

การศึกษาเชิงทดลองของระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำคู่

An Experimental Investigation on Connector Spacing of PFRP Built-up Members for Double Channel Sections

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์¹ สิทธีชัย แสงอาทิตย์^{*1} จักษดา ชำรงวุฒิ²

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Chanon Chatwivat¹ Sittichai Seangatiith^{*1} Jaksada Thumrongvut²

¹Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhonratchasima 30000

²Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhonratchasima 30000

Tel : 08-1872-7050 E-mail: sitchai@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีจุดรองรับแบบหมุดภายใต้แรงอัดในแนวแกน โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนประกอบที่มีระยะการติดจุดเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบของ ASCE และ AISC-LRFD ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เป็นชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ประกอบขึ้นจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ โดยมี 3 ขนาดหน้าตัดได้แก่ 76×22×6 mm 102×29×6 mm และ 152×43×10 mm จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 30 ตัวอย่าง โดยมีค่าอัตราส่วนความชะลูดอยู่ในช่วง 124 ถึง 188 จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงประมาณร้อยละ 90 ของแรงโก่งเดาะวิกฤติ (critical buckling load) โดยแบ่งลักษณะการวิบัติได้เป็น 2 แบบได้แก่ individual parallel buckling และ Individual opposite buckling และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการติดตั้งจุดเชื่อมต่อเพิ่มไม่มีความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบสุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการ

ออกแบบของ ASCE และ AISC-LRFD พบว่า สมการออกแบบทั้งสองสามารถใช้ทำนายหน่วยแรงโก่งเดาะวิกฤติของชิ้นส่วนรับแรงอัดได้

คำหลัก เสา พัลทูดชั้น วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ แรงอัดในแนวแกน

Abstract

This paper presents the experimental study on the PFRP compression members having C-sections with pinned-pinned supports under axial compression. The objectives of this study are to investigate the structural behaviors and the modes of failure of the compression members with different connector spacing and to compare the obtained results with those obtained from the ASCE and AISC-LRFD design equations. The specimens were built-up from single PFRP C-section, having three cross-sectional dimensions of 76×22×6 mm, 102×29×6 mm, and 152×43×10 mm. A total of 15 specimens with slenderness ratio ranging from 124 to 188 were tested. From the tests, the linear elastic responses are in the range of 90-100% of the critical

buckling load. The modes of failure can be generally classified in the 2 forms of individual parallel buckling and individual opposite buckling. From the previous research, adding the connector did not affect the strength. Finally, by comparing the test results with those obtained from the design equations, it was found that the design equations are acceptable for predicting the critical buckling stress of the PFRP compression members.

Keywords: Column, pultrusion, pultruded fiber-reinforced plastic, double C-section, axial compression

1. บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรู๊ด (Pultruded Fiber-Reinforced Plastic หรือ PFRP) คือ วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยซึ่งผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบ Pultrusion [1] โดยในช่วงกว่าสามสิบปีที่ผ่านมา วัสดุชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในต่างประเทศมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา สำหรับในประเทศไทย วัสดุชนิดนี้เริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้น โดยมีบริษัทที่ผลิตวัสดุ PFRP ขายในเชิงพาณิชย์ วัสดุ PFRP มักถูกผลิตให้มีหน้าตัดและรูปร่างเช่นเดียวกับเหล็กรูปพรรณ เช่น หน้าตัดรูปตัวไอ (i-shapes) หน้าตัดฉาก (angles) และหน้าตัดรูปรางน้ำ (channel) เป็นต้น [2-4] เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PFRP กับวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในทางวิศวกรรมโยธา เช่น เหล็กและอลูมิเนียมแล้ว พบว่า วัสดุ PFRP มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง [5] มีความต้านทานการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี [6] และมีกรรมวิธีในการผลิตให้เข้ากับงานที่ต้องการและติดตั้งได้ง่าย [7] เป็นต้น จากสมบัติเด่นดังกล่าว วัสดุชนิดนี้จึงถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างภายใต้สภาวะแวดล้อมและสารเคมีและมีน้ำหนักเบาเป็นหลัก เช่น โครงสร้างของหอทำความเย็น (cooling tower) สะพานในพื้นที่ทุรกันดาร โครงสร้างทางเดินและบันไดในโรงบำบัดน้ำเสีย (water treatment plant) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุ PFRP มีความแตกต่างกันตามผู้ผลิตทำให้วิศวกรผู้ออกแบบยังคงประสบปัญหาการขาดแคลนมาตรฐานการออกแบบ (design code) ที่น่าเชื่อถือ โดยปัจจุบัน พื้นฐานการ

ออกแบบโครงสร้างวัสดุ PFRP ยังคงอ้างอิงมาตรฐานของ ASCE Structural Plastic Design Manual [8] ที่ใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1984 และในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีในการผลิตได้ถูกพัฒนาอย่างมาก ดังนั้น วิศวกรจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมและสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุ PFRP ภายใต้แรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยการศึกษาและวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดที่ผลิตจากวัสดุ PFRP (PFRP compression member) และมีความละเอียด (slender) มาก เช่น โครงข้อหมุนของสะพานขนาดเล็กและระบบค้ำยันของโครงเฟรม เป็นต้น โดยมักถูกออกแบบโดยใช้ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวและคู่ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากหน้าตัดดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อเข้ากับชิ้นส่วนอื่น ๆ ได้ง่ายโดยใช้สลักเกลียว (bolt) ได้ง่าย ในกรณีดังกล่าว ASCE Structural Plastic Design Manual กำหนดให้ใช้สมการสำหรับการหาค่าแรงวิกฤติ (critical load) ของชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดที่มีจุดรองรับแบบหมุดในรูปของสมการของ Euler ตามสมการที่ (1) และในการออกแบบกำหนดให้ส่วนความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 3.0 โดยที่ E_L คือ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัด (flexural modulus of elasticity) ที่ได้จากการทดสอบแรงดัดของหน้าตัด (full-section flexural test) และ K คือ แฟกเตอร์ความยาวประสิทธิผล (effective length factor) สำหรับจุดรองรับแบบต่าง ๆ ซึ่งใช้ค่าเดียวกับการออกแบบเหล็กรูปพรรณ

$$\sigma_{ult.euler} = \frac{\pi^2 E_L}{(KL/r)^2} \quad (1)$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคู่มือออกแบบของ ASCE อยู่บนพื้นฐานของ Working Stress Design (WSD) ซึ่งค่อนข้างล้าสมัยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นฐานการออกแบบ Load Resistant Factor Design (LRFD) ที่ใช้การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยมาตรฐานการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ได้รับการยอมรับมากมาตรฐานหนึ่งสำหรับเหล็กรางน้ำคู้คือ AISC-LRFD section E2 [9] ซึ่งกำหนดให้สมการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำคู้ภายใต้แรงอัดอยู่ในรูป

$$P_u = \phi P_n = \phi \sigma_{cr} A_g \quad (2)$$

เมื่อ P_n คือกำลังรับแรงอัดในแนวแกน (axial compression strength) σ_{cr} คือ หน่วยแรงอัดวิกฤติ (critical compressive stress)

สำหรับการโก่งเดาะแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic buckling)

$$\sigma_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) f_y \quad (3)$$

เมื่อ $\lambda_c \leq 1.5$ สำหรับการโก่งเดาะแบบยืดหยุ่น (elastic buckling)

$$\sigma_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) f_y \quad (4)$$

เมื่อ $\lambda_c > 1.5$ โดยที่ f_y คือ หน่วยแรงคราก (yielding stress) และ λ_c คือ ค่าพารามิเตอร์ความชะลูด (slenderness ratio parameter) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 5

$$\lambda_c = \left(\frac{KL}{r\pi} \right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (5)$$

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) KL คือ ความยาวประสิทธิผล (effective length) r คือ ค่าน้อยที่สุดของรัศมีไจเรชั่น (radius of gyration) ของหน้าตัด

สำหรับหน้าตัดประกอบ (built-up sections) มาตรฐาน AISC-LRFD กำหนดให้ระยะห่างของจุดเชื่อมต่อ (connector spacing) ตามสมการที่ (6) เพื่อให้ชิ้นส่วนที่นำมาประกอบมีความสามารถในการกระจายแรงเฉือน (shear flow) และเกิด composite action อย่างสมบูรณ์

$$\frac{a}{r_i} \leq 0.75 \left(\frac{KL}{r} \right)_o \quad (6)$$

เมื่อ

a คือ ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อ (connector spacing)

$\left(\frac{KL}{r} \right)_o$ คือ อัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ของชิ้นส่วนประกอบ (built-up member) รอบแกนรอง

r_i คือ ค่าน้อยที่สุดของรัศมีไจเรชั่น (radius of gyration) ของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ (individual component)

Lue และคณะ [10-11] ได้นำเสนอผลการทดสอบและประเมินผลทางทฤษฎีการโก่งเดาะของเสาประกอบ



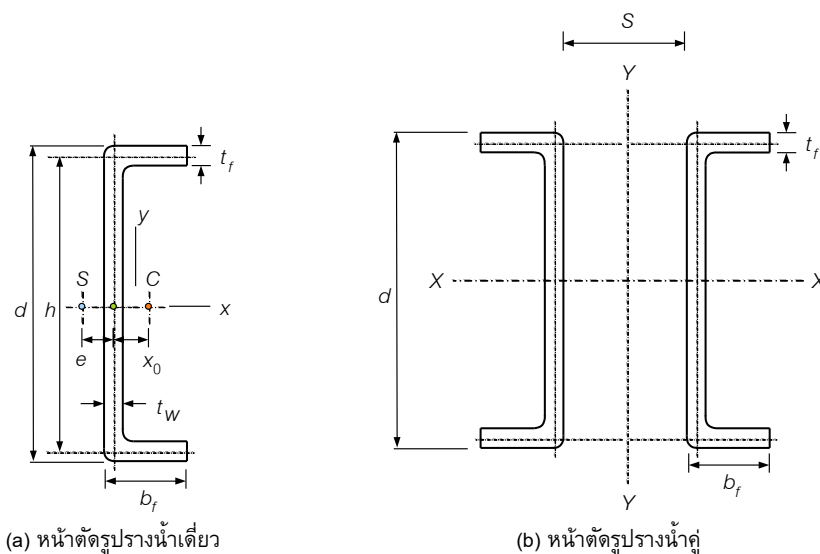
รูปที่ 1 สะพานที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วน PFRP

(built-up column) เหล็กรูปพรรณ โดยพบว่า เสาเหล็ก รูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดมีพฤติกรรมแบบคอมโพสิต (composite) หรือแบบประกอบ (built-up) ตามมาตรฐานการออกแบบได้นั้น หน้าตัดทั้งสองต้องได้รับการยึดแน่นหนาเพียงพอ เช่น การเชื่อมไฟฟ้าหรือการใช้สลักเกลียวที่มีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อที่เพียงพอ เพื่อให้จุดเชื่อมต่อมีความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนที่เกิดขึ้นหรือเกิด composite action ระหว่างกัน ในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดการโก่งเดาะ อย่างไรก็ตามสำหรับการนำชิ้นส่วนประกอบ PFRP ไปใช้ในงานก่อสร้างนั้นชิ้นส่วนดังกล่าวไม่ได้ทำหน้าที่อยู่ในโครงสร้างหลัก เช่น เสา เป็นต้น แต่นำไปใช้ในโครงสร้างประเภท โครงข้อหมุน (truss) ระบบยึดรั้ง (bracing) ดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูปพบว่าระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่ามากกว่าที่มาตรฐานกำหนด จากงานวิจัยที่ผ่านมา ชานนท์ และคณะ [12-13] พบว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนของชิ้นส่วนประกอบ PFRP มีพื้นฐานการรับน้ำหนักบรรทุกที่ชิ้นส่วนประกอบหรือหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว ดังนั้นหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง PFRP ในลักษณะดังกล่าวจะไม่สามารถเชื่อมต่อได้ตามข้อกำหนดในมาตรฐานเนื่องจากข้อจำกัดในการยึดหน้าตัดเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้วิศวกรไม่สามารถใช้สมการออกแบบทั้งของ ASCE และ AISC ได้โดยตรง ดังนั้น จากข้อจำกัดของการประกอบชิ้นส่วน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัด PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดในแนวแกนที่มีระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อในลักษณะต่าง ๆ และนำผลที่ได้จากการทดสอบ

เปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ ASCE และ AISC-LRFD เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของหน้าตัดของชิ้นส่วน FRP ที่ใช้ในงานวิจัยกับเหล็กรูปพรรณ และเพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าวให้มีความปลอดภัยและทันสมัยต่อไป

2. ตัวอย่างทดสอบและการติดตั้ง

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นส่วนหน้าตัดรูปรางน้ำ ซึ่งถูกผลิตโดยกระบวนการผลิตพัลทรูชัน (pultrusion process) จาก E-glass fiber และ polyester resin โดยถูกนำมาประกอบเป็นหน้าตัดรูปรางน้ำคู่โดยใช้เหล็กกล่องเป็นตัวคั่น (spacer) และยึดเข้ากันด้วยสลักเกลียวผ่านจุดศูนย์กลางของเหล็กกล่อง รูปที่ 2



(a) หน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

(b) หน้าตัดรูปรางน้ำคู่

รูปที่ 2 ลักษณะหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวและรางน้ำคู่

ตารางที่ 1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

Dimension (mm×mm×mm) $d \times b \times t$	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h (mm)	e (mm)	x_0 (mm)
76×22×6	76	22	6	6	70	7.2	3.3
102×29×6	102	29	6	6	96	9.3	4.5
152×43×10	152	43	10	10	142	13.9	6.5

ตารางที่ 2 สมบัติของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวและหน้าตัดรูปรางน้ำคู่

Dimension (mm×mm×mm) $d \times b \times t$	Single C-section				Double C-section				
	Area (mm ²)	I_{X-X} (10 ⁶) (mm ⁴)	I_{Y-Y} (10 ⁶) (mm ⁴)	r_{min} (mm)	Area (mm ²)	I_{X-X} (10 ⁶) (mm ⁴)	I_{Y-Y} (10 ⁶) (mm ⁴)	r_{min} (mm)	S (mm)
76×22×6	648	0.46	0.02	6.0	1296	0.91	0.87	25.9	38
102×29×6	888	1.17	0.05	8.0	1776	2.33	1.98	33.4	50
152×43×10	2180	6.26	0.30	11.8	4360	12.52	11.04	50.3	75

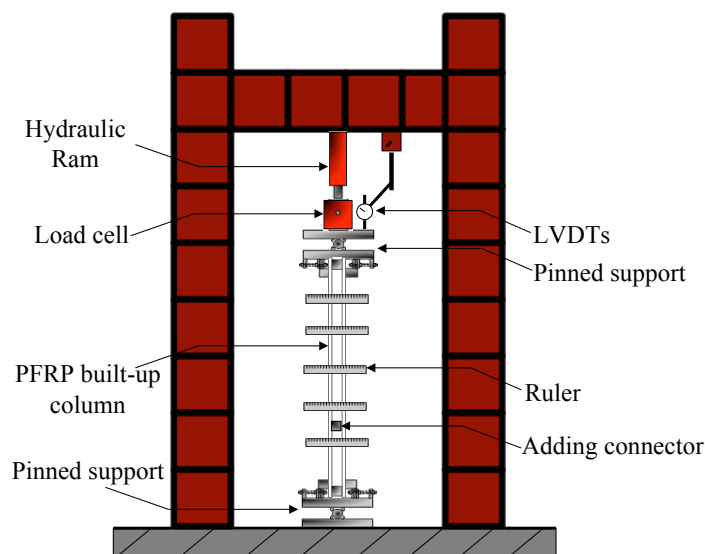
ซึ่งแสดงลักษณะหน้าตัดรูปร่างน้ำและรางน้ำคู่ สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการทดสอบวัสดุของหน้าตัด (full scale testing material) โดยมีค่าเฉลี่ยของและ เท่ากับ 181.1 MPa และ 34.2 GPa ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัด ของหน้าตัดเท่ากับ 30.9 GPa ดังที่แสดงรายละเอียดและสมบัติของทั้ง 3 หน้าตัดในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตัวอย่างทดสอบมีความยาวอยู่ในช่วง 1.50-2.00 m โดยมีอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) บนพื้นฐานของหน้าตัดรูปร่างน้ำเดี่ยวอยู่ในช่วง 124 ถึง 188 เนื่องจากรูปร่างการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเสาที่ได้จากการทดสอบเป็นแบบอิสระต่อกันโดยตัวอย่างทดสอบเสาที่ศึกษาไม่มี composite action เกิดขึ้น ซึ่ง

รายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3 ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 30 ตัวอย่าง ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยชื่อตัวอย่างทดสอบ ความยาว แฟกเตอร์ความยาวประสิทธิผล และอัตราส่วนความชะลูด ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกแสดงอยู่ในรูป “ $2Cd-L-N-S$ ” เมื่อ d คือความลึกของหน้าตัดรูปร่างน้ำเดี่ยว L คือความยาวของตัวอย่างทดสอบ N คือจำนวนของจุดเชื่อมต่อ และ S คือระยะที่มีการติดจุดเชื่อมต่อระหว่างกลาง ตัวอย่างเช่น $2C76-1.5-3-L/4$ หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดความลึกของหน้าตัดรูปร่างน้ำเดี่ยว 76 mm ความยาว 1.5 m ติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดโดยจุดเชื่อมต่อระหว่างหัวและท้ายอยู่ที่ระยะ $L/4$

ตารางที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	r (mm)	KL/r	σ_{LRFD} (MPa)	Number
2C76-1.0-3-L/4	76 × 22 × 6	1.0	6.02	166.11	12.22	3
2C76-1.0-3-L/8	76 × 22 × 6	1.0	6.02	116.28	15.08	3
2C102-1.0-3-L/4	102 × 29 × 6	1.0	8.01	124.84	21.63	3
2C102-1.0-3-L/8	102 × 29 × 6	1.0	8.01	87.39	26.71	3
2C102-1.5-3-L/4	102 × 29 × 6	1.5	8.01	187.27	9.62	3
2C102-1.5-3-L/8	102 × 29 × 6	1.5	8.01	131.09	11.87	3
2C152-1.5-3-L/4	152 × 43 × 10	1.5	11.78	127.33	20.79	3
2C152-1.5-3-L/8	152 × 43 × 10	1.5	11.78	89.13	25.67	3
2C152-2.0-3-L/4	152 × 43 × 10	2.0	11.78	169.78	11.70	3
2C152-2.0-3-L/8	152 × 43 × 10	2.0	11.78	118.85	14.44	3



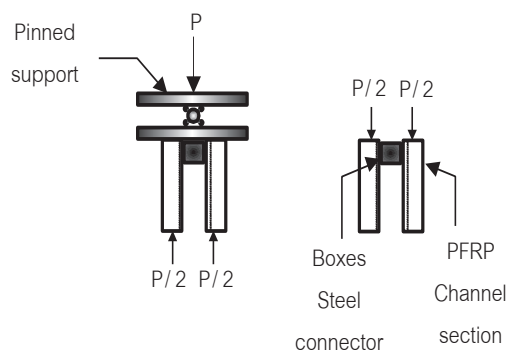
รูปที่ 3 แผนภาพการติดตั้งชิ้นส่วนประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง



รูปที่ 4 ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างชิ้นส่วนประกอบ FRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ก่อนการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดค่า หรือ initial out-of straightness โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM D3917 [14] พบว่า ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังนั้นจึงไม่พิจารณาผลของการโก่งตัวเริ่มต้น (initial crookedness) ต่อค่าแรงสูงสุดที่วัดได้ รูปที่ 3 แสดงแผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ โดยจุดรองรับที่ปลายทั้งสองข้างเป็นหมุด (pin) ที่หมุดได้รอบแกนรองของหน้าตัดรางนำคูล์ และหลังจากติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับให้ตรงตามแนวตั้งแล้วปลายตัวอย่างทดสอบจะถูกยึดไว้ด้วยเหล็กฉากทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันตัวอย่างทดสอบเลื่อนออกจากจุดรองรับในกรณีของการโก่งเคาะทางด้านข้าง จะทำการติดไม้บรรทัดจำนวน 5 ชิ้นที่ระยะ เพื่อบันทึกการโก่งตัวทางด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้น ให้แรงกระทำในแนวแกนกับตัวอย่างทดสอบโดยใช้ระบบไฮดรอลิกที่ติดตั้งไว้ปลายด้านบนของตัวอย่างทดสอบ แรงกระทำ ดังกล่าวจะถูกถ่ายผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (bearing plate) กระทำต่อหน้าตัดรูปร่างนำเดี่ยว โดยตรงหน้าตัดละ ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อจำลองลักษณะการใช้งานจริงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัดและมักพบในโครงข้อหมุน และระบบยึดรั้ง จากนั้น ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนถูกวัดจาก Linear Variable Differential Transducer (LVDT) ซึ่งติดตั้งที่

ปลายด้านบนของตัวอย่างทดสอบ แรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนถูกบันทึกโดย MW100 YOKOGAWA data acquisition unit สำหรับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างบันทึกจากการอ่านค่าบนไม้บรรทัดที่ติดตั้งไว้บนตัวอย่างทดสอบโดยใช้กล้องวัดมุม Theodolite อย่างไรก็ตาม ก่อนการทดสอบตัวอย่างทดสอบจะถูกให้แรงกระทำก่อนเพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมของตัวอย่างทดสอบและจุดรองรับ สุดท้าย ตัวอย่างทดสอบจะถูกทดสอบอย่างต่อเนื่องจนไม่สามารถรับแรงได้ โดยสังเกตจากแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นน้อยมากหรือไม่เพิ่มขึ้นเลย ในขณะที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้นมาก



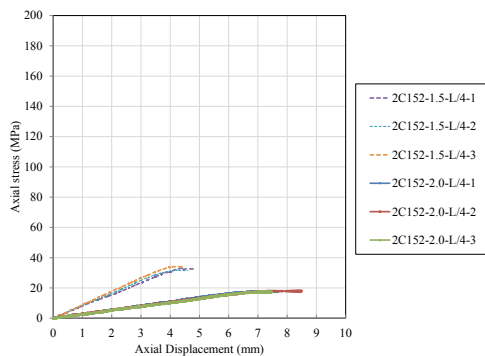
รูปที่ 5 แรงกระทำถ่ายผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทานกระทำต่อหน้าตัดรูปร่างนำเดี่ยวโดยตรง

3. ผลการศึกษา

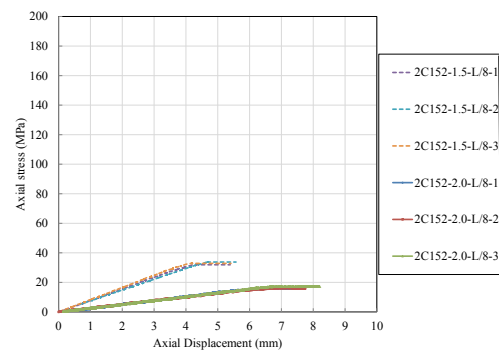
3.1 พฤติกรรมและลักษณะการวิบัติ

รูปที่ 6 (a) แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างที่ระยะ $L/4$ ของความยาว จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยการ

โก่งเดาะเนื่องจากการตัดโดยชิ้นประกอบไปในทิศทางขนานกัน (individual parallel buckling) รูปที่ 6 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างที่ระยะ $L/8$ ของความยาว จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรงจนถึงแรงโก่งเดาะ โดยที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเนื่องจากการตัดโดยชิ้นประกอบไปในทิศทางตรงกันข้าม (individual opposite buckling)



(a) $L/4$



(b) $L/8$

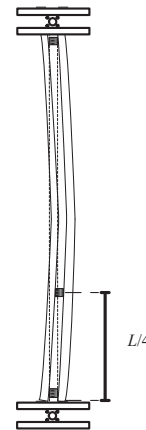
รูปที่ 6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน

รูปที่ 7 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ และรูปที่ 8 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/8$ โดยลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง สามารถแบ่งลักษณะการวิบัติได้เป็น 2 ลักษณะแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะเนื่องจากการตัดโดยชิ้นประกอบในทิศทางตรงกันข้ามกัน (individual opposite buckling) และการโก่งเดาะเนื่องจากการตัดโดยชิ้นประกอบในทิศทางขนานกัน (individual parallel buckling) จากสมการที่ (6) กำหนดให้ $\frac{a}{r_i} \leq 0.75 \left(\frac{KL}{r} \right)_o$ ดังนั้นระยะที่มากที่สุดที่ทำให้เสาเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการวิบัติของหน้าตัด $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ เป็นไป

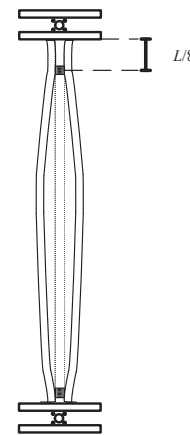
ตามที่แสดงในตารางที่ 4 จากตารางดังกล่าวพบว่า ระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อที่มากที่สุดมีค่าอยู่ระหว่างระยะ $L/4$ และ $L/8$ แสดงให้เห็นว่าระยะ $L/4$ ทำให้เสาเกิดการวิบัติแบบ individual parallel buckling ในขณะที่ระยะ $L/8$ ควรทำให้เสาเกิดการวิบัติแบบ individual opposite buckling โดยจากการทดสอบพบว่า เป็นไปตามสมการดังกล่าว สุดท้ายจากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่างโดยตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการตัดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าเนื่องจากการติดจุดเชื่อมต่อที่ระยะ $L/4$ และ $L/8$ เทียบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD

Section	L (mm)	r_o (mm)	r_i (mm)	$0.75(KL/r)_o$	$a_{L/4}$ (mm)	$\frac{a_{L/4}}{r_i}$	$a_{L/8}$ (mm)	$\frac{a_{L/8}}{r_i}$
$76 \times 22 \times 6$	1000	25.92	6.02	28.94	250	41.53	125	20.76
$102 \times 29 \times 6$	1000	33.43	8.01	22.43	250	31.21	125	15.61
	1500	33.43	8.01	33.65	375	46.82	187.5	23.41
$152 \times 43 \times 10$	1500	50.33	11.78	22.35	375	31.83	187.5	15.92
	2000	50.33	11.78	29.80	500	42.44	250	21.22



รูปที่ 7 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel buckling ของตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$



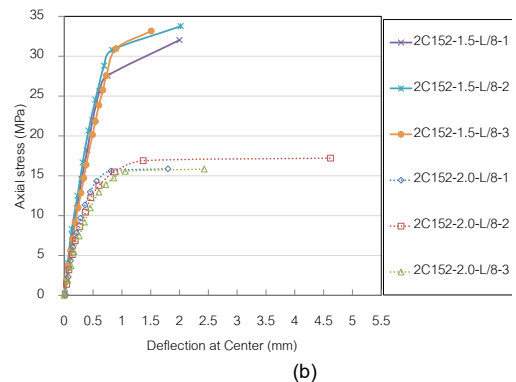
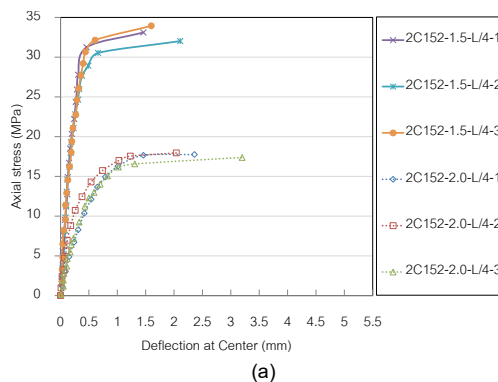
รูปที่ 8 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติแบบ individual opposite buckling ของตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/8$

พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมรับแรงในแนวแกน รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกอดัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของเสาที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะระหว่างความยาว จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณร้อยละ 90 ของหน่วยแรงโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นในรูป geometrical nonlinear จนกระทั่งตัวอย่าง

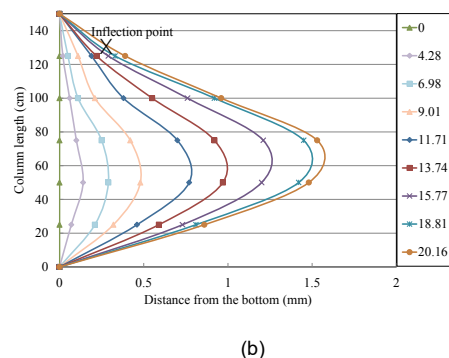
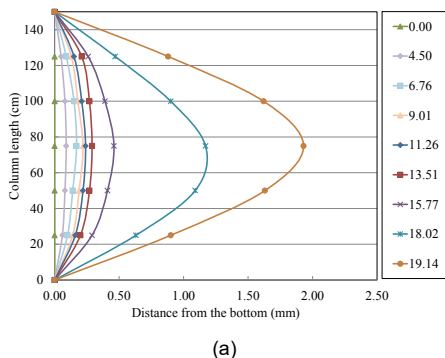
ทดสอบเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะ รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 10 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อหน่วยแรงกอดัดมีค่าน้อยการโก่งตัวทางด้านข้างจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อหน่วยแรงกอดัดที่มากขึ้นจะทำให้ค่าหน่วยแรงโก่งเดาะค่าการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นสูงมาก จากรูปร่างการโก่งตัวแบ่งลักษณะการวิบัติออกเป็น 2 แบบ คือลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel buckling และ individual opposite buckling โดยจากลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel

buckling พบว่ามีลักษณะของการดัดคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่มีจตุรรองรับแบบหมุด (pinned-pinned supported) ดังนั้นค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล (effective length factor, K) ที่ใช้ต้องมีค่าเท่ากับ 1.0 ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบกับสมการทางทฤษฎีพบว่าค่า มีค่าประมาณเท่ากับ 0.9 แต่จากลักษณะการโก่งตัวทางด้านข้างและเพื่อความปลอดภัยจึงควรใช้ค่าเท่ากับ 1.0 ในขณะที่ลักษณะการบิดแบบ individual opposite buckling เนื่องจากการยึด

รั้งของจุดเชื่อมทำให้มีลักษณะของการดัดคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่มีจตุรรองรับแบบหมุด-ยึดแน่น (pinned-fixed supported) ดังนั้นค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล (effective length factor, K) ที่ใช้ต้องมีค่าเท่ากับ 0.7 ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบกับสมการทางทฤษฎีพบว่าค่า มีค่าประมาณเท่ากับ 1.0 ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยต่อการนำค่าดังกล่าวไปคำนวณออกแบบจึงควรใช้ค่าเท่ากับ 1.0



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มเติมที่ระยะ L/4 และ L/8



รูปที่ 10 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มเติมที่ระยะ L/4 และ L/8

3.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD

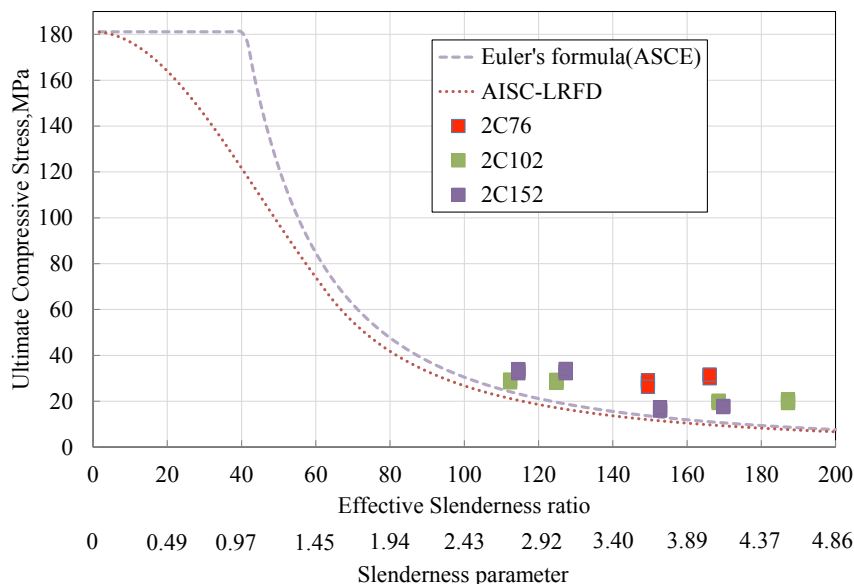
ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างสำหรับตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$, $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว หน่วยแรงโก่งเดาะ (buckling stress) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัว

ถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นหน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($\sigma_{cr,EXP}$) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน หน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลุดของตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่าง

ปลายทั้งสองข้าง จากรูปพบว่าอัตราส่วนความชะลุดของเสาประกอบเป็นปัจจัยที่มีผลต่อหน่วยแรงโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm สามารถรับหน่วยแรงได้ใกล้เคียงตัวอย่างหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ และ $76 \times 22 \times 6$ mm ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา [12-13] พบว่าการติดตั้งจุดเชื่อมต่ออย่างง่ายเพิ่มเติมนั้นไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงเพิ่ม เนื่องจากระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่ามากทำให้การกระจายแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อมต่อไม่สมบูรณ์ ดังนั้นชิ้นส่วนรับแรงอัดดังกล่าวจึงมีพื้นฐานของการรับน้ำหนักบรรทุกทุกอยู่ที่ชิ้นส่วนหน้าตัดรูปร่างนำเดี่ยว

สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งเดาะจากการทดสอบ และหน่วยแรงโก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($\sigma_{cr,LRFD}$) สำหรับเสาประกอบ FRP ที่มีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดตั้งระหว่างปลายทั้งสองข้างสามารถคำนวณค่า $\sigma_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (1-5) พบว่าอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงโก่ง

เดาะจากการทดสอบและหน่วยแรงโก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($\sigma_{cr,EXP} / \sigma_{cr,LRFD}$) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.11-2.36 โดยสาเหตุที่หน่วยแรงโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่าหน่วยแรงที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก 1) สมการออกแบบของ LRFD เป็นสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่รวมผลเนื่องจากหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ที่เกิดจากการผลิตซึ่งตัวอย่างทดสอบในการศึกษานั้นเป็นวัสดุ FRP ไม่มีผลเนื่องจากแรงดังกล่าว 2) ความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ (material variation) นอกจากนี้จากการพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน หน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($\sigma_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนความชะลุดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่ออัตราส่วนความชะลุดเพิ่มขึ้นลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการดัด (flexural buckling) สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลุดของตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดตั้งระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบตัวอย่างชิ้นส่วนประกอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

Specimens	L/r	Experiment				Analytical		Cal. K factor
		Test A $\sigma_{cr,A}$ (MPa)	Test B $\sigma_{cr,B}$ (MPa)	Test C $\sigma_{cr,C}$ (MPa)	Average $\sigma_{cr,EXP}$ (MPa)	LRFD ($\sigma_{cr,LRFD}$) (MPa)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$	
2C76-1.0-3-L/4	166.11	29.94	31.48	31.48	30.97	13.12	2.36	0.74
2C76-1.0-3-L/8	149.50	28.09	29.01	26.23	27.78	16.20	1.71	0.86
2C102-1.0-3-L/4	124.84	28.15	29.28	27.93	28.45	21.08	1.35	0.70
2C102-1.0-3-L/8	112.36	28.15	29.28	29.28	28.90	26.02	1.11	0.77
2C102-1.5-3-L/4	187.27	20.72	19.82	19.14	19.89	9.37	2.12	0.87
2C102-1.5-3-L/8	168.54	20.16	19.82	19.14	19.71	11.56	1.71	0.96
2C152-1.5-3-L/4	127.33	33.03	32.11	34.04	33.06	14.49	2.28	0.52
2C152-1.5-3-L/8	114.60	32.11	33.94	33.03	33.03	17.89	1.85	0.60
2C152-2.0-3-L/4	169.78	17.80	17.89	17.34	17.68	8.15	2.17	0.51
2C152-2.0-3-L/8	152.80	15.87	15.87	17.25	16.33	10.06	1.62	0.56

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้าง PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงอัดในแนวแกนที่มีระยะของจุดเชื่อมต่อที่แตกต่างกันได้ผลสรุปที่สำคัญดังนี้

1. พฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณร้อยละ 90 ของแรงโก่งเดาะวิกฤติ จากนั้น พฤติกรรมจะคงที่และค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้น ลักษณะการวิบัติแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ การโก่งเดาะของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยวในรูปแบบ individual opposite buckling และ individual parallel buckling

2. การติดตั้งจุดเชื่อมต่ออย่างง่ายเข้ากับช่วงตัวอย่างทดสอบที่ระยะต่าง ๆ เพื่อการค้ำยันชิ้นส่วนประกอบของตัวอย่างทดสอบพบว่า มีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกันอย่างมากเมื่อระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบของ AISC-LRFD แต่ไม่ส่งผลให้รับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่ามาก จึงทำให้ผลของการถ่ายแรงเฉือนและ composite action เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นความสามารถในการรับแรงจึงขึ้นอยู่กับชิ้นส่วน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

3. ลักษณะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่ระยะการโก่งตัวสูงสุดมีลักษณะการโก่งตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า ของตัวอย่างทดสอบจึงแปรเปลี่ยนตาม

ลักษณะการวิบัติ อย่างไรก็ตามเพื่อความปลอดภัยต่อการคำนวณออกแบบค่า ของตัวอย่างทดสอบควรมีค่าประมาณเท่ากับ 1.0

4. จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบของ AISC-LRFD และ ASCE พบว่า สมการทั้งสองมีปลอดภัยค่อนข้างสูงต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงอัดประลัย โดยสาเหตุเนื่องจากชนิดของวัสดุ PFRP ซึ่งไม่มีผลเนื่องจากหน่วยแรงคงค้างและความแปรปรวนของสมบัติของวัสดุ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และสาขาวิศวกรรมโยธาสำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Barbero E.J. and DeVivo L. 1999. Beam-column design equations for wide-flange pultruded structural shapes. Journal of Composites for Construction. Volumn 3 Number 4: 185-191.
- [2] Mottram J.T. 2004. Determination of critical load

- for flange buckling in concentrically loaded pultruded columns. *Composites Part B*. 35: 35-47.
- [3] Loughlan J. 1996. The buckling of composite stiffened box sections subjected to compression and bending. *Composite Structures*. Volumn 35 Number 1: 101-116.
- [4] Turvey G.J. 1996. Lateral buckling tests on rectangular cross-section pultruded GRP cantilever beams. *Composites Part B*. 27B: 34-42.
- [5] Vanevenhoven L.M., Shield C.K. and Bank L.C. 2010. LRFD factors for pultruded wide-flange columns. *Journal of Structural Engineering*. Volumn 136 Number 5: 554-564.
- [6] Nagaraj V. and Gangarao V.S. 1997. Static behavior of pultruded GFRP beams. *Journal of Composites for Construction*. 1: 120-129.
- [7] Barbero E., Fu S.H. and Raftoyiannis I. 1991. Ultimate bending strength of composite beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Volume 3 Number 4: 292-306
- [8] ASCE Structural Plastic Design Manual. 1984. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No. 63. ASCE. NY.
- [9] American Institute of Steel Construction, AISC. 2005. Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design. Chicago.
- [10] Lue D.M., Yen T. and Liu J.L. 2006. Experimental investigation on built-up columns. *Journal of Construction Steel Research*. pp. 1325-1332.
- [11] Liu J.L., Lue D.M. and Liu J.L. 2009. Investigation on slenderness ratios of built-up compression members. *Journal of Construction Steel Research*. pp. 237-248.
- [12] Chatwivat C., Seangatith S. and Thumrongvut J. 2012. An experimental study on PFRP built-up columns with double C-sections under axial compression. 17th National Convention on Civil Engineering, pp. STR-20.
- [13] ชานนท์ จัตรวีวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรดา ชำรงวุฒิ. 2556. พฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีดขึ้นหน้าตัดรูปรางน้ำ. วิศวกรรมสาร มช.
- [14] American Society for Testing and Materials. 2011. Annual Book of ASTM Standard. Standard specification for dimensional tolerance of thermosetting glass- reinforced plastic pultruded shapes. ASTM Standard No. D3917. PA.