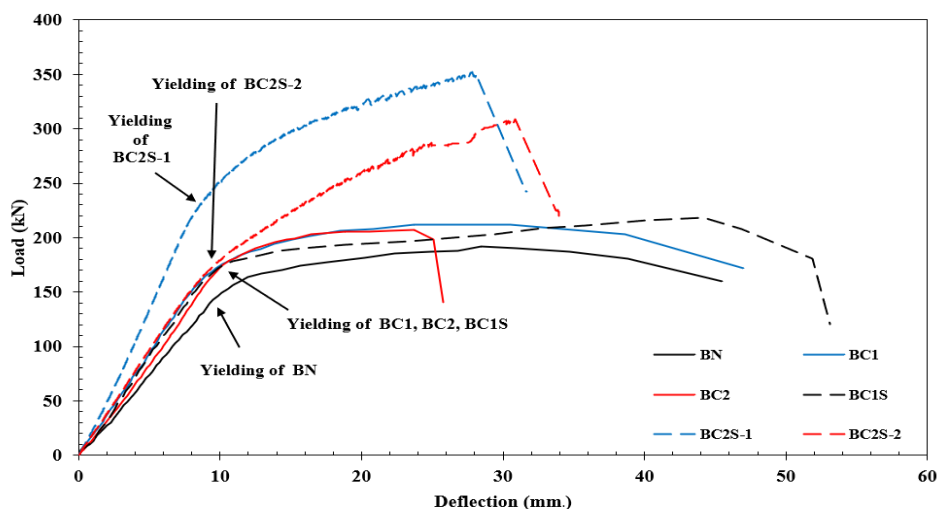


(ง)



รูปที่ 4 รูปแบบการวิบัติคานตัวอย่างทดสอบ (ก) BN (ข) BC1 (ค) BC2 (ง) BC1S (จ) BC2S-1

(ฉ) BC2S-2



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

ตารางที่ 2 ตารางผลการทดสอบของคานตัวอย่างทดสอบ

Beam	P_y (kN)	$\frac{P_y}{P_{y,BN}}$	P_u (kN)	$\frac{P_u}{P_{u,BN}}$	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	$\frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$
BN	146.4	1	195	1	9.83	29.2	2.97
BC1	175.8	1.2	215.2	1.1	10.24	27.1	2.65
BC2	170	1.16	208.6	1.07	9.72	24.55	2.53
BC1S	171.1	1.17	224.7	1.15	9.84	46.81	4.76
BC2S-1	220.7	1.51	352.3	1.8	8.06	35.07	4.35
BC2S-2	174.7	1.19	308.7	1.58	9.85	33.95	3.45

*หมายเหตุ P_y = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดคราก

P_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดสูงสุด

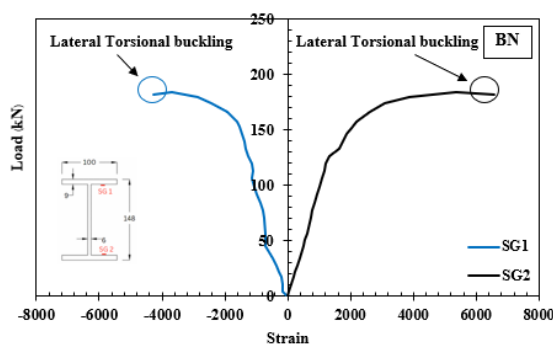
Δ_y = การแอ่นตัวกึ่งกลางคานที่จุดคราก

Δ_{max} = การแอ่นตัวกึ่งกลางคานที่จุดสูงสุด

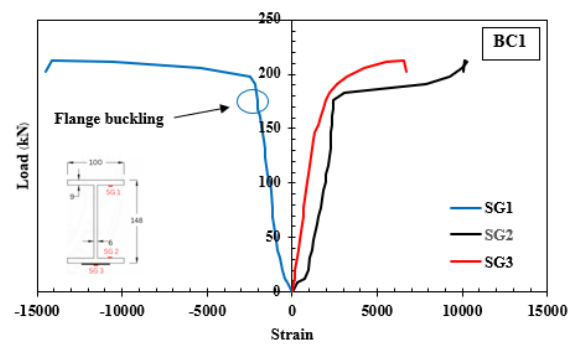
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของคานตัวอย่างทดสอบ BN, BC1, BC2, BC1S, BC2S-1 และ BC2S-2 แสดงดังรูปที่ 6 โดยค่าความเครียดที่ได้จากเครื่องมือวัดความเครียดซึ่งติดตั้งบริเวณปีกกลางของคานในตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคาน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้การทดสอบแรงดัดสี่ตำแหน่ง

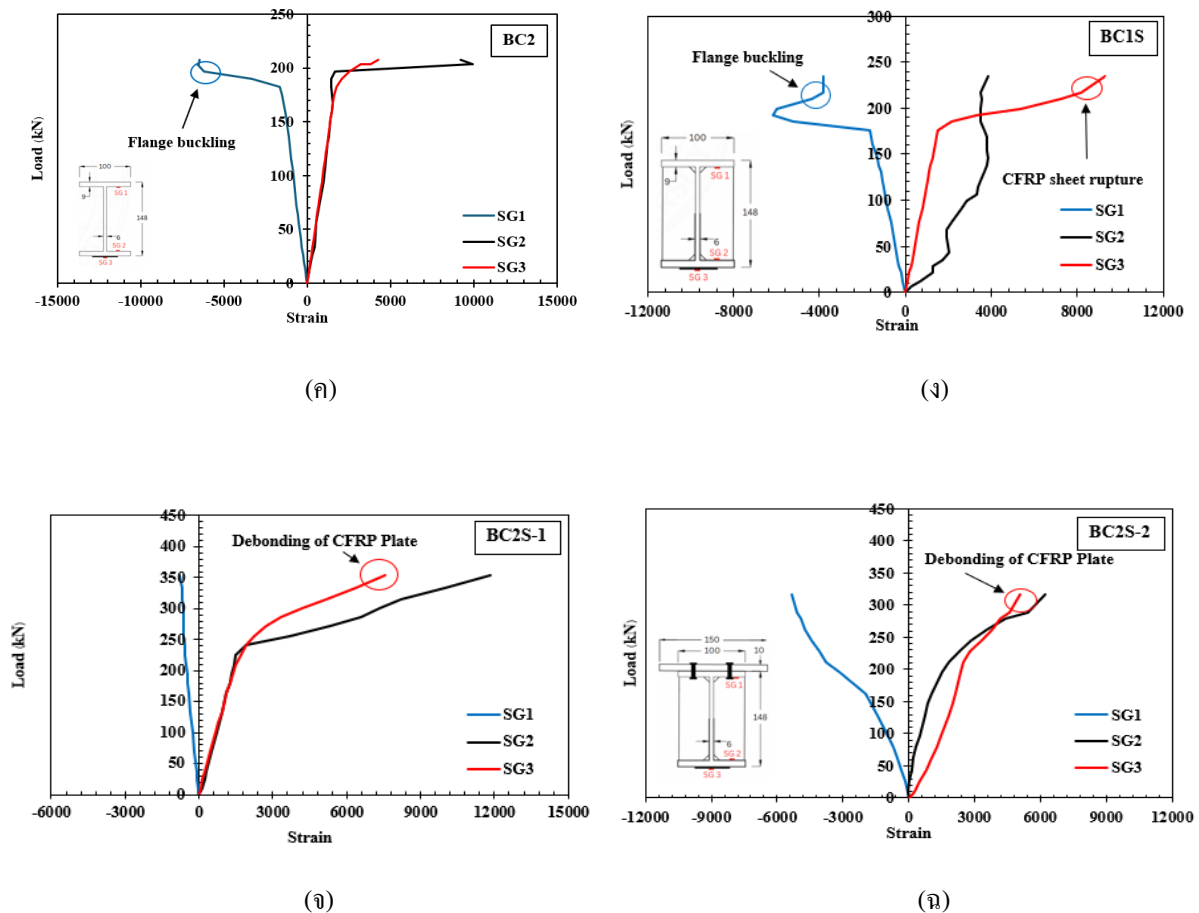
จากผลการทดสอบพบว่า ในช่วงแรกของการรับน้ำหนักบรรทุก คานตัวอย่างทดสอบทุกตัวแสดงพฤติกรรมเชิงเส้นระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด สะท้อนถึงพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกของคานเหล็ก โดยคานที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแสดงการเพิ่มความเครียดที่ต่ำกว่าคานควบคุม BN ที่ไม่เสริมกำลัง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ปีกกลางของคานสามารถช่วยเพิ่มความแข็ง (stiffness) ของคานในช่วงรับแรงดึงและลดการกระจายความเครียดในเหล็กบริเวณปีกกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาคาน BC1 และ BC2 ซึ่งเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 และ 2 ชั้นตามลำดับ พบว่าการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่น CFRP ส่งผลให้ความเครียดในปีกกลางของคานลดลง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกระดับเดียวกัน เนื่องจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงและสามารถรับแรงดึงได้ดี ทำให้เกิดการถ่ายแรงระหว่างเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่ช่วงหลังจุดครากของคาน จะพบว่าความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในคาน BC2 ซึ่งการเกิดการวิบัติจากการ โกงเดาะเฉพาะจุดของปีกบน ส่งผลให้ความเครียดในช่วงพลาสติกลดลงสำหรับคาน BC1S ซึ่งมีการเสริมแผ่นค้ำด้านข้างคาน (Stiffener) และการเสริมสมอยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดมีลักษณะเสถียรภาพมากกว่าคานที่ไม่มีการเสริมด้วยแผ่นค้ำด้านข้าง โดยความเครียดเพิ่มขึ้นไปจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด แสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นค้ำและสมอยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนช่วยลดการเกิดการ โกงเดาะเฉพาะจุดและการหลุดล่อนของแผ่น CFRP ส่งผลให้คานสามารถพัฒนาความเครียดได้มากขึ้นก่อนการวิบัติ ในกรณีของคาน BC2S-1 และ BC2S-2 ซึ่งมีการเสริมแผ่น CFRP 2 ชั้น ร่วมกับการเสริมแผ่นค้ำด้านข้างคานและแผ่นเหล็กบริเวณปีกบน พบว่าคานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความเครียดที่วัดได้เพิ่มขึ้นถึงระดับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ทั้งนี้ รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดสะท้อนถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังช่วยลดการเกิด โกงเดาะเฉพาะจุดและการกระจายความเครียดในคาน อย่างไรก็ตาม คาน BC2S-2 ซึ่งมีการยึดสลักเกลียวบริเวณปีกบน แสดงค่าความเครียดสูงสุดต่ำกว่าคาน BC2S-1 เล็กน้อย เนื่องจากการยึดด้วยสลักเกลียวทำให้คานเหล็กเป็นคานแบบ Partially-Composite



(ก)



(ข)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด (ก) BN (ข) BC1 (ค) BC2 (ง) BC1S (จ) BC2S-1

(ฉ) BC2S-2

3.3 ค่าดัชนีความเหนียว (Ductility Index)

ความเหนียวของคานแสดงความสามารถการเสียรูปในช่วงพลาสติก โดยงานวิจัยนี้ใช้ค่าดัชนีความเหนียวดังสมการที่ (9) ความเหนียวของคานทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าความเหนียวของ คาน BN และ BC1 มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนคาน BC2 ค่าความเหนียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็น ผลจากการเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน 2 ชั้นบริเวณปีกกลางของคาน ที่รับแรงดึงทำให้ความสามารถในการต้านแรงดึงสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นแรงอัดในปีกบนและแผ่นเอวส่วนบนของคานจะเพิ่มมากขึ้นจนเกิด การโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกบนและแผ่นเอว (Flange & web local buckling) คาน BC1S มีการเสริมแผ่น CFRP 1 ชั้น มีการเสริมแผ่นค้ำข้างคาน (Stiffener) และมีการเสริมสมอยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน จะเห็นได้ว่า ค่าความเหนียวของคานสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างและไม่เกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกบนและช่วงเอว และการโก่งเดาะและบิดด้านข้างของคาน สำหรับคาน BC2S-1 และ BC2S-2 ที่ได้มีการเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน 2 ชั้น มีการเสริมแผ่นค้ำข้างคาน (Stiffener) การเสริมสมอยึดที่ปลายแผ่น CFRP และเพิ่มการเสริมแผ่นเหล็กบริเวณปีกด้านบนของ

กาน จะเห็นได้ว่า ค่าความเหนียวของกาน สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกาน BC2 ที่มีการเสริมแผ่น CFRP 2 ชั้นเหมือนกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเสริมแผ่นค้ำข้างกาน (Stiffener) และการเสริมแผ่นเหล็กบริเวณปีกด้านบนของกาน

3.4 การทำนายกำลังรับแรงดัดของกานเหล็กปีกกว้าง

ตารางที่ 3 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างโมเมนต์ดัดที่จุดคราก (M_y) และโมเมนต์ดัดปลาย (M_u) ที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีดังสมการที่ (1)–(8)

กาน BN ที่ไม่มีการเสริมกำลัง มีค่าอัตราส่วน $M_{y,exp} / M_{y,theo} = 0.98$ และ $M_{u,exp} / M_{u,theo} = 1.12$ โดยค่าโมเมนต์ดัดปลายจากการทดสอบที่สูงกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อยเนื่องจากทฤษฎีคำนวณโมเมนต์ดัดปลายบนสมมติฐานที่หน้าตัดสามารถพัฒนาการกระจายความเค้นแบบพลาสติกได้เต็มที่ ในขณะที่การทดสอบแสดงให้เห็นว่ากาน BN เกิดการวิบัติด้วยการ โกงเดาะบิดด้านข้าง (Lateral Torsional Buckling) ซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดปลายสูงกว่าค่าโมเมนต์ดัดตามทฤษฎีที่คำนวณ

กาน BC1 และ BC2 ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ตามลำดับ มีค่าอัตราส่วนโมเมนต์ดัดปลายจากการทดสอบและโมเมนต์ดัดปลายจากทฤษฎี เท่ากับ 1.03 และ 0.98 ตามลำดับ โดยที่กาน BC2 มีค่าอัตราส่วนต่ำกว่า 1.00 เนื่องจากการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเป็น 2 ชั้น ส่งผลให้แรงดัดสะสมที่ปีกล่างเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาสมดุลภายในหน้าตัด ปีกบนของกานจึงต้องรับแรงอัดที่สูงขึ้นตามสัดส่วน เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความชะลูดของปีกบน ($b/t = 11.1$) ซึ่งเข้าใกล้ขีดจำกัดการ โกงเดาะเฉพาะที่ตามมาตรฐาน จึงทำให้ปีกบนเกิดการ โกงเดาะเฉพาะที่ก่อนที่จะหน้าตัดจะพัฒนา กำลังรับโมเมนต์พลาสติกได้เต็มที่ ส่งผลให้โมเมนต์ดัดปลายจากการทดสอบต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี

กาน BC1S มีค่าอัตราส่วน โมเมนต์ดัดที่จุดครากจากการทดสอบและโมเมนต์ดัดที่จุดครากจากทฤษฎี 1.10 และ อัตราส่วนโมเมนต์ดัดปลายจากการทดสอบและโมเมนต์ดัดปลายจากทฤษฎี 1.08 ซึ่งสูงกว่า 1.00 ทั้งสองค่า เนื่องจากการเสริมแผ่นค้ำด้านข้าง (Stiffener) ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงด้านข้างให้แก่แผ่นเอวและปีกบน จึงป้องกันการ โกงเดาะเฉพาะที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อร่วมกับสมอียึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนซึ่งป้องกันการหลุดลอกก่อนกำหนด ทำให้หน้าตัดสามารถพัฒนากำลังรับโมเมนต์ดัดได้สูงกว่าค่าที่คำนวณจากคุณสมบัติหน้าตัดตามทฤษฎี

กาน BC2S-1 มีค่าอัตราส่วน โมเมนต์ดัดที่จุดครากจากการทดสอบ และ โมเมนต์ดัดที่จุดครากจากทฤษฎี 1.28 และ อัตราส่วนโมเมนต์ดัดปลายจากการทดสอบและโมเมนต์ดัดปลายจากทฤษฎี 1.24 สูงที่สุดในบรรดาตัวอย่างทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าการเสริมแผ่นเหล็กที่ปีกบนด้วยกาอีพ็อกซี่สามารถเพิ่มพื้นที่หน้าตัดรับแรงอัดได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ โดยกาอีพ็อกซี่ทำหน้าที่ถ่ายแรงเฉือนระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กและปีกบนได้อย่างสม่ำเสมอตลอดความยาว ทำให้ระบบทำงานร่วมกันได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (Full Composite Action) และป้องกันการ โกงเดาะเฉพาะที่ได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าโมเมนต์ดัดปลายจากการทดสอบสูงกว่าค่าโมเมนต์ดัดปลายจากทฤษฎี อย่างมีนัยสำคัญ

กาน BC2S-2 ที่มีองค์ประกอบเสริมกำลังเช่นเดียวกับ BC2S-1 แต่เพิ่มการยึดด้วยสลักเกลียว M12 บริเวณแผ่นเหล็กปีกบน มีค่าอัตราส่วน โมเมนต์ดัดที่จุดครากจากการทดสอบและโมเมนต์ดัดที่จุดครากจากทฤษฎี 1.02 และ อัตราส่วนโมเมนต์ดัดปลาย

จากการทดสอบและโมเมนต์ดัดประลัยจากทฤษฎี 1.08 ซึ่งต่ำกว่า BC2S-1 อย่างชัดเจน เนื่องจากสลักเกลียวทำให้การถ่ายแรงเฉือนระหว่างแผ่นเหล็กและปีกบนเกิดขึ้นเฉพาะจุด ส่งผลให้กานมีพฤติกรรมแบบ Partially-Composite Beam และเกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) บริเวณสลักเกลียวและชั้นกาวอีพ็อกซี่ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการหลุดล่อนของผ้าพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนบริเวณรอยยึดปลายแผ่นก่อนที่หน้าตัดจะพัฒนากำลังรับ โมเมนต์ดัดได้เต็มที่ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการใช้ระบบยึดร่วมระหว่างกาวอีพ็อกซี่และสลักเกลียวพร้อมกันอาจทำให้การกระจายแรงเฉือนระหว่างกลไกการยึดทั้งสองไม่สม่ำเสมอ และลดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเสริมกำลังลง

ตารางที่ 3 ตารางผลการทดสอบของคานตัวอย่างทดสอบเปรียบเทียบกับทฤษฎีการคำนวณ

Beam	$M_{y,exp}$ (kNm)	$M_{u,exp}$ (kNm)	$M_{y,theo}$ (kNm)	$M_{u,theo}$ (kNm)	$\frac{M_{y,exp}}{M_{y,theo}}$	$\frac{M_{u,exp}}{M_{u,theo}}$
BN	31.6	58.5	32.2	52.4	0.98	1.12
BC1	38.1	64.5	33.8	62.6	1.13	1.03
BC2	36.8	62.6	35.3	64	1.04	0.98
BC1S	37.1	67.4	33.8	62.6	1.1	1.08
BC2S-1	47.8	105.7	37.3	85.5	1.28	1.24
BC2S-2	37.9	92.6	37.3	85.5	1.02	1.08

4 สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานเหล็กปีกกว้างเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ปีกล่างของคานส่วนที่รับแรงดัดภายใต้หน้าทับบรรทุกแบบสถิต โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ จำนวนชั้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมแผ่นค้ำด้านข้างคาน (Stiffener) การเสริมแผ่นเหล็กที่ปีกบนของคานส่วนที่รับแรงดัด ผลของการเสริมรอยยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และการยึดสลักเกลียวบริเวณปีกบนของคานส่วนที่รับแรงดัด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ปีกล่างสามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ 10.4 % สำหรับการเสริม 1 ชั้น และ 7.0 % สำหรับการเสริม 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม BN อย่างไรก็ตาม การเพิ่มแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเป็น 2 ชั้นส่งผลให้แรงดัดที่ปีกล่างของคานเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาสมดุลของแรงภายในหน้าตัด ปีกบนของคานจึงต้องรับแรงดัดที่สูงขึ้น เมื่อไม่มีแผ่นค้ำด้านข้าง โดยค่าอัตราส่วนความชะลูดของปีกบน (b/b) 11.1 เข้าใกล้ขีดจำกัด การโก่งเดาะเฉพาะที่ก่อนที่คานจะพัฒนากำลังรับโมเมนต์พลาสติกได้เต็มที่
2. การเสริมแผ่นค้ำด้านข้างร่วมกับรอยยึดที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน BC1S สามารถป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะที่และการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น 15.2 % เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม BN และมีดัชนีความเหนียว 4.76 สูงสุด แสดงให้เห็นว่าการเสริมแผ่นค้ำด้านข้างและรอยยึดช่วยให้คานสามารถพัฒนากำลังโมเมนต์พลาสติกได้เต็มที่

3. การเสริมแผ่นเหล็กที่ปีกบนโดยใช้กาวอีพ็อกซีของคาน BC2S-1 ทำให้การถ่ายแรงเฉือนสม่ำเสมอตลอดความยาวส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น 80.7 % เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม BN และมีอัตราส่วนโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบและโมเมนต์ดัดประลัยจากทฤษฎี 1.24
4. การเสริมแผ่นเหล็กที่ปีกบนโดยใช้สลักเกลียวร่วมกับกาวอีพ็อกซีของคาน BC2S-2 ทำให้การถ่ายแรงเฉือนเป็นแบบ Partially-Composite เกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) บริเวณสลักเกลียว ทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนก่อนที่หน้าตัดจะพัฒนาไปถึงรับ โมเมนต์ได้เต็มที่ ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง 12.4 % เมื่อเปรียบเทียบกับ BC2S-1

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบคุณบริษัท รีโทรฟิต สตาร์คเจอร์ สเตเชียลลิสต์ จำกัด ผู้สนับสนุนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Miller, T. C., Chajes, M. J., Mertz, D. R. and Hastings, J. N. Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6 (6), pp. 514–522. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:6(514).
- [2] Sen, R., Liby, L. and Mullins, G. Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, 2001, 32 (4), pp. 309–322. DOI: 10.1016/S1359-8368(01)00006-3.
- [3] Teng, J. G., Yu, T. and Fernando, D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 78, pp. 131–143. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.06.011.
- [4] Lenwari, A., Thepchatri, T. and Albrecht, P. Debonding strength of steel beams strengthened with CFRP plates. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10 (1), pp. 69–78. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:1(69).
- [5] Narmashiri, K., Jumaat, M. Z. and Ramli Sulong, N. H. Investigation on end anchoring of CFRP strengthened steel I-beams. *International Journal of Physical Sciences*, 2010, 5 (9), pp. 1360–1371. DOI: 10.5897/IJPS.9000333.
- [6] Sargazi, S. and Narmashiri, K. Flexural strengthening of steel beams using end-anchored CFRP strips. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 2015, 5 (S1), pp. 3857–3864.
- [7] Thai Industrial Standards Institute. TIS 1227-2558. *Hot rolled structural steel sections*. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute, 2015.

- [8] Sika Thailand. *Sika® CarboDur® S*, n.d. Available from: <https://tha.sika.com/en/construction/structural-strengthening/carbon-fiber-reinforcedpolymercfpr/sika-carbodur-s.html> [Accessed 15 Feb. 2026].
- [9] Sika Thailand. *Sikadur®-30 product data sheet (Version 03.01)*, June 2021. Available from: <https://tha.sika.com/dam/dms/th01/w/sikadur-30.pdf> [Accessed 15 Feb. 2026]. (in Thai).
- [10] Sika Thailand. *SikaWrap®-230 C*, n.d. Available from: <https://tha.sika.com/en/construction/structural-strengthening/fiber-reinforcedpolymerfrp/sikawrap-230-c.html> [Accessed 15 Feb. 2026].
- [11] Sika Thailand. *Sikadur®-330 product data sheet (Version 04.01)*, June 2021. Available from: <https://tha.sika.com/dam/dms/th01/f/sikadur-330.pdf> [Accessed 15 Feb. 2026]. (in Thai).
- [12] International Organization for Standardization. ISO 898-1:2013. *Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread*. Geneva: ISO, 2013.