

การศึกษาโดยการทดสอบเสาประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูด  
หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

นายชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**EXPERIMENTAL STUDY ON PFRP BUILT-UP  
COLUMNS WITH DOUBLE C-SECTION  
UNDER AXIAL COMPRESSION**

**Chanon Chatwivat**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2012**

การศึกษาโดยการทดสอบเสาประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด  
หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.จักษดา ชำรงวุฒิ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ : การศึกษาโดยการทดสอบเสาประกอบพลาสติกเสริมเส้นใย  
แบบพัลทูดหน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน (EXPERIMENTAL STUDY  
ON FRP BUILT-UP COLUMNS WITH DOUBLE C-SECTIONS UNDER AXIAL  
COMPRESSION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 197 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาประกอบFRPหน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่ใช้ในศึกษาประกอบด้วยเส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์และผลิตโดยวิธี Pultrusion ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่  $76 \times 22 \times 6$   $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm โดยมีอัตราส่วนความชะลูดอยู่ในช่วงระหว่าง 21-188 เสาประกอบFRP จำนวน 87 ตัวอย่าง ถูกทดสอบเพื่อศึกษาผลของความยาวต่อการตอบสนองทางโครงสร้างและหน่วยแรง โกงเดาะของคาน จากนั้น หน่วยแรง โกงเดาะของตัวอย่างเสาที่ทดสอบได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LFRD

จากผลการทดสอบโดยรวมพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนสามารถแบ่งความสัมพันธ์ออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือความสัมพันธ์แบบตัวอย่างทดสอบเสาสั้นและตัวอย่างทดสอบเสายาว ตัวอย่างทดสอบเสาสั้นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบเสายาวมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึง 60-100% ของหน่วยแรง โกงเดาะ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเป็นแบบการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการตัดโดยชิ้นส่วนหน้าตัดรูปร่างน้ำเดี่ยว หน่วยแรง โกงเดาะที่ทดสอบได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความชะลูดมีค่าลดลง จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการที่นำมาคำนวณออกแบบพบว่าสมการดังกล่าวสามารถทำนายหน่วยแรง โกงเดาะของเสาได้อย่างถูกต้องเพียงพอ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

CHANON CHATWIWAT : EXPERIMENTAL STUDY ON PFRP BUILT-  
UP COLUMNS WITH DOUBLE C-SECTION UNDER AXIAL  
COMPRESSION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SITTICHAJ  
SEANGATITH, Ph.D., 197 PP.

PFRP COMPOSITE COLUMNS/PULTRUSION/CHANNEL SECTION  
/COMPRESSION/ FLEXURAL BUCKLING

The objectives of this research are to study the structural behaviors of the pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) double channel columns under axial compression. The PFRP channel beams used in this study were made of E-glass fiber reinforcement and polyester resin and manufactured by a pultrusion process. Three different geometries of the beams are  $76 \times 22 \times 6$ ,  $102 \times 29 \times 6$  and  $152 \times 43 \times 10$  mm. The slenderness ratios of the specimens are in the range of 21 to 188. A total of 87 specimens were tested to investigate the effects of span of the column on the structural responses and buckling moment. Then, the obtained buckling moments were compared to the buckling moments calculated by using the LRFD steel design equation.

Based on the test results, it was found that the axial stress versus axial displacement relationships of the column specimens are classified into two types: short column and long column. The short column specimens exhibit linear elastic to failure response while the long column specimens exhibit linear response up to 60-100 % of the buckling stress. Which is similar to the stress versus mid-span lateral deflection relationships. The general mode of failure is the flexural buckling of individual channel section. The critical buckling stress increases as the slenderness

ratios of column decreases. In addition, 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.



School of Civil Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาทั้งด้านวิชาการและการชี้แนะแนวทางในการดำรงชีวิต
- ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวรรณเดช รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ อาจารย์ และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา
- อาจารย์ ดร.จักษดา ชำรงวุฒิ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับการให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- คุณณัฐญา กิ่งโคกกรวด และคุณจรรยาพร ศรีวิไลลักษณ์ ที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับการติดต่อประสานงานต่าง ๆ
- คุณวรวรรณชัย สายวาริณ คุณปรัชญา ก้านบัว เพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำโดยตลอด
- คุณกิตติศักดิ์ แสงขุรัง และคุณชนศักดิ์ รัตนพันธ์ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ร่วมมือทดสอบงานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี
- ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ๆ ทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งและช่วยเหลือตัวเองได้จนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	น
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	7
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	8
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>9</b>
2.1 บทนำ .....	9
2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion .....	9
2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ CFRP .....	9
2.2.2 ส่วนประกอบหลักของวัสดุ CFRP .....	10
2.2.2.1 เส้นใยแก้ว .....	10
2.2.2.2 เรซิน .....	12
2.2.3 กระบวนการผลิตวัสดุ CFRP .....	12
2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ CFRP .....	14
2.3 ชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion .....	21
2.4 พฤติกรรมและการออกแบบเสาและชิ้นส่วนรับแรงอัด .....	27



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของเหล็กgrupพรรณ .....	30
2.4.1.1 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของเหล็กgrup พรรณสำหรับการโก่งเดาะโดยรวม.....	30
2.4.1.2 การเปรียบเทียบการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกน ของเหล็กgrupพรรณสำหรับการโก่งเดาะโดยรวม โดยวิธี AISC/ASD และ AISC/LRFD.....	41
2.4.1.3 การโก่งเดาะของเสาและชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกน สำหรับวัสดุ FRP .....	41
2.4.2 เสาประกอบ .....	49
2.4.2.1 ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อ.....	49
2.4.2.2 ค่าอัตราส่วนความขรุขระที่ได้รับการปรับแต่ง .....	49
2.5 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	50
<b>3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>51</b>
3.1 บทนำ.....	51
3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP.....	53
3.3 การวิเคราะห์กำลังรับแรงกอดัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลโดย สมการออกแบบของ AISC-LRFD .....	58
3.4 การทดสอบกำลังรับแรงกอดัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูล.....	60
3.4.1 การทดสอบเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลที่มีการติดจุดเชื่อม ต่อที่ปลายทั้งสองข้าง.....	63
3.4.2 การทดสอบเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลที่มีการติดจุดเชื่อม ต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว.....	66
3.4.3 การทดสอบเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลที่มีการติดจุดเชื่อม ต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	69
<b>4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล .....</b>	<b>74</b>
4.1 บทนำ.....	74
4.2 การทดสอบวัสดุของชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ.....	74

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	79
4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของ เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลาย ทั้งสองข้าง .....	79
4.3.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้างของ เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลาย ทั้งสองข้าง .....	84
4.3.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติด จุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	88
4.4 เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง และมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	91
4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของ เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลาย ทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	91
4.4.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้างของ เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลาย ทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	94
4.4.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติด จุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว ...	98
4.5 เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง และมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	101
4.5.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของเสา ประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง ข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	101

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.2	พฤติกรรมกรรับแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้างของ เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลาย ทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 106
4.5.3	การเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติด จุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่ม ระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 115
<b>5</b>	<b>สรุปผลงานวิจัย..... 121</b>
5.1	บทนำ..... 121
5.2	สรุปผลทดสอบ ..... 121
5.2.1	พฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้..... 121
5.2.2	ลักษณะการวิบัติเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้..... 122
5.3	ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน ..... 124
5.4	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป ..... 124
รายการอ้างอิง	..... 125
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก	คุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด ..... 128
ภาคผนวก ข	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ..... 174
ประวัติผู้เขียน	..... 196

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่าง โครงสร้างเหล็กรูปพรรณหน้าตัดต่างๆ .....	1
1.2 โครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่เกิดสภาวะกัดกร่อนเนื่องจากสนิม .....	2
1.3 ตัวอย่างหน้าตัดต่างๆ ของวัสดุ PFRP .....	3
1.4 การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP ในลักษณะต่างๆ .....	4
1.5 สะพานที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วน PFRP .....	5
1.6 การนำสะพานที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วน PFRP ไปใช้ในพื้นทีต่างๆ เข้าถึงยาก .....	5
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่างๆ .....	9
2.2 ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion .....	11
2.3 หน้าตัดต่างๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion .....	12
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ PFRP .....	14
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ PFRP .....	18
2.6 Cooling tower ที่ทำจากวัสดุ PFRP .....	19
2.7 การติดตั้ง โครงข้อแข็งที่ทำจากวัสดุ PFRP ระหว่างการก่อสร้าง .....	20
2.8 อาคาร Eyecatcher ที่ทำจากวัสดุ PFRP .....	21
2.9 ลักษณะการทดสอบและหน้าตัดที่นำมาทดสอบ .....	22
2.10 ลักษณะการทดสอบและหน้าตัดที่นำมาทดสอบ .....	23
2.11 ลักษณะการรับแรงของเสาและลักษณะการโก่งเดาะของเสา .....	24
2.12 การโก่งเดาะแบบการตัดของเสาผนังบาง .....	25
2.13 การโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ของเสาผนังบาง .....	26
2.14 การพังทลายของเนื้อวัสดุ (crushing) .....	26
2.15 ลักษณะการยัดรีงที่ปลายของชิ้นส่วน .....	29
2.16 การแบ่งพฤติกรรมในช่วงอิลาสติกและอินอิลาสติกและสมการที่ใช้ .....	32
2.17 หน้าตัดเหล็กสมมาตรแกนเดียว .....	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 การแบ่งพฤติกรรมในช่วงอิลาสติกและอินอิลาสติกและสมการที่ใช้ .....	36
2.19 การทดสอบเสาวัสดุ CFRP .....	40
2.20 ลักษณะหน้าตัดของชิ้นส่วน วัสดุ CFRP ซึ่งรับแรงในแนวแกน .....	43
2.21 ชิ้นส่วนรับแรงกอดัดในแนวแกน .....	44
3.1 แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	48
3.2 แผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงกอดัดของตัวอย่างทดสอบ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี .....	50
3.3 แผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี .....	52
3.4 สรุปวิธีการคำนวณน้ำหนัก โกงเดาะ โดยมาตรฐาน AISC/LRFD และ ASCE.....	55
3.5 ลักษณะหน้าตัดรูปร่างของเสาประกอบ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัย .....	56
3.6 เสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่ใช้ในงานวิจัย .....	56
3.7 ลักษณะจุดรองรับแบบหมุด (Pinned-Pinned supports).....	57
3.8 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง.....	59
3.9 การติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง.....	60
3.10 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง.....	62
3.11 การติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	62
3.12 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	64
3.13 การติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	65
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกอดัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบรูปตัวซีจากการทดสอบแรงกอดัดของชิ้นส่วน วัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี.....	68

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงตัดและการ โกงตัวในแนวตั้งของตัวอย่างทดสอบรูปตัวซีจากการทดสอบแรงตัดของชิ้นส่วนวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี .....	70
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง .....	72
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 102×29×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง .....	72
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 152×43×10 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง .....	73
4.6 ลักษณะการ วิบัติแบบเสาสั้นของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	73
4.7 ลักษณะการ วิบัติแบบเสายาวของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	74
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการ โกงตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	76
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการ โกงตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 102×29×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	76
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการ โกงตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 152×43×10 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	77
4.11 รูปร่างการ โกงตัวของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	77
4.12 รูปร่างการ โกงตัวของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลู ขนาด 102×29×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง .....	78
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างทดสอบหน้าตัด $76 \times 22 \times 6$ mm .....	80
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างทดสอบหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ mm .....	80
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างทดสอบหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm .....	81
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	83
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	84
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	84
4.20 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	85
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	86
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้าง ของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว.....	87
4.24 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	87
4.25 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	88
4.26 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว.....	88
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของ ตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมี การติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบหน้าตัด $76 \times 22 \times 6$ mm.....	90
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของ ตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมี การติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ mm.....	90
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของ ตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมี การติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm .....	91
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ที่มี การติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ .....	93
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ .....	94



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $152 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ .....	94
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/8$ .....	95
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/8$ .....	95
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่ง ในแนวแกนของตัวอย่างขนาด $152 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/8$ .....	96
4.36 ลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel buckling ของตัวอย่าง ทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ .....	96
4.37 ลักษณะการวิบัติแบบ individual opposite buckling ของตัวอย่าง ทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/8$ .....	97
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้าง ของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ .....	98
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้าง ของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ .....	99
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้าง ของตัวอย่างขนาด $152 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ $L/4$ .....	99

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้าง ของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 .....	100
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้าง ของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 .....	100
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้าง ของตัวอย่างขนาด $152 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 .....	101
4.44 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/4 ความยาว 1.0 m .....	101
4.45 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 ความยาว 1.0 m .....	102
4.46 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/4 ความยาว 1.0 m .....	102
4.47 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 ความยาว 1.0 m .....	103
4.48 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/4 ความยาว 1.5 m .....	103
4.49 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 ความยาว 1.5 m .....	104
4.50 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/4 ความยาว 1.5 m .....	104
4.51 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 ความยาว 1.5 m .....	105
4.52 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/4 ความยาว 2.0 m .....	105

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53 รูปร่างการโค้งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด 152×43×10 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ L/8 ความยาว 2.0 m.....	106
4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของ ตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง และมีการติดเพิ่มที่ระหว่างปลายทั้งสองข้างของ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัด 76×22×6 mm.....	107
4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของ ตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง และมีการติดเพิ่มที่ระหว่างปลายทั้งสองข้างของ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัด 102×29×6 mm.....	108
4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของ ตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง และมีการติดเพิ่มที่ระหว่างปลายทั้งสองข้างของ ตัวอย่างทดสอบหน้าตัด 152×43×10 mm.....	108
4.57 ขั้นตอน การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของวัสดุ FRP.....	111

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติของใยแก้วชนิด E-glass ..... 10
2.2	คุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกล ของเหล็กรูปพรรณ ตามมาตรฐาน ASTM A36 ..... 14
2.3	คุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกล ของเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 ..... 17
2.4	ค่าของตัวประกอบความยาวประสิทธิผล ..... 31
2.5	ค่าของตัวประกอบความยาวประสิทธิผล Creative pultrusion ..... 45
3.1	รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ CFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่นำมาทดสอบแรงกดอัด ..... 53
3.2	รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ CFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่นำมาทดสอบแรงอัด ..... 55
3.3	รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างน้ำของชิ้นส่วน CFRP ที่นำมาใช้ในงานวิจัย ..... 60
3.4	คุณสมบัติของเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา ..... 61
3.5	รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง ..... 63
3.6	รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง ..... 63
3.7	รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง ..... 63
3.8	รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่ม ตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 65
3.9	รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่ม ตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 66

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.10	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่ม ตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 66
3.11	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่ม ระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 68
3.12	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่ม ระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 69
3.13	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่ม ระหว่างปลายทั้งสองข้าง ..... 69
4.1	ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดอัดของชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซี ..... 73
4.2	ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซี ..... 75
4.3	ความแกร่งของเสาประกอบ FRP ขนาด 76×22×6 mm ..... 79
4.4	ความแกร่งของเสาประกอบ FRP ขนาด 102×29×6 mm ..... 80
4.5	ความแกร่งของเสาประกอบ FRP ขนาด 152×43×6 mm ..... 80
4.6	ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของเสาประกอบ FRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง ..... 87
4.10	ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของเสาประกอบ FRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง ..... 87
4.11	ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของเสาประกอบ FRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง ..... 88

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	97
4.13 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	98
4.14 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว .....	98
4.15 การเปรียบเทียบค่าเนื่องจากการติดจุดเชื่อมต่อที่ระยะ $L/4$ และ $L/8$ เทียบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD .....	100
4.16 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	116
4.17 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	116
4.18 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง .....	117

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	=	ระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อ
$A$	=	พื้นที่หน้าตัด
$A_w$	=	พื้นที่หน้าตัดของแฉก
$b_c$	=	ความกว้างปีกลบด้วยความหนาของปีก ( $b_f - t_f$ )
$b_f$	=	ความกว้างของปีก
$c$	=	ระยะที่วัดจากแกนสะเทินถึงผิวด้านบนหรือผิวด้านล่างของคาน
$C_c$	=	อัตราส่วนความชะลูดวิกฤติ
$C_w$	=	ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยวของหน้าตัด
$d$	=	ความลึกของหน้าตัด
$E$	=	โมดูลัสยืดหยุ่น
$E_L$	=	โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนของเส้นใย
$F_y$	=	หน่วยแรงคราก
$F_p$	=	หน่วยแรงพลาสติก
$F.S.$	=	ตัวคูณความปลอดภัย
$I$	=	โมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกนสะเทิน
$I_{ps}$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วเทียบกับจุดศูนย์กลางแรงเฉือน
$I_x$	=	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนหลัก
$I_y$	=	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง
$J$	=	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด
$K$	=	ตัวประกอบความยาวประสิทธิผล
$K_m$	=	ตัวประกอบความยาวประสิทธิผลเฉพาะที่
$L$	=	ความยาวเสา
$L/d$	=	อัตราส่วนความยาวต่อความลึก
$M$	=	โมเมนต์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน
$M_n$	=	กำลังโมเมนต์ระบุ
$\sigma_{cr,A}$	=	หน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง A

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\sigma_{cr,B}$	=	หน่วยแรง โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง B
$\sigma_{cr,C}$	=	หน่วยแรง โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง C
$\sigma_{cr,EXP}$	=	หน่วยแรง โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบ
$\sigma_{cr,LRFD}$	=	หน่วยแรง โกงเดาะที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี LRFD
$P_n$	=	แรงอัดระบุ
$P_u$	=	แรงอัดที่เพิ่มค่าแล้ว
$Q_i$	=	แรงต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เช่น โมเมนต์ แรงเฉือน
$R_s$	=	ความต้านทานที่สภาวะการใช้งานขององค์อาคาร
$R_n$	=	ความต้านทานระบุ
$r$	=	รัศมีไจเรชั่น
$r_t$	=	รัศมีไจเรชั่นเทียบเท่าของการบิด
$r_{tb}$	=	รัศมีไจเรชั่นเทียบเท่าเนื่องจากการตัดและการบิดร่วมกัน
$r_y$	=	รัศมีไจเรชั่นรอบแกนรอง
$S$	=	โมเมนต์หน้าตัด
$t_f$	=	ความหนาของปีก
$t_w$	=	ความหนาของเอว
$x'_0$	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางแรงเฉือนถึงจุด centroid ของหน้าตัดรูปตัวซี
$\Delta$	=	ระยะการแอ่นตัว
$\Delta_{allow}$	=	ระยะการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้
$\Delta_{max}$	=	ระยะการแอ่นตัวสูงสุด
$\sigma_a$	=	หน่วยแรงอัดที่ยอมให้
$\sigma'_e$	=	หน่วยแรงอัดออยเลอร์ที่ยอมให้
$\sigma_r$	=	หน่วยแรงคงค้าง
$\sigma_{cr}$	=	หน่วยแรงอัดวิกฤติ
$\sigma_e$	=	หน่วยแรงอัดออยเลอร์
$\gamma_i$	=	ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก
$\gamma$	=	ความเครียดเฉือน
$\lambda_c$	=	พารามิเตอร์ความชะลูด



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\phi$	=	ตัวคูณความต้านทาน
$\phi_c$	=	ตัวคูณความต้านทาน ใช้กับชิ้นส่วนรับแรงอัด = 0.5
AISC	=	American Institute of Steel Construction
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
DAQ	=	Data Acquisition Unit
LVDT	=	Linear Variable Differential Transducer
UTM	=	Universal Testing Machine



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา

ในปัจจุบันเหล็กโครงสร้าง (structural steel) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการก่อสร้าง โดยจากข้อมูลล่าสุดของกระทรวงพาณิชย์ (www.moc.go.th, 2553) พบว่าในปี พ.ศ. 2553 ประเทศไทยได้นำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็ก (iron and steel products) มากเป็นลำดับที่ 5 ของสินค้านำเข้าทั้งหมด โดยพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์เหล็กที่ใช้ในงานก่อสร้างด้านต่าง ๆ คิดเป็นมูลค่าประมาณ 375,000 ล้านบาท สำหรับงาน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณจะมีหน้าตัด (section) ให้เลือกตามสภาวะการใช้งานและความเหมาะสมของหน้าตัดเช่น เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปร่างน้ำ (channel section) นิยมนำมาใช้เป็นแปของหลังคา เหล็กรูปพรรณหน้าตัดสมมาตร (symmetry section) เช่น หน้าตัด wide-flange และหน้าตัดรูปตัวไอนิยมใช้เป็นเสาและคาน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่าง โครงสร้างเหล็กรูปพรรณหน้าตัดต่างๆ

แต่ปัญหาที่เกิดจากการใช้เหล็กเป็นวัสดุก่อสร้างคือ เหล็กมีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมโดยจะพุกร่อนได้ง่ายต้องมีการกันสนิมอย่างสม่ำเสมอตลอดอายุการใช้งาน ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซม (repair and maintenance) ถ้าขาดในส่วนของการบำรุงรักษาอาจจะทำให้เหล็กเกิดการพุกร่อนอันนำไปสู่การวิบัติได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างเหล็กที่อยู่ในทะเลและแถบชายฝั่ง (marine and offshore structure)ซึ่งมักประสบปัญหา



รูปที่ 1.2 โครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่เกิดสภาวะกัดกร่อนเนื่องจากสนิม  
(จักษดา ชำรงวุฒิ และ สิทธิชัยแสงอาทิตย์, 2554)

อย่างมากเรื่องการกัดกร่อนของเหล็ก ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.2 ทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ (functionally obsolete) และ/หรือเกิดการบกพร่องของโครงสร้าง (structurally deficiency) อีกด้วย

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีนักวิจัยในต่างประเทศได้พยายามวิจัยค้นหาวัสดุก่อสร้างที่มาทดแทนเหล็กรูปพรรณสำหรับงานก่อสร้าง โครงสร้างใหม่ รวมถึงการซ่อมแซมและบำรุงรักษา โครงสร้างเดิมที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน วัสดุดังกล่าวเรียกว่า พลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic; FRP) โดยเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานการกัดกร่อนเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณ (Bank, 2006) อัตราส่วนของกำลังของวัสดุต่อน้ำหนัก (strength to weight ratio)

จากคุณสมบัติเด่นของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยทำให้วัสดุดังกล่าวถูกทำการศึกษาและวิจัยอย่างแพร่หลายโดยวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยมีชนิดของเส้นใยและเรซิน (resin) รวมถึงกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลาย เช่น พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber reinforced plastic; CFRP) ซึ่งนิยมใช้ในงานวิศวกรรมอากาศยานหรือพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber reinforced plastic; GFRP) ซึ่งมักจะผลิตโดยวิธีพัลทรูชั่น (pultrusion) จะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Pultruded fiber reinforced plastic (PFRP) ซึ่งได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาเป็นอย่างมากในแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกา คุณสมบัติของวัสดุ PFRP คือเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลเหมือนวัสดุอโรโทรปิก (orthotropic material) และเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) จึงต้องพิจารณาคุณสมบัติต่างๆตามทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Creative Pultrusion, Inc., 2004) นอกจากนี้วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยยังมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับวัสดุเปราะ (brittle material) ที่มีพฤติกรรมแบบ

Linear elastic to failure โดยมีค่าโมดูลัสต่างๆ ก่อนข้างต่ำ และมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนสูง ดังนั้นการเสียรูป (deformation) ของ โครงสร้าง จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่ควบคุมการออกแบบ (Roberts และ Al-Ubaidi, 2002)

นอกจากนี้วัสดุ CFRP ยังมีคุณสมบัติที่โดดเด่นอีกหลายประการในเชิงวิศวกรรมโยธา ได้แก่ มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมและ สารเคมีได้ดี อัตราส่วนของกำลังของวัสดุต่อน้ำหนักสูง ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถออกแบบและผลิตให้เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การใช้งานในแต่ละงานได้ โดยการเลือกชนิดของเรซิน เส้นใยและกำหนดทิศทางของการวางตัวของเส้นใย (Keller, 2003) และวัสดุ CFRP ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้าง จะอยู่ในรูป Structural profile ซึ่งมีรูปร่างหน้าตัดต่างๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ อาทิเช่น หน้าตัด wide-flange (W) หน้าตัดรูปตัวไอ (I) หน้าตัดฉาก (L) หน้าตัดรูปรางน้ำ (channel) และหน้าตัดรูปกล่อง (box) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างหน้าตัดต่างๆ ของวัสดุ CFRP (Creative Pultrusions, Inc., 2004)

จากคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุ CFRP ทำให้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในงานวิศวกรรมโยธาโดยได้มีการนำไปใช้งานในส่วนองโครงสร้างบางประเภทแล้วอาทิเช่น ในบริเวณพื้นที่ๆ มีการกัดกร่อนรุนแรง ได้แก่ โรงงานบำบัดน้ำเสีย หอทำความเย็น (cooling tower) หอทดสอบนิวเคลียร์ และ โรงงานอุตสาหกรรมเคมี หรือโครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่งที่ถูกการกัดกร่อนอย่างรุนแรงโดยคลอไรด์จากน้ำทะเล รวมทั้งโครงสร้างในบริเวณพื้นที่ๆ เข้าถึงยาก (hard-to-access area) และมีความลำบากในการก่อสร้างเนื่องจากพื้นที่ที่ไม่อำนวย อาทิเช่น สะพานและเสาไฟฟ้าในพื้นที่ๆ เป็นภูเขา ตลอดจนชิ้นส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา อาทิเช่น หอสถูกราวสะพาน ราวระเบียงและรั้วกันตึกต่างๆ เป็นต้น (Creative Pultrusion, Inc., 2004) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ในลักษณะต่างๆ (Bedford, 2005)

นอกจากนี้ยังมีการนำชิ้นส่วน FRP มาใช้ในลักษณะของการประกอบ (built-up) โดยการนำชิ้นส่วน FRP ตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปมาประกอบกันโดยใช้สลักเกลียว (bolt) เพื่อให้ได้คุณสมบัติของหน้าตัดที่ดีขึ้น โดยหน้าตัดลักษณะดังกล่าวนำมาใช้ในชิ้นส่วน โครงสร้างประเภทต่าง ๆ เช่น โครงข้อหมุน (truss) ระบบยึดรั้ง (bracing system) เป็นต้น ซึ่ง โครงสร้างลักษณะนี้ส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างของสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 1.5 จากรูปแสดงให้เห็นถึงการนำชิ้นส่วน FRP มาประกอบในส่วนของคานบน (upper beam) คานล่าง (lower beam) และชิ้นส่วนที่ยึดรั้ง (bracing) โครงข้อหมุนทั้งสองด้าน โดยสะพานดังกล่าวมีคุณสมบัติเด่นคือ ค่อนข้างง่ายต่อการนำไปติดตั้งแม้ว่าเป็นสถานที่ ๆ เข้าถึงยากเพราะชิ้นส่วน FRP มีน้ำหนักเบา และสามารถถอดออกจากการติดตั้งได้ดังแสดงในรูปที่ 1.6 อย่างไรก็ตามสำหรับการประกอบชิ้นส่วน FRP เป็นหน้าตัดประกอบซึ่งมีมาตรฐานรองรับทำให้ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่าน้อยมากเพื่อให้ชิ้นส่วนที่นำมาประกอบสามารถถ่ายเทแรงเฉือนและเกิด fully composite action แต่ในความเป็นจริง โครงสร้างที่เกิดจากการประกอบชิ้นส่วน FRP มีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อมากกว่าที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงอยู่ภายใต้พื้นฐานของ no fully composite action



รูปที่ 1.5 สะพานที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วน FRP  
(United States Department of Agriculture, 1997)



รูปที่ 1.6 การนำสะพานที่ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วน FRP ไปใช้ในพื้นที่ ๆ เข้าถึงยาก  
(United States Department of Agriculture, 1997)

ถึงแม้ว่าวัสดุ FRP จะมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ แต่ก็มีสาเหตุหลายประการที่ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบไม่นำวัสดุดังกล่าวมาใช้งานมากนัก เช่น การขาดแคลนข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านต่างๆของวัสดุ FRP การขาดแคลนความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมทางกล (mechanical behavior) ของชิ้นส่วน โครงสร้าง (structural member) ที่ทำจากวัสดุ FRP และที่สำคัญคือการขาดแคลนวิธีออกแบบ กฎเกณฑ์และสมการที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่ได้มาตรฐาน ภายใต้การกระทำของน้ำหนักบรรทุก และจลนศาสตร์ในลักษณะต่างๆ

ในปัจจุบันการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยในต่างประเทศได้อ้างอิงมาตรฐานการออกแบบ 2 เล่ม ได้แก่ คู่มือการออกแบบโครงสร้างพลาสติก (Structural Plastic Design Manual) โดยสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน (American Society of Civil Engineers; ASCE) (ASCE, 1984) และคู่มือการออกแบบสำหรับโครงสร้างวัสดุประกอบโพลีเมอร์ (polymer composite structures) ซึ่งตีพิมพ์ใน Series ของ Eurocomp Design Code and Handbook โดยสมาคมวัสดุประกอบแห่งยุโรป หรือ Eurocomp (Eurocomp, 1996) อย่างไรก็ตาม มาตรฐานการออกแบบดังกล่าวไม่ได้เน้นหรือเจาะจงสำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หากแต่กล่าวถึง ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบโครงสร้าง ข้อควรปฏิบัติ และข้อกำหนดด้านการใช้งานสำหรับโครงสร้างพลาสติกและวัสดุประกอบโพลีเมอร์โดยรวมเท่านั้น (Bank, 2006) นอกจากนี้ มาตรฐานการออกแบบที่กล่าวมา ยังมีคู่มือการออกแบบ (design manual) สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่ทางบริษัทผู้ผลิต (manufacturer) ในต่างประเทศได้พัฒนาขึ้น อาทิ เช่น บริษัท Creative Pultrusion (2004) Strongwell Corporation (2002) Fiberline Composites (2003) และ Bedford (2005) เป็นต้น โดยที่สมการและตารางออกแบบ (load design table) ต่างๆ ภายในคู่มือออกแบบแต่ละเล่ม ได้จากการค้นคว้าและพัฒนาของแต่ละบริษัท หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สมการและตารางออกแบบดังกล่าวเหมาะสมสำหรับวัสดุ FRP ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัทผู้ผลิตนั้นๆ

ในปัจจุบันได้มีนักวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ซึ่งรับแรงกดอัดในแนวแกน (axial) โดยชิ้นส่วน ประเภทดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในเสา (column) และ โครงงข้อหมุน (truss) เป็นต้น โดยเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทดสอบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่หน้าตัดซึ่งแตกต่างกัน เช่น หน้าตัด wide-flange หน้าตัดรูปร่างน้ำ (C-section) หน้าตัดรูปตัวไอ (I-section) หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง (box section) เป็นต้น ดังตัวอย่างงานวิจัยที่เสนอ โดย Barbero และ Raftoyiannis (1993) Hashem และ Yuan (2001) ซึ่งเปรียบเทียบ เสาสั้นและเสายาวที่หน้าตัดและอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ที่แตกต่างกัน และจากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ยังไม่พบสมการที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ซึ่งรับแรงในแนวแกนแบบทั่วไป (general design

equation) จากคุณสมบัติเด่นของวัสดุ FRP ที่มีต่อวัสดุโครงสร้างชนิดอื่นดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อีกทั้งการขาดคู่มือในการออกแบบโครงสร้างที่ได้มาตรฐาน จึงมีความคิดที่จะศึกษาพฤติกรรมทางกลของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP โดยเน้นพฤติกรรมหลัก ได้แก่ การรับแรงกดอัดในแนวแกน โดยศึกษาในหน้าตัดที่เกิดจากการประกอบ (built-up) ขึ้นจากหน้าตัดรูปร่างน้ำซึ่งมีความยาวและระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อที่ต่างกัน เพื่อให้ได้สมการที่ใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ซึ่งรับแรงกดอัดในแนวแกนเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและก่อสร้างจริงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทาง โครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ (FRP built-up column with double-C section) ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน
- 1.2.2) เพื่อนำเสนอสมการสำหรับการออกแบบเสาประกอบ FRP ดังกล่าวภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เป็นวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber reinforced plastic, GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (FRP) ที่มีหน้าตัดรูปร่างน้ำ
- 1.3.2) วัสดุ FRP ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย ใยแก้ว (fiber) ชนิด E-glass และเรซิน (resin) ชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyester)
- 1.3.3) ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย อัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) และระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อ (connector spacing)
- 1.3.4) วัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ มี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่  $76 \times 22 \times 6$ ,  $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm
- 1.3.5) ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง (dimensional tolerance) คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และคุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ อ้างอิงจากเอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติเรื่องพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรอดที่ผลิตได้ในประเทศไทยภายใต้การอัด การเนียน และการตัด



## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1) เข้าใจพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่
- 1.4.2) ได้สมการออกแบบ (design equation) และขั้นตอนสำหรับการออกแบบ (design procedure) ของเสาประกอบ FRP ที่รับแรงกดอัดในแนวแกน ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการใช้งานวัสดุ FRP สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทำให้มีการผลิตเชิงพาณิชย์ เพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีกระบวนการออกแบบที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic, FRP) ที่นิยมใช้ใน โครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา คือ พลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic, GRFP) ซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยวิธี Pultrusion หรือ Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) คุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ PFRP ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบ (raw material) ที่นำมาใช้ผลิต ดังนั้นก่อนที่จะเข้าใจคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุ PFRP จำเป็นต้องทราบและเข้าใจถึงลักษณะและคุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิต รวมถึงขั้นตอนกระบวนการผลิตวัสดุ PFRP

ดังนั้นในบทนี้กล่าวถึงลักษณะ โดยทั่วไปของวัสดุ PFRP วัตถุดิบและส่วนประกอบ และกระบวนการผลิตวัสดุ PFRP โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อเป็นการทำความเข้าใจพฤติกรรมโดยรวมของวัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้จะกล่าวถึง การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณและวัสดุ PFRP ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน รวมทั้งบททวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลโดยสมการคำนวณทางทฤษฎี

#### 2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion

##### 2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ PFRP

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยเป็นวัสดุคอมโพสิต (composite material) ซึ่งประกอบมาจากวัสดุสองชนิดขึ้นไปโดยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุทั้งสองชนิดยังเหมือนเดิม ซึ่งวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยจะเกิดจากการนำเส้นใย (fiber) มารวมกับวัสดุเชื่อมประสานคือเรซิน (resin) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยสามารถแบ่งแยกออกได้เป็นหลายประเภท ตามวัตถุดิบที่นำมาผสม ทิศทางการวางตัวของเส้นใย และวิธีการขึ้นรูป

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยสามารถรับแรงได้ดีเมื่อแรงที่มากระทำขนานกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย ดังนั้นทิศทางการวางตัวของเส้นใยจะมีผลเป็นอย่างมากในการพิจารณานำชิ้นส่วนมาใช้งาน ซึ่งทิศทางการวางตัวของเส้นใยนั้นสามารถควบคุมได้โดยวิธีการขึ้นรูป เช่น

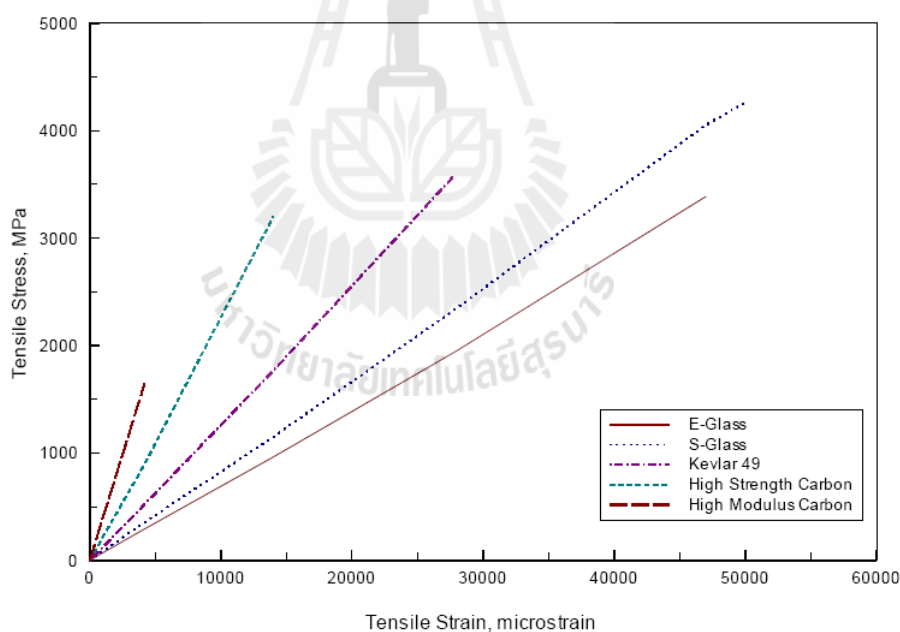
วิธีการขึ้นรูปแบบพัลทรู๊ด (pultruded) วิธีการขึ้นรูปแบบพัน (filament winding) วิธีการขึ้นรูปด้วยมือ (hand lay-up) เป็นต้น

## 2.2.2 ส่วนประกอบหลักของวัสดุ CFRP

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย CFRP มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่เส้นใยซึ่งเป็นตัวเสริมแรง และเรซินซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยชนิดของวัสดุคิบบมีหลายชนิดสามารถเลือกให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

### 2.2.2.1 เส้นใย (fiber)

โดยทั่วไปจะนิยมใช้เส้นใยที่มีค่ากำลังรับแรงดึงและ โมดูลัสสูงมาเป็นวัสดุเสริมแรง อาทิ เช่น เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) กราไฟต์ (graphite) เส้นใยโบรอน (boron fiber) เส้นใยอาราไมด์ (aramid fiber) หรือ เคฟลาร์ (kevlar) รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่างๆ (Daniel and Isahi, 1994)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่างๆ

(Daniel and Isahi, 1994)

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยจะมีเส้นใยแก้วเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 50-60% โดยน้ำหนัก (creative pultrution, inc., 2000) ซึ่งเส้นใยแก้วจะเป็นส่วนประกอบหลักที่รับแรง เส้นใย

แก้วจะผลิตมาจากการหลอมส่วนประกอบต่างๆเข้าด้วยกัน ได้แก่ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นส่วนประกอบหลัก หินปูน (limestone) กรดบอริก (bolic acid) ดินเหนียว (clay) ถ่านหิน (coal) และฟลูสปาร์ (fluorspar) ออกไซด์ของอลูมิเนียมและแคลเซียม เป็นต้น ที่อุณหภูมิประมาณ  $1,300^\circ\text{C}$  ส่วนผสมที่หลอมเหลวจะถูกดันผ่านช่องเล็ก ๆ แล้วทำให้เย็น โดยพ่นน้ำ ชนิดของเส้นใยแก้วที่มีการผลิตได้แก่ E-glass, S-glass, C-glass, A-glass, D-glass, L-glass และ M-glass เส้นใยแก้วจะมีกำลังรับแรงดึงสูง ทนทานต่อสารเคมีและไม่ดูดความชื้น เส้นใยแก้วที่นิยมใช้ในทางการค้าจะมีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่

- 1) E-glass คือ ใยแก้วที่มีคุณสมบัติคือ เส้นใยแก้วที่มีอัลคาไลน์ต่ำ (aluminum borosilicate) มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้า
- 2) S-glass คือ ใยแก้วที่มีกำลังและโมดูลัสสูง
- 3) C-glass คือ ใยแก้วที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี (corrosion resistance)

ชนิดของใยแก้วที่มีการนำมาใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธามากที่สุดคือ E-glass คุณสมบัติของ E-glass ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของใยแก้วชนิด E-glass (Daniel and Isahi, 1994)

คุณสมบัติ	E-glass
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	2550
กำลังรับแรงดึง (MPa)	3450
โมดูลัสแรงดึง (GPa)	72.45
อัตราส่วนปัวซอง	0.22
โมดูลัสแรงเฉือน (GPa)	29.95
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	4.8

ลักษณะของใยแก้วที่นำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยจะมีทั้งแบบเป็นเส้นต่อเนื่อง (continuous roving strand) และแบบเป็นแผ่นต่อเนื่อง (continuous roving mat) โดยแบบแผ่นจะมีทั้งที่มีการสาน (woven roving mat) และแบบไม่สาน (continuous filament) (Starr, 2000)

การเลือกชนิด รูปแบบ ลักษณะ และปริมาณของใยแก้วที่นำมาใช้งานเป็นสิ่งสำคัญที่จะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยได้แก่

- 1) กำลังรับแรงดึง (tensile strength) และค่าโมดูลัสแรงดึง (tensile modulus)
- 2) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) และค่า โมดูลัสแรงอัด (compressive modulus)
- 3) กำลังต้านทานการล้า (fatigue strength)
- 4) กำลังรับแรงกระแทก (impact strength) และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (energy absorption)
- 5) ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)
- 6) การนำไฟฟ้าและการนำความร้อน (electric and thermal conductivity)

### 2.2.2.2 เรซิน

เรซินจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยจะทำหน้าที่ในการส่งถ่ายแรงระหว่างเส้นใยแก้วเป็นตัวยึดเส้นใยแก้ว และป้องกันเส้นใยแก้วจากการขีดสีและอันตรายจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งเรซินที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เข้ากันได้กับใยแก้ว เรซินที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุมี 2 ชนิด คือ Thermoplastics และ Thermosetting plastics

เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หรือเรซิน เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด ได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้ โครงสร้างโมเลกุลเป็น โซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่าง โซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลว หรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม ตัวอย่าง พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้

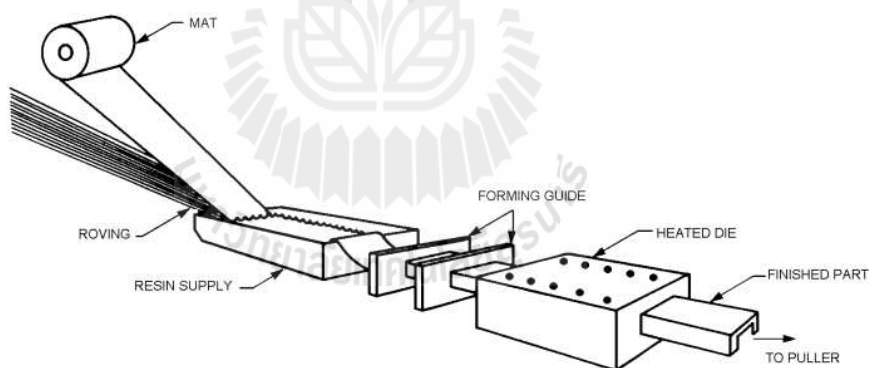
เทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastic) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี คงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ พลาสติกประเภทนี้ โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวได้

### 2.2.3 กระบวนการผลิตวัสดุ FRP

วิธีการผลิตพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ได้รับความนิยม คือ วิธี Pultrusion เนื่องจากการผลิตโดยวิธีนี้ได้ชิ้นส่วนของพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่มีหน้าตัดคงที่สม่ำเสมอ ตรง

ยาวและต่อเนื่องในลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กโครงสร้าง (Bakis et al., 2002) รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion

ขั้นตอนการผลิตโดยวิธี pultrusion เริ่มจาก การดึงเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น (continuous strand roving) ผ่านรางบังคับทิศทาง (guide plate) ลงสู่อ่างอาบเรซิน (resin impregnator) เพื่อให้เส้นใยแก้วอิมมัวด้วยเรซิน (wet-out) บางครั้งอาจมีการเสริมแผ่นเส้นใยแก้วแบบต่อเนื่องแบบสาน (continuous strand mat) ในขั้นตอนการผลิตไปพร้อมกับเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงในแนวขวาง (transverse properties) ให้กับวัสดุ FRFP จากนั้น ใส่งานวัสดุผิวนอกรวมเข้ากับเส้นใยแก้วที่อิมมัวด้วยพลาสติก เพื่อความเรียบของผิววัสดุ รวมทั้งเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อน และเพิ่มความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation resistance) ก่อนเข้าสู่เครื่องรีด (preformer) เพื่อรีดตัวประสานส่วนเกินออก จากนั้นระบบจะดึงวัสดุ (pulling system) เข้าสู่แม่พิมพ์และบ่มด้วยเครื่องบ่ม (forming and curing die) ด้วยแรงดันและความร้อนสูง โดยอุณหภูมิของเครื่องบ่มจะเริ่มจากต่ำในช่วงแรก จากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆ สูงขึ้น และลดต่ำลงในช่วงปลายของเครื่องบ่ม สุดท้ายวัสดุที่ได้จะถูกทำให้เย็นแล้วถูกตัดตามความยาวที่ต้องการ (Creative Pultrusion, Inc., 2004 และ Fiberline, 2003)



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion

(Creative Pultrusion, Inc., 2004)

นอกจากนั้นชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion สามารถผลิตตามขนาดและรูปร่างที่ต้องการได้ ตั้งแต่หน้าตัดที่ใช้โดยทั่วไป เช่น WF (wide flange), I, L (angle), C (channel) และ box section เป็นต้น รวมทั้งหน้าตัดที่ซับซ้อน (complex geometry) ขึ้นอยู่กับแบบของแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิต (Strongwell Corporation, Inc., 2002) รูปที่ 2.3 แสดงหน้าตัดต่างๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion



รูปที่ 2.3 หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion (Bedford, 2005)

#### 2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ PFPR

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2542) กล่าวว่า คุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFPR ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ อาทิเช่น ชนิดและปริมาณของใยแก้ว ชนิดและส่วนผสมของเรซิน เป็นต้น โดยได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางกลของวัสดุ PFPR หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงหนา 6.35 mm ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณ (structural steel) ตัวอย่างทดสอบถูกตัดทั้งในแนวขนานกับทิศทางการวางตัวของใยแก้ว (lengthwise; LW) และในแนวขวางกับทิศทางการวางตัวของใยแก้ว (crosswise; CW) การตัดใช้เครื่องตัดหัวเพชรเพื่อลดผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและพฤติกรรมของวัสดุ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น การทดสอบแรงดึง (ASTMD 3039-95) การทดสอบแรงอัด (ASTMD 695-95) การทดสอบแรงคด (ASTMD 790-92) และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบ (ASTM D 2344-95) ได้สรุปผลการทดสอบตามตารางที่ 2.2 พบว่า หน่วยแรงดึงประลัยและหน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุ PFPR มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยแรงดึงประลัยและหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กรูปพรรณ และมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงคราก (yielding stress) ของเหล็กรูปพรรณ 40.8% แต่หน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุ PFPR มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กรูปพรรณ 22.9% ในทิศทาง LW และ 64.2% ในทิศทาง CW นอกจากนี้โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ PFPR ในทิศทาง LW มีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณประมาณ 7 เท่า และ 26 เท่าในทิศทาง CW ยกเว้นโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดในทิศทาง LW ของวัสดุ PFPR จะมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณประมาณ 15 เท่า จากการที่วัสดุ PFPR มีหน่วยแรงคดประลัยที่ค่อนข้างสูง แต่ในทางตรงกันข้ามกลับมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การเสีรูปร่างเนื่องจากการแอ่นตัว (deflection) ของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมการออกแบบหน้าตัดของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ

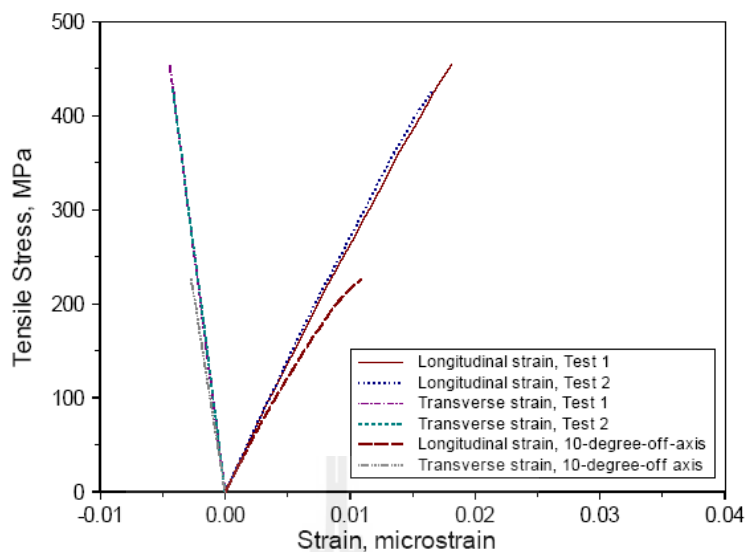
PFRP สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนประลัยของวัสดุ PFRP กับเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 พบว่าวัสดุ PFRP มีหน่วยแรงเฉือนประลัยต่ำกว่าเหล็กรูปพรรณประมาณ 5.3 เท่า ดังนั้น ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP ควรมีการตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนทุกครั้ง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

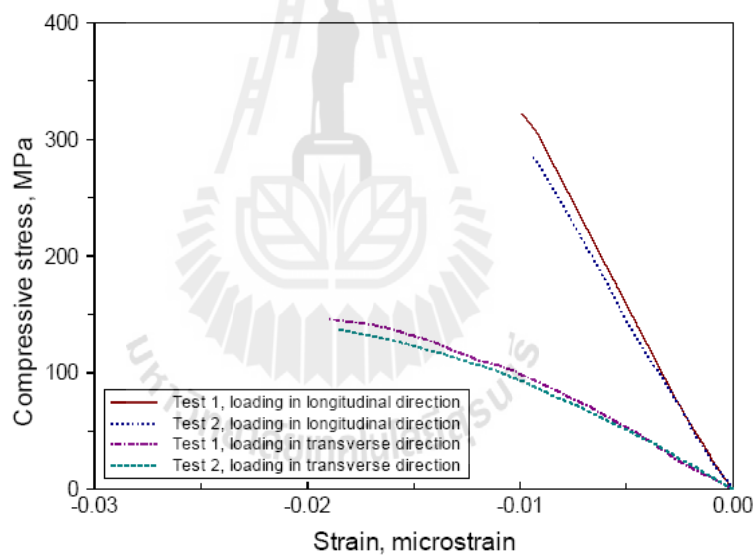
คุณสมบัติทางกล	วัสดุ PFRP	เหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36
หน่วยแรงดึงประลัย, LW	445.2 MPa	$\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ( $\sigma_u = 400 \text{ MPa}$ )
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง, LW	26.26 GPa	200 GPa
หน่วยแรงอัดประลัย, LW	308.46 MPa	$\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ( $\sigma_u = 400 \text{ MPa}$ )
หน่วยแรงอัดประลัย, CW	143.33 MPa	$\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ( $\sigma_u = 400 \text{ MPa}$ )
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด, LW	32.60 GPa	200 GPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด, CW	7.69 GPa	200 GPa
หน่วยแรงดัดประลัย, LW	422.57 MPa	250 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด, LW	13.15 GPa	200 GPa
โมดูลัสแรงเฉือน, LW	3.25 GPa	75 GPa
Interlamina shear stress, LW	23.64 MPa	125 MPa
อัตราส่วนปัวซอง, LW	0.263	0.32
ความหนาแน่น	1849.5 kg/m <sup>3</sup>	7852 kg/m <sup>3</sup>

และจากรูปที่ 2.4 พบว่า วัสดุ PFRP เป็นวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนเกือบถึงจุดวิบัติ และการวิบัติของวัสดุเป็นแบบแตกหักฉับพลัน (immediate failure) อย่างไรก็ตาม วัสดุชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนการวิบัติ โดยความเครียดที่จุดวิบัติมีค่ามากกว่า 0.010 mm/mm





(a) การทดสอบกำลังรับแรงดึง



(b) การทดสอบกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

นอกจากนั้น อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัด ( $E$ ) ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือน ( $G$ ) ของวัสดุ FRP และเหล็กรูปพรรณมีค่าเท่ากับ 4.05 และ 2.67 ตามลำดับ ดังนั้นการแอนตัวของโครงสร้าง FRP จะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงเฉือนมากกว่าการแอนตัวของโครงสร้างเหล็ก และโมดูลัสยืดหยุ่นเฉือนของวัสดุ FRP ไม่สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นกับ

อัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) ในรูปของสมการ  $G = E/2(1+\nu)$  ดังเช่นที่ใช้ในกรณีเหล็กรูปพรรณ สำหรับการเปรียบเทียบความหนาแน่นของวัสดุทั้งสอง พบว่า วัสดุ FRP เบากว่าเหล็กรูปพรรณ ประมาณ 4.2 เท่า ทำให้การก่อสร้างโครงสร้าง FRP มีความสะดวกกว่าโครงสร้างเหล็กเป็นอย่างมาก นอกจากนี้อัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักของวัสดุ FRP มีค่ามากกว่าของ โครงสร้างเหล็กถึง 4.5 เท่า

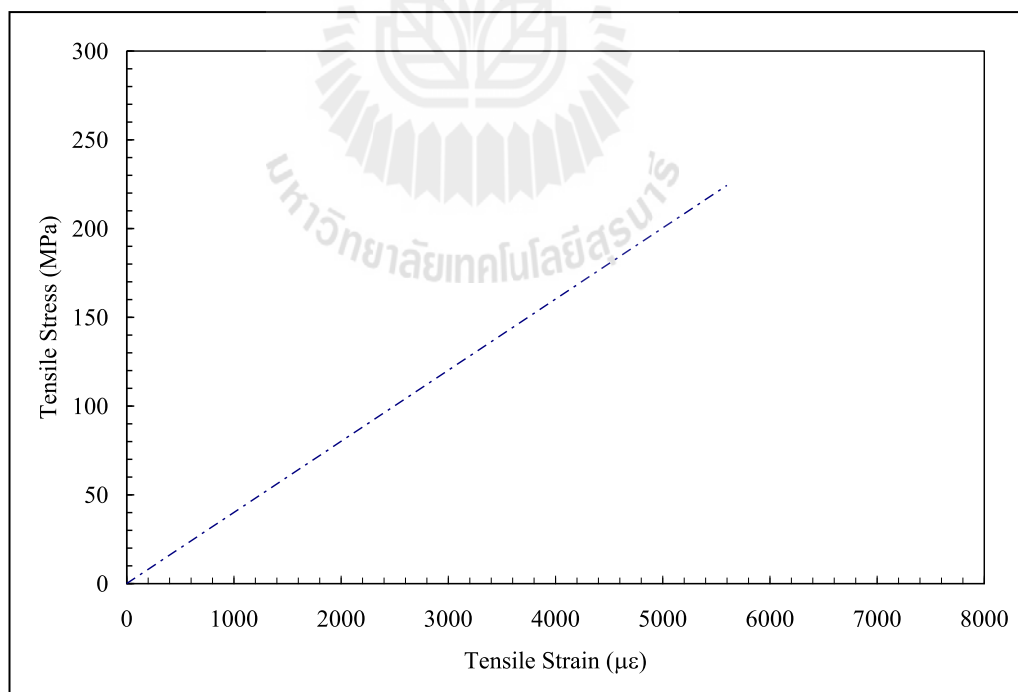
หวังแก้ว บุญสวน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ สงวน วงษ์ชวลิตกุล (2552) ได้ทำการทดสอบ วัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ผลิตในประเทศไทย โดยได้ทำการทดสอบความคลาดเคลื่อนของ รูปร่าง คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm,  $102 \times 29 \times 6$  mm และ  $152 \times 43 \times 10$  mm ซึ่งผลิตโดยบริษัท หิรัญ เอส เสวี จำกัด และเปรียบเทียบผล การทดสอบกับผลของ วัสดุ FRP ที่ผลิตจากต่างประเทศโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และ เหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM A36 โดยคุณสมบัติพื้นฐานจะใช้มาตรฐาน ASTM C 3917 โดยแสดงผลการทดสอบและเปรียบเทียบในภาคผนวก จากการทดสอบและเปรียบเทียบพบว่าวัสดุ FRP ที่นำมาทดสอบยังผลิตไม่ได้ตามมาตรฐานความคลาดเคลื่อนของรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM C 3917 เนื่องจากวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต ในส่วนของความหนาแน่นและความ ถ่วงจำเพาะพบว่าวัสดุ FRP ที่นำมาทดสอบมีค่าดังกล่าวสูงกว่าวัสดุ FRP ที่ผลิตจากต่างประเทศ ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. อยู่ 1.70% ทั้งสองค่าเนื่องจากมีปริมาณของเส้นใยแก้วสูงใน ขณะทีเมื่อเทียบกับเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM A36 พบว่ามีค่าดังกล่าวน้อยกว่าอยู่ 75.06% แต่วัสดุ FRP เบากว่าเหล็กโครงสร้าง 4.00 เท่า การดูดซึมน้ำและความชื้นพบว่ามี การดูดซึมน้ำสูงสุด 0.74% ซึ่งมากกว่าวัสดุ FRP ที่ผลิตจากต่างประเทศของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. อยู่ 23.33% แสดงว่าวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีแนวโน้มที่จะมีความคงทนต่ำ สุดท้ายการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบพบว่า วัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในการทดสอบ อยู่ในช่วงที่กำหนดของวัสดุ FRP ที่ผลิตจากต่างประเทศโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. ใน การทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในการทดสอบ กับวัสดุ FRP ที่ผลิตจากต่างประเทศโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และเหล็กโครงสร้างตาม มาตรฐาน ASTM A36 โดยแสดงผลการทดสอบและเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 2.3 จากการ ทดสอบและเปรียบเทียบพบว่า การทดสอบกำลังรับแรงดึงและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงขนานเส้นใย เฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.5(a) พบว่า หน่วยแรงดึงประลัยของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่า ไกล่เคียงกับวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. แต่มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงคลากของ เหล็กโครงสร้าง 10.39 % โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการ

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็ก  
รูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 (หัวแก้ว บุกสวน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ  
สงวน วงษ์ชาติกุล, 2552)

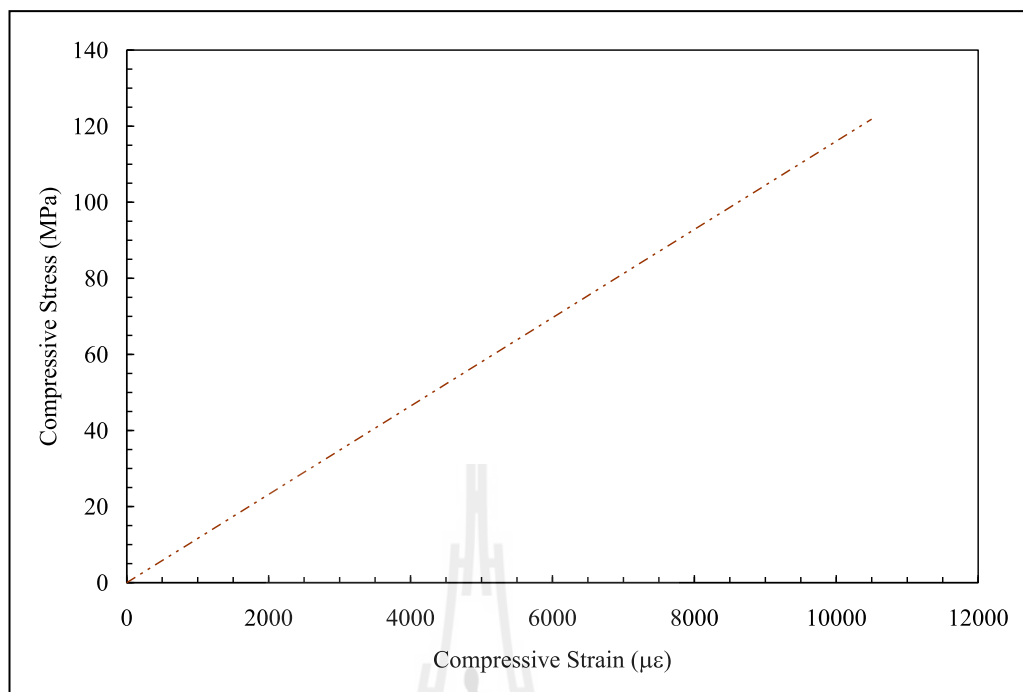
คุณสมบัติทางกล	ทดสอบได้	การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล	
		วัสดุ FRP ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc.	เหล็กโครงสร้าง ตามมาตรฐาน ASTM A36
หน่วยแรงดึงประลัยขนานเส้นใยเฉลี่ย	224.03 MPa	ใกล้เคียง	น้อยกว่าหน่วยแรง คลาก 10.39 %
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงขนานเส้นใยเฉลี่ย	35.20 GPa	มากกว่า 2.05 เท่า	น้อยกว่า 5.68 เท่า
หน่วยแรงดึงประลัยขนานเส้นใยเฉลี่ย (square)	223.97 MPa	ใกล้เคียง	น้อยกว่าหน่วยแรง คลาก 10.41 %
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงขนานเส้นใยเฉลี่ย (square)	12.13 GPa	น้อยกว่า 1.42 เท่า	น้อยกว่า 16.49 เท่า
หน่วยแรงอัดประลัยขนานเส้นใยเฉลี่ย	121.86 MPa	น้อยกว่า 59.91 %	น้อยกว่าหน่วยแรง คลาก 51.26 %
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดขนานเส้นใยเฉลี่ย	10.51 GPa	น้อยกว่า 1.96 เท่า	น้อยกว่า 19.03 เท่า
หน่วยแรงอัดประลัยตั้งฉากเส้นใยเฉลี่ย	23.19 MPa	น้อยกว่า 79.55 %	น้อยกว่าหน่วยแรง คลาก 90.72 %
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตั้งฉากเส้นใยเฉลี่ย	2.49 GPa	น้อยกว่า 2.77 เท่า	น้อยกว่า 80.32 เท่า
หน่วยแรงเฉือนสูงสุดขนานเส้นใยเฉลี่ย	37.27 MPa	---	น้อยกว่าหน่วยแรง คลาก 70.18 %
โมดูลัสแรงเฉือนขนานเส้นใยเฉลี่ย	2.18 GPa	---	น้อยกว่า 34.37 เท่า
หน่วยแรงคดประลัยทางแบนขนานเส้นใยเฉลี่ย	509.73 MPa	มากกว่า 124.65 %	มากกว่าหน่วยแรง คลาก 103.89 %
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดทางแบนขนานเส้นใยเฉลี่ย	31.07 GPa	มากกว่า 2.82 เท่า	น้อยกว่า 10.44 เท่า
หน่วยแรงคดประลัยทางขอบขนานเส้นใยเฉลี่ย	529.66 MPa	มากกว่า 133.43 %	มากกว่าหน่วยแรง คลาก 111.86 %
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดทางขอบขนานเส้นใยเฉลี่ย	35.53 GPa	มากกว่า 3.23 เท่า	น้อยกว่า 5.63 เท่า
อัตราส่วนกำลังรับแรงดึงต่อน้ำหนัก	0.114	---	มากกว่า 3.56 เท่า
อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดขนานเส้นใยต่อน้ำหนัก	0.062	---	มากกว่า 1.94 เท่า

ทดสอบมีค่ามากกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. อยู่ 2.05 เท่า แต่มีค่าน้อยกว่า  
เหล็กโครงสร้าง 5.68 เท่า เนื่องจากใยแก้วมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูงกว่าเรซินประมาณ 18.13 เท่า

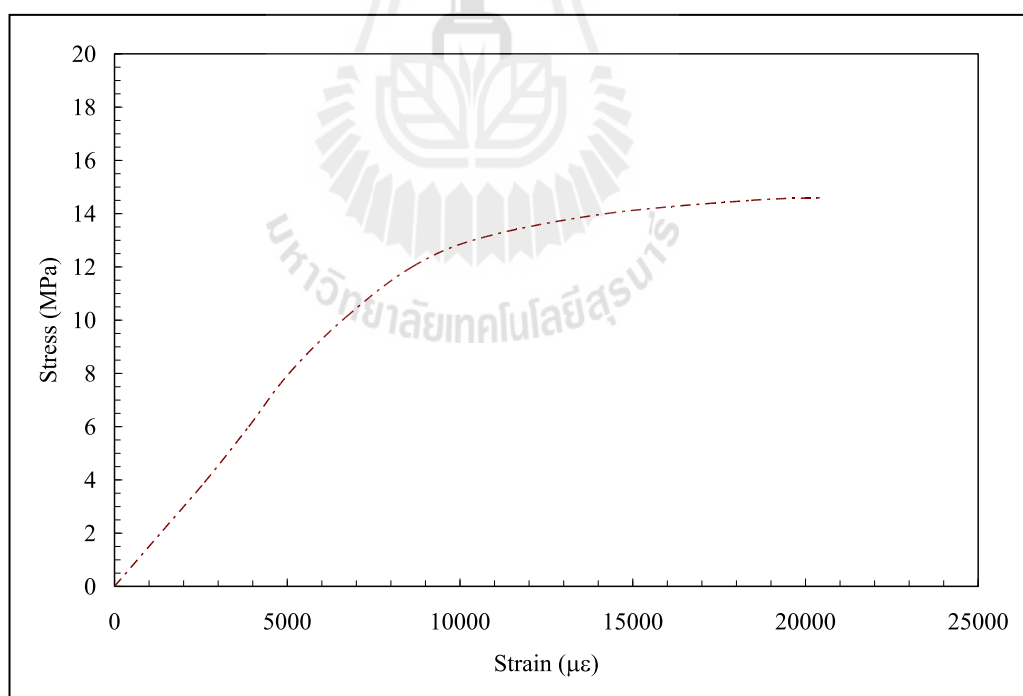
(Bank, 2006) ดังนั้นวัสดุ PFRP จึงมีแนวโน้มในการมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูง ในส่วนของกำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดขนานเส้นใยพบว่ามีความน้อยกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และเหล็กโครงสร้าง เนื่องจากการรับแรงลักษณะแรงอัดขนานเส้นใยนี้จะเกิดการโก่งคาะและเรซินที่เป็นตัวรับแรงหลักมีคุณภาพต่ำ ในขณะที่การทดสอบกำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตั้งฉากเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.5(b) เรซินยังคงทำหน้าที่รับแรงหลัก เนื่องจากเรซินที่ใช้ในการผลิตมีคุณภาพต่ำนี้จะเกิดการเลื่อนได้ง่าย ทำให้ผลการทดสอบที่ได้ยังคงมีค่าน้อยกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และเหล็กโครงสร้าง ในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและ โมดูลัสแรงเฉือนขนานเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.5(c) พบว่ามีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงคลากและ โมดูลัสแรงเฉือนของเหล็กโครงสร้างอยู่ 70.18 % และ 34.37 เท่าตามลำดับ การที่วัสดุ PFRP ที่นำมาทดสอบมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากความแตกต่างคุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาผลิต ในการทดสอบกำลังรับแรงคดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดขนานเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.5(d) พบว่าในกรณีของการให้แรงทางแบนจะมีค่าดังกล่าวมากกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. แต่ในเหล็กโครงสร้างจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดขนานเส้นใยน้อยกว่า



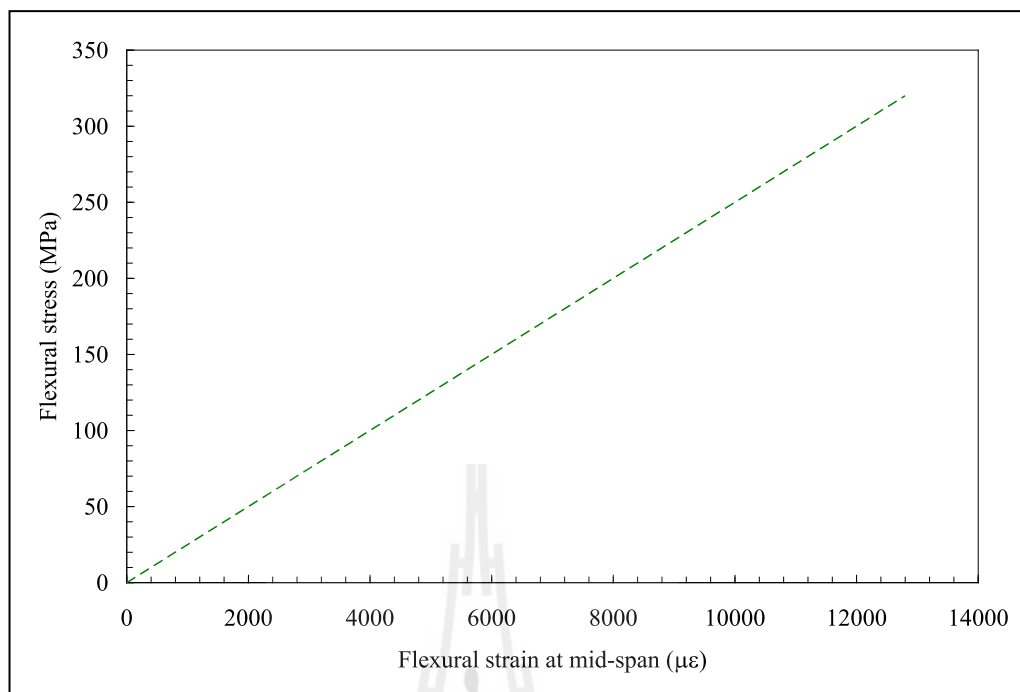
(a) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย



(b) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



(c) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย



(d) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ FRP (หวังแก้ว บุญสวน สิริพิชัยแสงอาทิตย์ และ สงวน วงษ์ชวลิตกุล, 2552)

### 2.3 ชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion ได้ถูกพัฒนาและเริ่มใช้งานเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้างในปี ค.ศ. 1950 ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา (Bank, 2006) ช่วงแรก ชิ้นส่วนของวัสดุ FRP ถูกนำไปใช้ใน โครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) และ ส่วนของ โครงสร้างที่มีสภาวะการกัดกร่อนสูง (high corrosion) เช่น โรงงานอุตสาหกรรมเคมี และ โรงงานบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น (Goldsworthy, 1954) ในปี ค.ศ. 1960 บริษัทผู้ผลิตหลายรายเริ่มผลิตชิ้นส่วน FRP ที่ได้มาตรฐานขึ้น โดยแต่ละบริษัทได้ทำการวิจัยและคิดค้นเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วน FRP ของตนเอง โดยหน้าตัดที่นิยมผลิตใช้งานในช่วงนั้น ได้แก่ หน้าตัดรูป I และวงกลม และในปีเดียวกันบริษัท Composites Technology, Inc (CTI) ได้พัฒนาระบบโครงสร้าง (building system) สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ขึ้น (Smallowitz, 1985)

Green, Bisarsin, and Love (1994) กล่าวว่าในปี ค.ศ. 1980 ระบบโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ได้ถูกพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ใน โครงสร้างอาคารสำหรับอุตสาหกรรม ทำความเย็น ตัวอย่างเช่น Cooling tower ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.6 นอกจากนี้ชิ้นส่วน FRP ได้

ถูกเริ่มนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักของโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา อาทิเช่น คาน เสา ผนัง และ แผ่นพื้นสำเร็จรูป เป็นต้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1985 บริษัท Strongwell Corporation ได้ออกแบบและดำเนินการก่อสร้างห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า Electromagnetic Interference (EMI) โดยแนวคิดหลักของโครงสร้างดังกล่าวคือ ภายในอาคารจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) ส่งผลให้วัสดุ PFRP ที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความโปร่งใสต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic transparency) เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้าง รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้ง โครงสร้างข้อแข็งของห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า Electromagnetic Interference (EMI)



รูปที่ 2.6 Cooling tower ที่ทำจากวัสดุ PFRP (Creative Pultrusions, 2004)



รูปที่ 2.7 การติดตั้ง โครงสร้างข้อแข็งที่ทำจากวัสดุ PFRP ระหว่างการก่อสร้าง (Strongwell, 2002)

อย่างไรก็ตาม ระหว่างปี ค.ศ. 1950 ถึง ค.ศ. 1990 อาคารที่มีความสูงหลายชั้น (multistory building) ซึ่งทำจากวัสดุ FRP อาจยังไม่พบเห็น เนื่องจากมีความซับซ้อน บริเวณจุดเชื่อมต่อ (connection) ของแต่ละชั้นส่วนภายในโครงสร้าง รวมทั้งวิศวกรยังขาดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมทางโครงสร้างบริเวณจุดเชื่อมต่อดังกล่าว ต่อมาหลังจากปี ค.ศ. 1990 ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของจุดเชื่อมต่อ (connection behaviors) สำหรับชิ้นส่วน FRP เพิ่มมากขึ้น โดยใช้แนวคิดและความรู้พื้นฐานสำหรับการศึกษามาจากจุดเชื่อมต่อของโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ (structural steel connection) ดังตัวอย่างงานวิจัยที่ถูกเสนอโดย Bank, Mosallam, and Gonsior (1990); Chen and Blandford (1995); Bank, Yin, and Moore (1996); Mottram and Zheng (1996); Nagara and Gangarao (1998); Smith, Parsons, and Hjelmstad (1999) จนในปี ค.ศ. 1999 อาคารที่มีชื่อว่า Eyecatcher ซึ่งเป็นอาคารที่มีความสูง 5 ชั้นสูง 15 m ได้ถูกสร้างขึ้น โดยบริษัท Fiberline Composites ในประเทศสวีเดน (Keller, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 อาคารดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ซึ่งสามารถใช้ทดแทน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณได้

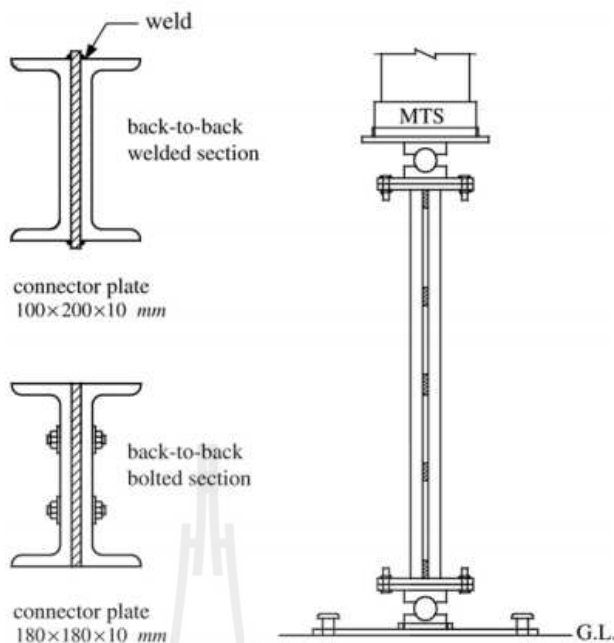


รูปที่ 2.8 อาคาร Eyecatcher ที่ทำจากวัสดุ FRP (Keller, 1999)



Barbero, Dede และ Jones (2000) ได้ทำการศึกษารูปแบบของการโก่งเดาะของเสาที่มีความยาวปานกลาง โดยทำการศึกษาตัวอย่างทดสอบเสาพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัล ทรงแท่งหน้าตัดตัวไอ ปีกกว้างจำนวน 12 ตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวต่างกัน โดยเสาความยาวปานกลางจะเกิดการโก่งเดาะ โดยรวมและการโก่งเดาะเฉพาะที่ที่กำลังโก่งเดาะใกล้เคียงกันและจากผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดการเสียเสถียรภาพภายหลังจากการเกิดการโก่งเดาะ สาเหตุคือความไม่สมบูรณ์ของการกระตุ่น (imperfection sensitivity) และการเกิดค่าแรงโก่งเดาะน้อยกว่าที่ได้ออกแบบ โดยสามารถแก้ไขได้ โดยการเพิ่มตัวประกอบความปลอดภัย (factor of safety)

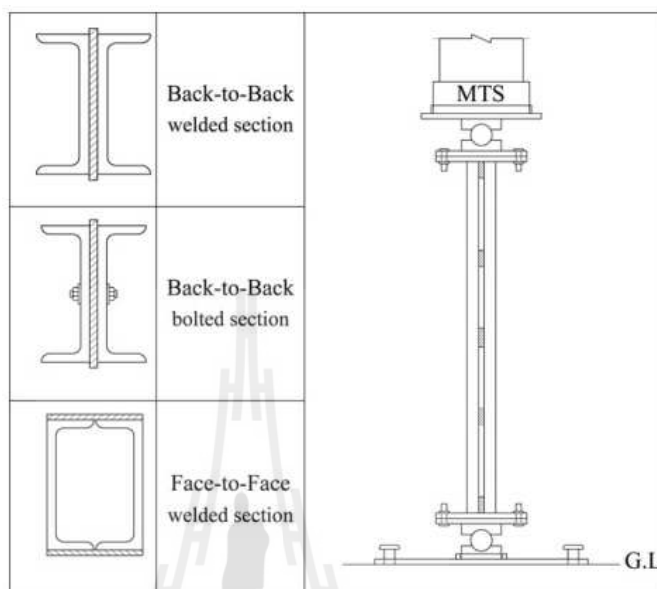
Lue, Yen และ Liu (2006) ได้ทำการทดสอบเสาประกอบเหล็กรูปพรรณเพื่อเป็นการยืนยันเทียบกับมาตรฐาน การออกแบบโดยทำการเทียบกับ AISC-ASD (American Institute of Steel Construction-Allowable Stress Design, 1989), AISC-LRFD (American Institute of Steel Construction-Load and resistance Factor Design, 1986, 1993, 1999, 2005), AS4100 (Standards Association of Australia, 1998) และ CSA S16-01 (Canadian Standard Association, 2001) โดยทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบตัวอย่างทดสอบจำนวน 12 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นสี่กลุ่ม ๆ ละสาม ตัวอย่างทดสอบ กลุ่มที่หนึ่งและกลุ่มที่สอง ใช้การเชื่อมต่อแบบสลักน๊อต (snug-tight bolted connector) โดยมีความยาวของเสาเท่ากับ 218 cm ซึ่งกลุ่มที่หนึ่งมีระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อเท่ากับ 50 cm ในขณะที่กลุ่มที่สองมีระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อเท่ากับ 67 cm ส่วนกลุ่มที่สามและกลุ่มที่สี่ใช้การเชื่อมต่อแบบเชื่อม (welded connector) โดยมีความยาวของเสาเท่ากับ 210 cm ซึ่งกลุ่มที่สามมีระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อเท่ากับ 50 cm ในขณะที่กลุ่มที่สี่มีระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อเท่ากับ 67 cm โดยการทดสอบและหน้าตัดที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถสรุปผลการทดสอบดังกล่าวได้ว่าแรงวิกฤติที่คำนวณได้จาก AISC-LRFD มีค่าประมาณ 73% ของผลทดสอบในการเชื่อมต่อแบบสลักน๊อตและ 69% ของการเชื่อมต่อแบบเชื่อม สำหรับ AS-4100 และ CSA S16-01 จะให้ผลการทดสอบออกมาเหมือนกับ AISC-LRFD ในการเชื่อมต่อแบบสลักน๊อต ส่วนการเชื่อมต่อแบบเชื่อมแรงวิกฤติที่คำนวณจาก AS4100 จะมีความปลอดภัยมากที่สุด ส่วนมาตรฐานการออกแบบที่ประหยัดที่สุดคือ CSA S16-01



รูปที่ 2.9 ลักษณะการทดสอบและหน้าตัดที่นำมาทดสอบ (Lue, Yen และ Liu, 2006)

ในอีกไม่กี่ปีถัดมา Lin, Lue และ Lin (2008) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่เป็นชิ้นส่วนประกอบเหล็กรูปพรรณจำนวน 42 ตัวอย่างทดสอบโดยใช้มาตรฐานการออกแบบในการเปรียบเทียบเหมือนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้การพิจารณาข้อกำหนดที่ได้กำหนดค่าอัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบต้องมีค่าไม่เกิน 0.75 เท่าของค่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาประกอบ โดยแบ่งตัวอย่างทดสอบออกเป็น 12 กลุ่ม กลุ่มที่ 1-6 เป็นการประกอบแบบเอวชนเอว (back to back built-up) และกลุ่มที่ 7-12 เป็นการประกอบแบบปีกชนปีก (face to face built-up) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยจะแยกย่อยออกเป็นกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบน้อยกว่า 0.75 เท่าของค่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาประกอบ และกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบอยู่ระหว่าง 0.75-1.0 เท่าของค่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาประกอบ สรุปได้ว่าเมื่อใช้ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อในแนวดิ่งมีค่ามากขึ้นจะทำให้กำลังของเสาประกอบมีค่าลดลง และปรากฏว่าถ้าใช้ค่าอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า 0.75 เท่าของอัตราส่วนความชะลูดของเสาประกอบจะใช้การปรับแต่งค่าอัตราส่วนความชะลูดหรือไม่ปรับแต่งอย่างไรอย่างหนึ่งก็ได้ และถึงแม้ว่าจะใช้ค่าอัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบอยู่ระหว่าง 0.75-1.0 เท่าของอัตราส่วนความชะลูดของเสาประกอบก็ยังคงทำให้

สัดส่วนของกำลังที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังที่ได้จากการคำนวณยังคงมีค่าเกินหนึ่งทำให้ยังคงมีความปลอดภัย



รูปที่ 2.10 ลักษณะการทดสอบและหน้าตัดที่นำมาทดสอบ (Lin, Lue และ Lin, 2008)

Duan และ Chen (1987) ได้ทำการศึกษามาตรฐานการออกแบบชิ้นส่วนประกอบของ AISC-LRFD (1986) โดยทำการเปรียบเทียบผลทดสอบของ Zandonini (1985) และ Astaneh et al. (1985) กับสมการของ AISC-LRFD และสมการที่เสนอคือ

$$\left(\frac{Kl}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{Kl}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{K_m a}{r_i}\right)^2} \quad (2.1)$$

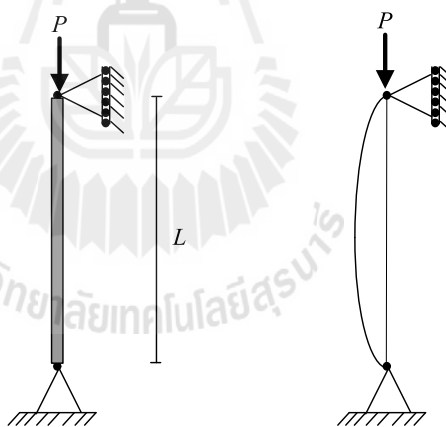
โดยที่  $K_m$  คือ ตัวประกอบความยาวประสิทธิภาพเฉพาะที่ (local effective length factor)

ค่าตัวประกอบความยาวประสิทธิภาพเฉพาะที่จะมีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่อจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนประกอบเป็นสลักน๊อต โดยจากการเปรียบเทียบผลทดสอบซึ่งจะให้เป็นไปตามสมการเส้นโค้งของ SSRC (Structural Stability Research Council) กับสมการของ AISC-LRFD และสมการที่นำเสนอพบว่ามีความใกล้เคียงของข้อมูลเป็นที่ยอมรับได้ โดยของ Zandonini ค่าสัดส่วนของกำลังโก่งเคาะของการทดสอบต่อค่าที่ทำนายตามทฤษฎีเท่ากับ 1.017 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.087 ของชิ้นส่วนประกอบที่เชื่อมต่อยด้วยสลักน๊อต ในขณะที่ Astaneh et al. ได้ค่าสัดส่วนของกำลังโก่ง

เดาะของการทดสอบต่อค่าที่ทำนายตามทฤษฎีเท่ากับ 0.982 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.091 ในการเปรียบเทียบกับสมการของ AISC-LRFD โดยเมื่อเทียบกับสมการที่นำเสนอจะได้ค่า สัดส่วนของ กำลัง โกงเดาะของการทดสอบต่อค่าที่ทำนายตามทฤษฎีเท่ากับ 1.053 และส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.105

## 2.4 พฤติกรรมและการออกแบบเสาและชิ้นส่วนรับแรงอัด

เสา (columns) ในความหมายของวิศวกรรมโครงสร้าง (structural engineering) เป็นองค์ อาคารที่อยู่ในแนวตั้งซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านแรงกดอัด (compression load) โดยน้ำหนักบรรทุก (loads) จากโครงสร้างส่วนบนลงสู่โครงสร้างส่วนล่างเมื่อเสาถูกกระทำโดยแรงกดอัดที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น เรื่อย ๆ จนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งเรียกว่าแรงวิกฤติ (critical load) เสาจะเกิดการวิบัติโดยการ โกงตัวออก ทางด้านข้าง (lateral deflection หรือ sidesway) ซึ่งถูกเรียกว่าการ โกงเดาะ (buckling) ดังแสดงใน รูปที่ 2.11 โดยทั่วไปการ โกงเดาะจะนำไปสู่การวิบัติของ โครงสร้างที่รุนแรงและเกิดขึ้นแบบทันที ทันใด ถ้าวิศวกรผู้ออกแบบได้ออกแบบเสาได้ไม่ดีพออาจจะทำให้เกิดการ วิบัติขึ้นได้



รูปที่ 2.11 ลักษณะการรับแรงของเสาและลักษณะการ โกงเดาะของเสา

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าแรง โกงเดาะสำหรับเสาที่มีจุดรองรับแบบหมุด (pinned-pinned supported) เสาจะถูกพิจารณาให้เป็นเสาในอุดมคติ (ideal column) โดยที่

1. เสามีความตรงสมบูรณ์ (perfectly straight) ก่อน โคนแรงกระทำ และ ถูกรองรับโดยหมุดที่ไร้แรงเสียดทาน
2. เสาผลิตขึ้นจากวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous material) ตลอดทั้งเสา และมีพฤติกรรมแบบ linear elastic

3. แรงกระทำที่กระทำกับเสาจะต้องผ่านจุด centroid ของหน้าตัด
4. ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำเสาจะเกิดการโก่งตัวอยู่ในระนาบเดียวเท่านั้น

โดยการวิบัติของเสาจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดโดยแบ่งแยกโดยอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ดังนี้

- 1) การโก่งเดาะโดยรวม (global buckling) เป็นการค้ำครอบแกนรอง (minor axis) ที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าหรืออาจเรียกได้ว่าการโก่งเดาะแบบการค้ำ (flexural buckling) จะเกิดขึ้นในเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดสูง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.12
- 2) การโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) เป็นการโก่งเดาะของเสาในส่วนเอวหรือปีก โดยมักจะเกิดกับเสาหน้าตัดผนังบางแบบเปิด (open thin-wall section) เช่นการโก่งเดาะแบบบิด (torsion buckling) การโก่งเดาะแบบการค้ำรวมกับการบิด (flexural torsional buckling) จะเกิดขึ้นในเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดปานกลาง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.13
- 3) การพังทลายของเนื้อวัสดุ (crushing) จะเกิดขึ้นในเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดน้อย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.12 การโก่งเดาะแบบการค้ำของเสาผนังบาง (Seangathith, 2000)



รูปที่ 2.13 การโค้งเดาะแบบเฉพาะที่ของเสาผนังบาง (Seangatith, 2000)



รูปที่ 2.14 การพังทลายของเนื้อวัสดุ (crushing) (หวังแก้ว บุญสวน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ สงวนวงษ์ชวลิตกุล, 2552)

### 2.4.1 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของเหล็กรูปพรรณ

ทักษิณ เทพชาตรี (2541) กล่าวว่า ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเหล็กรูปพรรณรับแรงอัดนั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การโก่งเดาะ โดยรวมและการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่เกิดจากการวิบัติโดยการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเหล็กรูปพรรณรับแรงอัดในแนวแกนนั้นมีพฤติกรรมอยู่ 2 ประเภทได้แก่

- 1) การโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างซึ่งรับแรงอัดในแนวแกนจะเกิดการโก่งเดาะโดยไม่มีโมเมนต์ภายนอกกระทำซึ่งการโก่งเดาะนี้จะทำให้ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเสียเสถียรภาพ น้ำหนักในแนวแกนต่ำสุดที่ทำให้ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเกิดการโก่งเดาะเรียกว่าน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) หรือน้ำหนักวิกฤติ (critical load) โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้กำหนดความสามารถในการรับน้ำหนักของเสา น้ำหนักโก่งเดาะจะแปรผกผันกับความยาวของเสา
- 2) การโก่งเดาะในช่วงอินอีลาสติก สำหรับชิ้นส่วนหรือโครงสร้างที่มีความยาวปานกลาง ค่าของน้ำหนักโก่งเดาะที่คำนวณได้โดยวิธีของชิ้นส่วนหรือโครงสร้างในช่วงอีลาสติกจะสูงกว่าค่าน้ำหนักโก่งเดาะที่ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างรับได้จริงเนื่องจากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กจะเริ่มโค้งเมื่อเลยจุดพิคัดเส้นตรงไปแล้ว

นอกจากนี้ชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเหล็กรูปพรรณยังมีข้อที่ควรนำมาพิจารณาอีกประการหนึ่งคือ หน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการผ่านกรรมวิธีในการผลิต อาทิเช่น การเย็นตัวลงอย่างไม่สม่ำเสมอของเหล็กประเภทรีดร้อน (hot-rolled steels) การดัดเย็น (cold bending) การโก่ง (cambering) การทำรูด้วยการกระแทก (punching) การเชื่อม (welding) เป็นต้น

#### 2.4.1.1 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของเหล็กรูปพรรณสำหรับการโก่งเดาะโดยรวม

##### 2.4.1.1.1 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของเหล็กรูปพรรณสำหรับการโก่งเดาะโดยรวมโดยวิธี AISC/ASD

การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (allowable stress design, ASD) เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สภาวะการใช้งาน (service state) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ ภายใต้อุณหภูมิดังกล่าวผลรวมของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานขององค์อาคาร โดยค่าความต้านทานนี้คำนวณโดยใช้ค่าตัวคูณความปลอดภัย (FS.) เป็นตัวลดจากค่าความต้านทานระบุ (nominal resistance) (AISC 316, 1989) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนสำหรับเหล็กgrupพรรณที่มีหน้าตัดสมมาตร 2 แกน (doubly symmetric)

$$\sum Q_i \leq R_s = \frac{R_n}{FS.} \quad (2.2)$$

$$M \leq \frac{M_n}{FS.} \quad (2.3)$$

หารสมการที่ (2.3) ตลอดด้วยค่าโมดูลัสหน้าตัด ( $S$ )

$$\left( f_b = \frac{M}{S} \right) \leq \left( F_b = \frac{M_n}{S(F.S.)} \right) \quad (2.4)$$

โดยที่	$Q_i$	คือ	แรงต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน เช่น โมเมนต์แรงเฉือน เป็นต้น หรือ จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร แรงลม เป็นต้น
	$R_s$	คือ	ความต้านทานที่สภาวะการใช้งานขององค์อาคาร
	$R_n$	คือ	ความต้านทานระบุ (nominal resistance)
	$F.S.$	คือ	ตัวคูณความปลอดภัย
	$M$	คือ	โมเมนต์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (service moment)
	$M_n$	คือ	กำลังโมเมนต์ระบุ (nominal moment strength)

#### a) หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (Allowable Stresses)

เนื่องจากผลของแรงค้ำงที่ทำให้กำลังของเสามีค่าลดน้อยลง โดยสมมติให้ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงค้ำงเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งในความเป็นจริงลักษณะการกระจายนี้สามารถเป็นได้หลายรูปแบบ Bleich (1952) ได้เสนอให้กำลังของเสาในช่วงอินอีลาสติกแทนด้วยเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f_{cr} = f_y - \frac{f_p}{\pi^2 E} (f_y - f_p) \left( \frac{KL}{r} \right)^2 \quad (2.5)$$

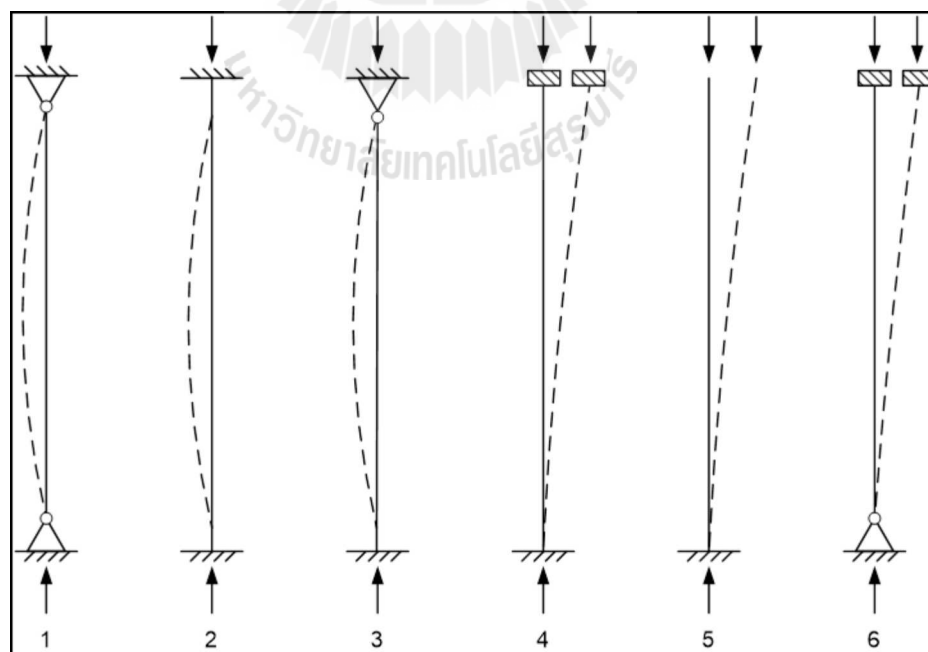
โดยที่	$f_{cr}$	คือ	หน่วยแรงอัดวิกฤติ
	$f_y$	คือ	หน่วยแรงคราก



$f_p$	คือ	หน่วยแรงพลาสติก
$K$	คือ	ตัวประกอบความขะลุค ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.15
$L$	คือ	ความยาวของชิ้นส่วน
$r$	คือ	รัศมีไจเรชั่น

ตารางที่ 2.4 ค่าของตัวประกอบความยาวประสิทธิผล (AISC, 1989)

การยึดรั้งที่ปลายของชิ้นส่วน	ค่าของตัวประกอบความยาวประสิทธิผล	
	ทฤษฎี	การออกแบบ
1. Pined – Pined	1.0	1.00
2. Fixed – Fixed	0.50	0.65
3. Pined – Fixed	0.70	0.80
4. Fixed – Translation Fixed	1.0	1.20
5. Fixed – Translation Free	2.0	2.10
6. Pined – Translation Fixed	2.0	2.00



รูปที่ 2.15 ลักษณะการยึดรั้งที่ปลายของชิ้นส่วน (AISC, 1989)

โดยที่

$$f_r = f_y - f_p \quad (2.6)$$

เมื่อ  $f_r$  คือ หน่วยแรงคงค้าง  
แทนค่าสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.5) จะได้

$$f_{cr} = f_y \left[ 1 - \frac{f_r}{f_y} (f_y - f_r) \frac{(KL/r)^2}{\pi^2 E} \right] \quad (2.7)$$

เพื่อให้เส้นกราฟของสมการสามารถใช้ได้ทั้งในกรณีของการโก่งเดาะรอบแกนหลักและแกนรองอีกทั้งเพื่อให้เส้นกราฟมีความต่อเนื่องอย่างราบเรียบจึงกำหนดให้ใช้ค่า  $f_r = 0.5f_y$  ดังนั้นจะได้

$$f_{cr} = f_y \left[ 1 - \frac{f_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (2.8)$$

เรียกสมการ (2.8) ว่าสมการเส้นโค้ง SSRC (structural stability research council curve, SSRC curve) ซึ่ง ว.ส.ท. ได้อาศัยสมการดังกล่าวในการกำหนดหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ตั้งมีชั้นตอนดังต่อไปนี้

- การกำหนดค่า  $C_c$

ค่า  $C_c$  คือค่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาตรงตำแหน่งที่เสาเปลี่ยนพฤติกรรมจากอีลาสติกไปเป็นอินอีลาสติก โดยกำหนดให้  $f_{cr} = \frac{f_y}{2}$

$$f_{cr} = \frac{f_y}{2} = f_y \left[ 1 - \frac{f_y C_c^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (2.9)$$

หรือ

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{f_y}} \quad (2.10)$$

- หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในช่วงอีลาสติก

ในกรณีที่  $KL/r \geq C_c$  เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะอยู่ในช่วงอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงกดอัดสามารถหาได้จากสมการออยเลอร์

$$f_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $f_e$  คือ หน่วยแรงอัดออยเลอร์  
หรือ

$$\sigma_a = \sigma'_e = \frac{\pi^2 E}{FS \cdot (KL/r)^2} \quad (2.12)$$

โดยที่  $f_a$  คือ หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (allowable compressive stresses)  
 $f'_e$  คือ หน่วยแรงอัดออยเลอร์ที่ยอมให้ (Euler's allowable compressive stresses)  
 $FS$  คือ ตัวคูณความปลอดภัยเท่ากับ 1.92 หรือ 23/12

- หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในช่วงอินอีลาสติก

ในกรณีที่  $KL/r \leq C_c$  เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะอยู่ในช่วงอินอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงอัดสามารถหาได้จากสมการเส้นโค้ง SSRC โดยจากสมการ (2.8)

$$f_{cr} = f_y \left[ 1 - \frac{f_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (2.8)$$

และ

$$f_a = \frac{f_y}{FS} \left[ 1 - \frac{f_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (2.13)$$

แทนค่า

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{f_y}} \quad (2.10)$$

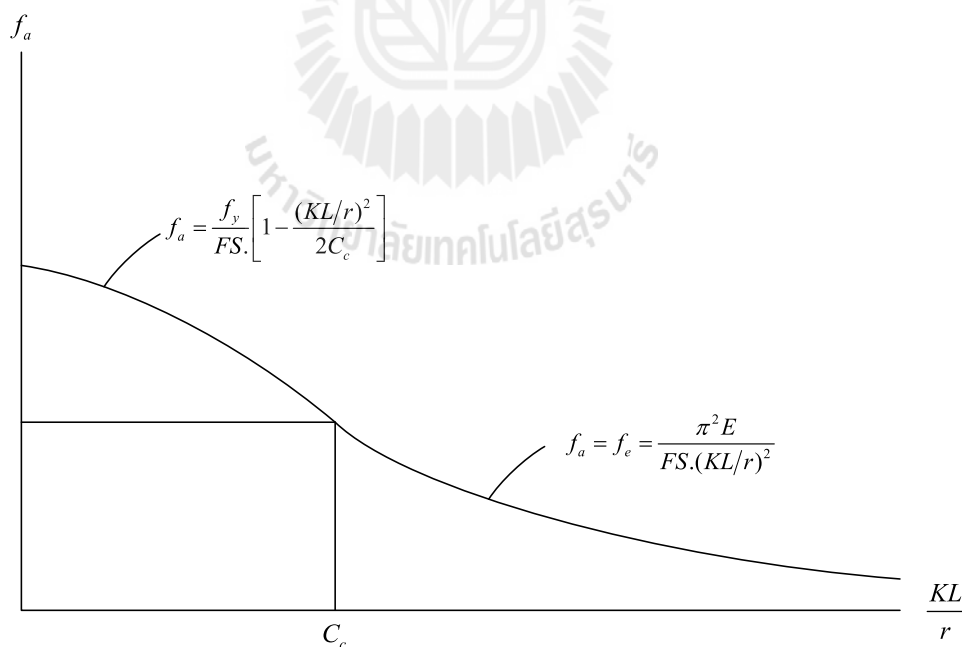
ลงไปจะได้

$$f_a = \frac{f_y}{FS} \left[ 1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] \quad (2.14)$$

โดยที่  $FS$  คือ ตัวคูณความปลอดภัยมีสมการในรูปของคิวบิก (cubic) มีค่าเท่ากับ

$$\frac{5}{3} + \frac{3(KL/r)}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3} \quad (2.15)$$

แสดงการแบ่งพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกและอินอีลาสติกดังรูปที่ 2.16 ซึ่งใช้สมการในการหาหน่วยแรงที่ยอมให้ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.16 การแบ่งพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกและอินอีลาสติกและสมการที่ใช้

### b) สัดส่วนความชะลูดสูงสุด

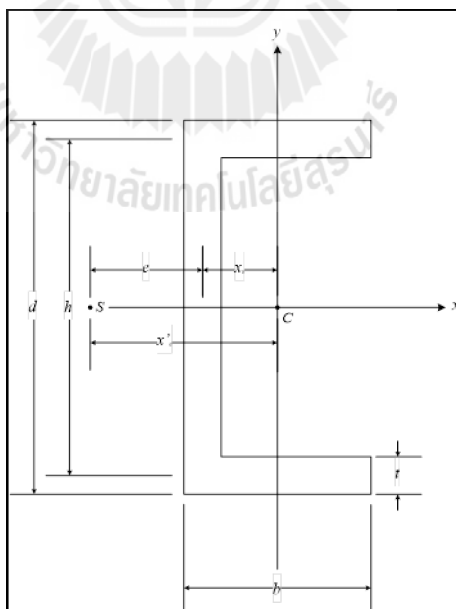
ในองค์อาคารรับแรงอัด ว.ส.ท. ได้กำหนดให้สัดส่วนความชะลูดสูงสุดของเสามีค่าเท่ากับ 200

สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนสำหรับเหล็กgrupพรรณที่มีหน้าตัดสมมาตร แกนเดียว (mono-symmetric) เช่น หน้าตัดรูปรางน้ำ รูปตัวทีและรูปฉาก จะเกิดการโก่งเดาะ 2 ลักษณะ ได้แก่ การโก่งเดาะด้วยการดัดรอบแกนหลัก (x) และการโก่งเดาะรอบแกนรอง (y) ร่วมกับการบิดรอบแกนตามยาว (z) รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างหน้าตัดเหล็กสมมาตรแกนเดียว น้ำหนักวิกฤตที่ทำให้ชิ้นส่วนโก่งเดาะรอบแกนหลักคำนวณได้จากสมการของออยเลอร์

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L)^2} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $r_{ib}$  คือ รัศมีไจเรชันเทียบเท่าเนื่องจากการดัดและการบิดร่วมกัน คำนวณได้จากสมการ (2.17)

$$\left(1 - \frac{x_0'^2}{r_{ps}^2}\right) r_{ib}^4 - (r_i^2 - r_x^2) r_{ib}^2 + r_x^2 r_i^2 = 0 \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.17 หน้าตัดเหล็กสมมาตรแกนเดียว

เมื่อ

$$r_t^2 = \frac{C_w + 0.04J(KL)^2}{I_{ps}} \quad (2.18)$$

$$I_{ps} = I_x + I_y + Ax_0' \quad (2.19)$$

$$r_{ps} = \frac{I_{ps}}{A} \quad (2.20)$$

โดยที่	$x_0'$	คือ	ระยะจากจุดศูนย์กลางแรงเฉือนถึงจุด centroid ของหน้าตัดรูปตัวซี
	$r_t$	คือ	รัศมีจายเรชันเทียบเท่าของการบิด
	$I_{ps}$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วเทียบกับจุดศูนย์กลางแรงเฉือน
	$C_w$	คือ	ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยวของหน้าตัด (warping section constant)
	$J$	คือ	ค่าคงที่ของการบิดของหน้าตัด (torsional section constant)

ในการคำนวณหาน้ำหนักโก่งเดาะ ให้เปรียบเทียบค่า  $r_{tb}$  กับ  $r_x$  ถ้า  $r_{tb}$  น้อยกว่า  $r_x$  เสาจะเกิดการโก่งเดาะด้วยการดัดและการบิดรวม ถ้า  $r_{tb}$  มากกว่า  $r_x$  เสาจะเกิดการโก่งเดาะรอบแกน  $x$  ให้ใช้ค่าที่น้อยกว่าไปคำนวณโดยสมการของออยเลอร์ดังแสดงในสมการ (2.16) ได้น้ำหนักวิกฤตที่ขึ้นส่วนรับได้

#### 2.4.1.1.2 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของเหล็ก รูปพรรณสำหรับการโก่งเดาะโดยรวมโดยวิธี AISC/LRFD

สถาบันการก่อสร้างเหล็กอเมริกัน (American Institute of Steel Construction; AISC) ได้จัดพิมพ์คู่มือการออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design; LRFD) ในปี ค.ศ. 1994 วิธี LRFD มีหลักการและขั้นตอนการออกแบบคล้ายคลึงกับวิธีกำลังประลัย (ultimate strength design: USD) ที่ใช้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสนอโดย ACI (American Concrete Institute) โดยทั่วไปโครงสร้างเหล็กที่ออกแบบด้วยวิธี LRFD จะประหยัดกว่าที่ออกแบบด้วยวิธี ASD โดยมีค่าความปลอดภัยใกล้เคียงกัน และในปัจจุบัน AISC แนะนำให้วิศวกรผู้ออกแบบใช้การคำนวณและออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธี LRFD เป็นหลัก

มาตรฐาน LRFD เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สถานะจำกัด (limit state) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ ภายใต้สถานะจำกัดนี้กำหนดให้ค่าแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานคูณ

กับค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานระบุขององค์อาคารกับตัวคูณความต้านทาน (resistance factor) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนสำหรับเหล็กรูปพรรณที่มีหน้าตัดสมมาตร 2 แกน (doubly symmetric)

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (2.21)$$

โดยที่  $\gamma_i$  คือ ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor)  
 $\phi$  คือ ตัวคูณความต้านทาน (resistance factor)  
 $R_n$  คือ ความต้านทานระบุ (nominal resistance)

จากสมการ SSRC

$$f_{cr} = f_y \left[ 1 - \frac{f_y (KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (2.8)$$

กำหนดให้

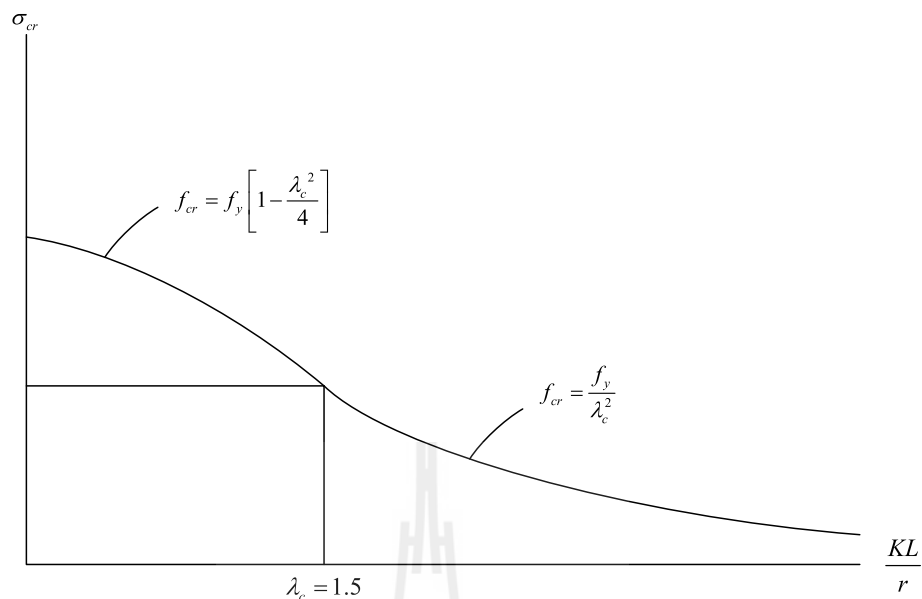
$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_y}{f_e}} = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\lambda_c$  คือ พารามิเตอร์ความชะลูด

แทนค่าลงในสมการ SSRC จะได้

$$f_{cr} = f_y \left[ 1 - \frac{\lambda_c^2}{4} \right] \quad (2.23)$$

สมการ SSRC กำหนดให้พฤติกรรมการโก่งเคาะของเสาเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกเป็นช่วงอินอีลาสติกเมื่อ  $f_{cr} = \frac{f_y}{2}$  จะทำให้ทราบว่า  $\lambda_c = \sqrt{2}$  แต่ตามมาตรฐาน AISC ใช้  $\lambda_c = 1.5$  เป็นค่ากำหนดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการโก่งเคาะของเสา แสดงการแบ่งพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกและอินอีลาสติกดังรูปที่ 2.18 ซึ่งใช้สมการในการหาหน่วยแรงวิกฤติที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.18 การแบ่งพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกและอินอีลาสติกและสมการที่ใช้

### 3 หน่วยแรงอัดวิกฤติในช่วงอีลาสติก

ในกรณีที่  $\lambda_c > 1.5$  เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเคาะในช่วงอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงอัดวิกฤติหาได้จากสมการออยเลอร์

$$f_{cr} = \frac{f_y}{\lambda_c^2} \quad (2.24)$$

แต่มาตรฐาน AISC ใช้  $f_{cr} = \frac{0.877 f_y}{\lambda_c^2}$  เมื่อ  $\lambda_c^2 > 1.5$

### - หน่วยแรงอัดวิกฤติในช่วงอินอีลาสติก

ในกรณีที่  $\lambda_c \leq 1.5$  เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเคาะในช่วงอินอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงอัดวิกฤติหาได้จาก

$$f_{cr} = f_y \left(1 - \frac{\lambda_c^2}{4}\right) \quad (2.25)$$

แต่มาตรฐาน AISC ใช้  $f_{cr} = (0.658)^{\lambda_c^2} F_y$  เมื่อ  $\lambda_c^2 \leq 1.5$



### 2.3) กำลังอัดที่เพิ่มค่าแล้ว

จากสมการพื้นฐานของหลักการวิธีการออกแบบ LRFD ในสมการ (2.21) เมื่อกำหนดให้

$$P_u = \sum \gamma_i Q_i \text{ และ } P_n = R_n = F_{cr} \text{ จะได้}$$

$$P_u = \phi_c \sigma_{cr} A \quad (2.26)$$

โดยที่  $P_u$  คือ แรงอัดที่เพิ่มค่าแล้ว (kg)

$P_n$  คือ แรงอัดระบุ (kg)

$\phi_c$  คือ ตัวคูณความต้านทานใช้กับชิ้นส่วนรับแรงอัด = 0.5

$\sigma_{cr}$  คือ หน่วยแรงอัดวิกฤต (ksc)

สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนสำหรับเหล็กgrupพรรณที่มีหน้าตัดสมมาตร แกนเดียว (mono symmetric) มาตรฐาน AISC/LRFD กำหนดให้

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_y}{f_e}} \quad (2.22)$$

และ

$$f_e = \frac{f_{ey} + f_{ez}}{2H} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4f_{ey}f_{ez}H}{(f_{ey} + f_{ez})^2}} \right] \quad (2.27)$$

โดยที่

$$f_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)_y^2} \quad (2.28)$$

$$f_{ez} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)_z^2} \quad (2.29)$$

$$H = 1 - \left( \frac{x_0^2}{r_0^2} \right) \quad (2.30)$$

$$r_0^2 = x_0^2 + [(I_x + I_y)/A] \quad (2.31)$$

โดยที่  $\lambda_c$  คือ พารามิเตอร์ความชะลูด  
 $\sigma_c$  คือ หน่วยแรงอัดอีลาสติกเนื่องจากการ บิดหรือเนื่องจากการตัดและการบิดร่วมกัน

#### 2.4.1.2 การเปรียบเทียบการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของ เหล็กgrupพรรณสำหรับการโก่งเดาะโดยรวมโดยวิธี AISC/ASD และ AISC/LRFD

สำหรับการเปรียบเทียบการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของเหล็กgrupพรรณโดยวิธี AISC/ASD และ AISC/LRFD นั้นวิธี AISC/ASD เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สภาวะการใช้งาน (service state) เป็นเกณฑ์ ซึ่งแตกต่างกับวิธี AISC/LRFD ที่เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สภาวะจำกัด (limit state) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือวิธี AISC/ASD ภายใต้สภาวะดังกล่าวผลรวมของแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานขององค์อาคาร ซึ่งค่าความต้านทานนี้คำนวณโดยใช้ค่าตัวคูณความปลอดภัย (factor of safety) เป็นตัวลดจากค่าความต้านทานระบุ (nominal resistance) ในขณะที่วิธี AISC/LRFD ภายใต้สภาวะจำกัดนี้จะกำหนดให้ค่าแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานคูณกับค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานระบุขององค์อาคารคูณกับตัวคูณความต้านทาน จากความแตกต่างดังกล่าวทำให้โดยทั่วไปโครงสร้างเหล็กที่ออกแบบโดยวิธี AISC/LRFD มีความประหยัดมากกว่าการออกแบบโดยวิธี AISC/ASD โดยมีค่าความปลอดภัยใกล้เคียงกัน นอกจากนี้วิธี AISC/LRFD มีหลักการและขั้นตอนในการออกแบบที่ค่อนข้างทันสมัยเมื่อเทียบกับวิธี AISC/ASD ซึ่งนิยมใช้กันมาในอดีต

#### 2.4.1.3 การโก่งเดาะของเสาและชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนสำหรับวัสดุ PFRP

##### 2.4.1.3.1 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของวัสดุ PFRP โดยสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกันสำหรับการโก่งเดาะโดยรวมและโก่งเดาะเฉพาะที่

ในปี ค.ศ. 1984 สมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน ได้ตีพิมพ์คู่มือการออกแบบโครงสร้างพลาสติก เพื่อเป็นแนวทางให้แก่วิศวกรที่ทำงานเกี่ยวกับโครงสร้างพลาสติก ในคู่มือได้แนะนำว่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกหน้าตัดรูปฉากที่ถูกกระทำโดยแรงอัดตามแนวแกนสามารถใช้กำลังต่ำสุดของค่าหน่วยแรงโก่งเดาะเนื่องจากการตัด ค่าหน่วยแรงโก่งเดาะเนื่องจากการ

ตัดและการบิด ค่าหน่วยแรงโก่งเดาะเนื่องจากการบิดและกำลังรับแรงอัดของวัสดุไปใช้ในการออกแบบ

**a) การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของวัสดุ FRP โดยสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกันสำหรับการโก่งเดาะโดยรวม**

สำหรับชิ้นส่วนที่วิบัติโดยการโก่งเดาะโดยรวม (global buckling) เนื่องจากการตัดหน่วยแรงโก่งเดาะเนื่องจากการตัด ( $\sigma_{xc,FI}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการการโก่งเดาะเนื่องจากการตัดของออยเลอร์ ดังสมการ (2.32)

$$\sigma_{xc,FI} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $E$  คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับการตัดในทิศทางของการโก่งเดาะ  $L$  คือ ความยาวของเสา  $K$  คือ ตัวประกอบความยาวประสิทธิผลมีค่าเช่นเดียวกับที่ใช้ในโครงสร้างเหล็ก  $r$  คือ รัศมีไจเรชัน (radius of gyration) ในทิศทางของการโก่งเดาะของหน้าตัด

**b) การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของวัสดุ FRP โดยสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกันสำหรับการโก่งเดาะเฉพาะที่**

สำหรับชิ้นส่วนที่วิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) เนื่องจากการบิดค่าหน่วยแรงโก่งเดาะเนื่องจากการบิด ( $\sigma_{xc,T}$ ) สามารถประมาณได้จากสมการการโก่งเดาะเนื่องจากการบิดสำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linearly elastic isotropic materials) ดังแสดงในสมการ (2.33)

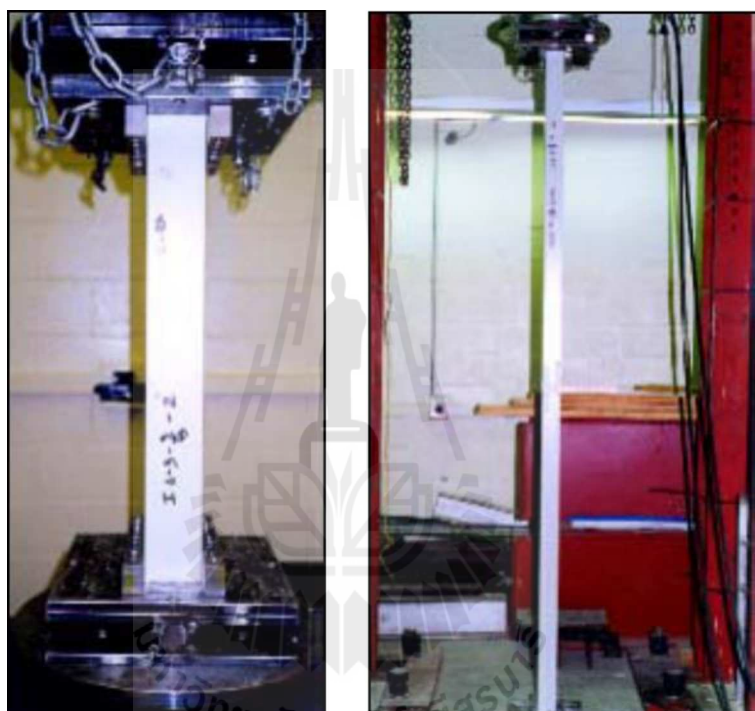
$$\sigma_{xc,T} = \frac{E_L}{2(1+\nu_{LT})} \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.33)$$

เมื่อ  $E_L$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามยาว  $t$  และ  $b$  คือ ความหนาและความกว้างของปีกของหน้าตัดตามลำดับ และ  $\nu_{LT}$  คือ อัตราส่วนปัวซองของหลัก

สำหรับชิ้นส่วนที่วิบัติโดยการโก่งเดาะเนื่องจากการตัดและการบิด หน่วยแรงโก่งเดาะสามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการการโก่งเดาะเนื่องจากการตัดและสมการการโก่งเดาะเนื่องจากการบิด แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ยังไม่ถูกกำหนดมาอย่างแน่นอน โดยจะขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ออกแบบ

### 2.4.1.3.2 การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของวัสดุ PFRP โดยบริษัท Creative Pultrusion สำหรับการโก่งเดาะโดยรวมและโก่งเดาะเฉพาะที่

Creative Pultrusion, Inc. (2000) ได้เสนอสมการการออกแบบเสาวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปต่าง ๆ คือ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง รูปกลมกลวง รูปตัวไอปีกกว้าง (wide flange) รูปตัวไอและรูปฉาก ที่ได้มาจากการวิเคราะห์และทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การทดสอบเสาวัสดุ PFRP (Creative Pultrusion, Inc., 2000)

สมการการออกแบบเสา PFRP ที่ใช้ E-glass เป็นวัสดุเสริมแรงมีพื้นฐานมาจากข้อมูลจำนวนมากของการทดสอบตามขนาดจริง (full scale test) การวิบัติของเสาแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การวิบัติจากแรงบดทาน (bearing) หรือการพังทลายของเนื้อวัสดุ (crushing) เกิดขึ้นในเสานาคสั้น
2. การวิบัติเนื่องจากการเสียเสถียรภาพของเสา ได้แก่ เกิดการโก่งเดาะโดยรวมเกิดขึ้นในเสายาวและการโก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นในเสาความยาวปานกลาง

### a) การออกแบบเสาสั้นวัสดุ FRP

สำหรับเสาสั้นวัสดุ FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงมีอัตราส่วนความชะลูด ( $KL/r$ ) น้อยกว่า 35 เกิดการวิบัติโดยแรงบากทานของวัสดุ ความสามารถในการรับแรงของเสาคำนวณได้จากสมการ (2.34)

$$\sigma_{ult} = \frac{P_{ult}}{A} \text{ (lbs)} \quad (2.34)$$

โดยที่  $P_{ult}$  คือ แรงตามแนวแกนประลัย (lbs.)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด ( $\text{in}^2$ )  
 $\sigma_{ult}$  คือ กำลังรับแรงบากทานของวัสดุ (psi)

สำหรับเสาสั้นวัสดุ FRP หน้าตัดรูปกลมกลวงมีอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า 30 และเสาน้ำตัดรูปตัวไอมีอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า 30 วิบัติโดยแรงตามแนวแกนและ โมเมนต์ดัด สมการเส้นตรงที่ใช้ในออกแบบเสาที่วิบัติร่วมระหว่างแรงบากทานและการ โกงเดาะแบบการดัดที่ได้มาจากการทดสอบสำหรับหน้าตัดรูปกลมกลวงแสดงในสมการ (2.35) และสำหรับหน้าตัดรูปตัวไอแสดงในสมการ (2.36)

$$\sigma_{ult} = 30 - \frac{1}{7} \frac{KL}{r} \text{ (ksi)} \quad (2.35)$$

$$\sigma_{ult} = 25 - \frac{5}{38} \frac{KL}{r} \text{ (ksi)} \quad (2.36)$$

โดยที่  $\sigma_{ult}$  คือ กำลังรับแรงบากทานประลัย (psi)  
 $K$  คือ ตัวประกอบความยาวประสิทธิผล  
 $L$  คือ ความยาวของเสา (in)  
 $r$  คือ รัศมีการหมุนของหน้าตัด (in)

สำหรับเสาสั้นวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวไอปีกกว้างมีอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า 40 จะพบการ โกงเดาะเฉพาะที่ (local buckling) และการยุบ (crippling) ของปีกในการทดสอบ กำลังประลัยของการ โกงเดาะเฉพาะที่ของเสาน้ำตัดรูปตัวไอปีกกว้างสามารถทำนายจากการปรับแต่งสมการการ โกงเดาะของแผ่นบางวัสดุไอโซโทรปิก (isotropic) ดังแสดงในสมการ (2.37) ควรมีการ

เปรียบเทียบกำลังประลัยของการ โกงเดาะเฉพาะที่กับกำลังรับแรงบากทานของเนื้อวัสดุแล้วใช้ค่าที่ต่ำสุดมาใช้ออกแบบ ค่าทั้งสองเป็นตัวบ่งบอกความเป็นเสายาวหรือเสาสั้น

$$\sigma_{ult} = \phi k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{b_f}{t_f} \right)^2 \quad (\text{psi}) \quad (2.37)$$

โดยที่  $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทางของแรงกระทำ (psi)

$\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง

$t_f$  คือ ความหนาของปีก (in)

$b_f$  คือ ความกว้างของปีก (in)

$\phi$  คือ ตัวประกอบของวัสดุคอนกรีต มีค่า 0.8

$k$  เท่ากับ 0.5 สำหรับหน้าตัดที่มีปีกที่ไม่เกร็ง (non-stiffened flanges)

เท่ากับ 4.0 สำหรับหน้าตัดที่มีปีกที่เกร็ง (stiffened flanges)

สำหรับเสาสั้นวัสดุ FRP หน้าตัดรูปฉากมีอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า 45 จะพบการ โกงเดาะเฉพาะที่ของปีกเหมือนกับเสาหน้าตัดรูปตัวไอปีกกว้าง ดังนั้นสามารถใช้สมการ (2.37) ในการทำนายกำลังประลัยของเสา

#### b) การออกแบบเสายาวปานกลางวัสดุ FRP

สำหรับหน้าตัดรูปฉากมีอัตราส่วนความชะลูดมากกว่า 60 การ โกงเดาะแบบการค้ำร่วมกับการบิดจะเป็นตัวควบคุมกำลังประลัย ในการทดสอบจะพบการร่วมนกันของการค้ำและการบิดเกิดขึ้นโดยมีการเคลื่อนตัวไปทางข้างและการบิดของหน้าตัด กำลังรับการ โกงเดาะแบบการค้ำร่วมกับการบิดประมาณได้จากค่าต่ำสุดที่ได้จากสมการการ โกงเดาะแบบการค้ำแสดงในสมการ (2.38) และสมการการ โกงเดาะของเสายาวค้ำแสดงในสมการ (2.39)

$$\sigma_{ult} = \phi \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{b_f}{t_f} \right)^2 \quad (\text{psi}) \quad (2.38)$$

จากผลการทดสอบแนะนำให้ใช้  $\phi = 0.8$  สำหรับสมการ (2.38) สอดคล้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตของวัสดุ FRP เมื่อ  $b_f$  คือ ความกว้างของปีก (in) สำหรับหน้าตัดรูปตัวไอปีกกว้าง  $b_f$  คือ ครึ่งหนึ่งของความกว้างของหน้าตัดและความยาวของขาสำหรับหน้าตัดรูปฉาก

### c) การออกแบบเสายาววัสดุ FRP

สำหรับเสายาว ได้แก่ เสาวัสดุ FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงมีอัตราส่วนความชะลุดมากกว่า 35 เสาหน้าตัดรูปกลมกลวงและหน้าตัดรูปตัวไอมีอัตราส่วนความชะลุดมากกว่า 40 เสาหน้าตัดรูปตัวไอปีกกว้างมีอัตราส่วนความชะลุดมากกว่า 60 เมื่อรับแรงอัดตามแนวแกนจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะแบบการคด (flexural buckling) หรือเรียกว่า การโก่งเดาะออยเลอร์ (Euler buckling) กำลังโก่งเดาะประลัยที่ได้จากการทดสอบจะสอดคล้องกับสมการของออยเลอร์ ดังแสดงในสมการ (2.39)

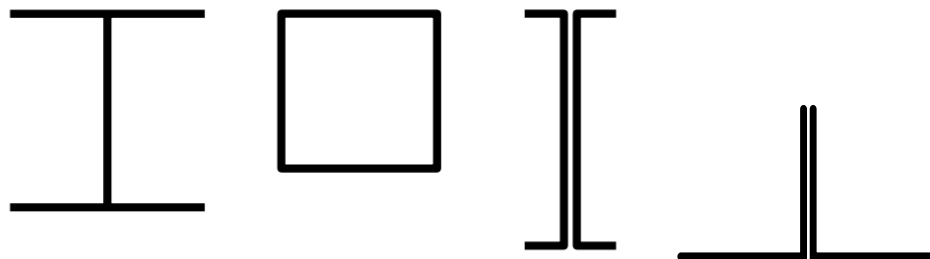
$$\sigma_{ult, Euler} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \text{ (psi)} \quad (2.39)$$

ตัวประกอบความยาวประลัยพิผล  $K$  ขึ้นอยู่กับลักษณะของการยึดรั้งที่ปลายของชิ้นส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.15

ตารางที่ 2.5 ค่าของตัวประกอบความยาวประลัยพิผล (Creative Pultrusion, Inc., 2000)

การยึดรั้งที่ปลายของชิ้นส่วน	ค่าของตัวประกอบความยาวประลัยพิผล
1. Pined – Pined	1.00
2. Fixed – Fixed	0.65
3. Pined – Fixed	0.80
4. Fixed – Translation Fixed	1.20
5. Fixed – Translation Free	2.10
6. Pined – Translation Fixed	2.00

Bank (2006) กล่าวว่า การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของวัสดุ FRP สำหรับชิ้นส่วนที่มีหน้าตัดแกนเดียว (mono symmetric) และหน้าตัดสมมาตรสองแกน (doubly symmetric) มีส่วนสำคัญอยู่ที่แกนหลักของชิ้นส่วน (principle coordinate axes) และการประกอบของแผ่นบางในแนวนอน (ปีก) และแนวค้ำ (เอว) ซึ่งส่วนใหญ่ชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนนั้นจะใช้หน้าตัดตัวไอ (I-shape), หน้าตัดตัวไอปีกกว้าง (wide-flange), ปลอกสี่เหลี่ยม (square tube), ปลอกวงกลม (round tube), หน้าตัดฉาก (angle) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

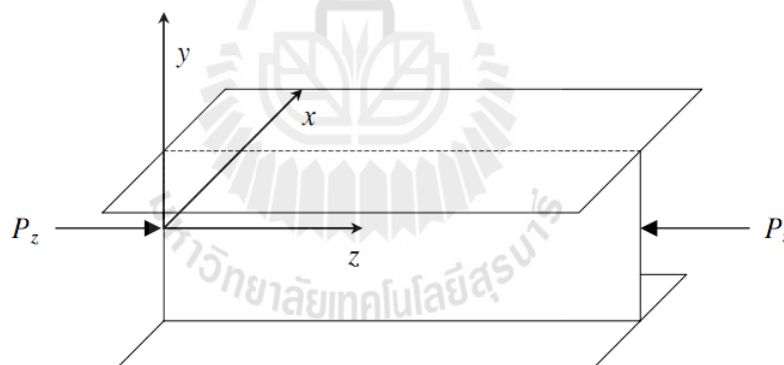


รูปที่ 2.20 ลักษณะหน้าตัดของชิ้นส่วนวัสดุ FRP ซึ่งรับแรงในแนวแกน

(Bank, 2006)

1) ชิ้นส่วนรับแรงกดอัดในแนวแกน (concentrically loaded compression members)

ในการออกแบบชิ้นส่วนดังกล่าวเพื่อให้ชิ้นส่วนนั้นสามารถที่จะต้านทานต่อหน่วยแรงหรือแรงภายในในระบบแกนโดยรวม (global coordinate system) ซึ่งถูกกระทำโดยแรงในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ชิ้นส่วนรับแรงกดอัดในแนวแกน

(Bank, 2006)

ในกรณีที่สมาชิกเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) สามารถหาหน่วยแรงกดอัดได้จาก

$$\sigma_z = \frac{P_z}{A_z} \quad (2.40)$$

โดยที่  $A_z$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน



หน่วยแรงในแนวแกนหรือแรงในแนวแกนที่นำมาออกแบบจะต้องมีค่าน้อยกว่ากำลังของวัสดุ (material strength) และหน่วยแรงโก่งเดาะวิกฤติ (critical buckling stress)

## 2) สภาวะขอบเขตประลัย (ultimate limit states)

### - การโก่งเดาะโดยรวมเนื่องจากการดัด (global flexural buckling)

การโก่งเดาะโดยรวมเนื่องจากการดัดโดยทั่วไปสามารถพบได้ในชิ้นส่วนที่รับแรงในแนวแกนซึ่งหมายถึง Euler buckling เมื่อ โคนแรงกระทำจนถึงค่าแรงวิกฤติจะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างเรียกว่าการโก่งเดาะซึ่งมักจะเกิดกับเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดที่มีค่ามาก การโก่งเดาะโดยรวมเนื่องจากการดัดได้ถูกศึกษาเป็นที่แพร่หลาย โดย Barbero และ Tomlin (1993), Zureick และ Scout (1997), Zureick และ Steffen (2000), Mottram et al. (2003) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการของ Euler สามารถใช้อธิบายการโก่งเดาะโดยรวมเนื่องจากการดัด อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวสามารถใช้ในเสาที่มีความสูงน้อยกว่า โดยควรจะนำผลของการเสียรูปในทิศทางเฉือน (shear deformation) มาพิจารณาด้วยถึงแม้ว่าจะมีผลกระทบน้อยมากประมาณ 5% (Zureick และ Scout, 1997)(Roberts, 2002) ค่าแรงวิกฤติของการโก่งเดาะเนื่องจากการดัดสำหรับชิ้นส่วนที่เป็นเนื้อเดียวกันรวมถึงผลของการเสียรูปในทิศทางเฉือนหาได้ดังนี้

$$P_{cr}^{flex} = \frac{P_{euler}}{1 + \frac{P_{euler}}{k_{tim} A_z G_{LT}}} \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$P_{euler} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (2.42)$$

หน่วยแรงโก่งเดาะวิกฤติเนื่องจากการดัดซึ่งรวมผลของการเสียรูปในทิศทางเฉือน

$$\sigma_{cr}^{flex} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)_{max}^2} \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_{tim} G_{LT}} \right) \left( \frac{\pi^2 E}{(KL/r)_{max}^2} \right)} \right] \quad (2.43)$$

โดยที่	$\left(\frac{KL}{r}\right)_{\max}$	คือ	อัตราส่วนความชะลูดสูงสุด
	$K$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งคด
	$L$	คือ	ความสูงของเสา
	$r$	คือ	รัศมีจายเรชั่น
	$k_{tim}$	คือ	ค่าคงที่ของการเฉือนของ Timoshenko

ในกรณีที่ไม่นำผลของการเสียดรูปในทิศทางเฉือนในสมการ (2.43) เทอมในวงเล็บมีค่าเท่ากับหนึ่ง

## 2.4.2 เสาประกอบ (built-up column)

### 2.4.2.1 ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อ (connector spacing)

ข้อกำหนดของสมการในการออกแบบของ AISC/LRFD กำหนดให้ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อที่พิจารณาในเสาประกอบมีค่าอัตราส่วนความชะลูดของแต่ละชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ (individual component slenderness ratio) มีค่าน้อยกว่า 0.75 เท่าของอัตราส่วนความชะลูดของเสาโดยรวม (overall slenderness ratio)

$$\frac{a}{r_i} < 0.75 \left( \frac{KL}{r} \right)_o \quad (2.44)$$

โดยที่	$\frac{a}{r_i}$	คือ	ค่าอัตราส่วนความชะลูดของแต่ละชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ
	$\left(\frac{KL}{r}\right)_o$	คือ	อัตราส่วนความชะลูดของเสาโดยรวม

### 2.4.2.2 ค่าอัตราส่วนความชะลูดที่ได้รับการปรับแต่ง (modified slenderness ratio)

เสาประกอบหรือชิ้นส่วน โครงสร้างที่เกิดจากการประกอบนั้นค่าอัตราส่วนความชะลูดที่นำมาใช้จะต้องเกิดจากการปรับแต่งค่าอัตราส่วนความชะลูดของค่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาโดยรวมและค่าอัตราส่วนความชะลูดของแต่ละชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ เพราะเมื่อเกิดการโก่งคดขึ้นในชิ้นส่วนประกอบจะทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นที่จุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ โดยการปรับแต่งดังกล่าวเขียนเป็นสมการคือ

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \quad (2.45)$$

โดยที่  $\left(\frac{KL}{r}\right)_m$  คือ ค่าอัตราส่วนความชะลูดที่ได้รับการปรับแต่งของเสาประกอบ

ทอม  $\left(\frac{KL}{r}\right)_o$  ส่งผลกระทบต่อ การดัด (bending effect) ส่วนทอม  $\frac{a}{r_i}$  ส่งผลกระทบต่อ การเฉือน

(shear effect)

อย่างไรก็ตามสำหรับการประกอบชิ้นส่วน FRP เป็นหน้าตัดประกอบซึ่งมีมาตรฐานรองรับทำให้ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อน้อยมากเพื่อให้ชิ้นส่วนที่นำมาประกอบสามารถถ่ายเทแรงเฉือนและเกิด fully composite action แต่ในความเป็นจริง โครงสร้างที่เกิดจากการประกอบชิ้นส่วน FRP มีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อนอกกว่าที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงอยู่ภายใต้พื้นฐานของ no fully composite action

## 2.5 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สมการที่ใช้ออกแบบเสาประกอบและชิ้นส่วนวัสดุ FRP ภายใต้แรงกดอัดส่วนใหญ่มาจากสมการคำนวณทางทฤษฎีของเหล็ก รูปพรรณ และส่วนหนึ่งถูกพัฒนาสมการจากการทดสอบ (empirical formula) รวมทั้งยังไม่ได้มีการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน ตลอดจนสมการออกแบบเสาประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลที่มียังไม่มีความสมบูรณ์เพียงพอ จึงเห็นสมควรที่จะทำการศึกษาวินิจฉัยเกี่ยวกับพฤติกรรมและลักษณะเฉพาะในการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูล โดยทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงกดอัดของเสาประกอบในห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาพัฒนาสมการการออกแบบเสาประกอบและชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูล และสุดท้ายเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการคำนวณทางทฤษฎีที่ได้ เพื่อเกิดประโยชน์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

## บทที่ 3

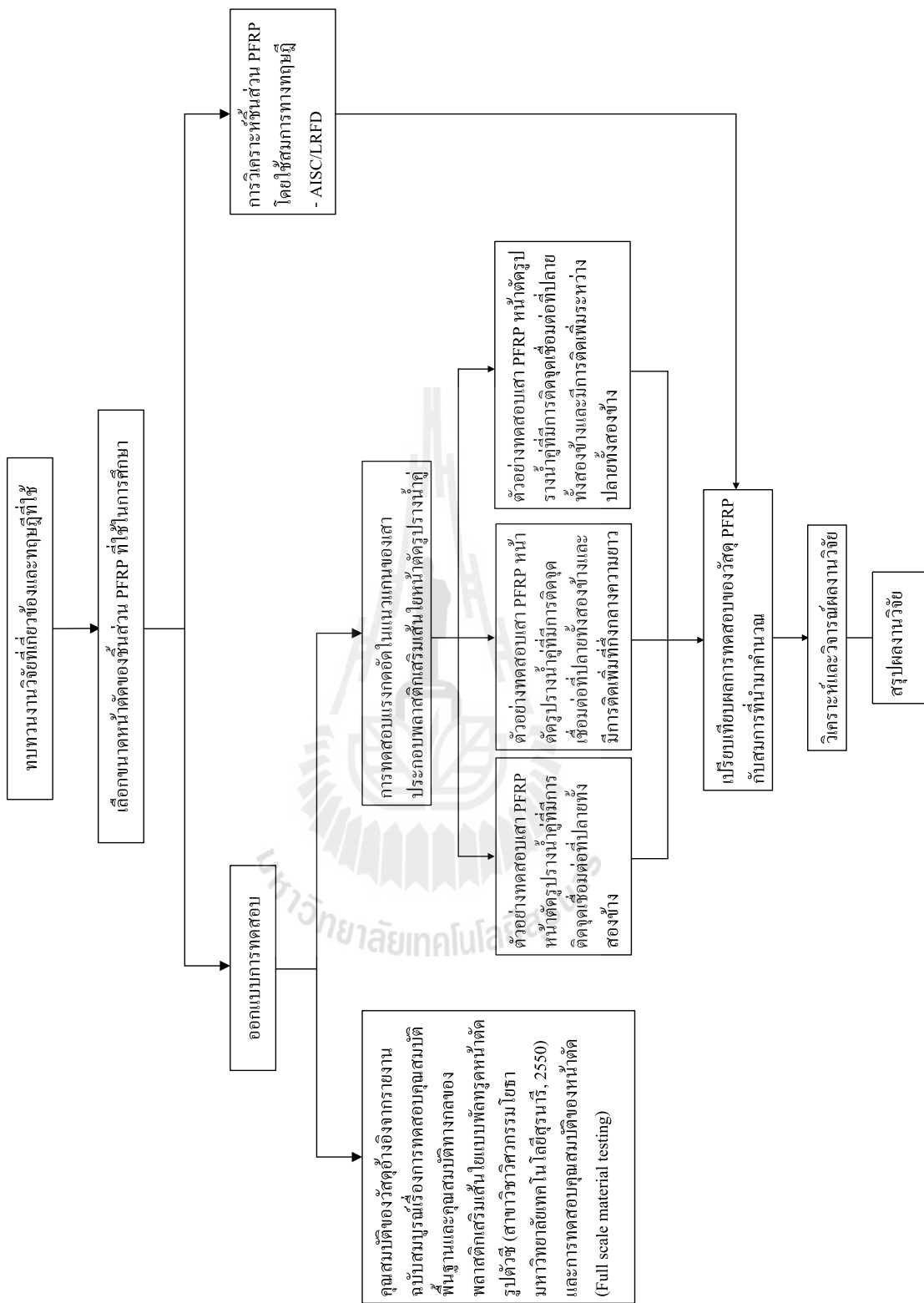
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงแนวคิด ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงกดอัด การศึกษาประกอบด้วย การทดสอบการรับแรงกดอัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ การวิเคราะห์กำลังรับแรงกดอัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้โดยใช้สมการคำนวณทางทฤษฎี การเปรียบเทียบผลการศึกษากับการรับแรงกดอัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้โดยสมการทางทฤษฎี สุดท้ายกล่าวถึงการเปรียบเทียบผลการศึกษากับการรับแรงกดอัดของเสาประกอบ FRP โดยผลการทดสอบและสมการทางทฤษฎี

การศึกษาประกอบด้วย การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของวัสดุ FRP และหลักการพรรณน ขั้นตอนต่อมาทำการเลือกวัสดุที่ผลิตเป็นวัสดุ FRP และเลือกขนาดของหน้าตัดที่ทำการศึกษา จากนั้นจัดหาวัสดุ FRP และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา เริ่มทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ และกำลังรับแรงกดอัดของเสาประกอบที่ทำจากวัสดุ FRP ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้จำนวน 87 ตัวอย่าง ถูกทดสอบโดยแบ่งกลุ่มทดสอบออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ (1) เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างจำนวน 42 ตัวอย่าง (2) เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้างจำนวน 15 ตัวอย่าง และ (3) เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างเพื่อทำการเลื่อนจุดเชื่อมต่อดังกล่าวเพื่อหาระยะที่ตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติจากโก่งเดาะโดยรวม (global buckling) ไปเป็นโก่งเดาะโดยชิ้นประกอบ (individual buckling) จำนวน 30 ตัวอย่าง จากนั้นนำข้อมูลคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ที่ทดสอบได้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับคำนวณความสามารถในการรับแรงกดอัดโดยสมการออกแบบของ LRFD และสมการทางทฤษฎีของ Euler

สุดท้ายเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงกดอัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่ได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD และสมการทางทฤษฎีกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยสรุปขั้นตอนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP

ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างและการคำนวณทางทฤษฎี ผลการทดสอบวัสดุมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการคำนวณทางทฤษฎีได้ถูกนำมาใช้ในการหาสมการสำหรับทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และการตอบสนองทางโครงสร้าง (structural responses) อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าหากไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) ซึ่งได้จากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้นขั้นตอนและผลทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุดังกล่าวได้อ้างอิงจากรายงานฉบับสมบูรณ์เรื่อง “ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ ” (สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ หวังแก้ว บุญสวน, 2550) การศึกษาประกอบด้วยการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties) และคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยการทดสอบดังกล่าวถูกกระทำตามมาตรฐาน ASTM และมีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก. สุดท้ายเนื่องจากการทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลโดยใช้ชิ้นส่วน FRP ซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็ก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพิ่มในส่วนของการทดสอบแรงกดอัด และการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบรูปรางน้ำ (full scale) เพิ่มเติมเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากการทดสอบและมีรายละเอียดดังแสดงในบทที่ 4

#### 3.2.1 การทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบรูปรางน้ำ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบรูปรางน้ำที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำโดย สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ หวังแก้ว บุญสวน เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็ก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพิ่มในส่วนของการทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบรูปรางน้ำ (full scale) เพื่อหาค่า หน่วยแรงกดอัดประลัย ( $\sigma_{comp,ult}$ ) และความแกร่งเนื่องจากการกดอัด ( $E_c$ ) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำและนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบ

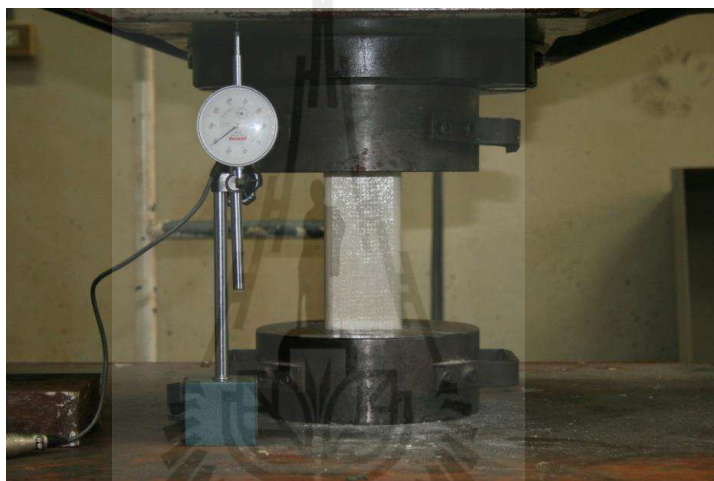
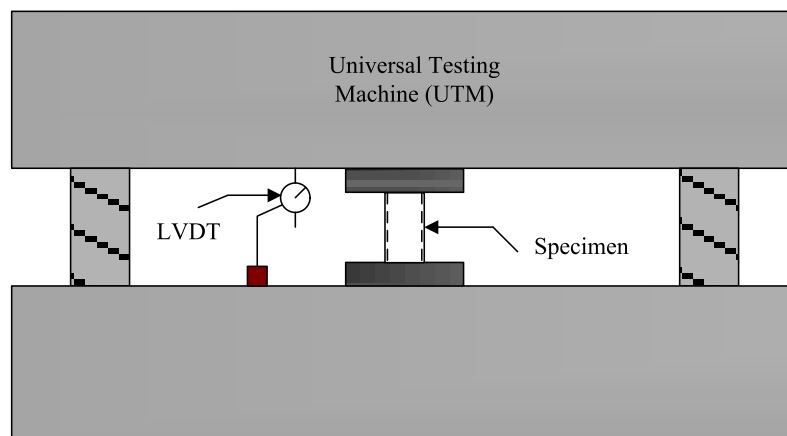
#### ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFPR) ที่มีหน้าตัดรูปรางน้ำ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ โดยชิ้นส่วนวัสดุ PFPR หน้าตัดรูปรางน้ำมี 3 ขนาด ได้แก่ (1) 76

×22×6 mm (2) 102×29×6 mm และ (3) 152×43×10 mm โดยวิธีการทดสอบอ้างอิงจาก “การทดสอบวัสดุ:บรรยาย” โดย สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2545) โดยความยาวของตัวอย่างทดสอบอยู่ในช่วงของ 2-10 ของความลึกของตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากเพื่อป้องกันการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบในกรณีที่มีความยาวมากกว่า 10 เท่าของความลึกของตัวอย่างทดสอบ และเพื่อป้องกันผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่นำมาทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบรูปตัวซี โดยทำการทดสอบชื่อตัวอย่างละ 3 ตัวอย่าง รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่นำมาทดสอบแรงกดอัด

ขนาดหน้าตัด	$d$ (mm)	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$L$ (mm)	$L/d$
76×22×6	76	22	6	400	5.3
102×29×6	102	29	6	400	3.9
152×43×10	152	43	10	400	2.6



รูปที่ 3.2 แผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปวงรี

#### ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในรูปที่ 3.2
- 2) ติดตั้ง linear variable differential transducer (LVDT) ให้ตรงตามแนวตั้งเพื่อวัดค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวแกน
- 3) ต่อสายนำสัญญาณจาก LVDT Transducers และค่าแรงกดอัดจาก UTM เข้า Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อ Monitor ข้อมูล
- 4) ทำการ pre-loading ตัวอย่างทดสอบ โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 25% ของแรงสูงสุด
- 5) เซตศูนย์อีกครั้ง และทำการบันทึกเพื่อเริ่มต้นการทดสอบ
- 6) ทำการเพิ่มแรงกระทำจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



### 3.2.2 การทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบรูปร่างน้ำ

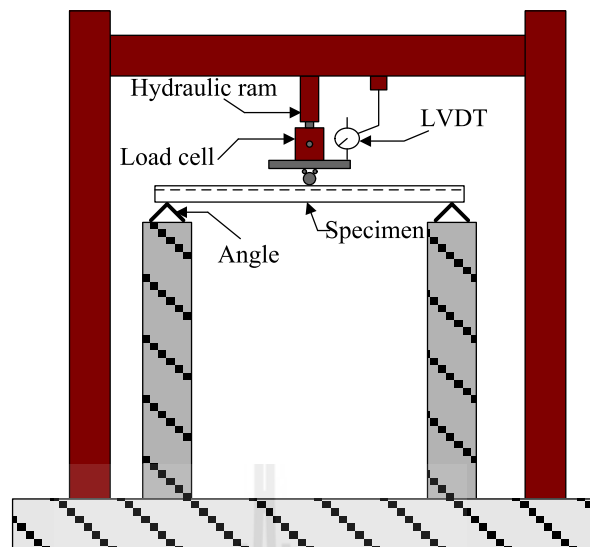
วัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบรูปร่างน้ำที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปร่างน้ำโดย สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ หวังแก้ว บุญสวน เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็ก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบเพิ่มในส่วนของการทดสอบแรงกดัดของตัวอย่างทดสอบรูปร่างน้ำ (full scale) เพื่อหาค่าความแกร่งเนื่องจากการดัด ( $E_{flex}$ ) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปร่างน้ำและนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบ

#### ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปร่างน้ำ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ โดยชิ้นส่วนวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำมี 3 ขนาด ได้แก่ (1)  $76 \times 22 \times 6$  mm (2)  $102 \times 29 \times 6$  mm และ (3)  $152 \times 43 \times 10$  mm โดยวิธีการทดสอบอ้างอิงจาก “การทดสอบวัสดุ: บรรยาย” โดย สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2545) โดยใช้การทดสอบแบบ 3 จุด (three-point loading) ในการทดสอบ สำหรับความยาวของตัวอย่างทดสอบใช้อัตราส่วนของความยาวต่อความลึกมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ( $L/d \geq 10$ ) เป็นตัวกำหนดความยาวของตัวอย่างทดสอบ โดยที่ใช้ระยะโคงตัวมากที่สุดเท่ากับ  $L/100$  ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่นำมาทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบรูปร่างน้ำ โดยทำการทดสอบชื่อตัวอย่างละ 3 ตัวอย่าง รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปตัวซี

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่นำมาทดสอบแรงดัด

ขนาดหน้าตัด	$d$ (mm)	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$L$ (mm)	Span (mm)	$L/d$
$76 \times 22 \times 6$	76	22	6	1000	900	11.8
$102 \times 29 \times 6$	102	29	6	1000	900	8.8
$152 \times 43 \times 10$	152	43	10	1000	900	5.9



รูปที่ 3.3 แผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเพื่อทดสอบแรงคัดของตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับโครงข้อแข็ง โดยปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบยื่นออกจากจุดรองรับเป็นระยะ 50 mm และถูกรองรับโดยเหล็กฉากซึ่งเปรียบเสมือนจุดรองรับอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.3

2) ติดตั้งชุดให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบ โดยชุดให้แรงกระทำประกอบด้วย ปัมไฮดรอลิกและ Load cell

- 3) หลังจากติดตั้งตัวอย่างทดสอบให้ตรงตามแนวตั้งเรียบร้อยแล้ว จะติดตั้ง linear variable differential transducer (LVDT) บริเวณด้านบนให้ตรงตามแนวตั้งเพื่อวัดค่าการโก่งตัวในแนวตั้ง
- 4) ต่อสายนำสัญญาณจาก LVDT และค่าแรงกดอัดจาก Load cell เข้า Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อ Monitor ข้อมูล
- 5) ทำการ pre-loading ตัวอย่างทดสอบ โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ ประมาณ 25% ของแรงสูงสุด
- 6) เซตศูนย์อีกครั้ง และทำการบันทึกเพื่อเริ่มต้นการทดสอบ
- 7) ทำการเพิ่มแรงกระทำจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีการโก่งตัวในแนวตั้งเท่ากับ  $L/100$

### 3.3 การวิเคราะห์กำลังรับแรงกดอัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางนำคู่ออกแบบตามสมการออกแบบของ AISC-LRFD

การออกแบบการทดสอบเริ่มจากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ FRP รวมถึงเกี่ยวกับเหล็กรูปพรรณ เสาประกอบหน้าตัดรูปแบบต่างๆ จากการปรีทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องไม่พบว่ามีการนำวัสดุ FRP มาใช้ในเสาประกอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะใช้สมการออกแบบของเหล็กรูปพรรณ โดยมาตรฐานการออกแบบของ AISC-LRFD (American Institute of Steel Construction-Load and resistance Factor Design) แต่เนื่องจากมาตรฐานการออกแบบดังกล่าวเป็นการออกแบบเหล็กรูปพรรณทำให้เมื่อนำมาใช้กับวัสดุ FRP จะต้องมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรบางตัว เช่น หน่วยแรงคลาก ( $\sigma_y$ ) ไปเป็นหน่วยแรงประลัย ( $\sigma_u$ ) เนื่องจากวัสดุ FRP มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติทำให้ไม่เกิดการคลาก (yielding) และค่าความแกร่ง ( $E$ ) เนื่องจากค่า  $E$  ของวัสดุ FRP และเหล็กรูปพรรณนี้มีค่าต่างกัน โดยที่ค่า  $E$  ที่ใช้ในการคำนวณออกแบบจะใช้ค่าความแกร่งเนื่องจากการคด ( $E_{flex}$ ) โดยจะประกอบไปด้วย

#### 3.3.1 กำลังโก่งเดาะวิกฤติ (critical buckling load, $\sigma_{cr}$ )

จากสมการ SSRC

$$\sigma_{cr} = \sigma_u \left[ 1 - \frac{\sigma_u (KL/r)^2}{4\pi^2 E_{flex}} \right] \quad (3.1)$$

กำหนดให้

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\sigma_u}{\sigma_e}} = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{\sigma_u}{E_{flex}}} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\lambda_c$  คือ พารามิเตอร์ความชะลุดแทนค่าลงไปในสมการ SSRC จะได้

$$\sigma_{cr} = \sigma_u \left[ 1 - \frac{\lambda_c^2}{4} \right] \quad (3.3)$$

สมการ SSRC กำหนดให้พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาเปลี่ยนจากช่วงอีลาสติกเป็นช่วงอินอีลาสติกเมื่อ  $\sigma_{cr} = \frac{\sigma_u}{2}$  จะทำให้ทราบว่า  $\lambda_c = \sqrt{2}$  แต่ตามมาตรฐาน AISC ใช้  $\lambda_c = 1.5$  เป็นค่ากำหนดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการโก่งเดาะของเสา

**หน่วยแรงอัดวิกฤติในช่วงอีลาสติก**

ในกรณีที่  $\lambda_c > 1.5$  เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงอัดวิกฤติหาได้จากสมการออยเลอร์

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_u}{\lambda_c^2} \quad (3.4)$$

แต่มาตรฐาน AISC ใช้  $\sigma_{cr} = \frac{0.877\sigma_u}{\lambda_c^2}$  เมื่อ  $\lambda_c^2 > 1.5$

**หน่วยแรงอัดวิกฤติในช่วงอินอีลาสติก**

ในกรณีที่  $\lambda_c \leq 1.5$  เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอินอีลาสติก ซึ่งหน่วยแรงอัดวิกฤติหาได้จาก

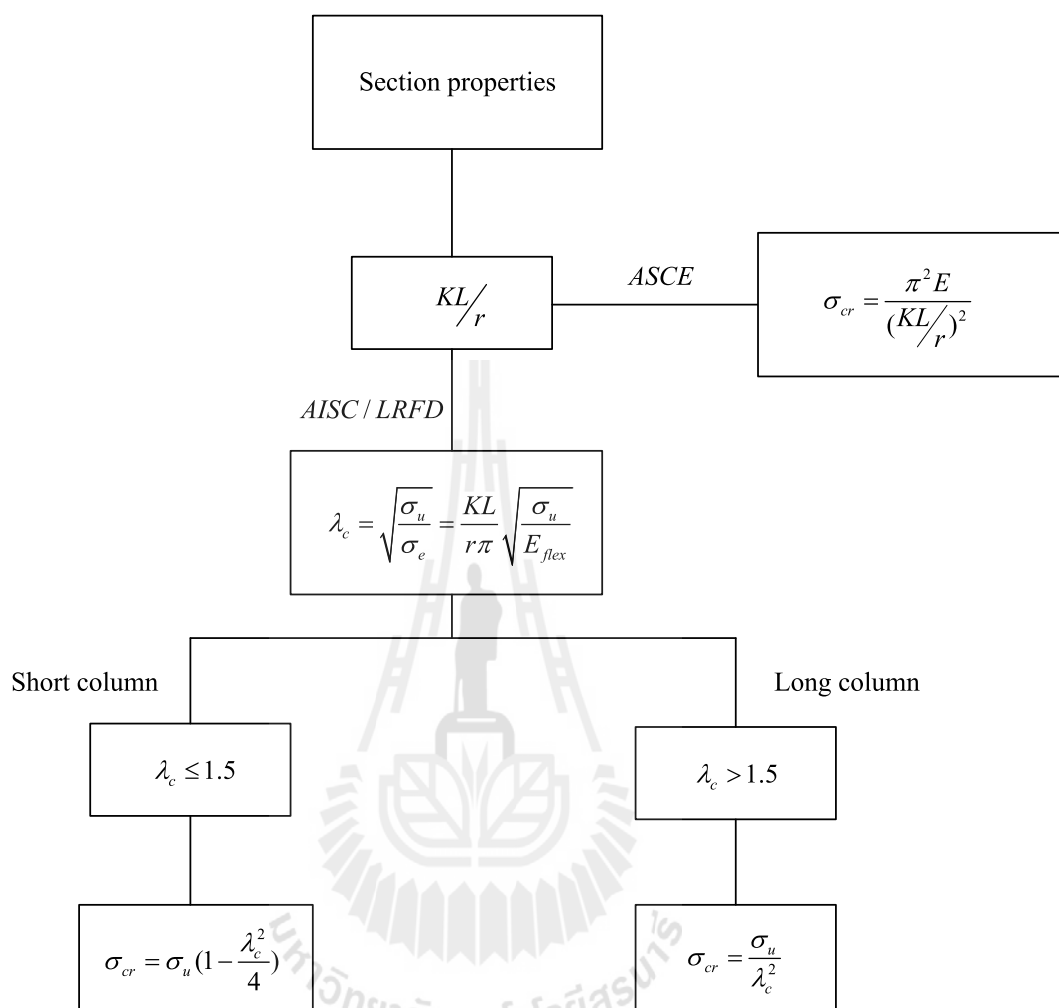
$$\sigma_{cr} = \sigma_u \left( 1 - \frac{\lambda_c^2}{4} \right) \quad (3.5)$$

แต่มาตรฐาน AISC ใช้  $\sigma_{cr} = (0.658)^{\lambda_c^2} F_u$  เมื่อ  $\lambda_c^2 \leq 1.5$

สำหรับมาตรฐานของ ASCE สำหรับการคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะวิกฤติ ได้แก่

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (3.6)$$

โดยสามารถสรุปวิธีการคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะวิกฤติได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4

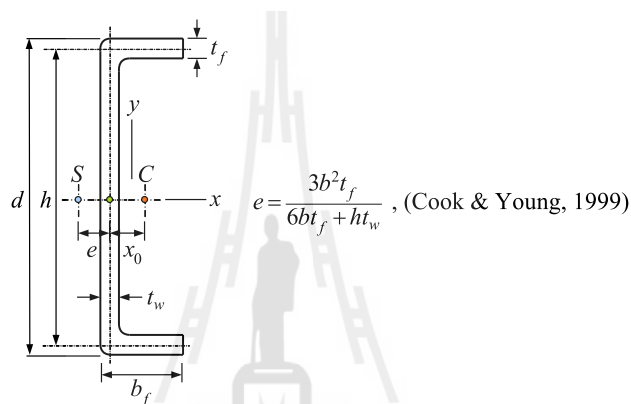


รูปที่ 3.4 สรุปวิธีการคำนวณน้ำหนักโก่งเดาะ โดยมาตรฐาน AISC/LRFD และ ASCE

### 3.4 การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP และเหล็กรูปพรรณที่มีหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ได้บทสรุปเกี่ยวกับการให้แรงกระทำต่อหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ โดยการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (centroid) ของหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ เนื่องจากในการคำนวณเชิงทฤษฎี น้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางของหน้าตัด (centroid) ของหน้าตัด ส่งผลให้การวิเคราะห์สมการของการโก่งเดาะสำหรับเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้มีความซับซ้อนลดลง โดยที่การวิเคราะห์ดังกล่าวไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากเยื้องศูนย์กลาง (eccentric) ที่เกิดขึ้นระหว่างการให้แรงกระทำ

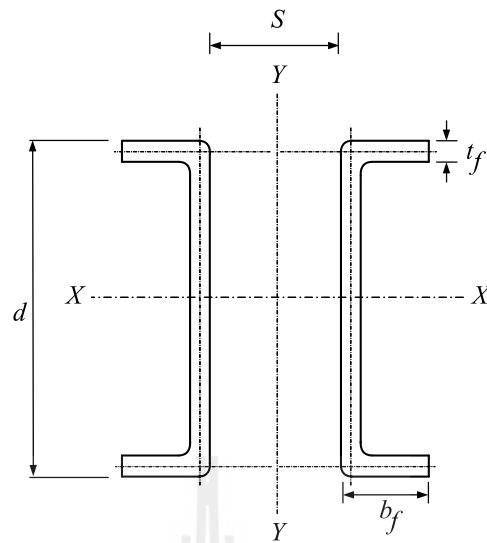
ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นหน้าตัดรูปร่างน้ำ โดยมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่  $76 \times 22 \times 6$   $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm รูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดหน้าตัดของชิ้นส่วน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ในงานวิจัย ในส่วนของเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ คุณสมบัติของวัสดุ PFRP ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกอดัดและรายละเอียดของหน้าตัดแสดงในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.4 โดยระยะ  $S$  จะใช้ค่าที่ทำให้โมเมนต์อินเนอร์เซียร์รอบแกน  $x$  ประมาณเท่ากับโมเมนต์อินเนอร์เซียร์รอบแกน  $y$  ( $I_x \cong I_y$ ) เพื่อความสามารถในการรับแรงที่เพิ่มขึ้น โดยใช้จุกรองรับแบบหมุด (pinned-pinned supported) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 ลักษณะหน้าตัดรูปร่างน้ำของเสาประกอบ PFRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างน้ำของชิ้นส่วน PFRP ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ขนาดหน้าตัด	$d$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)	$t_w$ (mm)	$h$ (mm)	$e$ (mm)	$x_0$ (mm)
$76 \times 22 \times 6$	76	22	6	6	70	7.19	3.26
$102 \times 29 \times 6$	102	29	6	6	96	9.34	4.51
$152 \times 43 \times 10$	152	43	10	10	142	13.87	6.51



รูปที่ 3.6 เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดหน้าตัด (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	$F_L^C$ (MPa)	$I_x$ (mm <sup>4</sup> )	$I_y$ (mm <sup>4</sup> )	$E_L$ (GPa)	$s$ (mm)
2×76×22×6	1296	181.13	910528	870512	34.16	38
2×102×29×6	1776	181.13	1984672	2347048	34.16	50
2×152×43×10	4360	181.13	12518133	11042843	34.16	75



รูปที่ 3.7 ลักษณะจุดรองรับแบบหมุด (Pinned-Pinned supports)

### 3.4.1 การทดสอบเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristics) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงอัดในแนวแกน ที่มีจุดรองรับแบบหมุด (pinned-pinned supported) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการคด (flexural buckling) และผลของความยาวเสาต่อน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load)

#### ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็น วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (FRP) ที่มีหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้มี 3 ขนาด ได้แก่ (1)  $76 \times 22 \times 6$  mm (2)  $102 \times 29 \times 6$  mm และ (3)  $152 \times 43 \times 10$  mm ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อรัศมีไจเรชั่น ( $L/r$ ) อยู่ระหว่าง 20-170 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบเสาที่มีจุดรองรับแบบหมุด

ตารางที่ 3.5 ถึงตารางที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด (geometric properties) โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 42 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ  $2Cd-L-N-C$  ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้  $2Cd$  หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีความลึก จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 76, 102 และ 152 mm  $L$  หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบ โดยมีหน่วยเป็น m  $N$  หมายถึงจำนวนของจุดเชื่อมต่อ สดท้าย  $C$  หมายถึงระยะที่มีการติดจุดเชื่อมต่อระหว่างกลาง ยกตัวอย่างเช่น  $2C102-1.0-2-0$  หมายถึงเสาประกอบที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีความยาว 1.0 m โดยมีจำนวนของจุดเชื่อมต่อ 2 ตัว และไม่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่ม รูปที่ 3.8 และ 3.9 แสดงแผนภาพและการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง



ตารางที่ 3.5 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

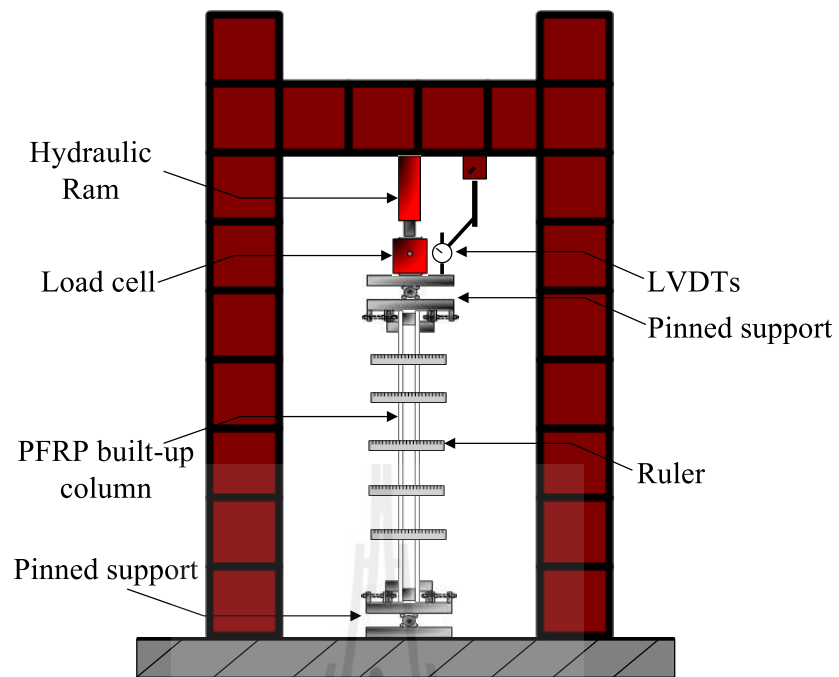
Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C76-0.25-2-0	$76 \times 22 \times 6$	0.25	6.02	33.2	181.13	3
2C76-0.40-2-0	$76 \times 22 \times 6$	0.40	6.02	53.1	133.95	3
2C76-0.70-2-0	$76 \times 22 \times 6$	0.70	6.02	93.3	43.67	3
2C76-1.00-2-0	$76 \times 22 \times 6$	1.00	6.02	149.5	26.39	3

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

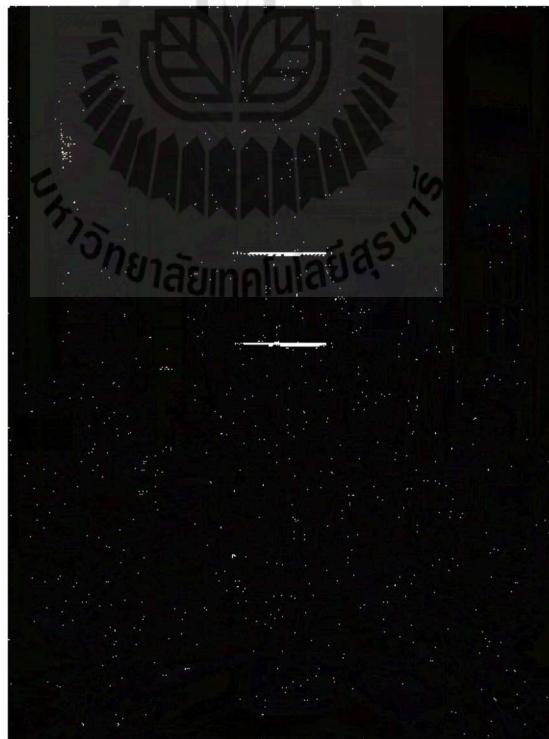
Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C102-0.25-2-0	$102 \times 29 \times 6$	0.25	8.01	31.2	181.13	3
2C102-0.40-2-0	$102 \times 29 \times 6$	0.40	8.01	49.9	181.13	3
2C102-0.70-2-0	$102 \times 29 \times 6$	0.70	8.01	87.4	77.36	3
2C102-1.00-2-0	$102 \times 29 \times 6$	1.00	8.01	112.4	46.85	3
2C102-1.50-2-0	$102 \times 29 \times 6$	1.50	8.01	168.5	20.83	3

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C152-0.25-2-0	$152 \times 43 \times 10$	0.25	11.78	21.2	181.13	3
2C152-0.40-2-0	$152 \times 43 \times 10$	0.40	11.78	33.9	181.13	3
2C152-0.70-2-0	$152 \times 43 \times 10$	0.70	11.78	59.4	163.85	3
2C152-1.50-2-0	$152 \times 43 \times 10$	1.50	11.78	114.6	45.05	3
2C152-2.00-2-0	$152 \times 43 \times 10$	2.00	11.78	152.8	25.32	3



รูปที่ 3.8 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.9 การติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

### 3.3.2 การทดสอบเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลาย ทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้าง และ ลักษณะการวิบัติของเสา PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่มีจุดรองรับแบบ หมุด (pinned-pinned supported) โดยเน้นศึกษาลักษณะการวิบัติโดยการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการคด (flexural buckling) เมื่อมีการติดจุดเชื่อมต่อตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้างและผลของความยาวเสათ่อน้ำหนักโกงเดาะ (buckling load)

#### ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็น วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปรางน้ำ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำมี 3 ขนาด ได้แก่ (1)  $76 \times 22 \times 16$  mm (2)  $102 \times 29 \times 6$  mm และ (3)  $152 \times 43 \times 10$  mm ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อรัศมีไจเรชั่น ( $L/r$ ) อยู่ระหว่าง 124-188 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบเสาที่มีจุดรองรับแบบหมุด ตารางที่ 3.8 ถึงตารางที่ 3.10 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด (geometric properties) โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 15 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ  $2Cd-L-N-C$  ถูกตั้งขึ้น โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้  $2Cd$  หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีความลึก จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 76, 102 และ 152 mm  $L$  หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบโดยมีหน่วยเป็น m  $N$  หมายถึงจำนวนของจุดเชื่อมต่อสุดท้าย  $C$  หมายถึงระยะที่มีการติดจุดเชื่อมต่อระหว่างกลาง ยกตัวอย่าง เช่น  $2C102-1.0-3-L/2$  หมายถึงเสาประกอบที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีความยาว 1.0 m โดยมีจำนวนของจุดเชื่อมต่อ 3 ตัว และมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/2$  จากปลายด้านหนึ่ง รูปที่ 3.10 และ 3.11 แสดงแผนภาพและการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง

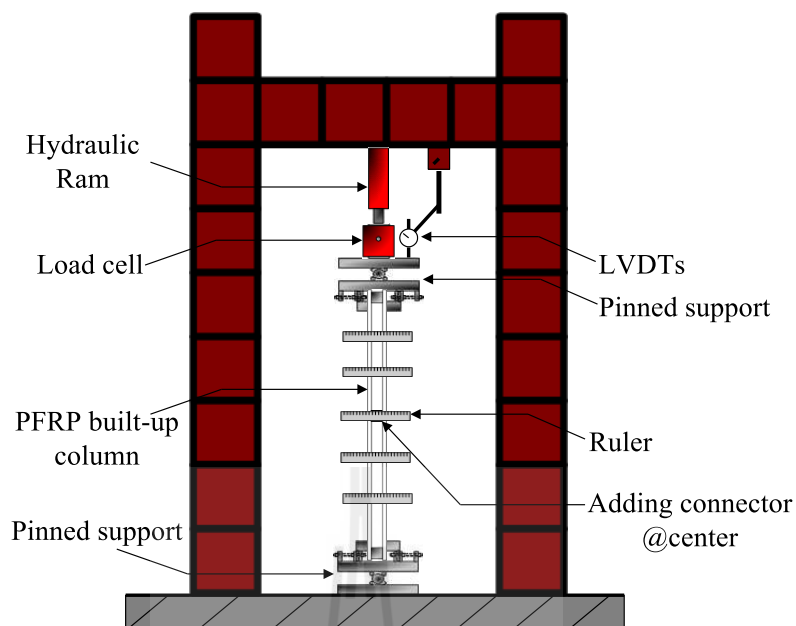
Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C76-1.0-3-L/2	$76 \times 22 \times 6$	1.0	6.02	166.1	21.42	3

ตารางที่ 3.9 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ FRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง

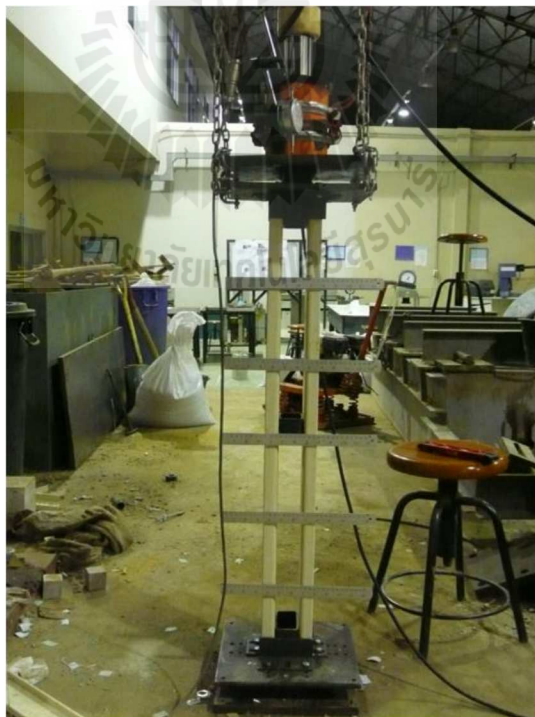
Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C102-1.0-3-L/2	$102 \times 29 \times 6$	1.0	8.01	124.8	37.94	3
2C102-1.5-3-L/2	$102 \times 29 \times 6$	1.5	8.01	187.3	16.86	3

ตารางที่ 3.10 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ FRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C152-1.5-3-L/2	$152 \times 43 \times 10$	1.5	11.78	127.3	36.50	3
2C152-2.0-3-L/2	$152 \times 43 \times 10$	2.0	11.78	169.8	20.54	3



รูปที่ 3.10 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมี การติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.11 การติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุด เชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง

### 3.3.3 การทดสอบเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้าง และลักษณะการวิบัติของเสา PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่มีจุดรองรับแบบหมุด (pinned-pinned supported) โดยเน้นศึกษาลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้าง เนื่องจากการคด (flexural buckling) เมื่อมีการเลื่อนจุดเชื่อมต่อระหว่างปลายทั้งสองข้างเพื่อหาระยะซึ่งแบ่งพฤติกรรมการวิบัติจากโก่งเดาะโดยรวมไปเป็น โก่งเดาะ โดยขึ้นประกอบและผลของความยาวเสาต่อน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load)

#### ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้มี 3 ขนาด ได้แก่ (1)  $76 \times 22 \times 16$  mm (2)  $102 \times 29 \times 6$  mm และ (3)  $152 \times 43 \times 10$  mm ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อรัศมีไจเรชั่น ( $L/r$ ) อยู่ระหว่าง 124-188 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบเสาที่มีจุดรองรับแบบหมุด

ตารางที่ 3.11 ถึงตารางที่ 3.13 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด (geometric properties) โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 30 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ  $2Cd-L-N-C$  ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้  $2Cd$  หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีความลึกจำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 76, 102 และ 152 mm  $L$  หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบโดยมีหน่วยเป็น m  $N$  หมายถึงจำนวนของจุดเชื่อมต่อ สดท้าย  $C$  หมายถึงระยะที่มีการติดจุดเชื่อมต่อระหว่างกลาง ยกตัวอย่าง เช่น  $2C102-1.0-3-L/8$  หมายถึงเสาประกอบที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีความยาว 1.0 m โดยมีจำนวนของจุดเชื่อมต่อ 3 ตัว และมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$  จากปลายด้านหนึ่ง หนึ่ง รูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงแผนภาพและการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ตารางที่ 3.11 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

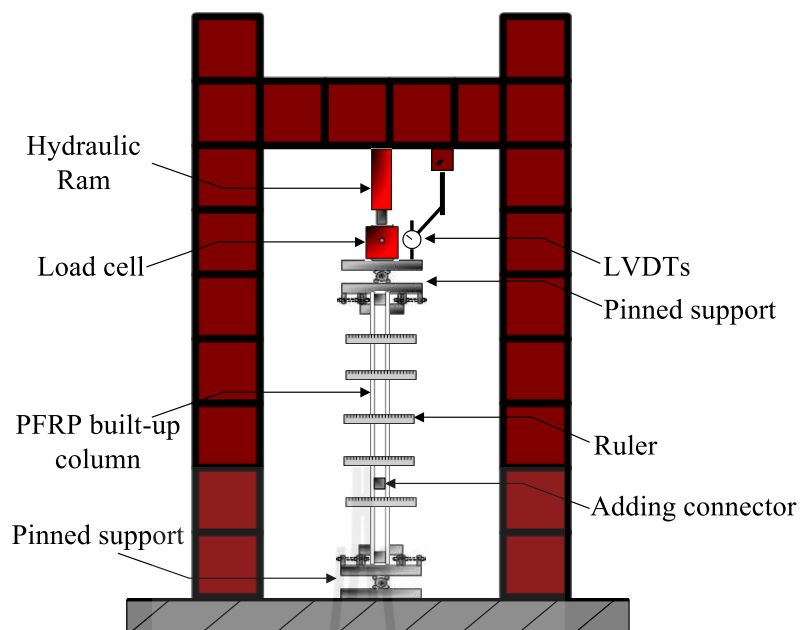
Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C76-1.0-3-L/4	$76 \times 22 \times 6$	1.0	6.02	166.11	12.22	3
2C76-1.0-3-L/8	$76 \times 22 \times 6$	1.0	6.02	116.28	15.08	3

ตารางที่ 3.12 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ FRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C102-1.0-3-L/4	$102 \times 29 \times 6$	1.0	8.01	124.84	21.63	3
2C102-1.0-3-L/8	$102 \times 29 \times 6$	1.0	8.01	87.39	26.71	3
2C102-1.5-3-L/4	$102 \times 29 \times 6$	1.5	8.01	187.27	9.62	3
2C102-1.5-3-L/8	$102 \times 29 \times 6$	1.5	8.01	131.09	11.87	3

ตารางที่ 3.13 รายละเอียดตัวอย่างเสาประกอบ FRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	$L$ (m)	$r$ (mm)	$KL/r$	$\sigma_{LRFD}$ (MPa)	Number
2C152-1.5-3-L/4	$152 \times 43 \times 10$	1.5	11.78	127.33	20.79	3
2C152-1.5-3-L/8	$152 \times 43 \times 10$	1.5	11.78	89.13	25.67	3
2C152-2.0-3-L/4	$152 \times 43 \times 10$	2.0	11.78	169.78	11.70	3
2C152-2.0-3-L/8	$152 \times 43 \times 10$	2.0	11.78	118.85	14.44	3



รูปที่ 3.12 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.13 การติดตั้งตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง



### การเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยรวม

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ ได้ถูกประกอบขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการคอนกรีต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดชิ้นวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยให้มีความยาวตามที่กำหนดในรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแต่ละหน้าตัด
- 2) เเจาะรูเพื่อทำการติดตั้งจุดเชื่อมต่อให้กับเสาตัวอย่างทดสอบ โดยให้มีรูปแบบการติดตั้งเชื่อมต่อตามที่กำหนดไว้ในรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแต่ละหน้าตัด
- 3) ทำการประกอบชิ้นตัวอย่างทดสอบโดยการติดตั้งจุดเชื่อมต่อให้ครบตามที่กำหนด

### ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับโครงข้อแข็ง โดยปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบถูกรองรับโดยจุกรองรับแบบหมุด
- 2) ติดตั้งชุดให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบ โดยชุดให้แรงกระทำประกอบด้วยปั๊มไฮดรอลิกและ Load cell
- 3) หลังจากติดตั้งตัวอย่างทดสอบให้ตรงตามแนวตั้งเรียบร้อยแล้ว จะติดตั้ง linear variable differential transducers (LVDTs) บริเวณด้านบนให้ตรงตามแนวตั้งเพื่อวัดค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน
- 4) ทำการแบ่งเสาตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 ช่วงเท่า ๆ กันและติดไม้บรรทัดเพื่อทำการอ่านค่าการโก่งตัวทางด้านข้าง โดยการใช้กล้อง Theodolite รูปที่ 3.5 และ 3.10 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบของตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม
- 5) ต่อสายนำสัญญาณจาก LVDTs Transducers และค่าแรงกดอัดจาก UTM เข้า Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อ Monitor ข้อมูล
- 6) ทำการ pre-loading ตัวอย่างทดสอบ โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 25% ของแรงสูงสุด
- 7) เซตศูนย์อีกครั้ง และทำการบันทึกเพื่อเริ่มต้นการทดสอบ
- 8) จะใช้วิธีการ load control ในการอ่านค่าแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้าง โดยเพิ่มแรงกระทำเป็นช่วง ๆ ตามการแบ่งช่วงของค่าแรงกดอัดสูงสุดซึ่งในการศึกษาค้างนี้จะแบ่งช่วงของแรงกระทำออกเป็น 30 ช่วงเพื่ออ่านค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างของแต่ละช่วง โดยกล้องวัดมุม Theodolite ตามจุดต่าง ๆ ที่ได้ติดไม้บรรทัดไว้

9) ทำการเพิ่มแรงกระทำจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้าง ในขณะที่แรงกดอัดเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือไม่มี的增加ขึ้นของแรงกดอัดเพื่อสังเกตและบันทึกลักษณะการโก่งเดาะของเสาตัวอย่างทดสอบ



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

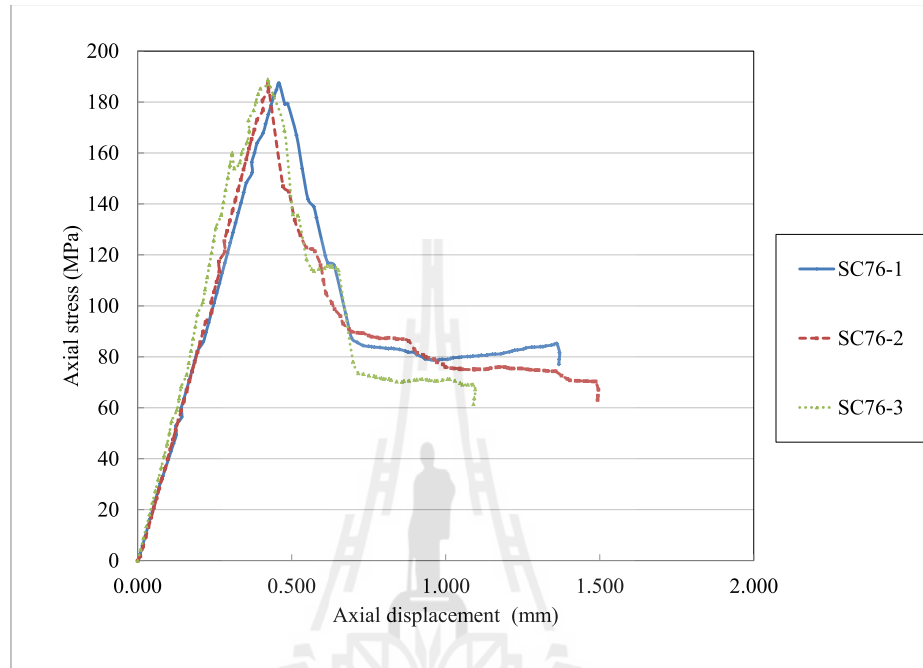
สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอ ผลการทดสอบกำลังรับแรงกอดัดในแนวแกนของเสาประกอบที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการนำเสนอเป็นหัวข้อตามลักษณะของจุดเชื่อมต่อ ได้แก่ 1) เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง 2) เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างเพื่อทำการเลื่อนจุดเชื่อมต่อดังกล่าวเพื่อหาระยะที่ตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติจากโค้งเดาะโดยรวม (global buckling) ไปเป็น โกงเดาะโดยขึ้นประกอบ (individual buckling) และ 3) เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มตรงกลางระหว่างปลายทั้งสองข้าง ผลทดสอบที่ได้ประกอบด้วย ลักษณะเฉพาะ (characteristic) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงกอดัดในแนวแกน จากนั้น เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงกอดัดของเสาประกอบ FRP ที่ได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD และสมการทางทฤษฎีของ Euler

#### 4.2 การทดสอบวัสดุของชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

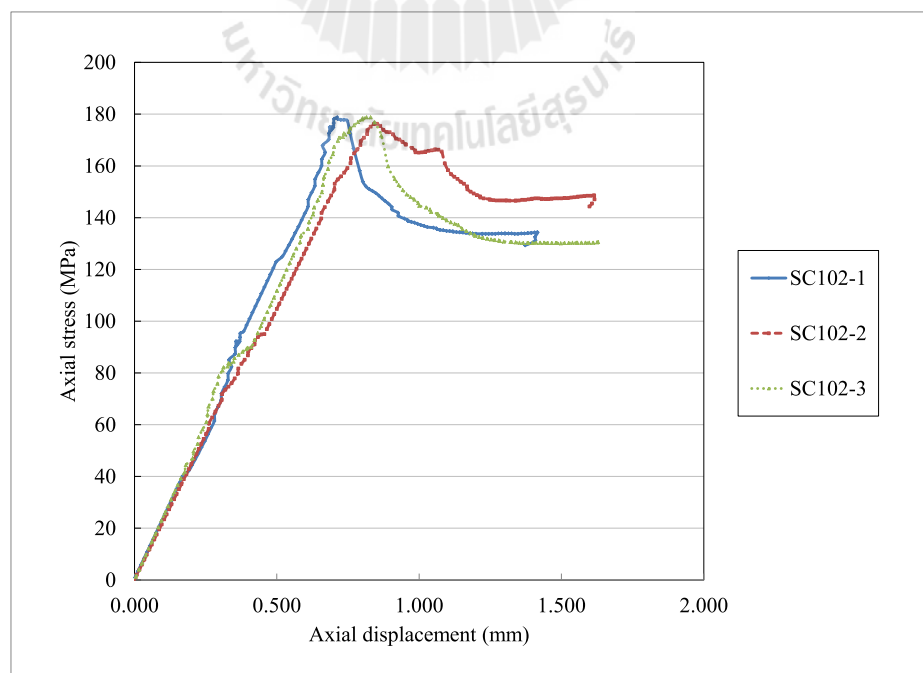
##### 4.2.1 การทดสอบแรงกอดัดของชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำทั้งสามหน้าตัด จากรูปพบว่าชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ โดยที่ค่าหน่วยแรงกอดัดประลัยและความแกร่งเนื่องจากการกอดัดของแต่ละหน้าตัดมีค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าของรายงานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ สาเหตุนี้เกิดจากความแตกต่างกันของตัวอย่างทดสอบที่นำมาทดสอบของการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำมีขนาดค่อนข้างเล็กแตกต่างจากการทดสอบในครั้งนี้ ซึ่งใช้ตัวอย่างทดสอบแบบ full scale ดังนั้นค่าที่นำมาใช้คำนวณออกแบบใน

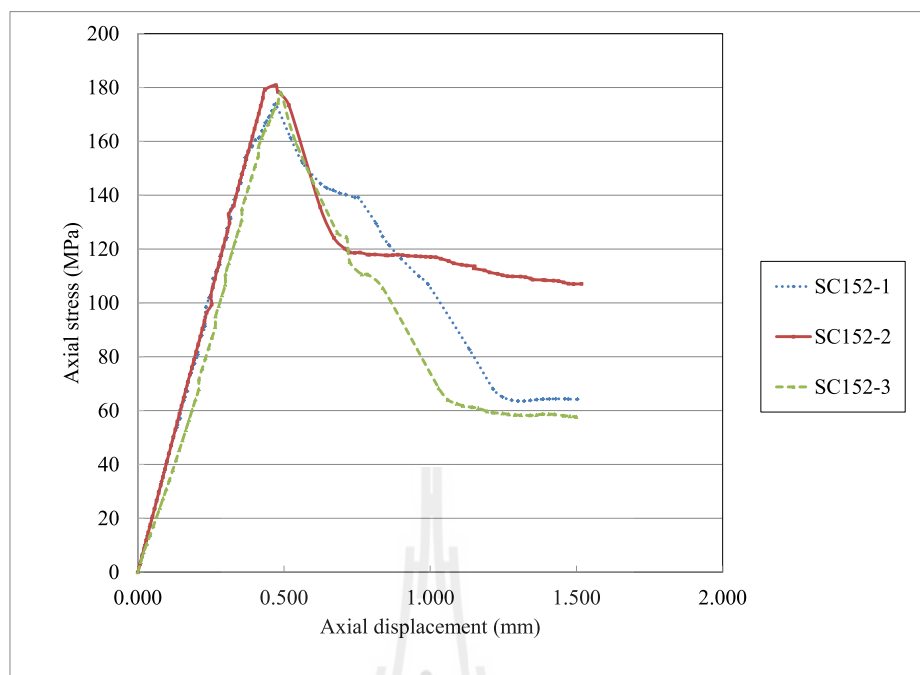
งานวิจัยครั้งนี้จึงใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบครั้งนี้เนื่องจากมีขนาดของหน้าตัดซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้จริงในงานวิจัย โดยที่ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงประลัยและค่าความแกร่งเนื่องจากการกดอัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 181.1 MPa และ 34.2 GPa ตามลำดับ



(a) 76×22×6



(b) 102×29×6



(c) 152×43×10

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบรูปร่างน้ำจากการทดสอบแรงกดอัดของชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

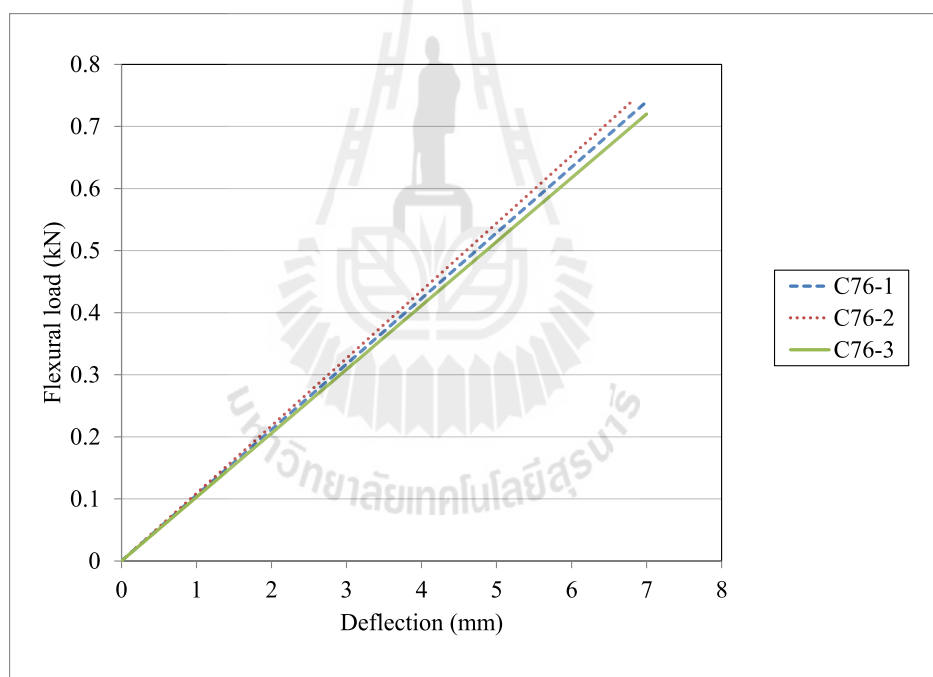
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดอัดของชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

Specimens	Ultimate compression stress				Compression stiffness			
	$\sigma_{ult,comp}$				$E_C$			
	Test 1	Test 2	Test 3	Average	Test 1	Test 2	Test 3	Average
$\sigma_{ult,comp,1}$	$\sigma_{ult,comp,2}$	$\sigma_{ult,comp,3}$	$\sigma_{ult,comp}$	$E_{C,1}$	$E_{C,2}$	$E_{C,3}$	$E_C$	
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)	
C76-0.40	182.35	187.44	188.82	187.87	34.02	34.99	35.23	34.75
C102-0.40	178.73	176.29	178.71	177.91	33.93	35.86	33.38	34.39
C152-0.40	173.76	180.88	177.92	177.52	33.11	34.70	32.57	33.46

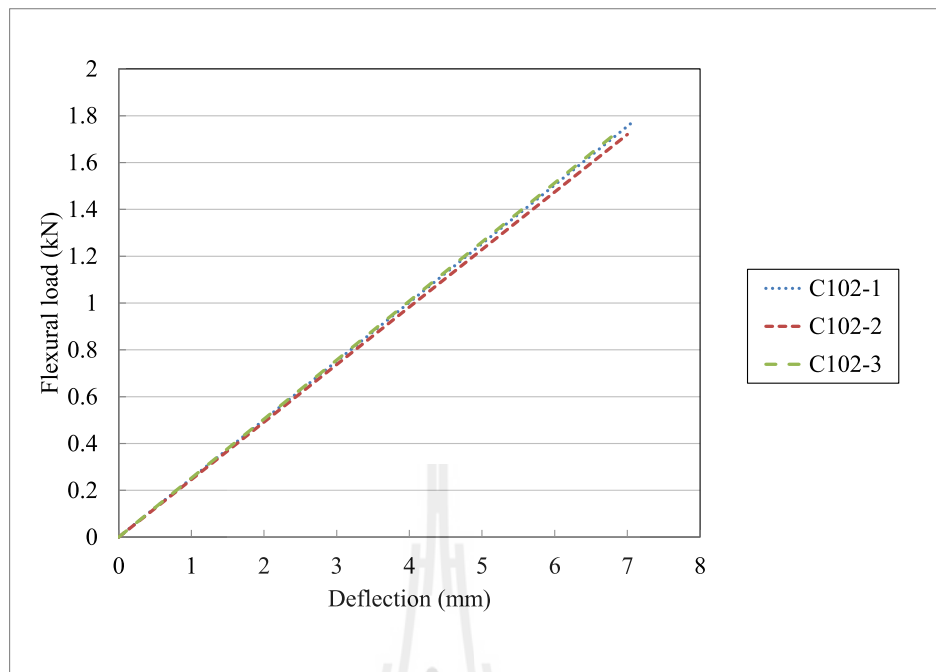
#### 4.2.2 การทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดัดและการโก่งตัวในแนวตั้งของตัวอย่างทดสอบทั้งสามหน้าตัด สำหรับการทดสอบแรงดัดนี้ผู้วิจัยต้องการหาเฉพาะค่า  $E_{flex}$  เท่านั้น ดังนั้นช่วงที่ทำการทดสอบแรงดัดของตัวอย่างทดสอบวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำจึงอยู่ในช่วงยืดหยุ่น

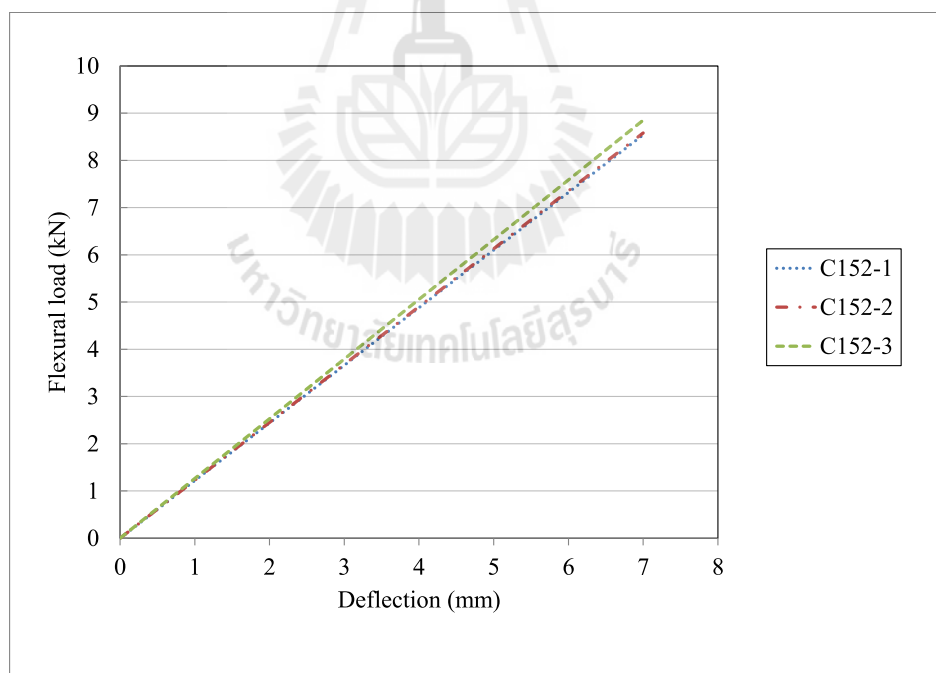
เชิงเส้นตรง โดยมีระยะการโก่งตัวในแนวตั้งถึงแค่  $L/100$  หรือที่ระยะเท่ากับ 10 mm จากรูปพบว่า พฤติกรรมการรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงระยะการโก่งตัวในแนวตั้งดิ่งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยที่ค่า  $E_{flex}$  ของแต่ละหน้าตัดมีค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากตารางพบว่า  $E_{flex}$  ที่ได้จากการทดสอบมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากรายงานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีดหน้าตัดรูปรางน้ำ สาเหตุนี้เกิดจากความแตกต่างกันของตัวอย่างทดสอบที่นำมาทดสอบของการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีดหน้าตัดรูปรางน้ำมีขนาดค่อนข้างเล็กแตกต่างจากการทดสอบในครั้งนี้ซึ่งใช้ตัวอย่างทดสอบแบบ full scale ดังนั้นค่าที่นำมาใช้คำนวณออกแบบในงานวิจัยครั้งนี้จึงใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบครั้งนี้เนื่องจากมีขนาดของหน้าตัดซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้จริงในงานวิจัย



(a) 76×22×6



(b) 102×29×6



(c) 152×43×10

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคัตและการโก่งตัวในแนวตั้งของตัวอย่างทดสอบบูรปรอง  
 นำจากการทดสอบแรงคัตของชิ้นส่วนวัสดุ CFRP หน้าคัตบูรปรองน้ำ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่าง

Specimens	Flexural stiffness			
	$E_{flex}$			
	Test 1	Test 2	Test 3	Average
	$E_{flex,1}$ (GPa)	$E_{flex,2}$ (GPa)	$E_{flex,3}$ (GPa)	$E_{flex}$ (GPa)
C76-0.70	32.18	33.13	31.31	32.21
C102-0.70	31.44	30.81	31.62	31.29
C152-0.70	28.79	28.93	29.84	29.19

#### 4.3 เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

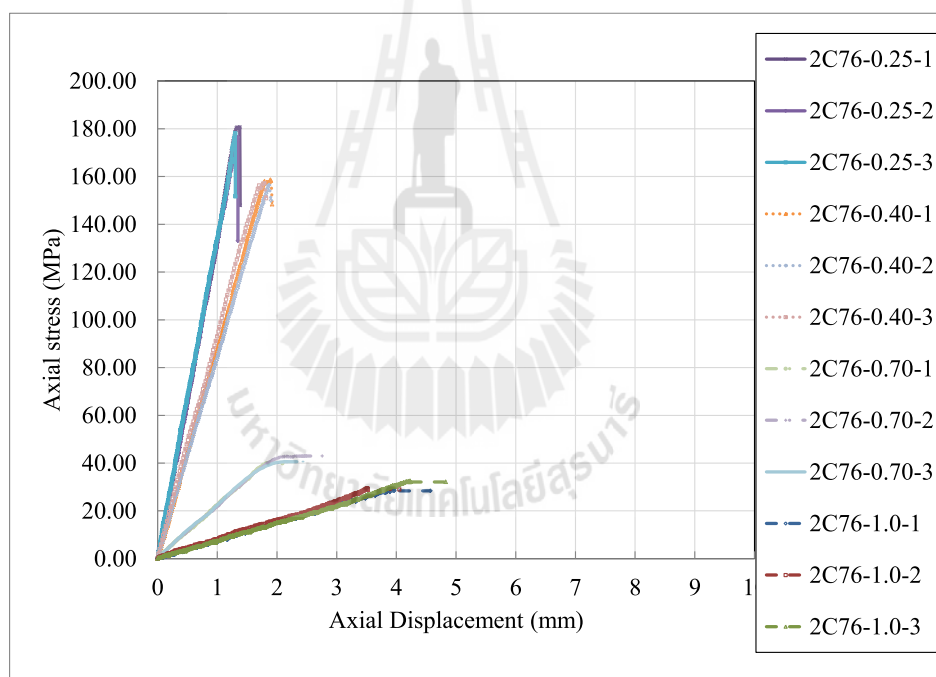
##### 4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

รูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ เสาสั้น (short column) และเสายาว หรืออาจเรียกว่าเสาชะลูด (slender column) สำหรับเสาสั้น ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) โดยกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบแรงกดอัด โดยที่ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบวัสดุมีค่าเท่ากับ 181.16 MPa และเมื่อเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบเข้ากับรายงานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรอดหน้าตัดรูปตัวซี พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าเนื่องจากค่าที่ได้จากรายงานเป็นการทดสอบของชิ้นตัวอย่างทดสอบซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็กแตกต่างจากตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดสอบโดยค่าแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากรายงานฉบับดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 121.86 MPa สำหรับเสายาว พฤติกรรมการรับแรงของเสา มีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของน้ำหนักโก่งเดาะจากนั้น พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

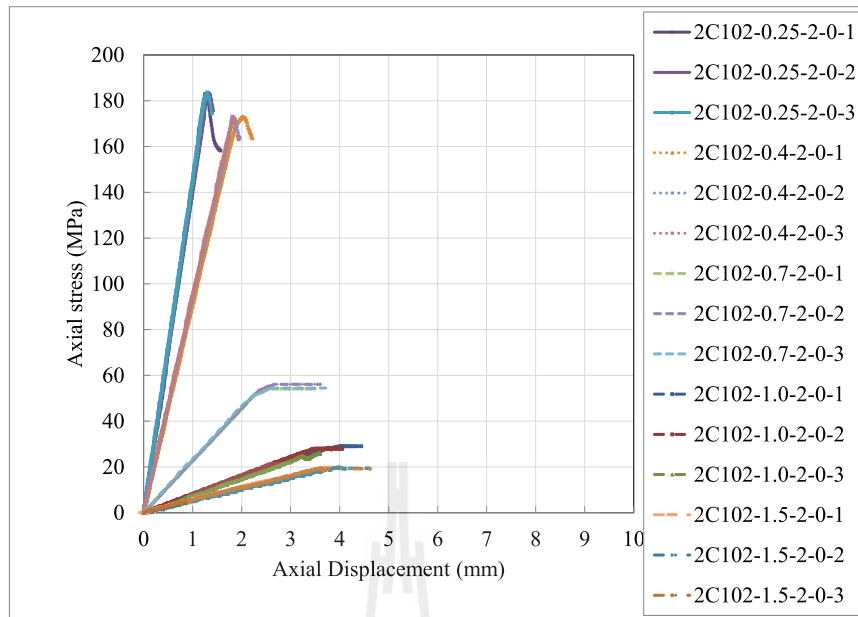
ลักษณะการวิบัติของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ เสาสั้นมีการแตกออกของเนื้อวัสดุบริเวณเอว (web cracking) เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีความขายน้อยมากเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำจะเกิด



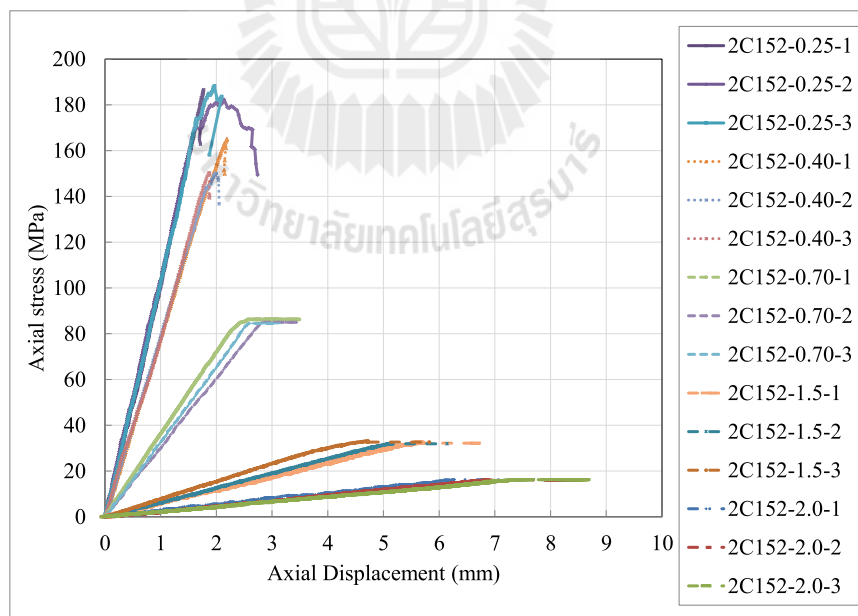
แรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยเรียกว่า tensile crack จากนั้นเกิดการ blooming ของหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเสายาวเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเนื่องจากการตัด (flexural buckling) ของชั้นประกอบหน้าตัดรูปร่างน้ำรอบแกนรอง (minor axis) ของหน้าตัดในทิศทางตรงกันข้ามกัน เนื่องจากการขาดแคลนจุดเชื่อมต่อที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบโก่งเดาะไปในทิศทางขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 อย่างไรก็ตามสำหรับเสายาวในกลุ่มที่ 1 ตัวอย่างทดสอบบางส่วนมีลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะของชั้นประกอบในทิศทางขนานกันเนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น น้ำหนักบรรทุกที่ศูนย์กลางหรือความแปรปรวนของวัสดุซึ่งเป็นการบดบังทางโครงสร้างทำให้เสายาวในกลุ่มที่ 1 มีลักษณะการวิบัติที่ไม่แน่นอนเนื่องจากการขาดแคลนจุดเชื่อมต่อที่ทำให้ลักษณะการวิบัติแบบการโก่งเดาะของชั้นประกอบในทิศทางขนานกันอย่างแน่นอนดังที่แสดงในตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2



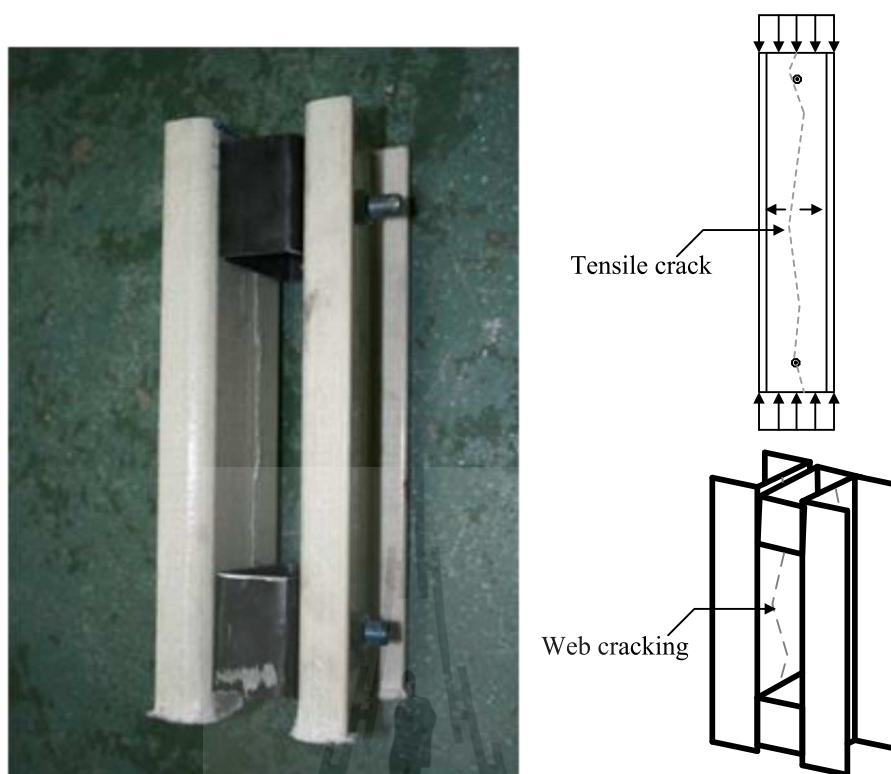
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



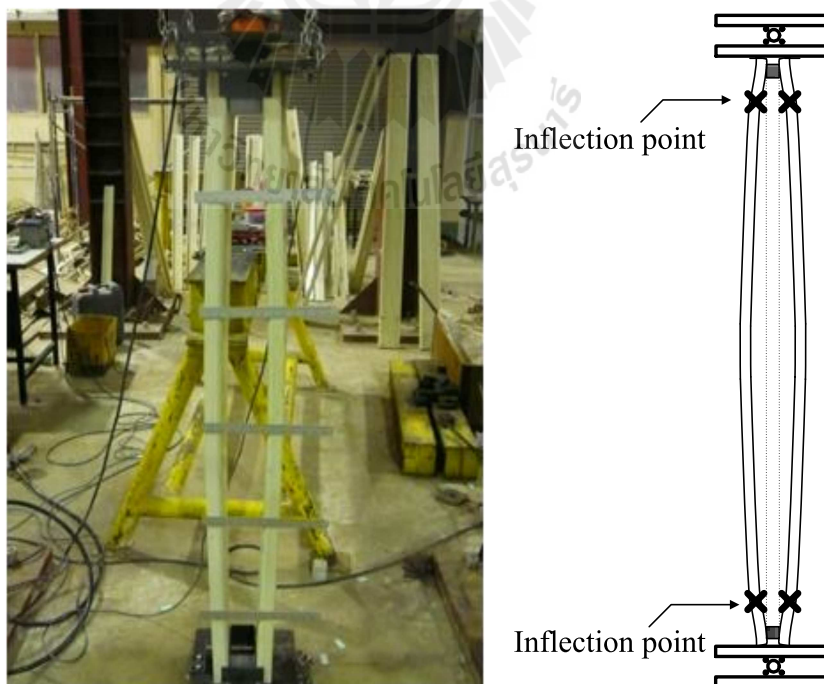
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ FRFP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ FRFP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



รูปที่ 4.6 ลักษณะการวิบัติแบบเสาสั้นของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง



รูปที่ 4.7 ลักษณะการวิบัติแบบเสายาวของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

ในส่วนของค่าความแกร่ง (stiffness,  $E$ ) ของตัวอย่างทดสอบแต่ละหน้าตัด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 ค่า  $E$  แสดงถึงการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดมากจะมีผลกระทบเนื่องจากโครงสร้าง เช่น แรงเยื้องศูนย์กลาง (eccentric loading) จุดศูนย์กลางหน้าตัด (centroid) และความเป็น composite ของตัวอย่างทดสอบ เป็นต้น ล้วนแล้วแต่มีผลต่อค่า  $E$  ของตัวอย่างทดสอบ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ค่า  $E$  จะถูกแสดงเฉพาะในส่วน of ตัวอย่างทดสอบที่มีความชะลูดน้อยกว่า 61 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบแบบสั้น

ตารางที่ 4.3 ความแกร่งของเสาประกอบ CFRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

Specimens	Experiment			
	Test A $E_A$ (GPa)	Test B $E_B$ (GPa)	Test C $E_C$ (GPa)	Average $E$ (GPa)
2C76-0.25-2-0	32.11	34.95	32.37	33.14
2C76-0.40-2-0	33.99	32.13	36.15	34.09

ตารางที่ 4.4 ความแกร่งของเสาประกอบ CFRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

Specimens	Experiment			
	Test A $E_A$ (GPa)	Test B $E_B$ (GPa)	Test C $E_C$ (GPa)	Average $E$ (GPa)
2C102-0.25-2-0	38.16	35.06	36.66	36.62
2C102-0.40-2-0	36.41	37.53	36.87	36.94

ตารางที่ 4.5 ความแกร่งของเสาประกอบ FRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

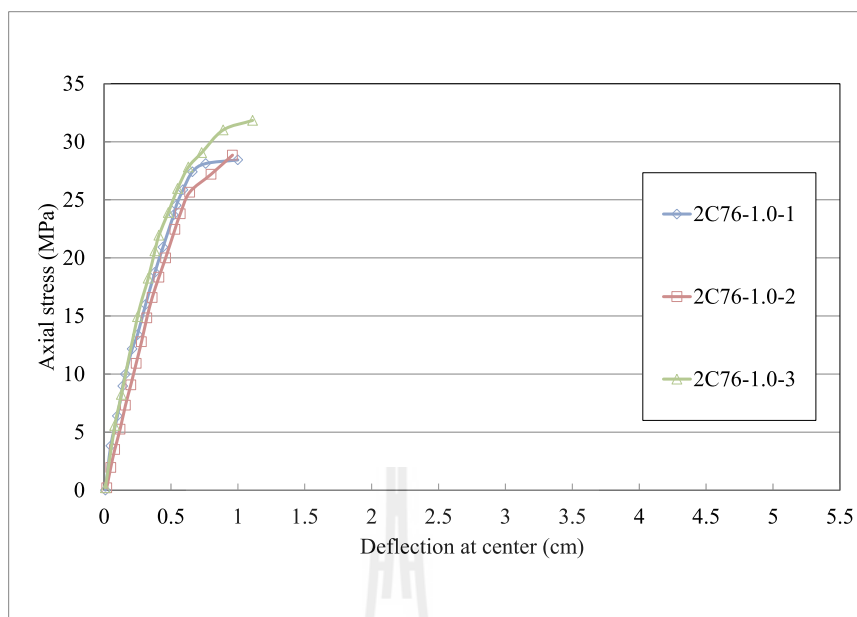
Specimens	Experiment			
	Test A $E_A$ (GPa)	Test B $E_B$ (GPa)	Test C $E_C$ (GPa)	Average $E$ (GPa)
2C152-0.25-2-0	36.94	36.16	36.05	36.38
2C152-0.40-2-0	32.33	32.56	34.02	32.97

#### 4.3.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้างของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

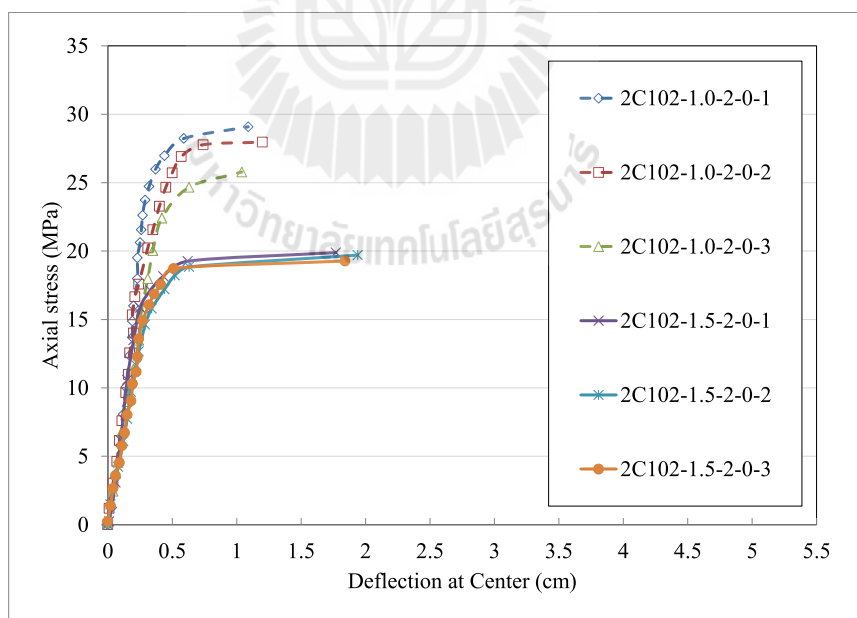
รูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง จากรูปพบว่าพฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างทั้งหมดมีลักษณะยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนถึงช่วงประมาณ 60-70% ของน้ำหนักบรรทุกทุกโก่งเดาะ ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนแบบเสายาว จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะแบบโดยรวม (global buckling) รอบแกนรองของชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ

รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.13 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าน้อยการโก่งตัวทางด้านข้างจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำถึงค่าน้ำหนักโก่งเดาะค่าการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นสูงมาก

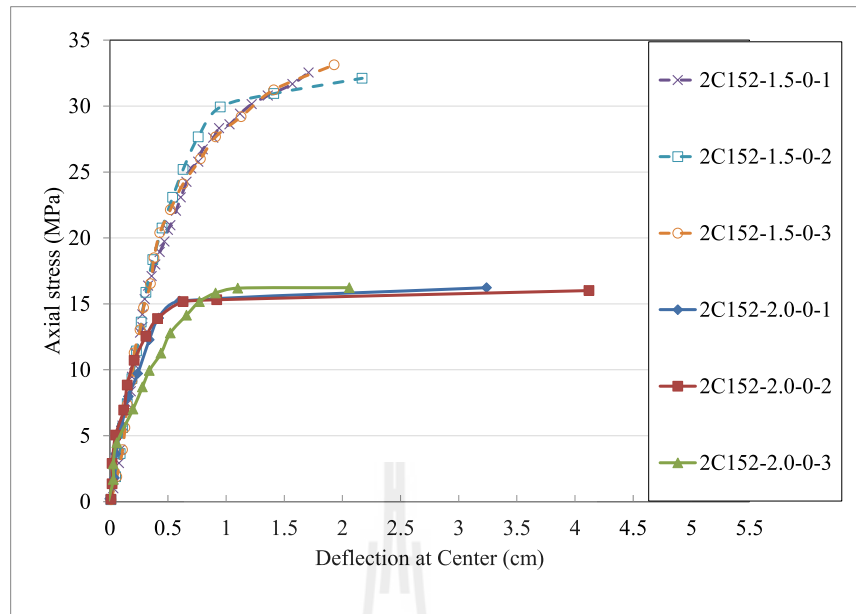
จากการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและรูปร่างการโก่งตัวซึ่งมีลักษณะการวิบัติแบบ individual opposite buckling พบว่ามีจุดดัดกลับ (inflection point) ปรากฏให้พอสังเกตเห็นได้ เมื่อการโก่งตัวทางด้านข้างมีค่าสูงเกินกว่า  $L/100$  ลักษณะของการดัดคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) ดังนั้นจากการปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล (effective length factor,  $K$ ) ที่ใช้ตามทฤษฎีต้องมีค่าเท่ากับ 0.7 อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงและการระบุจุดดัดกลับทำได้ยาก ดังนั้นสำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้กำหนดให้ค่า  $K$  เท่ากับ 1.0



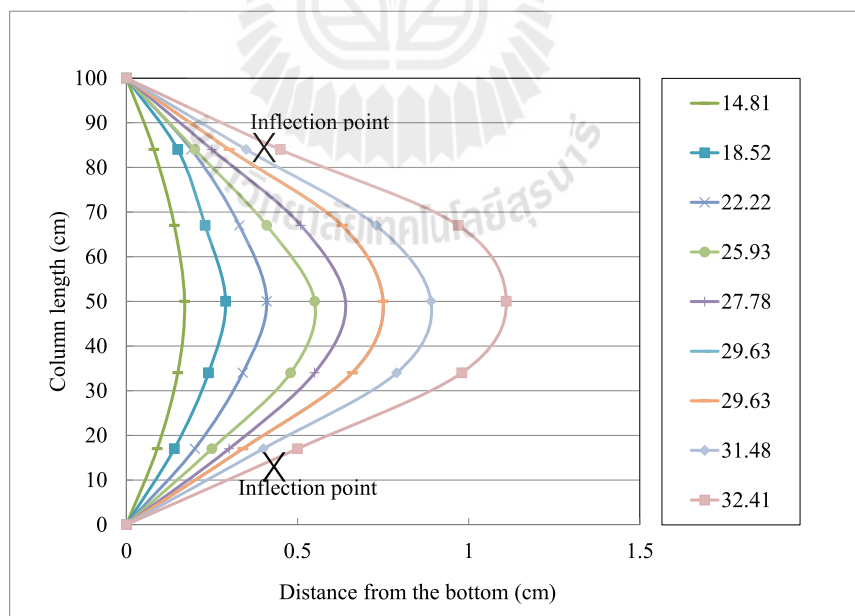
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสา ประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



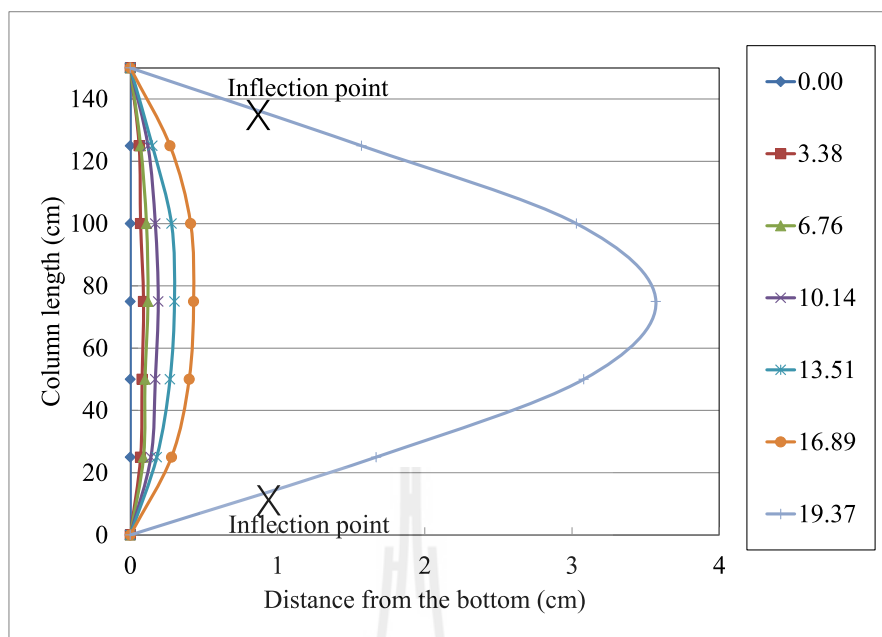
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสา ประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



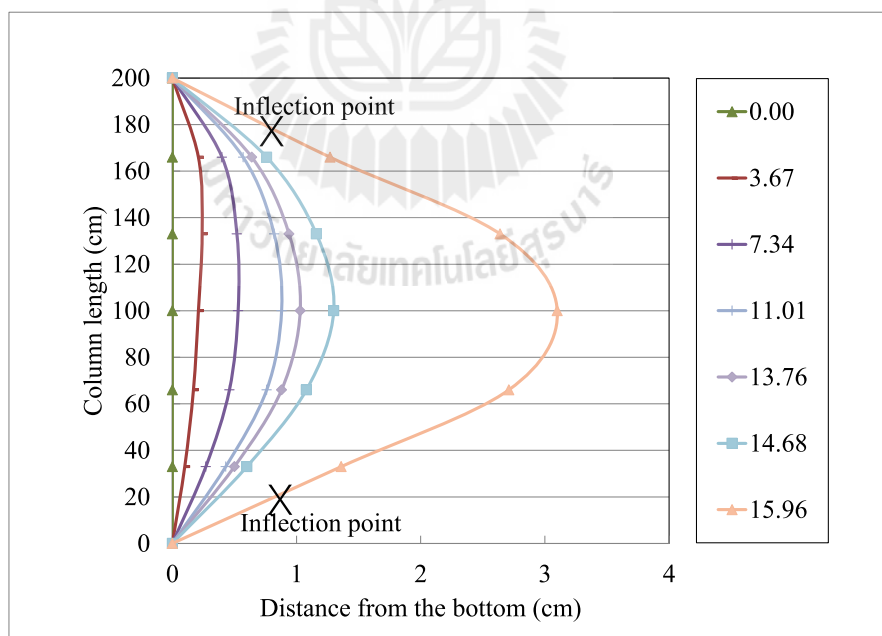
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



รูปที่ 4.11 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



รูปที่ 4.12 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปวงรีน้ำคูลูกขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง



รูปที่ 4.13 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปวงรีน้ำคูลูกขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง



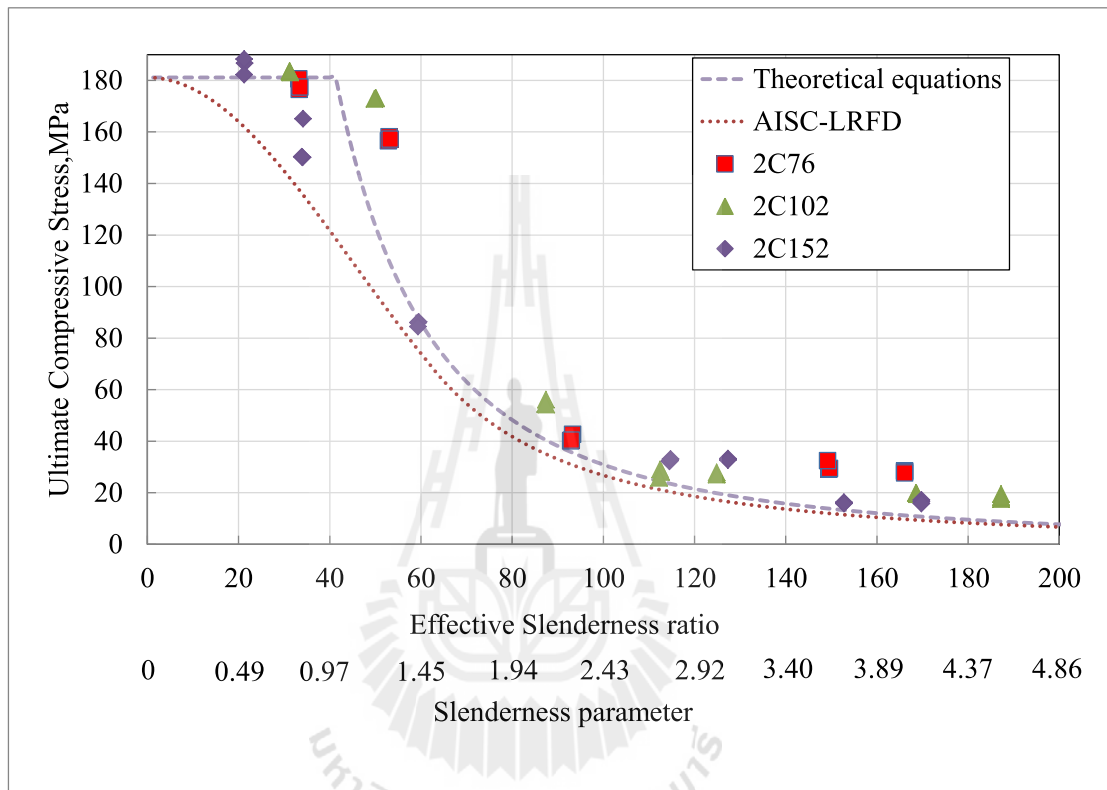
#### 4.3.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

งานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $\sigma_{cr,EXP}$ ) เป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดท้ายก่อนที่ตัวอย่างเกิดการโก่งเดาะ ตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างสำหรับตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$   $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าวหน่วยแรงโก่งเดาะ (buckling stress) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $\sigma_{cr,EXP}$ ) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุดังที่แสดงในหัวข้อที่ 4.2 จากรูปพบว่าอัตราส่วนความชะลูดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อหน่วยแรงโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด  $152 \times 43 \times 10$  mm สามารถรับหน่วยแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด  $102 \times 29 \times 6$  และ  $76 \times 22 \times 6$  mm ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบแบบสั้นซึ่งมีลักษณะการวิบัติโดยเนื้อวัสดุของแต่ละหน้าตัดมีหน่วยแรงกอดัดสูงสุดใกล้เคียงกัน ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบแบบยาวหน่วยแรงกอดัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนความชะลูดเพิ่มขึ้น

สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งเดาะจากการทดสอบและหน่วยแรงโก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $\sigma_{cr,LRFD}$ ) สำหรับเสาประกอบ CFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างสามารถคำนวณค่า  $\sigma_{cr,LRFD}$  ได้จากสมการที่ (3.1-3.4) พบว่าอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะจากการทดสอบและหน่วยแรงโก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $\sigma_{cr,EXP} / \sigma_{cr,LRFD}$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.98-1.87 โดยสาเหตุที่หน่วยแรงโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่าหน่วยแรงที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก 1) สมการออกแบบของ LRFD เป็นสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณโดยรวมผลเนื่องจากหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิตซึ่งตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้เป็นวัสดุ CFRP ไม่มีผลเนื่องจากแรงดังกล่าว 2) ความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ (material variation) ซึ่งมีผลให้ผลการทดสอบบางส่วนต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD ตลอดจนตัวอย่างเสาที่มีความยาวสูง พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้หน่วยแรงโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD นอกจากนี้จากตารางพบว่า

หากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน หน่วยแรง โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $\sigma_{cr,EXP}$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวเสาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อความยาวของเสาเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติโดยการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการคด (flexural buckling) สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสอง

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรง โกงเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของเสา  
ประกอบ FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C76-0.25-2-0	33.2	180.51	176.42	177.35	178.09	147.91	1.20
2C76-0.40-2-0	53.1	158.10	156.48	157.18	157.25	107.82	1.46
2C76-0.70-2-0	93.3	39.97	42.59	40.35	40.97	41.85	0.98
2C76-1.00-2-0	149.5	29.01	29.32	32.41	30.25	16.20	1.87

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรง โกงเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของเสา  
ประกอบ FRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C102-0.25-2-0	31.2	183.04	183.44	183.66	183.38	148.72	1.23
2C102-0.40-2-0	49.9	173.02	173.19	172.79	173.00	109.35	1.58
2C102-0.70-2-0	87.4	54.17	56.08	54.45	54.90	43.02	1.28
2C102-1.00-2-0	112.4	29.05	28.00	25.74	27.59	26.02	1.06
2C102-1.50-2-0	168.5	19.82	19.82	19.37	19.67	11.56	1.70

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงโก่งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของเสาประกอบ FRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C152-0.25-2-0	21.2	186.63	182.22	188.23	185.70	159.46	1.16
2C152-0.40-2-0	33.9	165.09	150.11	150.32	155.18	130.71	1.19
2C152-0.70-2-0	59.4	86.28	85.94	84.47	85.57	66.55	1.29
2C152-1.50-2-0	114.6	32.56	32.11	33.03	32.57	17.89	1.82
2C152-2.00-2-0	152.8	16.24	15.96	15.78	15.99	10.06	1.59

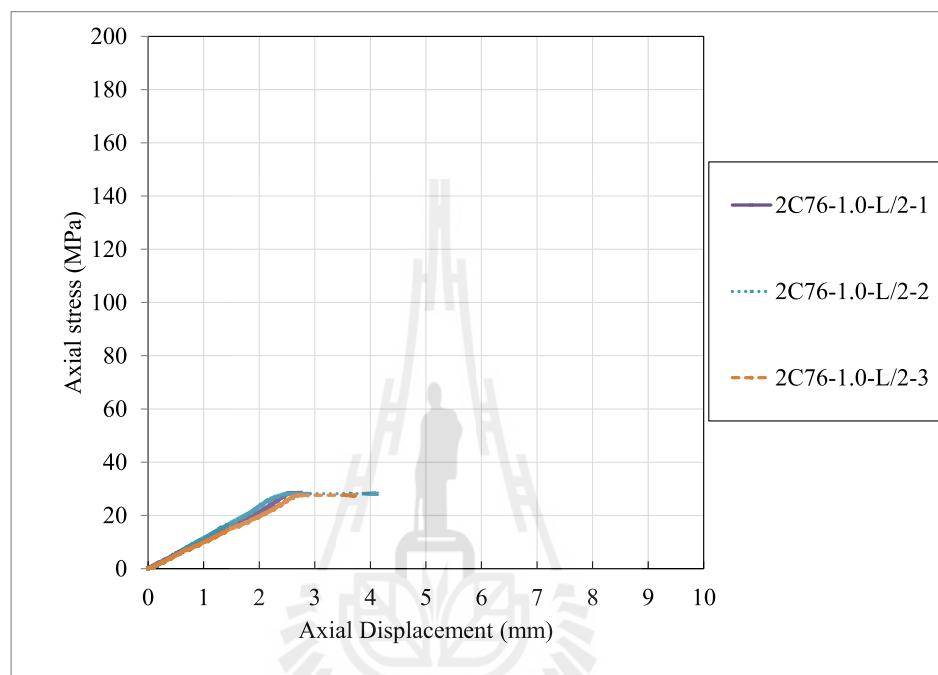
#### 4.4 เสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง และมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

##### 4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

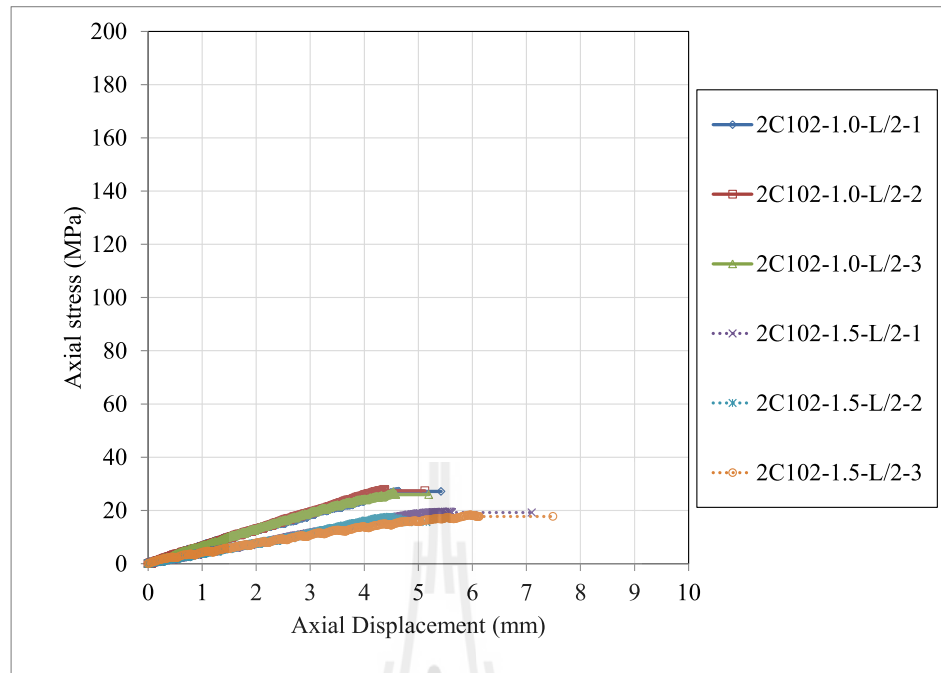
รูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว จากรูปพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของเสามีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-100% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้น โดยความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงอย่างรวดเร็วและเป็นศูนย์ที่แรงโก่งเดาะวิกฤติ จากนั้น เมื่อผ่านแรงโก่งเดาะวิกฤติแล้ว แรงที่กระทำกับตัวอย่างทดสอบจะมีค่าคงที่ และสุดท้าย ความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบจะค่อย ๆ ลดลง

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว มีลักษณะแบบ individual parallel buckling ซึ่งเกิดจากการโก่งตัวทางด้านข้างของหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการเพิ่มจุดเชื่อมต่อที่บริเวณกึ่งกลางทำให้ระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่าน้อยลงซึ่งแตกต่างกับตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างที่มีระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อที่มากกว่า ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.18 จากการ

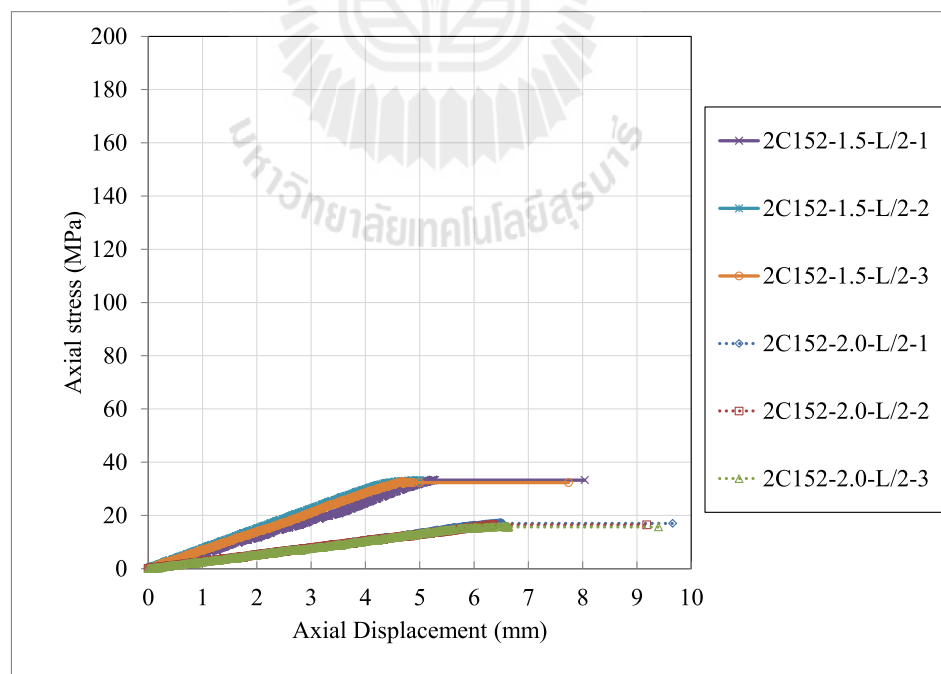
ทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างเสา CFRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการดัดเค้นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



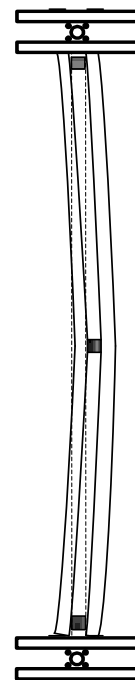
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว



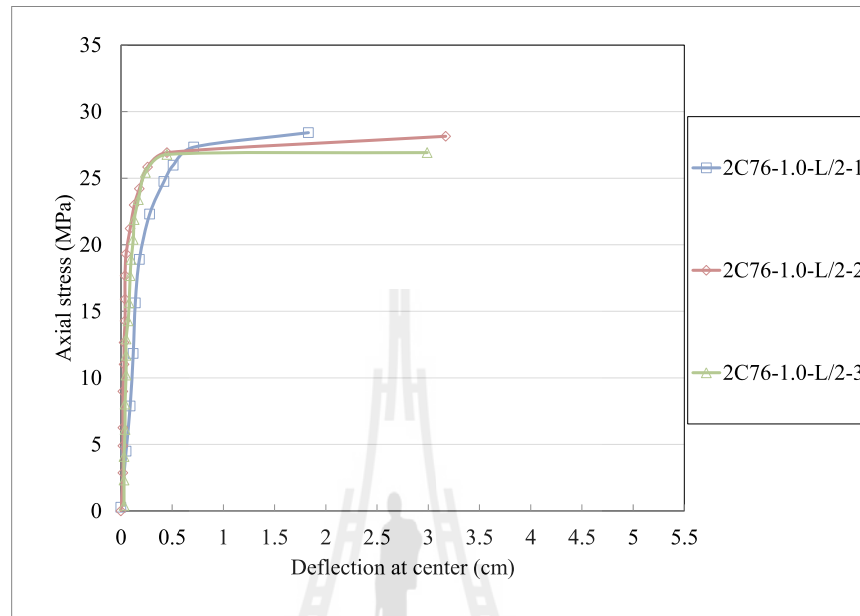
รูปที่ 4.18 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

#### 4.4.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการโก่งตัวทางด้านข้างของเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมรับแรงในแนวแกน รูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของเสาที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นในรูป geometrical nonlinear จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะ โดยจากกราฟพบว่าเมื่อเสามีความยาวมากขึ้นทำให้ค่าความเป็นเชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลง

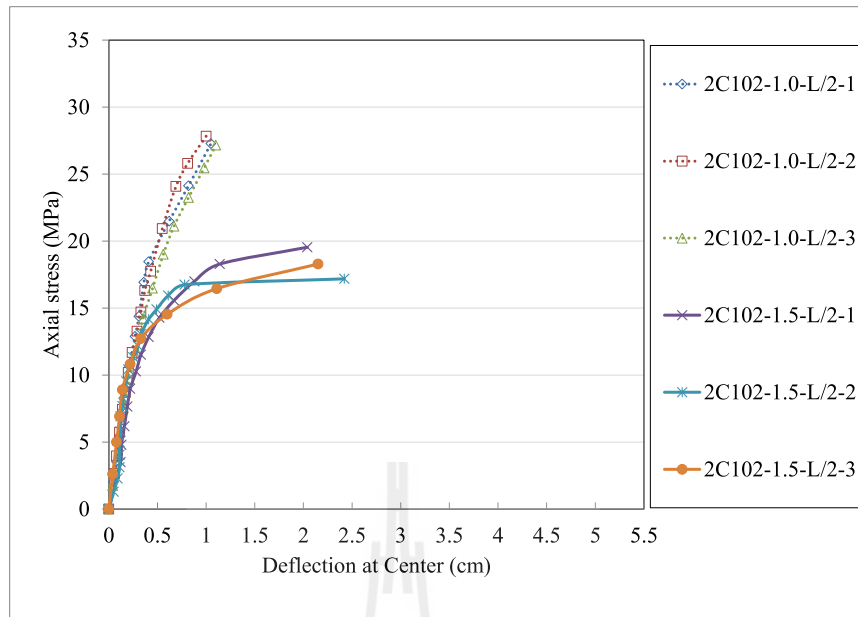
รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อหน่วยแรงกดอัดมีค่าน้อยการโก่งตัวทางด้านข้างจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อหน่วยแรงกดอัดที่มากขึ้นถึงค่าหน่วยแรงโก่งเดาะค่าการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นสูงมาก จากรูปร่างการโก่งตัวซึ่งมีลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel buckling พบว่ามีลักษณะของการคดคล้ายคลึง

กับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบหมุด (pinned-pinned supported) ดังนั้นค่าตัวคูณความยาวประสิทธิภาพ (effective length factor,  $K$ ) ที่ใช้ต้องมีค่าเท่ากับ 1.0

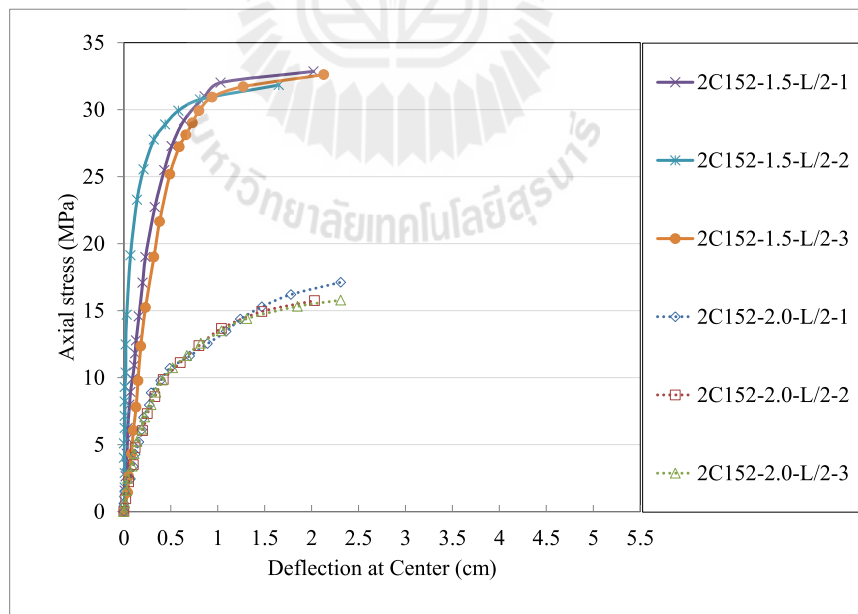


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 1.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

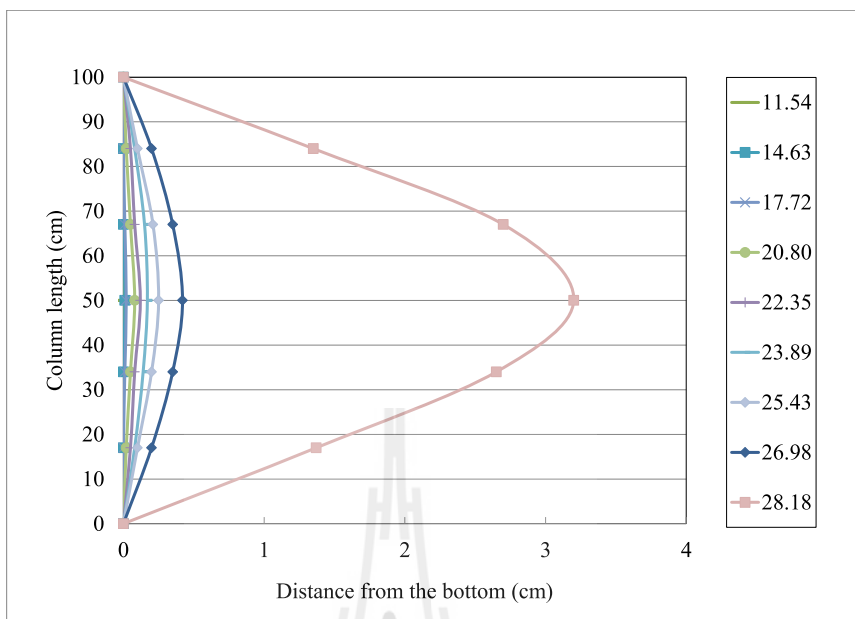




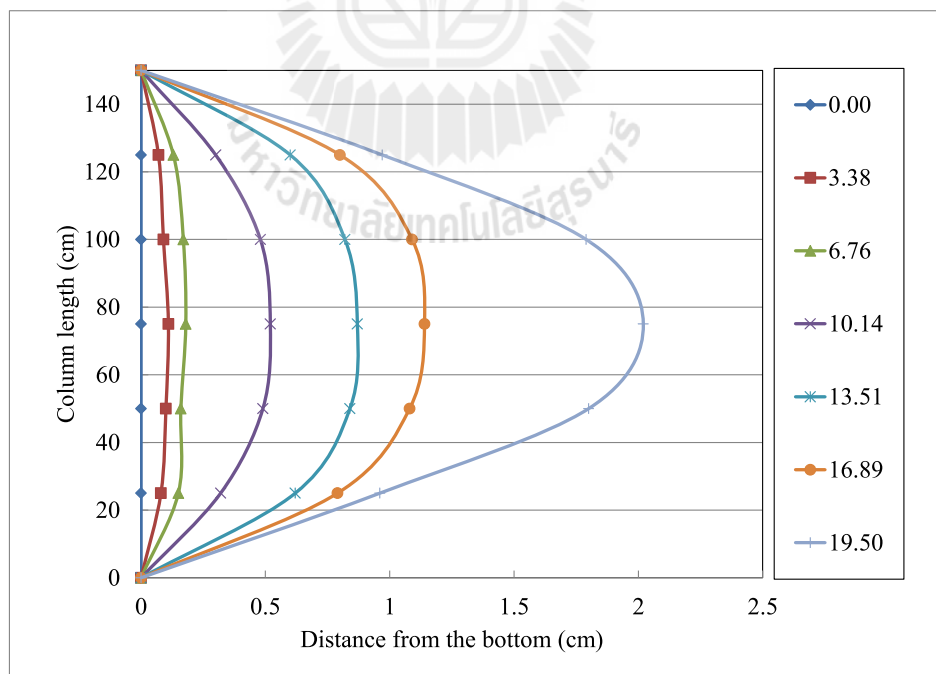
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลาง ความยาว



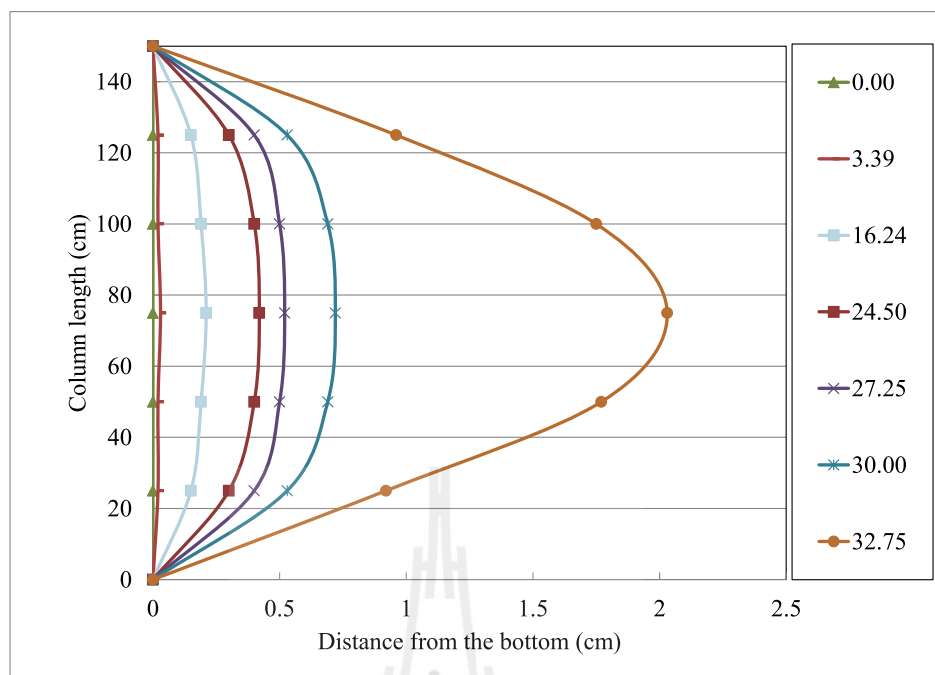
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลาง ความยาว



รูปที่ 4.22 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว



รูปที่ 4.23 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด 102×29×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว



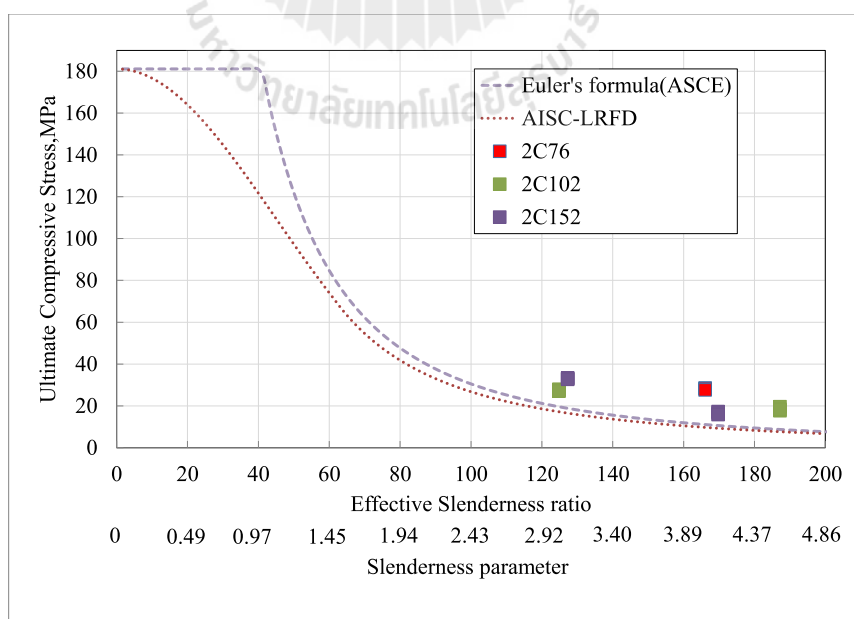
รูปที่ 4.24 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

#### 4.4.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

ตารางที่ 4.9 ถึงตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว สำหรับตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$ ,  $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว หน่วยแรงโก่งเดาะ (buckling stress) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นหน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $\sigma_{cr,EXP}$ ) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน หน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุแบ่งเป็นแต่ละหน้าตัดดังที่แสดงในหัวข้อที่ 4.2 จากรูปพบว่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาประกอบเป็นปัจจัยที่มีผลต่อหน่วยแรงโก่ง

เดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด  $152 \times 43 \times 10$  mm สามารถรับแรงได้ใกล้เคียงตัวอย่างหน้าตัด  $102 \times 29 \times 6$  และ  $76 \times 22 \times 6$  mm ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรง โกงเดาะจากการทดสอบและหน่วยแรง โกงเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $\sigma_{cr,LRFD}$ ) สำหรับเสาประกอบ PFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างสามารถคำนวณค่า  $\sigma_{cr,LRFD}$  ได้จากสมการที่ (3.1-3.4) พบว่าอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะจากการทดสอบและหน่วยแรง โกงเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $\sigma_{cr,EXP} / \sigma_{cr,LRFD}$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.30-2.27 โดยสาเหตุที่หน่วยแรง โกงเดาะที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่าหน่วยแรงที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก 1) สมการออกแบบของ LRFD เป็นสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณโดยรวมผลเนื่องจากหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิตซึ่งตัวอย่างทดสอบในการศึกษานั้นเป็นวัสดุ PFRP ไม่มีผลเนื่องจากแรงดังกล่าว 2) ความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ (material variation) ตลอดจนตัวอย่างเสาที่มีความยาวสูง พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการ โกงเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลัง โกงเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD นอกจากนี้จากตารางพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนัก โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{cr,EXP}$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวเสาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อความยาวของเสาเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติโดยการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการคด (flexural buckling) สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสา  
ประกอบ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลาง  
ความยาว

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลาย  
ทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C76-1.00-2-L/2	166.1	28.46	28.18	27.56	28.07	13.12	2.14

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้ง  
สองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C102-1.00-2-L/2	124.8	27.18	27.86	27.03	27.36	21.08	1.30
2C102-1.50-2-L/2	187.3	19.50	17.57	18.27	18.45	9.37	1.97

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้ง  
สองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C152-1.50-2-L/2	127.3	33.25	33.00	32.61	32.95	14.49	2.27
2C152-2.00-2-L/2	169.8	17.17	16.52	15.79	16.50	8.15	2.02

## 4.5 เสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

### 4.5.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

รูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง ที่ระยะ  $L/4$  ของความยาว จากรูปพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเนื่องจากการคดโดยขึ้นประกอบไปในทิศทางขนานกัน (individual parallel buckling)

รูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง ที่ระยะ  $L/8$  ของความยาว จากรูปพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรงจนถึงแรงโก่งเดาะ โดยที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเนื่องจากการคดโดยขึ้นประกอบไปในทิศทางตรงกันข้าม (individual opposite buckling)

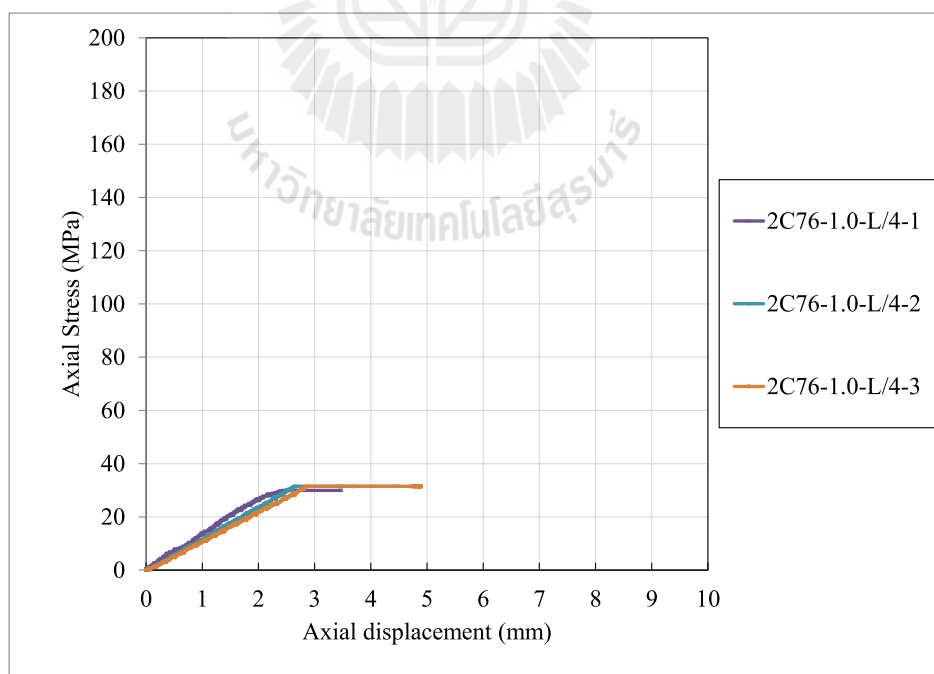
รูปที่ 4.32 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$  และรูปที่ 4.33 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$  โดยลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาประกอบ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง สามารถแบ่งลักษณะการวิบัติได้เป็น 2 ลักษณะแบบ ได้แก่การโก่งเดาะเนื่องจากการคดโดยขึ้นประกอบในทิศทางตรงกันข้ามกัน (individual opposite buckling) และการโก่งเดาะเนื่องจากการคดโดยขึ้นประกอบในทิศทางขนานกัน (individual parallel buckling) จากสมการที่ 2.30 กำหนดให้  $a/r_i \leq 0.75 \left( \frac{KL}{r_o} \right)$  ดังนั้นระยะที่มากที่สุดที่ทำให้เสาเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการวิบัติของหน้าตัด  $76 \times 22 \times 6$   $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  เป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 4.12 จากตารางดังกล่าวพบว่าระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อที่มากที่สุดมีค่าอยู่ระหว่างระยะ  $L/4$  และ  $L/8$  แสดงให้เห็นว่าระยะ  $L/4$  ทำให้เสาเกิดการวิบัติแบบ individual parallel buckling ในขณะที่ระยะ  $L/8$  ควรทำให้เสาเกิดการวิบัติแบบ individual opposite buckling โดยจากการทดสอบพบว่า เป็นไปตามสมการดังกล่าว สุดท้ายจากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของ

วัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างเสาประกอบ FRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการตัดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น

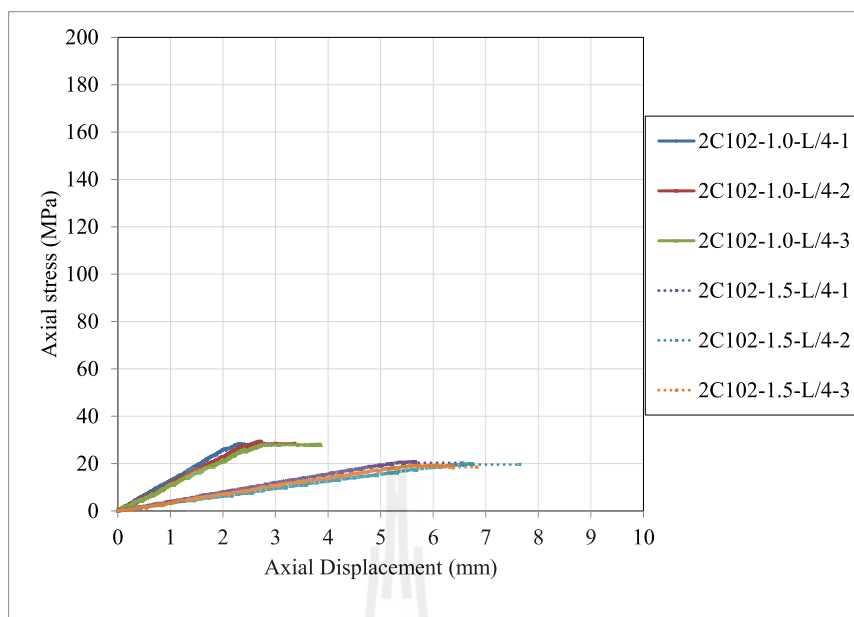
ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าเนื่องจากการติดจุดเชื่อมต่อที่ระยะ  $L/4$  และ  $L/8$  เทียบกับ

สมการออกแบบของ AISC-LRFD

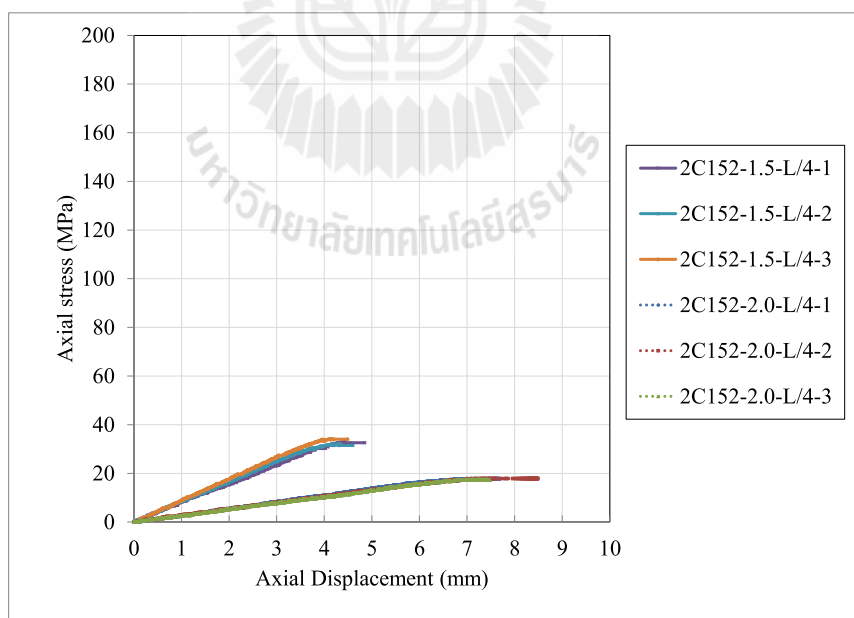
Section	$L$ (mm)	$r_o$ (mm)	$r_i$ (mm)	$0.75KL/r_o$	$a_{L/4}$ (mm)	$\frac{a_{L/4}}{r_i}$	$a_{L/8}$ (mm)	$\frac{a_{L/8}}{r_i}$
76×22×6	1000	25.92	6.02	28.94	250	41.53	125	20.76
102×29×6	1000	33.43	8.01	22.43	250	31.21	125	15.61
	1500	33.43	8.01	33.65	375	46.82	187.5	23.41
152×43×10	1500	50.33	11.78	22.35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



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด 76×22×6 mm ความยาว 1.0 ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$

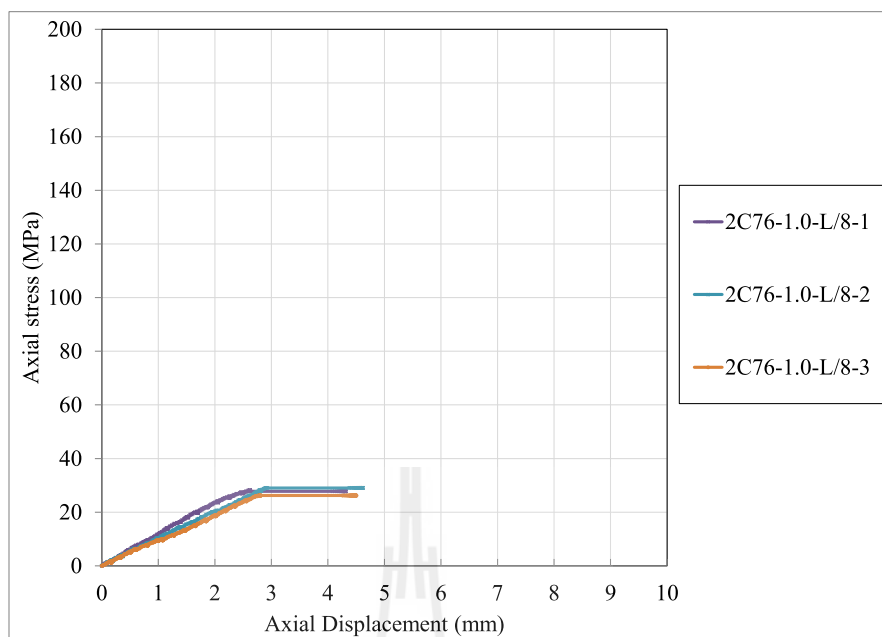


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$

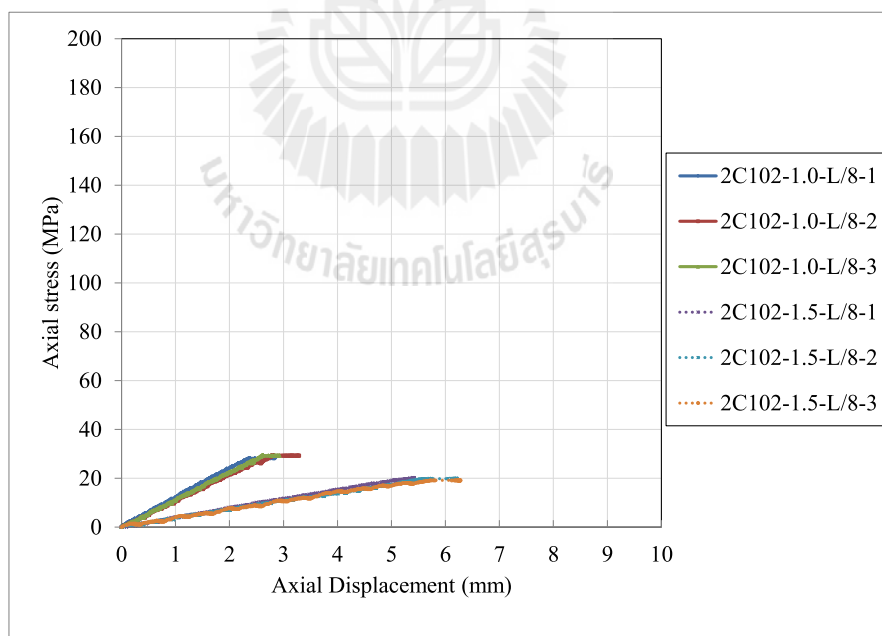


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $152 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$

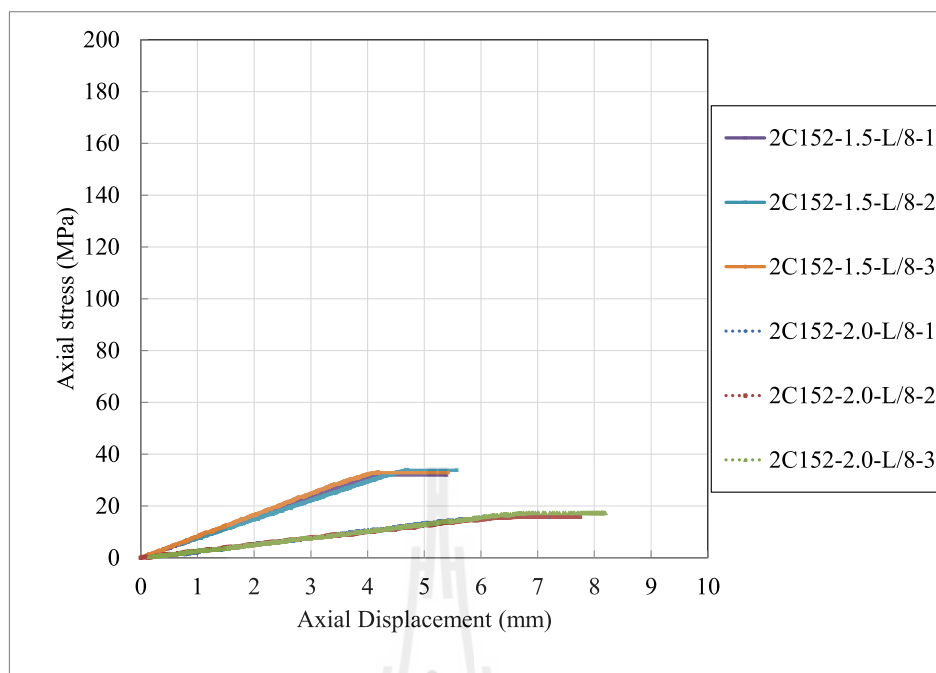




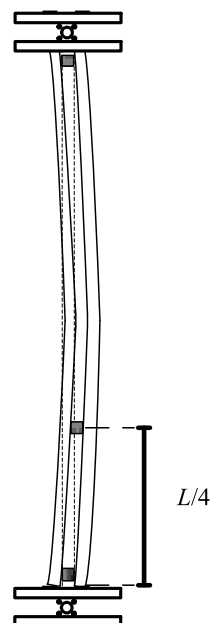
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$



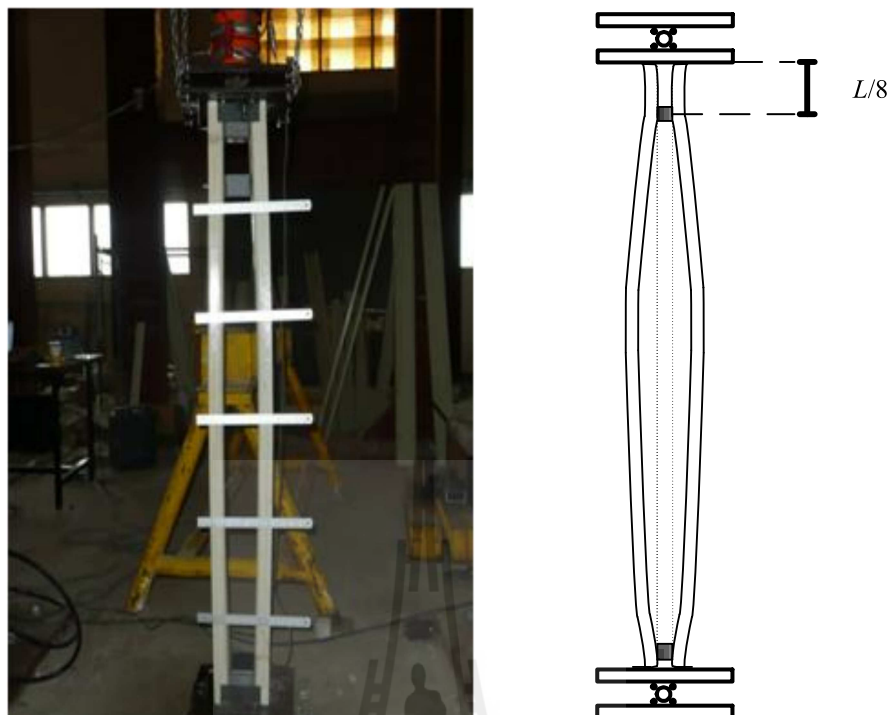
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างขนาด  $152 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$



รูปที่ 4.32 ลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel buckling ของตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$



รูปที่ 4.33 ลักษณะการวิบัติแบบ individual opposite buckling ของตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$

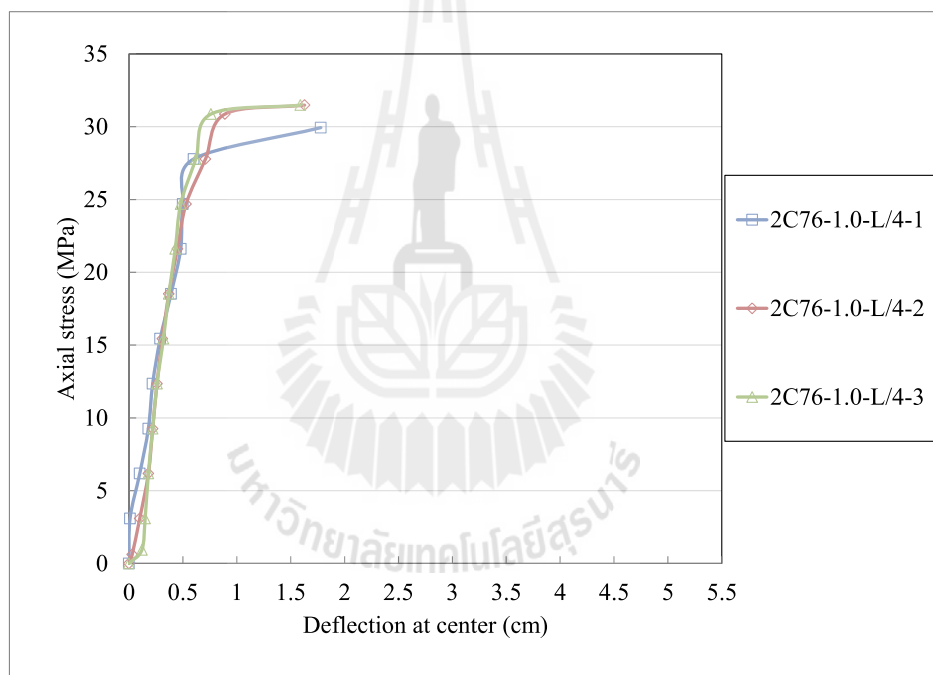
#### 4.5.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการโก่งตัวทางด้านข้างของเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมรับแรงในแนวแกน รูปที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของเสาที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของหน่วยแรงโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นในรูป geometrical nonlinear จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะ

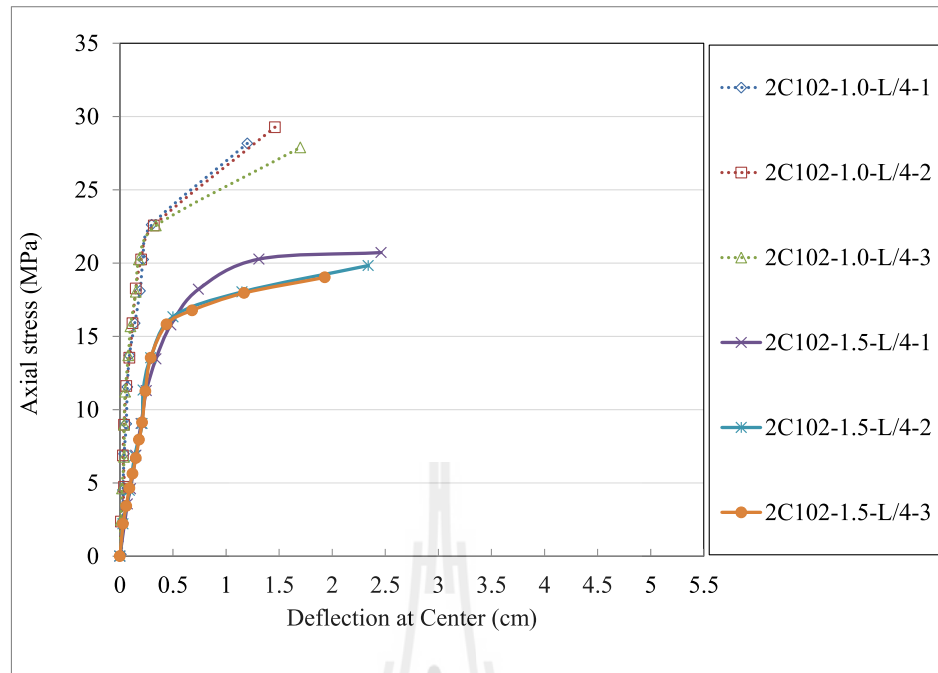
รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.40 ถึงรูปที่ 4.45 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อหน่วยแรงกดอัดมีค่าน้อยการโก่งตัวทางด้านข้างจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อหน่วยแรงกดอัดที่มากขึ้นถึงค่าหน่วยแรงโก่งเดาะค่าการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นสูงมาก

จากรูปร่างการโก่งตัวแบ่งลักษณะการวิบัติออกเป็น 2 แบบ คือลักษณะการวิบัติแบบ individual parallel buckling และ individual opposite buckling โดยจากลักษณะการวิบัติแบบ

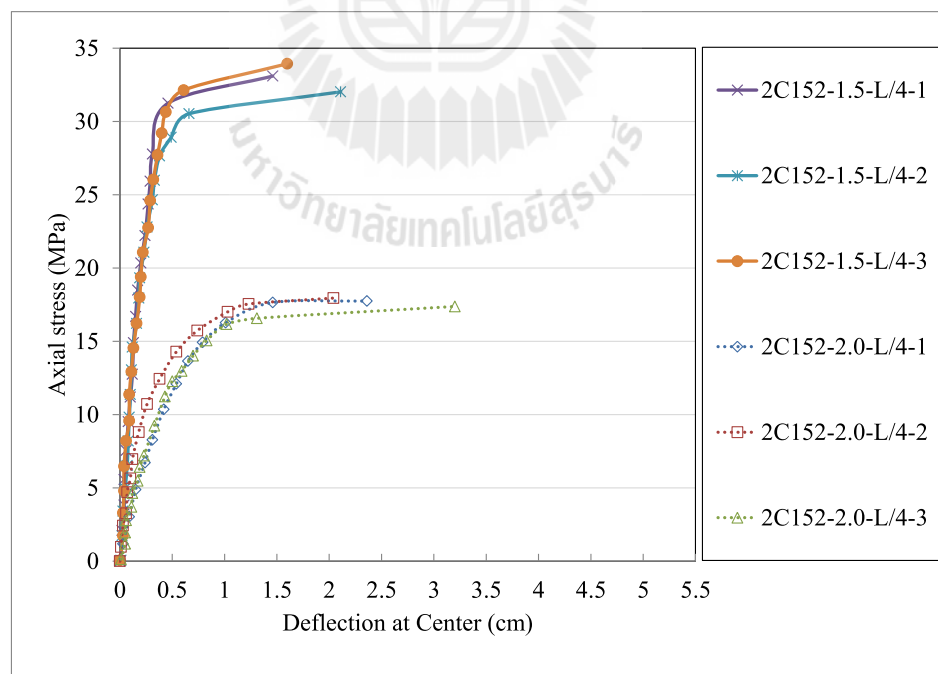
individual parallel buckling พบว่ามีลักษณะของการดัดคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบหมุด (pinned-pinned supported) ดังนั้นค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล (effective length factor,  $K$ ) ที่ใช้ต้องมีค่าเท่ากับ 1.0 ในขณะที่ลักษณะการวิบัติแบบ individual opposite buckling เนื่องจากการยึดรั้งของจุดเชื่อมทำให้มีลักษณะของการดัดคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบหมุด-ยึดแน่น (pinned-fixed supported) ดังนั้นค่าตัวคูณความยาวประสิทธิผล (effective length factor,  $K$ ) ที่ใช้ต้องมีค่าเท่ากับ 0.7 อย่างไรก็ตามลักษณะการวิบัติดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิน  $L/100$  และการระบุจุดดัดกลับ (inflection point) ทำได้ยาก ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยต่อการนำเสนอผลการดังกล่าวไปใช้คำนวณออกแบบจึงกำหนดให้ค่า  $K$  ของตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.0



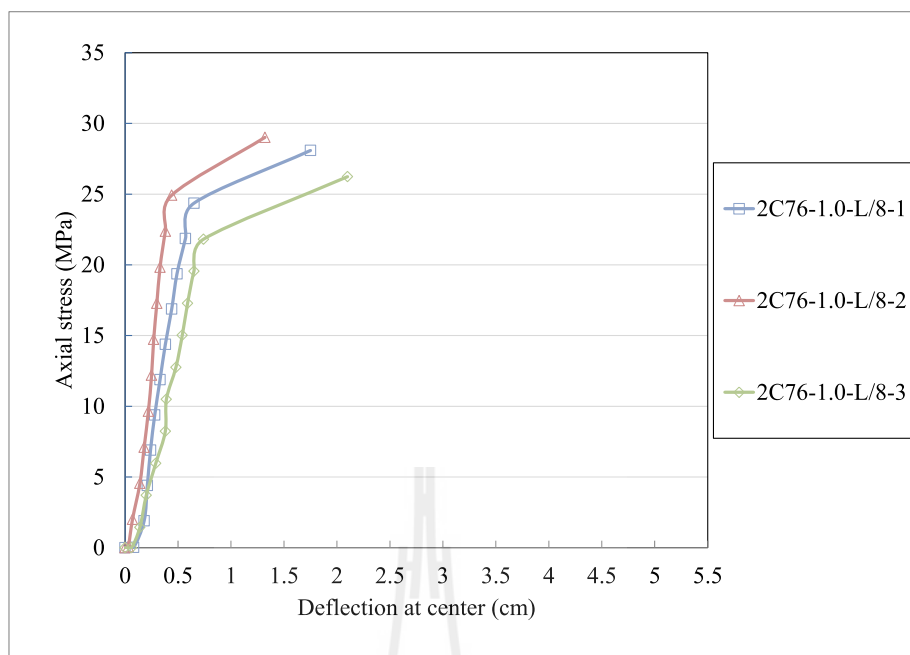
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$



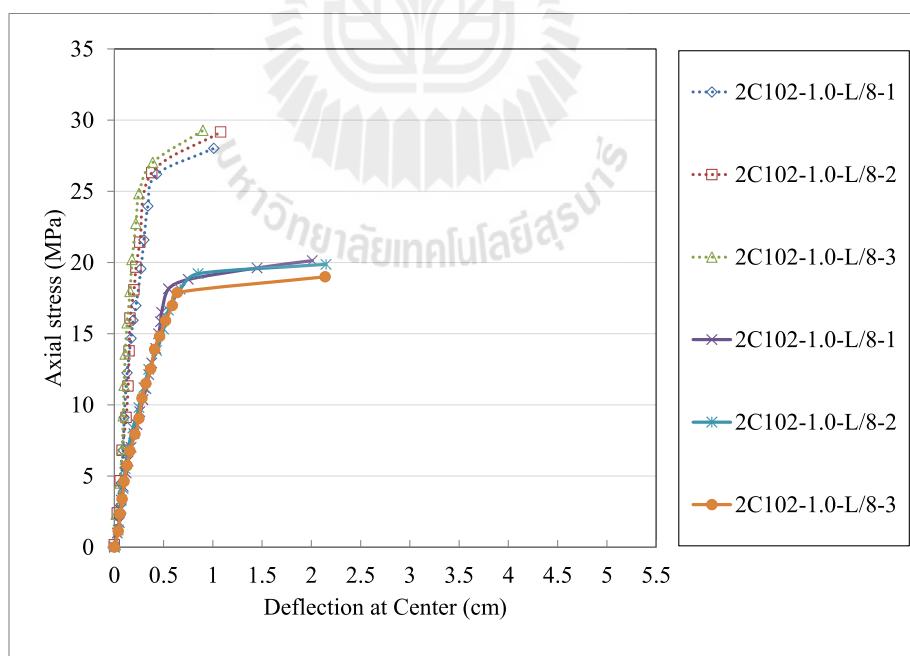
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางดัดข้างของตัวอย่าง ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$



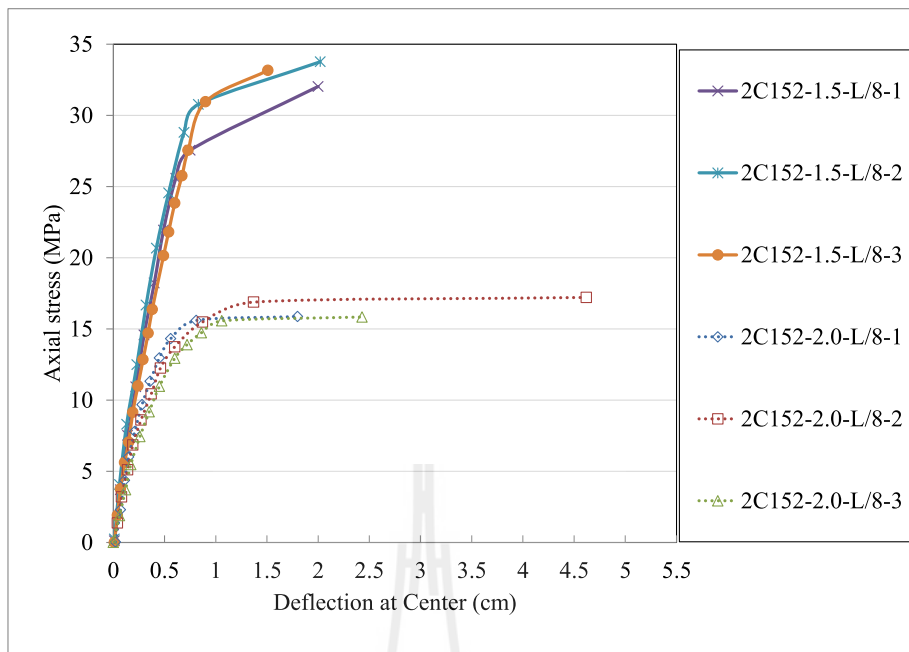
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางดัดข้างของตัวอย่าง ขนาด  $152 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$



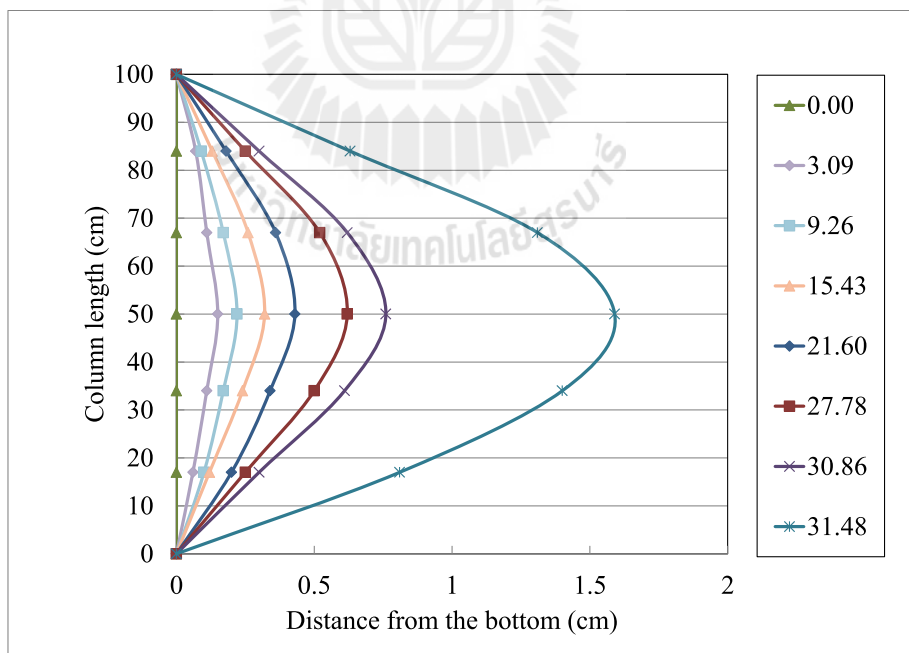
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$



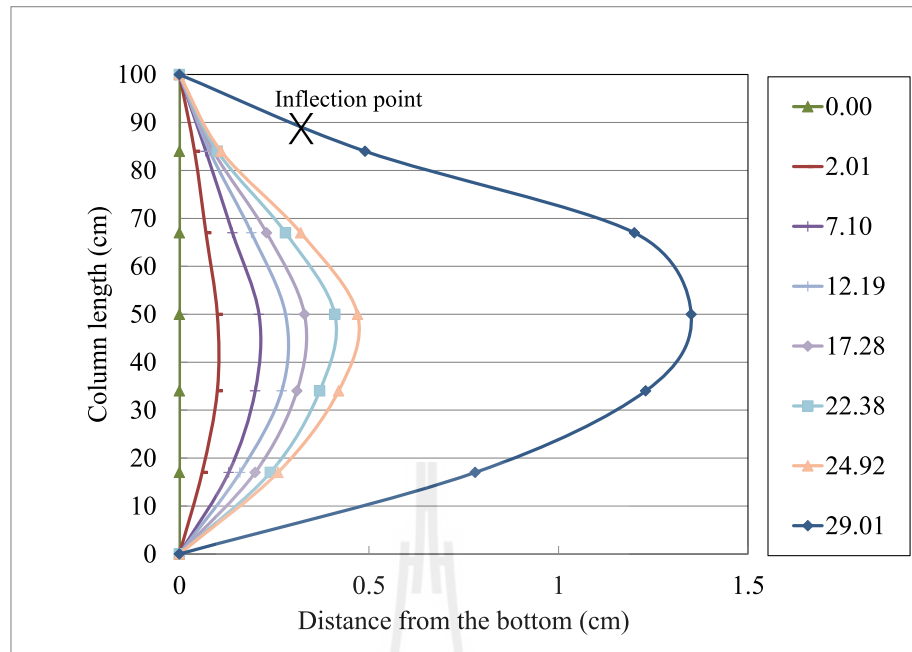
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่าง ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 1.5 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$



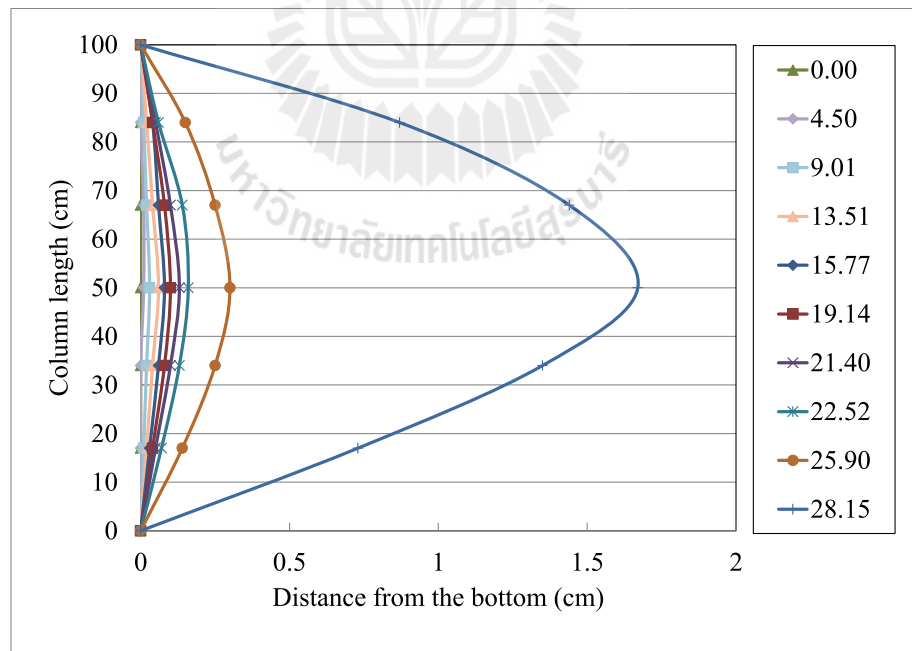
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและระยะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างขนาด 152×29×6 mm ความยาว 1.5 ถึง 2.0 m ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$



รูปที่ 4.40 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด 76×22×6 mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$  ความยาว 1.0 m

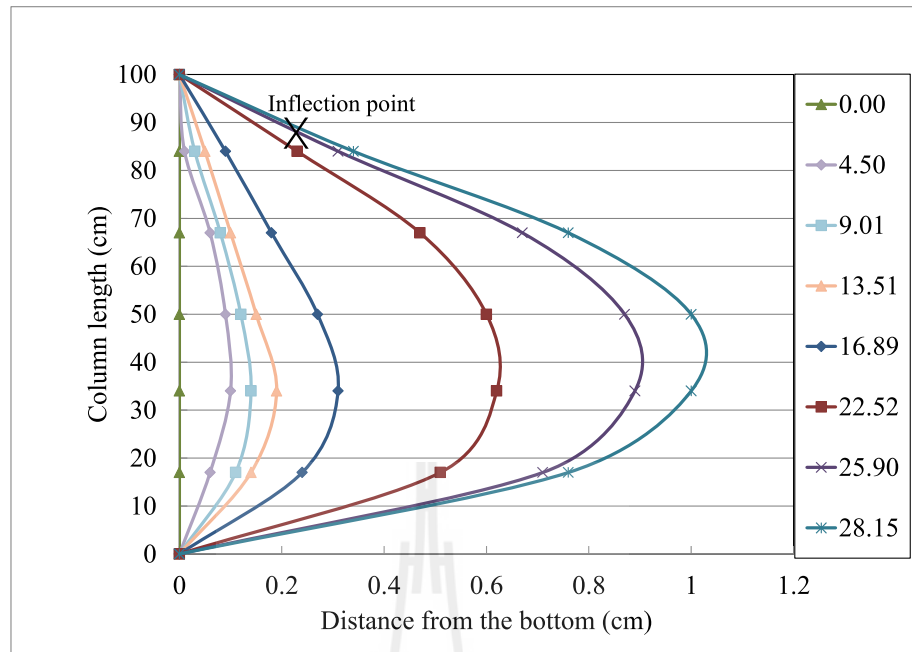


รูปที่ 4.41 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$  ความยาว 1.0 m

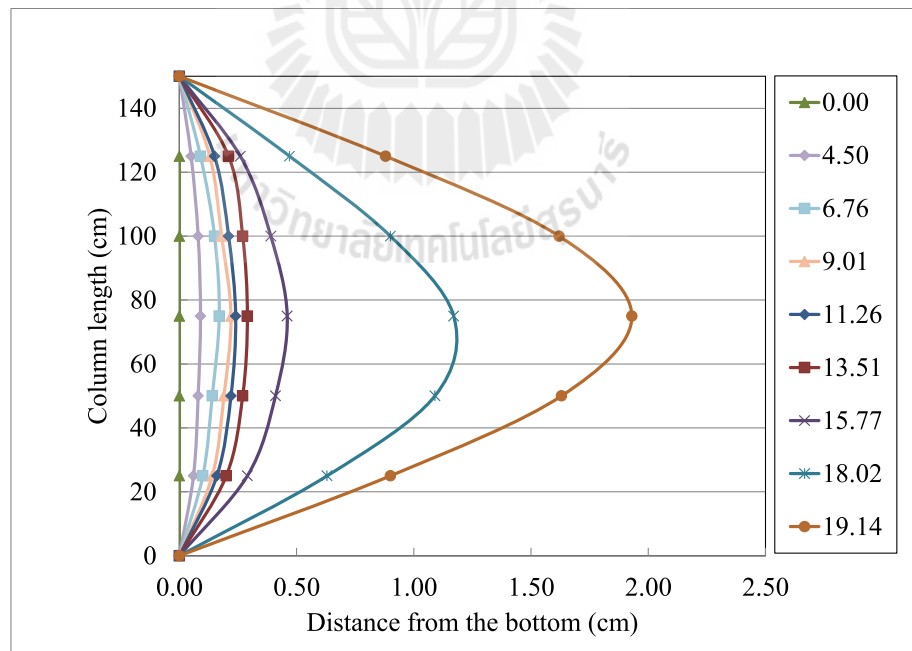


รูปที่ 4.42 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$  ความยาว 1.0 m

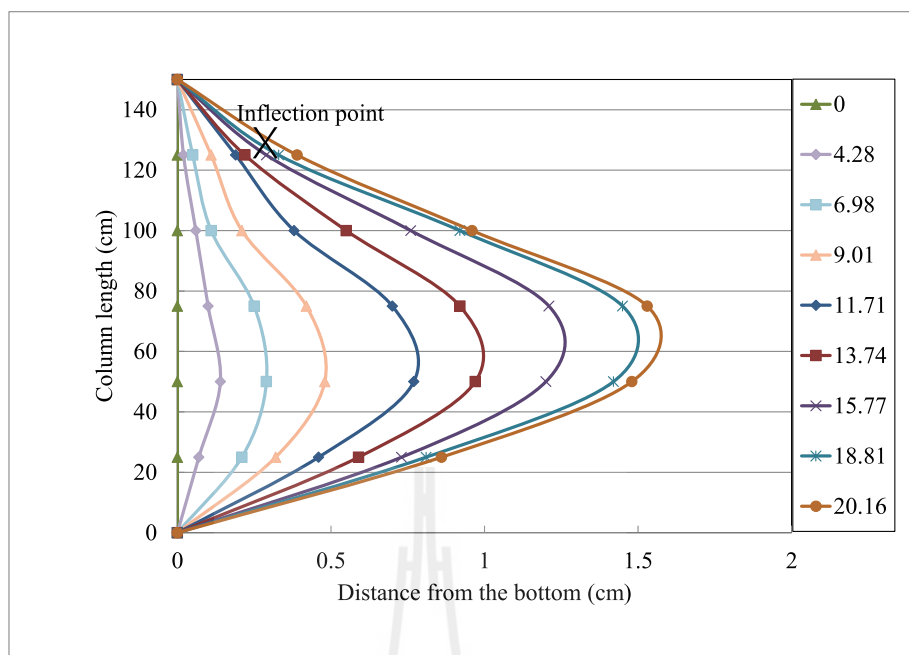




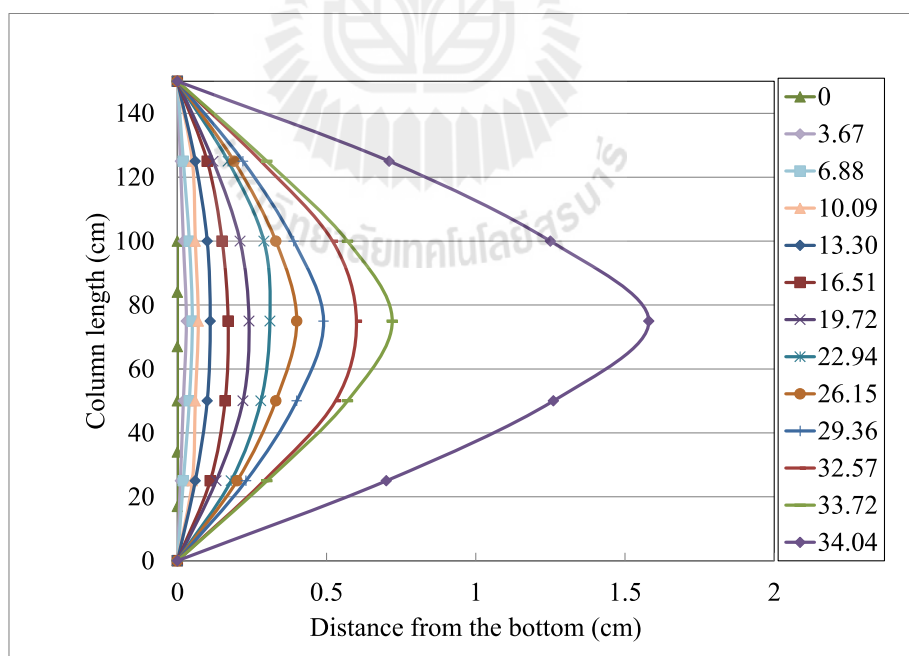
รูปที่ 4.43 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$  ความยาว 1.0 m



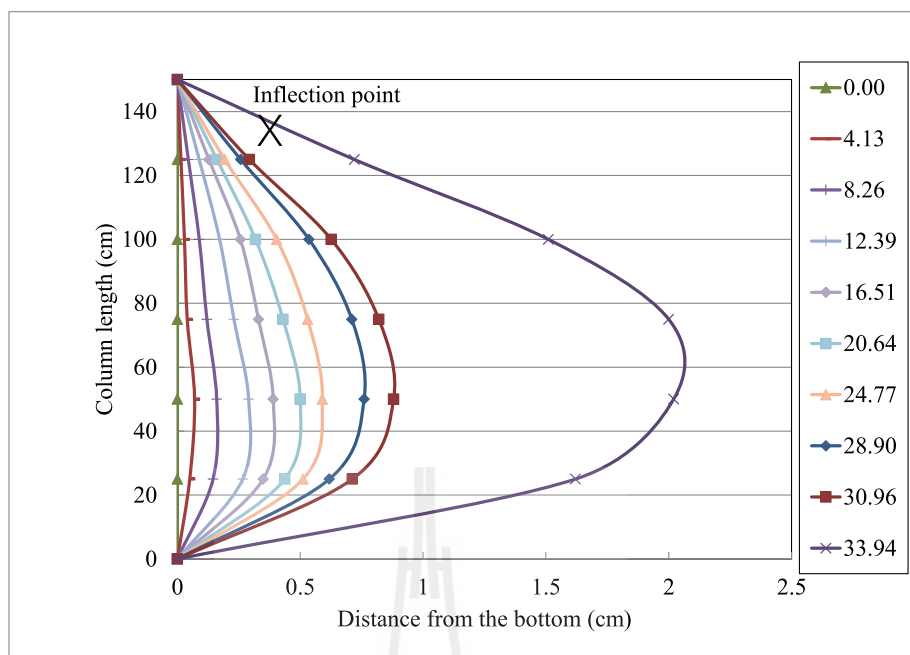
รูปที่ 4.44 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$  ความยาว 1.5 m



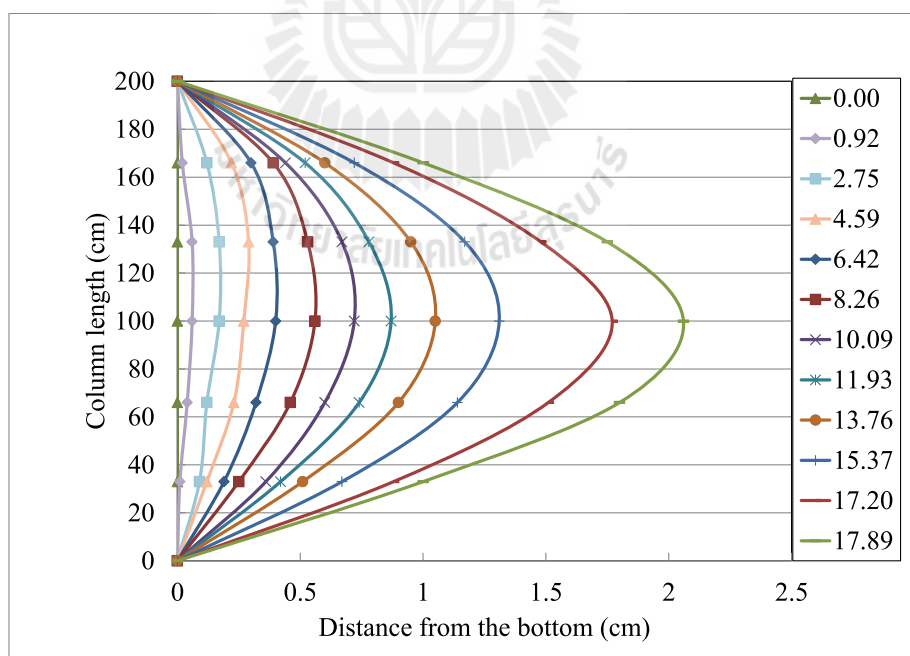
รูปที่ 4.45 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$  ความยาว 1.5 m



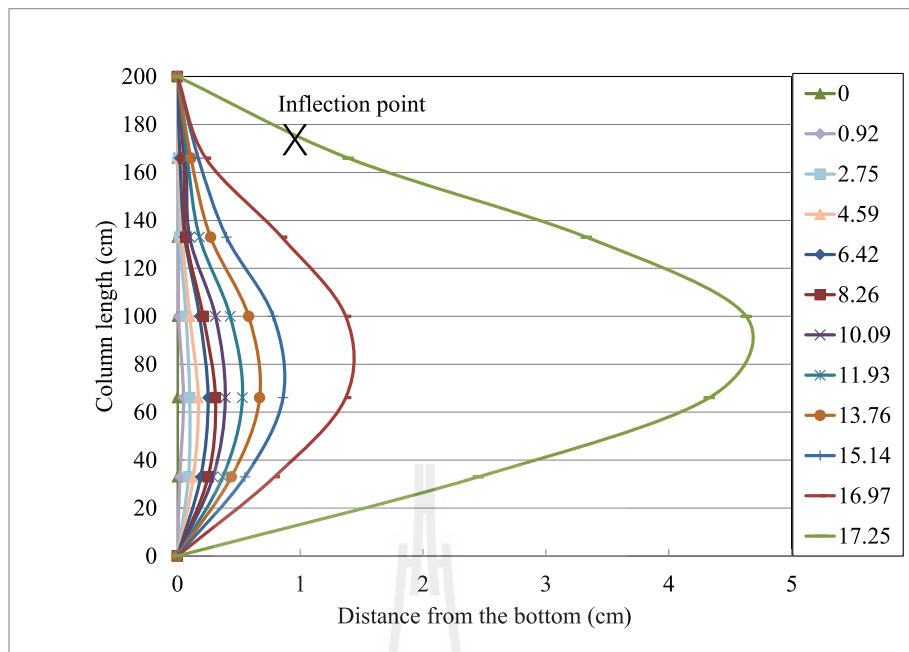
รูปที่ 4.46 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$  ความยาว 1.5 m



รูปที่ 4.47 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$  ความยาว 1.5 m



รูปที่ 4.48 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/4$  ความยาว 2.0 m

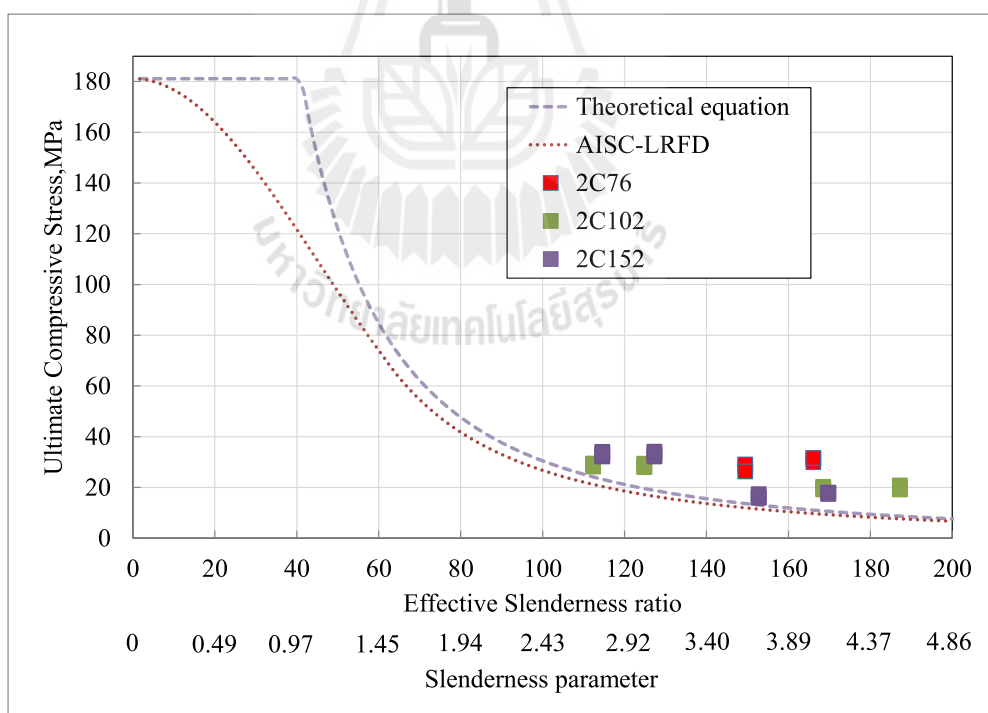


รูปที่ 4.49 รูปร่างการโก่งตัวของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลูกขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อเพิ่มที่ระยะ  $L/8$  ความยาว 2.0 m

#### 4.5.3 น้ำหนักโก่งเดาะของเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคูลูกที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างสำหรับตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$   $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว หน่วยแรงโก่งเดาะ (buckling stress) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นหน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{cr,EXP}$ ) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน หน่วยแรงโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุแบ่งเป็นแต่ละหน้าตัดดังที่แสดงในหัวข้อที่ 4.2 จากรูปพบว่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาประกอบเป็นปัจจัยที่มีผลต่อหน่วยแรงโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด  $152 \times 43 \times 10$  mm สามารถรับหน่วยแรงได้ใกล้เคียงตัวอย่างหน้าตัด  $102 \times 29 \times 6$  และ  $76 \times 22 \times 6$  mm ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรง โกงเดาะจากการทดสอบและหน่วยแรง โกงเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $\sigma_{cr,LRFD}$ ) สำหรับเสาประกอบ PFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างสามารถคำนวณค่า  $\sigma_{cr,LRFD}$  ได้จากสมการที่ (3.1-3.4) พบว่าอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะจากการทดสอบและหน่วยแรง โกงเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $\sigma_{cr,EXP} / \sigma_{cr,LRFD}$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.11-2.36 โดยสาเหตุที่หน่วยแรง โกงเดาะที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่าหน่วยแรงที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก 1) สมการออกแบบของ LRFD เป็นสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณโดยรวมผลเนื่องจากหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิตซึ่งตัวอย่างทดสอบในการศึกษานั้นเป็นวัสดุ PFRP ไม่มีผลเนื่องจากแรงดังกล่าว 2) ความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ (material variation) นอกจากนี้จากตารางพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน หน่วยแรง โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $\sigma_{cr,EXP}$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนความชะลูดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่ออัตราส่วนความชะลูดเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติโดยการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการคด (flexural buckling) สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง โกงเดาะและอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างเสาประกอบ PFRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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
2C76-1.0-3-L/8	149.50	28.09	29.01	26.23	27.78	16.20	1.71

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C102-1.0-3-L/4	124.84	28.15	29.28	27.93	28.45	21.08	1.35
2C102-1.0-3-L/8	112.36	28.15	29.28	29.28	28.90	26.02	1.11
2C102-1.5-3-L/4	187.27	20.72	19.82	19.14	19.89	9.37	2.12
2C102-1.5-3-L/8	168.54	20.16	19.82	19.14	19.71	11.56	1.71

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบตัวอย่างเสาประกอบขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

Specimens	$L/r$	Experiment				Analytical	
		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)	$\frac{\sigma_{cr,EXP}}{\sigma_{cr,LRFD}}$
2C152-1.5-3-L/4	127.33	33.03	32.11	34.04	33.06	14.49	2.28
2C152-1.5-3-L/8	114.60	32.11	33.94	33.03	33.03	17.89	1.85
2C152-2.0-3-L/4	169.78	17.80	17.89	17.34	17.68	8.15	2.17
2C152-2.0-3-L/8	152.80	15.87	15.87	17.25	16.33	10.06	1.62

#### 4.6 สรุปขั้นตอนการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงกดอัดในแนวแกนของชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่

จากการศึกษาทดสอบตัวอย่างทดสอบชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยใช้มาตรฐานการออกแบบเหล็กรูปพรรณของ AISC-LRFD ซึ่งมีลักษณะของหน้าตัดคล้ายคลึงกับชิ้นส่วน FRP สามารถแสดงเป็นขั้นตอนการออกแบบได้ดังนี้

- 1) คำนวณค่าพื้นฐานของหน้าตัด เช่น พื้นที่หน้าตัด โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนหลักและรอบแกนรอง เป็นต้น
- 2) เลือกความยาวของชิ้นส่วนเพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราส่วนความชะลูด ( $KL/r$ ) โดยที่ค่าดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 200
- 3) มาตรฐานการออกแบบของ AISC-LRFD กำหนดจุดแบ่งพฤติกรรมของเสาออกเป็น 2 แบบ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ความชะลูดวิกฤติ ( $\lambda_c$ ) โดยที่สมการของ AISC-LRFD คือ

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_c}} = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (2.17)$$

โดยที่เมื่อนำมาใช้กับชิ้นส่วนวัสดุ FRP ต้องมีการปรับสมการดังกล่าวในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ (material properties) ดังนั้นสมการดังกล่าวจะถูกแสดงเป็น

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\sigma_u}{\sigma_e}} = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{\sigma_u}{E_{flex}}} \quad (3.2)$$

จากมาตรฐาน AISC-LRFD กำหนดให้ค่า  $\lambda_c$  เท่ากับ 1.5 หรือที่ค่าอัตราส่วนความชะลูดประมาณ 60

- 4) หลังจากที่ได้ค่าอัตราส่วนความชะลูดของชิ้นส่วน FRP จะแบ่งสมการในการคำนวณหน่วยแรงวิกฤตออกเป็น 2 แบบ คือ 1)  $\lambda_c \leq 1.5$  และ 2)  $\lambda_c > 1.5$
- 5) ในกรณีของ  $\lambda_c \leq 1.5$  มาตรฐานการออกแบบของ AISC-LRFD กำหนดให้

$$f_{cr} = F_y \left(1 - \frac{\lambda_c^2}{4}\right) \quad (2.20)$$

โดยเมื่อนำมาใช้กับชิ้นส่วนวัสดุ FRP ต้องมีการปรับสมการดังกล่าวในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ (material properties) ดังนั้นสมการดังกล่าวอยู่ในรูปของ

$$\sigma_{cr} = \sigma_u \left(1 - \frac{\lambda_c^2}{4}\right) \quad (2.20)$$

ในกรณีของ  $\lambda_c > 1.5$  มาตรฐานการออกแบบของ AISC-LRFD กำหนดให้

$$f_{cr} = \frac{F_y}{\lambda_c^2} \quad (2.19)$$

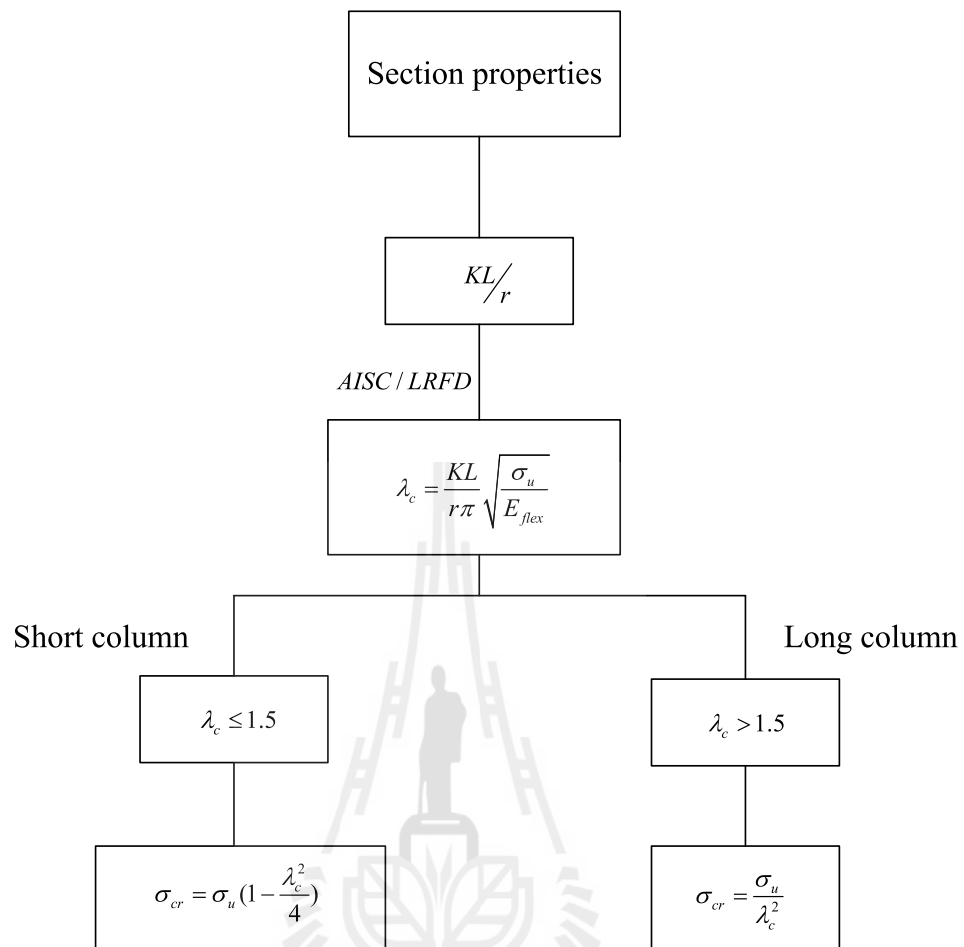
โดยที่เมื่อนำมาใช้กับชิ้นส่วนวัสดุ FRP ต้องมีการปรับสมการดังกล่าวในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ (material properties) ดังนั้นสมการดังกล่าวจะถูกแสดงเป็น

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_u}{\lambda_c^2} \quad (3.4)$$

สุดท้ายสำหรับชิ้นส่วนวัสดุ FRP ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อแบบต่าง ๆ ดังที่แสดงในการทดสอบข้างต้น พบว่าการติดจุดเชื่อมต่อมีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อก่อนข้างสูง ดังนั้นพฤติกรรมการรับแรงกอดัดในแนวแกนของเสาจะเกิดขึ้นในลักษณะของการรับแรงในชิ้นประกอบ โดยที่ค่า  $K$  ได้ถูกแสดงไว้ในส่วนของการทดสอบข้างต้น ซึ่งสามารถนำค่าดังกล่าวมาใช้ให้เหมาะสมกับการติดจุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ

ขั้นตอนการออกแบบเสาได้ถูกแสดงเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 4.51





รูปที่ 4.51 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดในแนวแกนของวัสดุ FRP

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัย

#### 5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristics) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบโดยวิธี LRFD ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.2 สรุปผลทดสอบ

##### 5.2.1 พฤติกรรมทางโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้

##### 5.2.1.1 พฤติกรรมทางโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

พฤติกรรมรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ ตัวอย่างทดสอบแบบสั้นและตัวอย่างทดสอบแบบยาว สำหรับตัวอย่างทดสอบแบบสั้น ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ สำหรับตัวอย่างทดสอบแบบยาว พฤติกรรมรับแรงของตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

##### 5.2.1.2 พฤติกรรมทางโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

พฤติกรรมรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาวมีลักษณะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบแบบยาวของตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน ของตัวอย่าง

ทดสอบมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-100% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้น โดยความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงอย่างรวดเร็วและเป็นศูนย์ที่แรงโก่งเดาะวิกฤติ จากนั้น เมื่อผ่านแรงโก่งเดาะวิกฤติแล้ว แรงที่กระทำกับตัวอย่างทดสอบจะมีค่าคงที่ และสุดท้าย ความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบจะค่อย ๆ ลดลง

### 5.2.1.3 พฤติกรรมทางโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างที่ระยะ  $L/4$  ของความยาว จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเนื่องจากการคด โดยขึ้นประกอบไปในทิศทางขนานกัน (individual parallel buckling) ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างที่ระยะ  $L/8$  ของความยาว จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรงจนถึงแรงโก่งเดาะ โดยที่ตัวอย่างเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะเนื่องจากการคด โดยขึ้นประกอบไปในทิศทางตรงกันข้าม (individual opposite buckling)

## 5.2.2 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้

### 5.2.2.1 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง

ตัวอย่างทดสอบ FRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างมีลักษณะการวิบัติแบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ การวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) ในตัวอย่างทดสอบแบบสั้น และการวิบัติโดยการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากการคด โดยขึ้นประกอบไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน (individual opposite buckling) และจากการทดสอบไม่พบการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีก และเอวของหน้าตัด

### 5.2.2.2 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุด เชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว

ตัวอย่างทดสอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาวมีลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการตัดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ โดยเกิดจากการแอ่นตัวด้านข้างไปในทิศทางขนานกัน (individual parallel buckling) และจากการทดสอบไม่พบการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีก และเอวของหน้าตัด

### 5.2.2.3 ลักษณะการวิบัติตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่มีการติดจุดเชื่อมต่อ ที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้าง

ตัวอย่างทดสอบ PFRP ที่มีจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างมีลักษณะการวิบัติแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการตัดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ โดยเกิดจากการแอ่นตัวด้านข้างไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน (individual opposite buckling) และการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการตัดของชิ้นส่วนที่นำมาประกอบ โดยเกิดจากการแอ่นตัวด้านข้างไปในทิศทางขนานกัน (individual parallel buckling) สุดท้ายจากการทดสอบไม่พบการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีก และเอวของหน้าตัด

## 5.2.3 เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD

สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง และตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มที่ระยะกึ่งกลางความยาว และตัวอย่างทดสอบที่มีการติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีการติดเพิ่มระหว่างปลายทั้งสองข้างภายใต้แรงกระทำในแนวแกน กำลังโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดของตัวอย่างทดสอบเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการตัด สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น โดยกำลังโก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD มีค่าต่ำกว่ากำลังโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบอาจมีสาเหตุเนื่องจาก 1) สมการออกแบบของ LRFD เป็นสมการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยรวมผลเนื่องจากหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิตซึ่งตัวอย่างทดสอบในการศึกษานั้นเป็นวัสดุ PFRP ไม่มีผลเนื่องจากแรงดังกล่าว 2) ความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ (material variation) ซึ่งมีผลให้ผลจากการทดสอบบางส่วนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ตลอดจนตัวอย่างเสาที่มีความยาวสูง พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

### 5.3 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้งาน คือ การติดตั้งจุดเชื่อมต่อเพิ่มเติมเข้ากับเสาประกอบในการศึกษาครั้งนี้ไม่มีผลกระทบต่อกำลังโก่งเคาะ เนื่องจากระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่ามาก ทำให้จุดเชื่อมต่อที่ติดตั้งเพิ่มไม่สามารถถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างหน้าตัดรางน้ำเดี่ยวและก่อให้เกิด composite action อย่างสมบูรณ์ได้ และสำหรับค่าอัตราส่วนความชะลูดประสิทธิผล (effective length factor,  $K$ ) นั้นพบว่า การติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่ปลายตัวอย่างทดสอบและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบบางส่วนเป็นแบบ Individual opposite buckling ซึ่งมีลักษณะการโก่งตัวแตกต่างจากแบบ Individual parallel buckling โดยพบว่า มีจุดคั่นกลับ (inflection point) ปรากฏให้พอสังเกตเห็นได้เมื่อตัวอย่างทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกินกว่า  $L/100$  อย่างไรก็ตามลักษณะการวิบัติดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ค่อนข้างสูงและการระบุระยะของจุดคั่นกลับทำได้ยาก ดังนั้น สำหรับการศึกษานี้กำหนดให้ค่า  $K$  ของตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.0

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มีข้อจำกัดอยู่มาก การนำผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่นำเสนอในการศึกษานี้ไปใช้งานก่อสร้างจริงนั้น วิศวกรผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานต้องใช้พิจารณา โดยคำนึงถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ คุณภาพการก่อสร้าง ขนาดหน้าตัด ความยาวของคาน รวมทั้งลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยเป็นหลักด้วย

### 5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

- 1) ศึกษาพฤติกรรมของเสาหน้าตัดรางน้ำภายใต้แรงกระทำในแนวแกน โดยใช้สมการออกแบบของ LFRD ในงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐาน
- 2) ศึกษาแรงกระทำที่ตำแหน่ง (location) ต่าง ๆ ของหน้าตัด เช่น เหว (web) และปีก (flange) เพื่อให้ผลงานวิจัยต่อไปครอบคลุมถึงการใช้งานจริง
- 3) การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ของเสาประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน

โดยสรุปแล้ว งานวิจัยนี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์และสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2555-2559) โดยการพัฒนาองค์ความรู้และต่อยอดภูมิปัญญาให้เกิดประโยชน์เชิงพาณิชย์และสาธารณะ และพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตทางอุตสาหกรรมให้เอื้อต่อการเพิ่มศักยภาพของการเป็นฐานการผลิตภาคอุตสาหกรรม ตลอดจนพัฒนาวัตถุดิบในประเทศและการเพิ่มมูลค่าสินค้าเพื่อพัฒนาศักยภาพการผลิตและการตลาด เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน

## รายการอ้างอิง

- American Institute of Steel Construction. (1989). **AISC Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design.** (9th ed.). American Institute of Steel Construction.
- American Institute of Steel Construction. (1999). **Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings (AISC 350-99).** American Institute of Steel Construction.
- American Society for Testing and Materials. (1998). **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics: ASTM D 570-98.** West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2002). **Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics: ASTM D 695-02a.** West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2002). **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials: ASTM D 790-03.** West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2000). **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement: ASTM D 792-00.** West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2006). **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials: ASTM D 3039/D 3039M-00.** West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2004). **Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials: ASTM D 3171-99.** West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2003). **Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading: D 3410/D 3410M-03.** West Conshohocken, Pennsylvania.

- American Society for Testing and Materials. (2002). **Standard Test Method for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shapes: ASTM D 3917-96**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2005). **Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method: ASTM D 5379/D 5379M-05**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society of Civil Engineers. (1984). Structural plastics design manual. **ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 63**. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
- Astaneh, A. A., Goel, S. C., and Hanson, R. D., (1985). Cyclic Out-of plane Buckling of Double-angle Bracing. **Journal of Structural Engineering (ASCE)**. 111(5): 1135-1153.
- Bakis, C. E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., and Triantafillou, T.C., (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction - state-of-the-art review. **Journal of Composites for Construction**. 6(2): 73-87.
- Bank, L.C. (2006). **Composites and Construction: Structural Design with FRP Materials**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Bank, L.C., Mosallam, A.S., and Gonsior, H.E. (1990). Beam-to-column connections for pultruded FRP structures. **Proceedings of the 1<sup>st</sup> Materials Engineering Congress**. Materials Engineering Division, ASCE. New York.: 804-813.
- Bank, L. C., Yin, J., and Moore, L. (1996). Experimental and numerical evaluation of beam-to-column connections for pultruded structures. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 15: 1052–1067.
- Barbero, E.J., and Raftoyiannis, I.G. (1994). Lateral and distortional buckling of pultruded I-beams. **Composite Structures**. 27(3): 261–268.
- Barbero, E.J., and Tomblin, J. (1994). Local buckling experimental on FRP columns. **Thin-Walled Structures**. 18: 97–116.
- Barbero, E.J., Dede, E.K., Jones, S. (2000). Experimental Verification of Buckling-mode Interaction in Intermediate-length Composite Columns. **International Journal of Solids and Structures**. 37: 3919-3934

- Bedford. (2005). **Bedford Reinforced Plastics Design Guide**. Bedford, Pennsylvania: Bedford Plastic.
- Bleich, F. (1952). **Buckling Strength of Metal Structure**. New York: McGrawHill.
- Chen, H., and Blandford, G.E. (1995). Finite-element model for thin-walled space frame flexible connection behavior. **Journal of Structural Engineering**. 121(10): 1514-1521.
- Creative Pultrusions. (2004). **The Pultex Pultrusion Design Manual of Standard and Custom Fiber Reinforced Polymer Structural Profiles**. Alum Bank, Pennsylvania: Creative Pultrusions.
- Daniel, M. I., and Ishai, O. (1994). **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Duan, L., and Chen, W.F. (1987). Design Rules of Built-up Members in Load and Resistance Factor Design. **Journal of Structural Engineering**. 114(11): 2544-2554
- Eurocomp. (1996). Structural design of polymer composites. **Eurocomp Design Code and Handbook**. (ed. Clarke J.). London: E&FN Spon.
- Fiberline. (2003). **Fiberline Design Manual**. Kolding, Denmark: Fiberline.
- Goldsworthy, B. (1954). The continuous extrusion of RP. **Proceeding of the 9<sup>th</sup> SPIPRD Conference**. Chicago, February 3-5, Section 13.
- Green, A., Bisarnsin, T., and Love, E.A. (1994). Pultruded reinforced plastics for civil engineering structural applications. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 13: 942-951.
- Keller, T. (2003). Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. **Structural Engineering Documents No. 7**. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, Switzerland.
- Liu, J.L., Lue, D.M., Lin, C.H. (2009). Investigation on Slenderness Ratio of Built-up Compression Members. **Journal of Constructional Steel Research**. 65: 237-248
- Lue, D.M., Yen, T., Liu, J.L. (2006). Experimental Investigation on Built-up Columns. **Journal of Constructional Steel Research**. 62: 1325-1332
- Mallick, P.K. (1988). **Fiber-Reinforced Composites; Materials, Manufacturing, and Design**. New York: Marcel Dekker.



- Mottram, J.T., Brown, N. D., and Anderson, D. (2003). Physical testing for concentrically loaded columns of pultruded wide-flange profile. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-structures and Buildings*. 156(2): 205-219.
- Mottram, J.T., and Zheng, Y. (1996). State-of-the-art review on the design of beam-to-column connections for pultruded frames. **Composite Structures**. 35: 387-401.
- Nagaraj, V., and Gangarao, V.S. (1997). Static behavior of pultruded GFRP beams. **Journal of Composites for Construction**. 1: 120-129.
- Nagaraj, V., and Gangarao, V.S. (1998). Fatigue behavior and connection efficiency of pultruded GFRP beams. **Journal of Composites for Construction**. 2(1): 57-65.
- Roberts, T.M., and Al-Ubaidi, H. (2002). Flexural and torsional properties of pultruded fiber reinforced plastics I-profiles. **Journal of Composites for Construction**. 6(1): 28-34.
- Seangatith, S. (2002). Mechanical behaviors of GFRP box beams with low span-to-depth ratios subjected to three-point loading. **The Eighth National Convention on Civil Engineering**. Vol. 3: pp. MAT 121-125.
- Smallowitz, H. (1985). Reshaping the future of plastic buildings. **Civil Engineering, ACSE**. May: 38-41.
- Smith, S.J., Parsons, I.D., and Hjelmstad, K.D. (1999). Experimental comparisons of connections for GFRP pultruded frames. **Journal of Composites for Construction**. 3(1): 20-26.
- Starr, T. (2000). **Pultrusion for Engineers**. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Strongwell. (2002). **Strongwell Design Manual**. Bristol, Virginia: Strongwell.
- Whittle, J., and Ramseyer, C. (2009). Buckling Capacities of Axially Loaded, Cold-formed, Built-up C-channels. **Thin-Walled Structures**. 47: 190-201
- William, T.S. (2007). **Steel Design International Student Edition**. Toronto: Thomson Learning
- Zandonini, R. (1985). Stability of Compact Built-up Struts: Experimental Investigation and Numerical Simulation. **Costruzioni Metalliche**. No.4
- Zureick, A., and Scott, D. (1997). Short-term behavior and design of fiber-reinforced polymeric slender members under axial compression. **Journal of Composites for Construction**. 1(4): 140-149.
- Zureick, A., and Steffen, R. (2000). Behavior and Design of Concentrically Loaded Pultruded Angle Struts. **Journal of Structural Engineering**. 126(3): 406-416.

- ทักษิณ เทพชาตรี (2541). **พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, กรุงเทพมหานคร
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2542). **คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้ว**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5. ชลบุรี. 24-26 มีนาคม 2542. หน้า MAT-202-MAT-207
- หวังแก้ว บุญสวน สิทธิชัยแสงอาทิตย์ และสงวน วงษ์ชวลิตกุล (2552). **พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมใยแบบพัลทรีดที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเชื่อม และการตัด**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14. นครราชสีมา. 13-15 พฤษภาคม 2552. เล่มที่ 4 หน้า 1625-1632
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. (2552). **การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีดหน้าตัดรูปรางน้ำ**. รายงานฉบับสมบูรณ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.





ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด

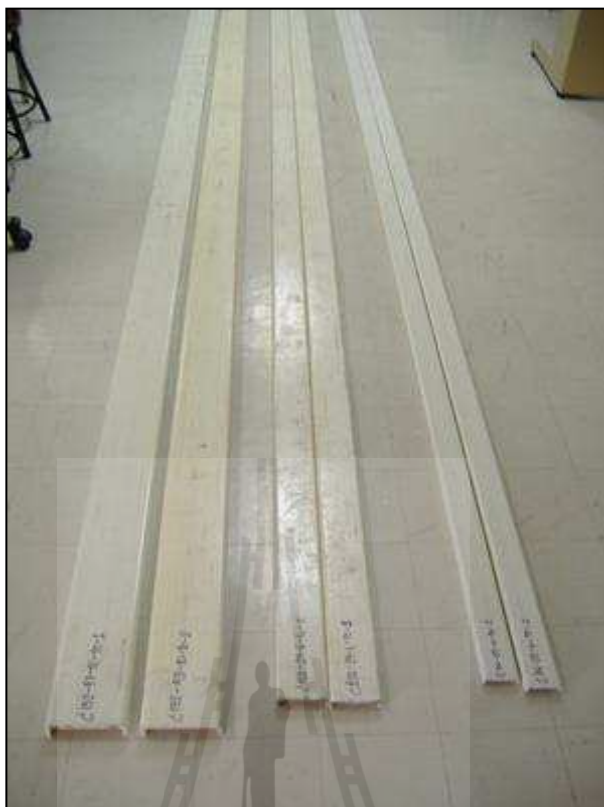
## ก.1 บทนำ

การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างและการคำนวณทางทฤษฎีนั้น ผลการทดสอบวัสดุ มีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการคำนวณทางทฤษฎีได้ถูกนำมาใช้ในการหาสมการสำหรับ ทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และการตอบสนองทางโครงสร้าง (structural responses) อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าหากไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) ซึ่งได้จากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้น ภาคผนวกนี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจาก วัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ โดยการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวได้อ้างอิงจากรายงาน ฉบับสมบูรณ์เรื่อง “การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใย แบบพัลทูดหน้าตัดรูปตัวซี” (สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน, 2550) การศึกษา ประกอบด้วย (1) การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง (2) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties) และ (3) คุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อ ดังนี้

## ก.2 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของวัสดุ FRP

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง (dimensional tolerance) นับว่ามีความสำคัญ สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP เช่น Structural profile หน้าตัดต่าง ๆ การตรวจสอบ ความคลาดเคลื่อนของรูปร่างเนื่องจากกระบวนการผลิตถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการประเมิน ความสม่ำเสมอและความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วน Structural profile พลาสติกเสริมเส้นใย ที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion ของบริษัทผู้ผลิตต่าง ๆ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจส่ง ผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของวัสดุได้

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อต้องการทราบความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่ผลิตจากโรงงานภายในประเทศ และเปรียบเทียบ ผลการทดสอบที่ได้กับมาตรฐานของ ASTM C3917-02 “Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shape” ซึ่งเป็น การ ท ร ว ง ส อ บ วัสดุ FRP ที่ได้รับจากโรงงานผู้ผลิตมีมาตรฐานด้านรูปร่างเป็นที่ยอมรับหรือไม่ ตัวอย่างทดสอบ ได้จากการสุ่มตัวอย่างขนาดหน้าตัดละ 2 ตัวอย่าง โดยมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ (1)  $76 \times 22 \times 6$  mm (2)  $102 \times 29 \times 6$  mm และ (3)  $152 \times 43 \times 10$  mm รวมจำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.1 และตารางที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

การทดสอบ	ชื่อตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทดสอบ		
	C76-TO-No.	C102-TO-No.	C152-TO-No.
ความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด	2	2	2
ความตรงในแนวราบ	2	2	2
ความงอในแนวราบ	2	2	2
ความแบนราบ	2	2	2
ความบิด	2	2	2
ความคลาดเคลื่อนของมุม	2	2	2

วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM C3917 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่างสำหรับ Structural profile หน้าตัดรูปร่างนี้ ประกอบด้วยดัชนีความคลาดเคลื่อน (dimensional tolerance index) ที่สำคัญอยู่ 6 ประเภท ได้แก่

- 1) การทดสอบความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด (cross-section dimensions)
- 2) การทดสอบความตรงในแนวราบ (straightness)
- 3) การทดสอบความงอในแนวราบ (camber)
- 4) การทดสอบความแบนราบ (flatness)
- 5) การทดสอบความบิด (twist)
- 6) การทดสอบความคลาดเคลื่อนของมุม (angularity)

การบันทึกข้อมูลแต่ละค่าจะใช้การวัดจำนวน 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย รูปที่ ก.2 ถึงรูปที่ ก.3 แสดงตัวอย่างการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง



รูปที่ ก.2 การวัดขนาดความหนาของปีกวัสดุ FRP โดยไมโครมิเตอร์



รูปที่ ก.3 การวัดขนาดความกว้างของปีกวัสดุ FRP โดยเวอร์เนียคาลิเปอร์

ตารางที่ ก.2 แสดงผลทดสอบความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัดสำหรับวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ พบว่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด ความแบนราบและความคลาดเคลื่อนของมุมสำหรับวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำผ่านมาตรฐานทุกตัวอย่างทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C3917 สำหรับความคลาดเคลื่อนของความตรงในแนวราบผ่านมาตรฐานอยู่ 2 ตัวอย่าง คือ C76-TO-01 และ C152-TO-01 สำหรับความคลาดเคลื่อนของความงอในแนวราบ ผ่านมาตรฐานอยู่เพียง 1 ตัวอย่าง คือ C152-TO-01 ความคลาดเคลื่อนของการบิดไม่ผ่านมาตรฐานอยู่เพียง 1 ตัวอย่าง เท่านั้น คือ C152-TO-01

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด

ชื่อตัวอย่าง	ดัชนีความคลาดเคลื่อน (dimensional tolerance index)					
	ความคลาดเคลื่อน ของขนาดหน้าตัด	ความตรง แนวราบ	ความงอ แนวราบ	ความ แบนราบ	ความบิด	ความ คลาดเคลื่อน ของมุม
C76-TO-01	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
C76-TO-02	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
C102-TO-01	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
C102-TO-02	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
C152-TO-01	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน
C152-TO-02	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

### ก.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ FRP

โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของวัสดุ FRP ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดและปริมาณของใยแก้ว ชนิดและส่วนผสมของเรซิน เป็นต้น โดยชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่ผลิตในประเทศไทย อาจมีคุณสมบัติแตกต่างกับวัสดุ FRP ที่ผลิตในต่างประเทศ ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างขององค์ประกอบ (constituents) ทางกายภาพ และคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties) ของวัสดุ FRP โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบถูกตัดออกมาจากชิ้นส่วนใหญ่ (full scale) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ FRP ประกอบด้วย 3 การทดสอบ ได้แก่

- 1) การทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ
- 2) การทดสอบการดูดน้ำและความชื้น
- 3) การทดสอบปริมาณองค์ประกอบของวัสดุ FRP



### ก.3.1 การทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

โดยทั่วไปความหนาแน่นของวัสดุ CFRP ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร ขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ CFRP ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนปริมาตรของวัสดุ CFRP ต่อปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิ 23°C (Shah, 2007) การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาความหนาแน่น (density) และความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของวัสดุ CFRP ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของวัสดุ CFRP สำหรับการวิจัยนี้ต่อไป

วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D792-00 “Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative) Density of Plastics by Displacement” จำนวนของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-DS-W-No.	เอว	4
C76-DS-F-No.	ปีก	4
C102-DS-W-No.	เอว	4
C102-DS-F-No.	ปีก	4
C152-DS-W-No.	เอว	4
C152-DS-F-No.	ปีก	4

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP ดังแสดงในรูปที่ ก.4 โดยที่ตัวอย่างแต่ละชิ้นควรมีปริมาตรไม่น้อยกว่า 1 cm<sup>3</sup> ตลอดจนมีสภาพพื้นผิว (surface) และมุม (edge) ที่เรียบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบแต่ละชิ้นควรมีน้ำหนักโดยประมาณเท่ากับ 50 g (ASTM D792, 2000) รูปที่ ก.5 ถึงรูปที่ ก.6 แสดงตัวอย่างของวิธีการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ ก.4 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ ก.5 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบในอากาศ



รูปที่ ก.6 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบในน้ำ

ตารางที่ ก.4 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของวัสดุ PFRP จากตารางพบว่าโดยรวมวัสดุ PFRP ทั้ง 3 ขนาดมีค่าความหนาแน่น โดยเฉลี่ยเท่ากับ  $1958.5 \text{ kg/m}^3$  และค่าความถ่วงจำเพาะ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.96 เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับข้อมูลของบริษัท Creative Pultrusions ที่ระบุว่าวัสดุ PFRP มีค่าความหนาแน่น  $1656\text{-}1925 \text{ kg/m}^3$  และค่าความถ่วงจำเพาะ 1.66-1.93 (Creative Pultrusions, 2004) พบว่าค่าความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของวัสดุ PFRP ที่ทดสอบได้มีใกล้เคียงกับข้อมูลของบริษัท Creative Pultrusions

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

ขนาดระบุ	บริเวณ	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )		ความถ่วงจำเพาะ	
		เฉพาะบริเวณ	เฉพาะขนาด	เฉพาะบริเวณ	เฉพาะขนาด
C76×22×6	เอว	2020.1	2019.4	2.03	2.02
C76×22×6	ปีก	2018.6		2.02	
C102×29×6	เอว	1970.5	1947.0	1.98	1.95
C102×29×6	ปีก	1923.6		1.93	
C152×43×10	เอว	1889.5	1909.1	1.89	1.91
C152×43×10	ปีก	1928.6		1.93	
เฉลี่ยทั้งหมด		1958.5		1.96	

### ก.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

โดยทั่วไปคุณสมบัติของการดูดซึมน้ำ (water absorption) ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของวัสดุ การดูดซึมน้ำในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านกำลัง (strength properties) และความแข็ง (stiffness properties) ของวัสดุ CFRP (Pran and Barkatt, 1999) ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการผ่านจุดเยือกแข็งและการหลอมเหลว (freezing and thawing) และการทำลายด้วยสารเคมีที่ผสมอยู่ในน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ CFRP กล่าวคือ หากวัสดุ CFRP มีความสามารถในการดูดซึมน้ำและความชื้นสูง อาจมีโอกาที่วัสดุจะถูกทำลายโดยสาเหตุดังกล่าวได้ง่าย ส่งผลให้วัสดุมีความคงทนต่ำ ตลอดจนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุ CFRP โดยความสามารถการดูดซึมน้ำของวัสดุ CFRP เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ทำนายความคงทนของวัสดุ CFRP

ตัวอย่าง ทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP โดยมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าความยาว 76.2 mm กว้าง 25.4 mm และมีความหนาเท่ากับความหนาของวัสดุ (ASTM D570, 1998) ดังแสดงตัวอย่าง ในรูปที่ ก.7 วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D570-98 “Standard Test Method for Water Absorption of Plastics” จำนวนของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ ก.5



รูปที่ ก.7 ลักษณะตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ ก.5 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-WA-W-No.	เอว	4
C76-WA-F-No.	ปีก	4
C102-WA-W-No.	เอว	4
C102-WA-F-No.	ปีก	4
C152-WA-W-No.	เอว	4
C152-WA-F-No.	ปีก	4

ตารางที่ ก.6 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำและความชื้นของวัสดุ PFRP จากตารางพบว่าโดยรวมทุกขนาดหน้าตัดมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 0.46% เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการดูดซึมน้ำเฉลี่ยที่ได้กับข้อมูลของ Structural Shape ของบริษัท Bedford ที่กล่าวว่าชิ้นส่วน PFRP มีการดูดซึมน้ำสูงสุด 0.45% (Bedford, 2005) และข้อมูลของ Pultex Structural Profile 1500/1525 series ของบริษัท Creative Pultrusions ระบุว่ามีการดูดซึมน้ำสูงสุด 0.60% (Creative Pultrusions, 2004) ดังนั้นจากทดสอบพบว่าชิ้นส่วน PFRP ที่ใช้ในการศึกษามีค่าการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกับข้อมูลของทั้งสองบริษัท

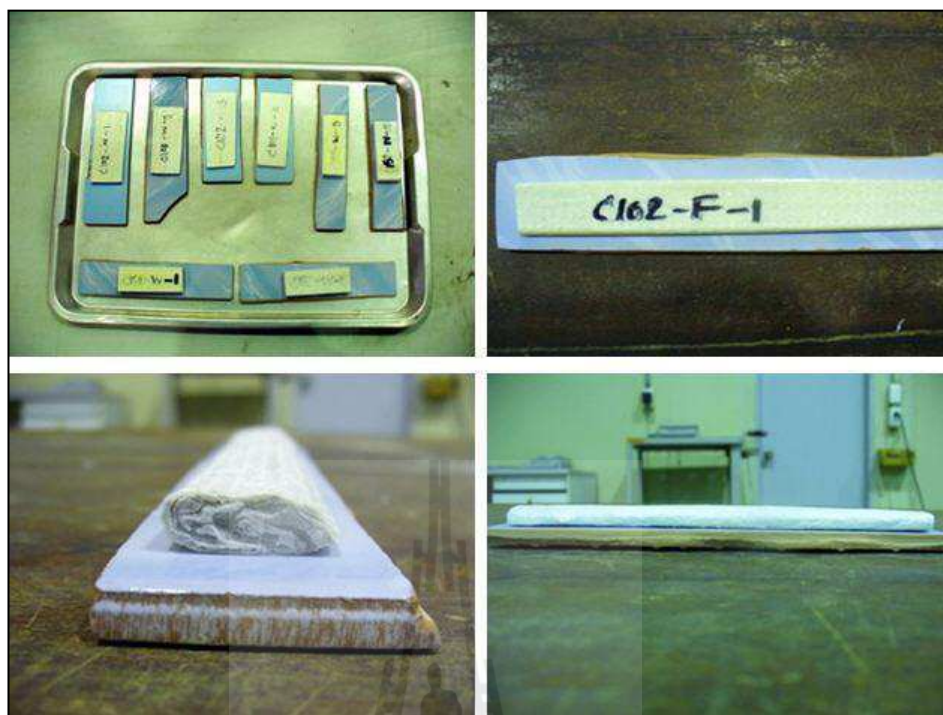
ตารางที่ ก.6 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำและความชื้น

ขนาดระบุ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (%)
C76×22×6	เอว	0.24
C76×22×6	ปีก	0.31
C102×29×6	เอว	0.48
C102×29×6	ปีก	0.68
C152×43×10	เอว	0.58
C152×43×10	ปีก	0.47
ค่าเฉลี่ยทั้งหมด		0.46

### ก.3.3 การทดสอบปริมาณขององค์ประกอบ

ปริมาณขององค์ประกอบมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ CFRP ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาปริมาณโดยน้ำหนักและโดยปริมาตรของเรซิน ไยแก้ว และช่องว่าง (void) รวมถึงลักษณะของการจัดวาง (alignment) ของใยแก้วที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ CFRP โดยผลการทดสอบสามารถนำไปใช้ทำนายความสามารถและทิศทางในการรับแรงของชิ้นส่วน CFRP โดยประมาณได้

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ CFRP โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้งหมดต้องผ่านการทดสอบหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (ASTM D3171, 1999) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.8 วิธีการทดสอบกระทำตามวิธีการ G (Matrix burn off in a muffle furnace) ในมาตรฐาน ASTM D3171-99 “Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials” ด้วยกระบวนการนี้ องค์ประกอบของเรซิน จะถูกแยกออกจากตัวอย่างทดสอบโดยการให้ความร้อนจากเตาเผา (furnace) ในขณะที่องค์ประกอบของเส้นใยแก้วยังคงอยู่เช่นเดิม จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้แสดงดังตารางที่ ก.7



รูปที่ ก.8 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

ตารางที่ ก.7 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-CO-F-No.	เอว	4
C76-CO-W-No.	ปีก	4
C102-CO-W-No.	เอว	4
C102-CO-F-No.	ปีก	4
C152-CO-W-No.	เอว	4
C152-CO-F-No.	ปีก	4

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาปริมาณของเรซิน ไยแก้ว และช่องว่างในวัสดุ FRP ได้แก่เตาอบ และเตาเผา ซึ่งสามารถรักษาความร้อนได้คงที่ที่อุณหภูมิ 70°C และ 565°C ตามลำดับ การทดสอบเริ่มต้นด้วยการ preheated ตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิกึ่งที่ประมาณ 70°C เพื่อกำจัดความชื้นภายในเนื้อวัสดุ ดังแสดง ในรูปที่ ก.9 จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนัก และนำไปเผาภายในเตาเผาที่อุณหภูมิกึ่งที่ประมาณ 565°C จนกระทั่งปริมาณเรซินถูกเผาจนหมด โดยขั้นตอนดังกล่าวใช้ระยะเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง (ASTM D3171, 2004) ดังแสดงในรูปที่ ก.10 จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่อไป



รูปที่ ก.9 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกอบด้วยอุณหภูมิ 70°C





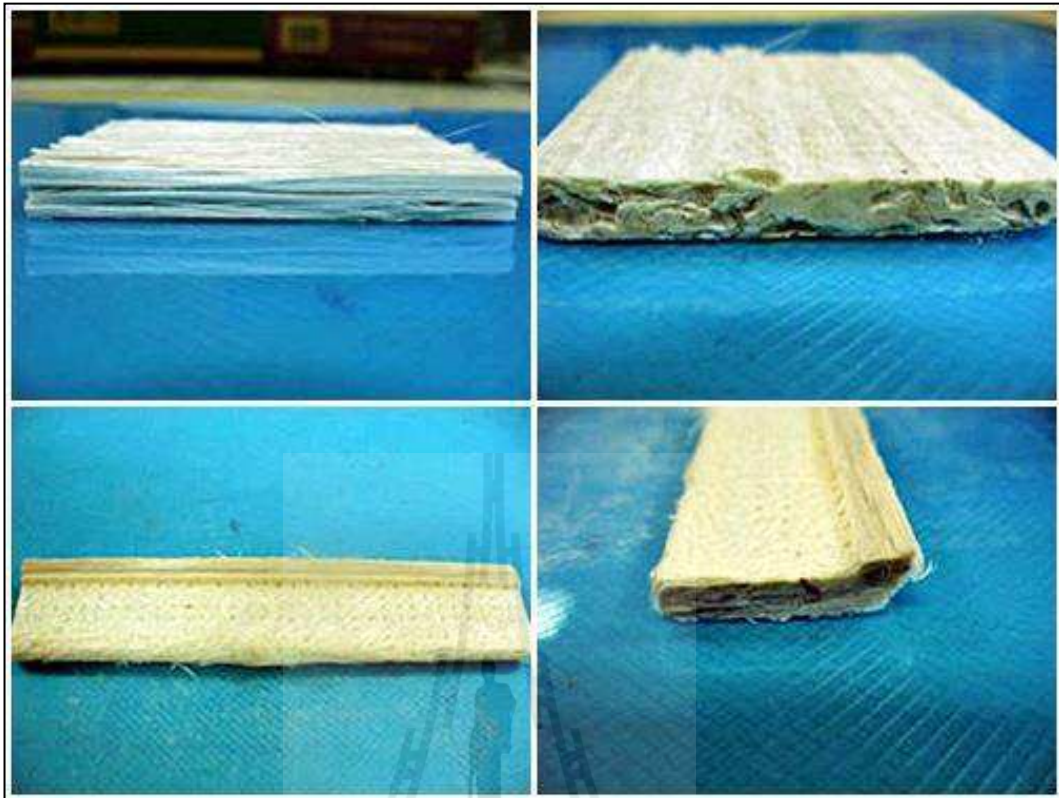
รูปที่ ก.10 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 565°C

ตารางที่ ก.8 แสดงผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าผลการทดสอบโดยเฉลี่ยวัสดุ FRP มีปริมาณของใยแก้วเท่ากับ 72.2% โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของเรซินเท่ากับ 27.8% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบที่ได้กับปริมาณของใยแก้วที่ใช้ผลิตวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงระหว่าง 45-75% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณใยแก้วของตัวอย่างที่ทดสอบได้มีค่าค่อนข้างมาก แต่อยู่ในช่วงที่กำหนด

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของหน้าตัด

ขนาดระบุ	บริเวณ	ปริมาณใยแก้วโดยน้ำหนัก (%)		ปริมาณเรซิน โดยน้ำหนัก (%)	
		เฉพาะบริเวณ	เฉพาะขนาด	เฉพาะบริเวณ	เฉพาะขนาด
C76×22×6	เอว	73.36	74.28	26.64	25.72
C76×22×6	ปีก	75.20		24.80	
C102×29×6	เอว	73.56	72.12	26.44	27.88
C102×29×6	ปีก	70.68		29.32	
C152×43×10	เอว	65.67	67.20	34.33	32.80
C152×43×10	ปีก	68.68		31.27	
เฉลี่ยทั้งหมด		72.20		27.80	

รูปที่ ก.11 ถึงรูปที่ ก.12 แสดงการเรียงตัวของใยแก้ว จากรูปพบว่าผิวภายนอกทั้งสองด้านของตัวอย่างเป็นแผ่นผิว (surface veil) ที่มีการวางตัวของใยแก้วโดยไม่มีทิศทางแบบสุ่มทิศทาง (random fiber non-woven filaments) ส่วนภายในมีกลุ่มของเส้นใยแก้ว (continuous strand rovings) เรียงตัวไปในทิศทางตามยาวของชิ้น ส่วนโดยไม่มีใยแก้วแบบแผ่น (glass fiber mat) อยู่ภายในชิ้นส่วน



รูปที่ ก.11 ลักษณะของส่วนเอวและปีกของวัสดุ FRP หลังจากการเผาเอาเรซินออก



รูปที่ ก.12 ลักษณะการวางตัวของใยแก้วและแผ่นผิวของชิ้นส่วน FRP

#### ก.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP

คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้าง กำลังของวัสดุ ซึ่งเป็นความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆ โดยไม่เกิดการวิบัติ นอกจากนั้น โครงสร้างที่ถูกรออกแบบต้องมีความแข็งแรงที่พอเพียงภายใต้แรงกระทำ โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากจนทำให้โครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามจุดประสงค์ของ โครงสร้าง ที่ได้ถูกรออกแบบไว้ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้าง การวิเคราะห์ทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุมีความสำคัญที่เท่าเทียมกัน โดยที่ทฤษฎีจะถูกนำมาใช้ในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางกลขององค์อาคาร แต่สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ออกแบบได้ ถ้าไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งจะได้มาจากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ FRP จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้ เปรียบเทียบกับวัสดุ FRP ที่ผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศ และนำค่าคุณสมบัติทางกล ที่ทดสอบได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงดัดของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ โดยสมการทางทฤษฎีและวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ต่อไป ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบถูกตัดออกจาก ชิ้นส่วนใหญ่ (full scale) ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล ดังแสดงใน รูปที่ ก.13 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ประกอบด้วย 5 การทดสอบ ได้แก่

- 1) การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย
- 2) การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย
- 3) การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย
- 4) การทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย
- 5) การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.13 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล

#### ก.4.1 การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

กำลังรับแรงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile strength) และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile modulus) เป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP (Shah, 2007) วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง (tensile modulus) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึง

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ FRP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D3039-06 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Composite Materials” จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจำนวน 60 ตัวอย่าง จะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ก.9

ASTM D3039 (2006) ได้กำหนดขนาดของตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP โดยมีความยาว 250 mm กว้าง 15 mm ความยาวของชิ้นส่วนยึดจับ (grip) 56 mm และความหนา มีค่าเท่ากับความหนาของชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ โดยมีทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย (fiber orientation) เท่ากับ 0° (unidirectional) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.14 สำหรับค่าความเครียดเชิงดึง (tensile strain) ตามแนวแกนของเส้นใย สามารถหาได้โดยการติดตามวัดความเครียด (strain gauge)

ตารางที่ ก.9 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

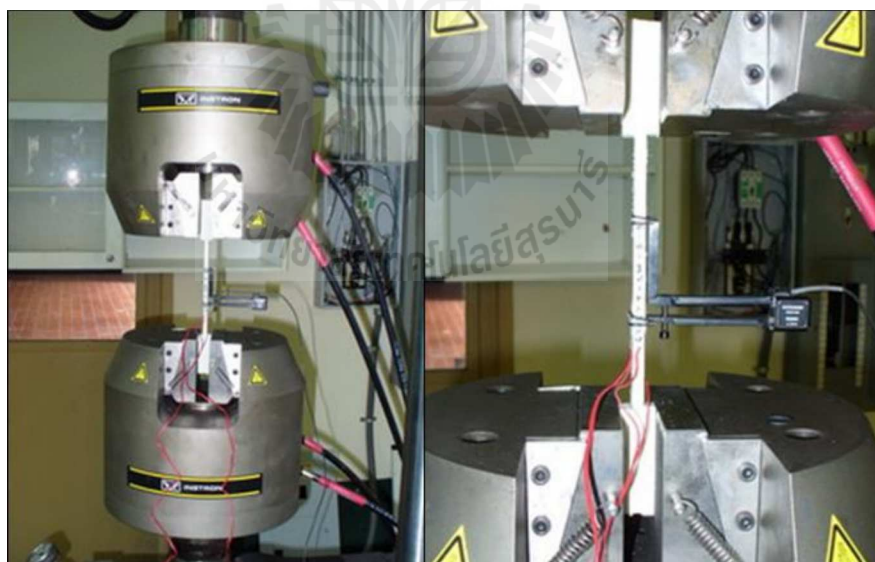
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ติดตั้งตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-TL-W-No.	เอว	10
C76-TL-F-No.	ปีก	10
C102-TL-W-No.	เอว	10
C102-TL-F-No.	ปีก	10
C152-TL-W-No.	เอว	10
C152-TL-F-No.	ปีก	10



รูปที่ ก.14 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

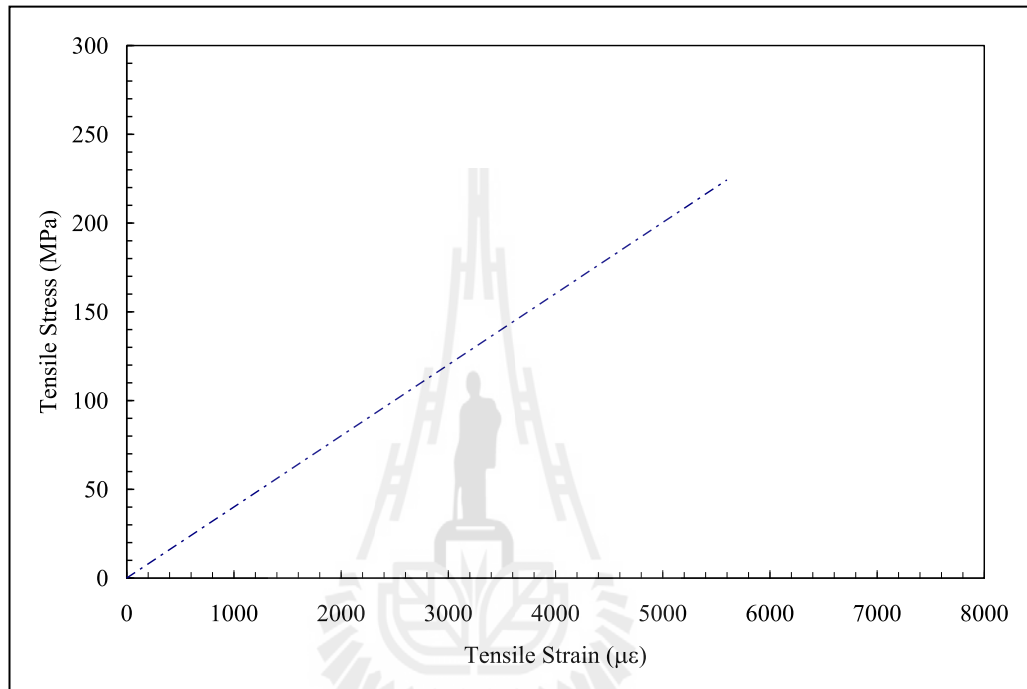
สำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN โดยชิ้นส่วนยึดจับ (grip) ต้องถูกบีบด้วยความดัน (pressure) ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเลื่อน (slip) ระหว่างหัวจับและชิ้นส่วนยึดจับ และหลีกเลี่ยงการวิบัติแบบอัดแตก (crushing failure) บริเวณชิ้นส่วนยึดจับ (ASTM D3039, 2006)

ในการทดสอบค่าความเครียดเชิงดึงถูกบันทึกโดย Extensometer และมาตรวัดความเครียดเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ โดย Extensometer ถูกติดตั้งบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ โดยมาตรวัดความเครียดยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ถูกติดตั้งแบบ back-to-back บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับ (crosshead) ด้วยอัตราคงที่ (constant rate) เท่ากับ 2 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D3039, 2006) รูปที่ ก.15 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย การบันทึกข้อมูลในการทดสอบใช้ Data Acquisition System (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 บันทึกค่าหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์



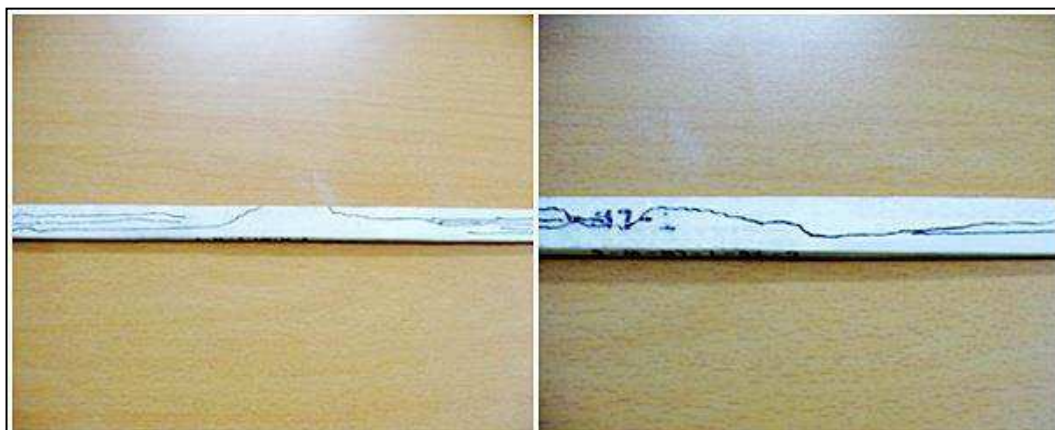
รูปที่ ก.15 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ ก.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะ ที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.17



รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย





รูปที่ ก.17 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP ดังแสดงในตารางที่ ก.10 พบว่าหน่วยแรงดึงประลัยของวัสดุ CFRP มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงของวัสดุ CFRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 2.05 เท่า การที่วัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูงกว่าของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากมีปริมาณใยแก้วมาก (72.2% โดยน้ำหนัก) และเส้นใยแก้วนั้นมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูงกว่าเรซินประมาณ 18 เท่า (Bank, 2006) ดังนั้นวัสดุ CFRP จึงมีแนวโน้มการมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูง

ตารางที่ ก.10 ผลทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงดึงประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย (MPa)	224.03	226.90
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย (GPa)	35.20	17.20
ความเครียดที่จุดวิบัติ (mm/mm)	0.0054	-

#### ก.4.2 การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย (longitudinal compression test) ปัญหาหลักที่พบบ่อยระหว่างการทดสอบ คือ ภายใต้อันตรึงกระทำตัวอย่างมักเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ตามทิศทางของเส้นใย (fiber direction) หรืออาจเกิดการวิบัติก่อนเวลาอันควร (premature failure) โดยมีลักษณะการวิบัติแบบ Localized brooming บริเวณส่วนปลายของตัวอย่างทดสอบ (Agarwal, Broutman, and Chandrashekara, 2006) ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว มาตรฐาน ASTM D3410-03 “Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading” จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยได้แก่กำลังรับแรงอัดสูงสุด (ultimate compressive strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกน (longitudinal compressive modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัด

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP รูปที่ ก.18 แสดงลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ก.11



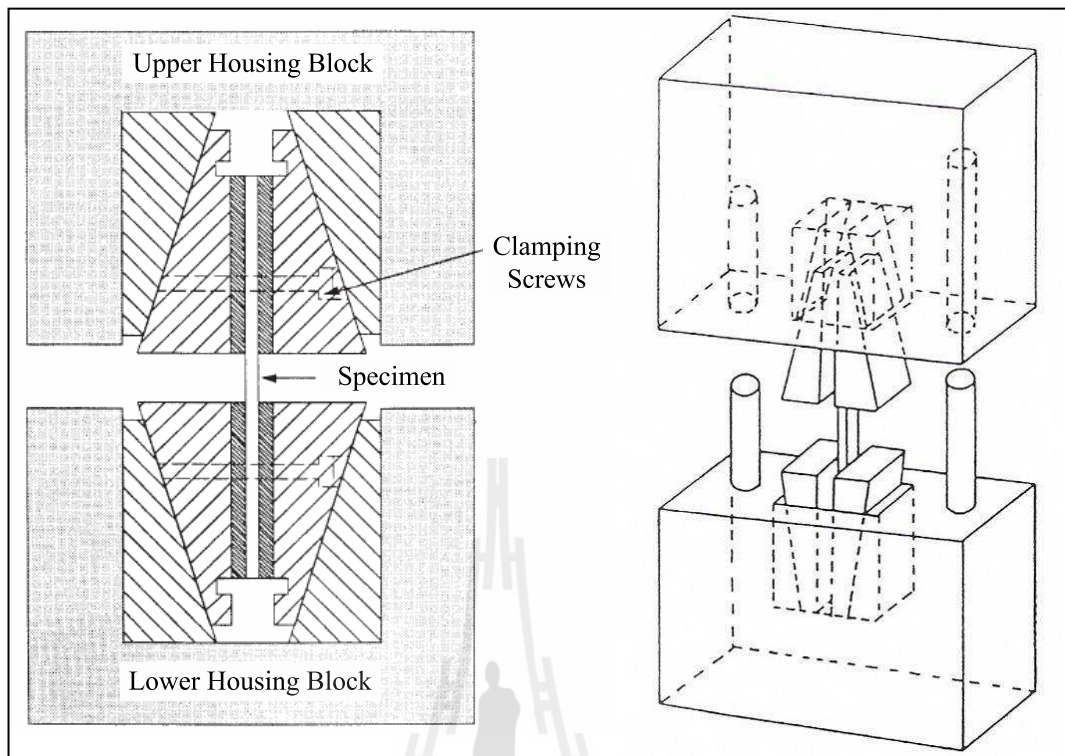
รูปที่ ก.18 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.11 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-CL-W-No.	เอว	10
C76-CL-F-No.	ปีก	10
C102-CL-W-No.	เอว	10
C102-CL-F-No.	ปีก	10
C152-CL-W-No.	เอว	10
C152-CL-F-No.	ปีก	10

Whitney, Daniel, and Pipes (1981) กล่าวว่า การติดตั้งและการจัดวางตำแหน่ง (alignment) ตัวอย่างทดสอบในแนวตั้งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุ ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ Test fixture สำหรับใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เพื่อลดการเยื้องศูนย์ในขั้นตอนการติดตั้ง ตลอดจนช่วยป้องกันการโก่งเดาะตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ โดยอุปกรณ์ Test fixture ที่นิยมใช้การทดสอบมากที่สุด คือ IITRI Test fixture ซึ่งถูกพัฒนาโดย Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) (Hofer and Rao, 1977) ดังแสดงในรูปที่ ก.19 และ รูปที่ ก.20 ซึ่งต่อมาภายหลังอุปกรณ์ Test fixture ดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐาน ASTM D3410-03

ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 1200 ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.5 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D3410, 2003) รูปที่ ก.21 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.19 รายละเอียดของ Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย  
(ASTM D3410, 2003; Agarwal, Broutman, and Chandrashekhara, 2006)

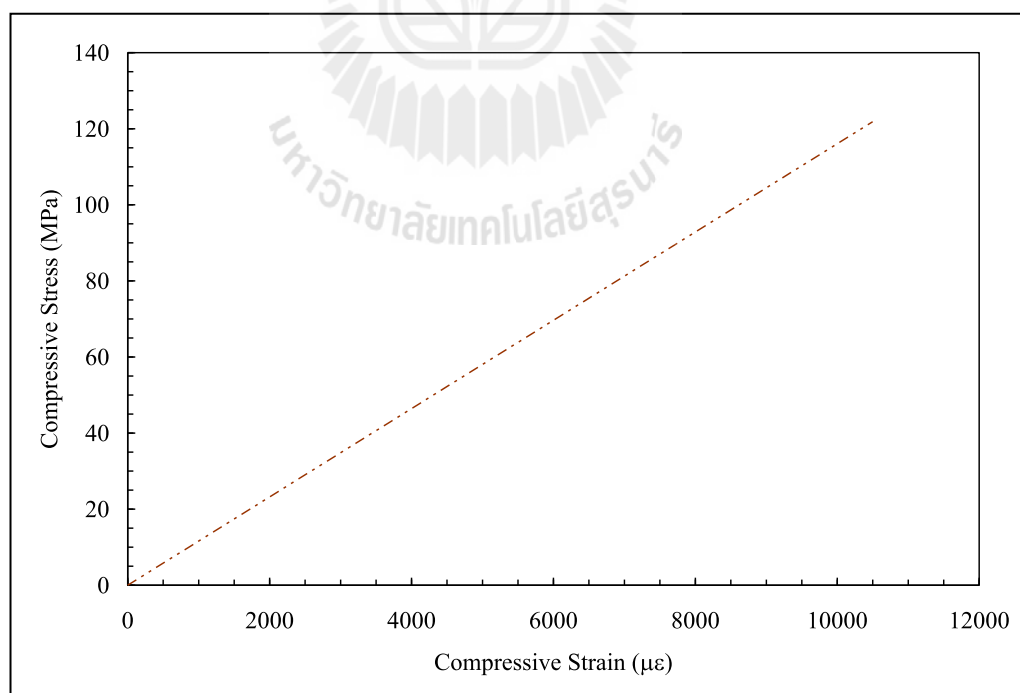


รูปที่ ก.20 Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

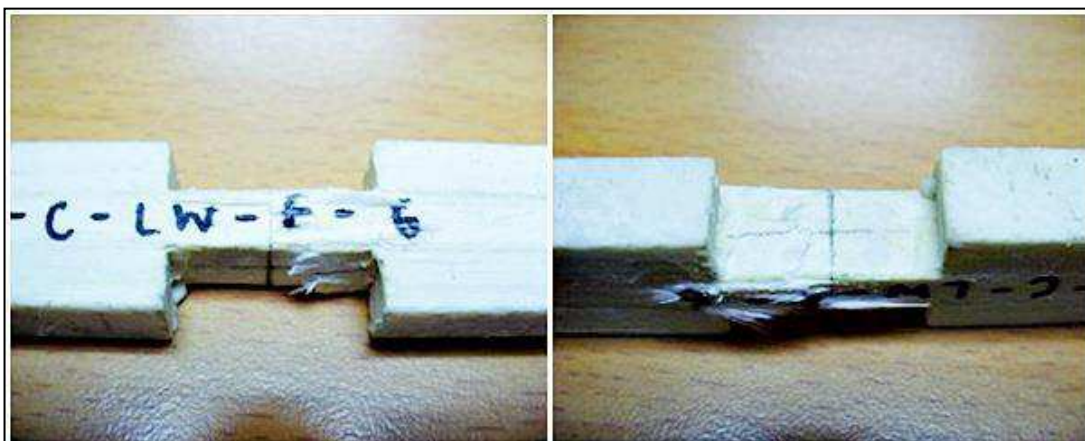


รูปที่ ก.21 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ ก.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) ที่ความเครียดประมาณ  $10,000 \mu\epsilon$  และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.23



รูปที่ ก.22 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.23 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ FRFP ดังแสดงในตารางที่ ก.12 พบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRFP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าวัสดุ FRFP ของบริษัท Creative Pultrusion เท่ากับ 59.91% และ 1.96 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ FRFP ที่ใช้ในงานวิจัยมีหน่วยแรงอัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยต่ำกว่าวัสดุของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เส้นใยแก้ว จะเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ส่งผลให้เรซินเป็นวัสดุหลักในการรับแรงอัด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมของเรซินที่ใช้ในการผลิตด้อยคุณภาพ

ตารางที่ ก.12 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRFP

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	121.86 MPa	226.90 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	10.51 GPa	20.60 GPa

### ก.4.3 การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย (transverse compression test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (ultimate compressive strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวาง (transverse compressive modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

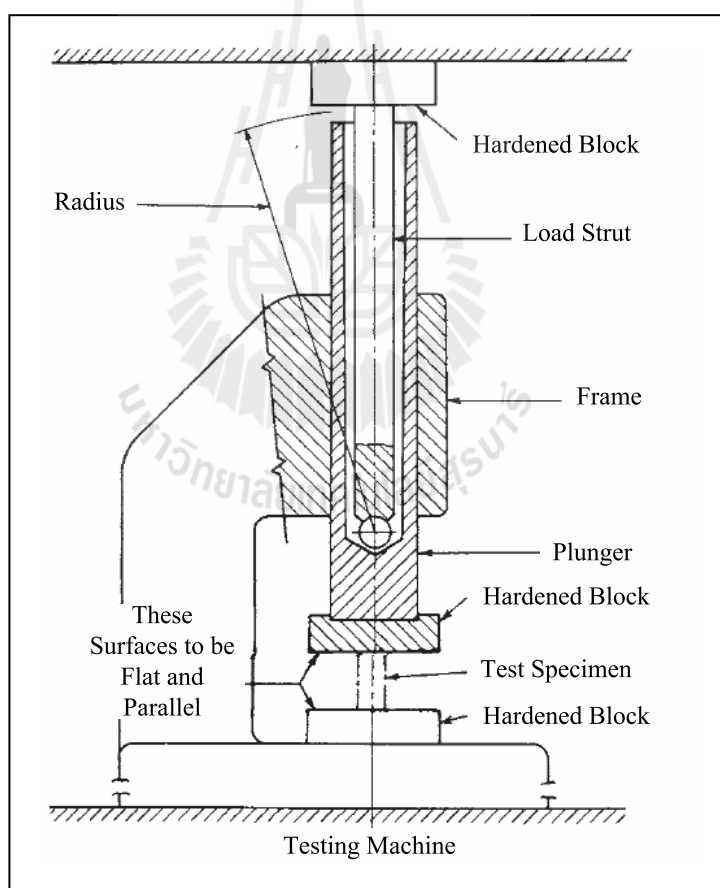
ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวขวางของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D695-02 “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics” จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ก.13

ตารางที่ ก.13 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-CT-W-No.	เอว	10
C76-CT-F-No.	ปีก	10
C102-CT-W-No.	เอว	10
C102-CT-F-No.	ปีก	10
C152-CT-W-No.	เอว	10
C152-CT-F-No.	ปีก	10

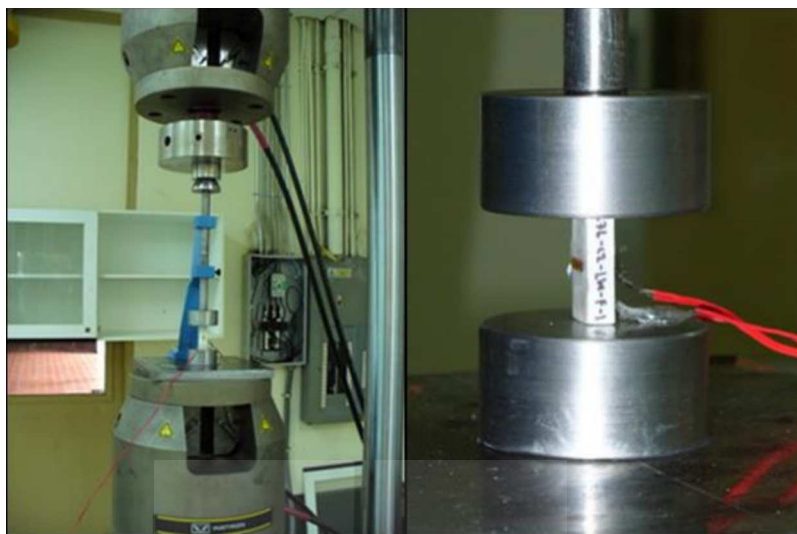
มาตรฐาน ASTM D695 (2002) ได้กำหนดขนาดตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย โดยมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีขนาด  $12.7 \times 25.4$  mm สำหรับความหนา 6 mm และขนาด  $12.7 \times 40.0$  mm สำหรับความหนา 10 mm สำหรับความค่าความเครียดเชิงอัด (compressive strain) และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย สามารถหาได้โดยการติดตามวัดความเครียด ยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ซึ่งถูกคิดแบบ back-to-back บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ โดยค่าที่วัดได้เป็นค่าความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางและแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยแรงกดอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN ค่าหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดถูกบันทึกโดยใช้อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย Data logger ยี่ห้อ YOKOGAWA-DS600 และ Data acquisition (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 ตัวอย่างทดสอบถูกติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงอัด (compression tool) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.24 ตัวอย่างถูกวางระหว่างจุกรองรับที่มีลักษณะแบบผิวเรียบ โดยให้ผิวของตัวอย่างทดสอบขนานกับผิวของจุกรองรับ และให้ทิศทางของแรงกระทำตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.3 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D695, 2002) รูปที่ ก.25 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย



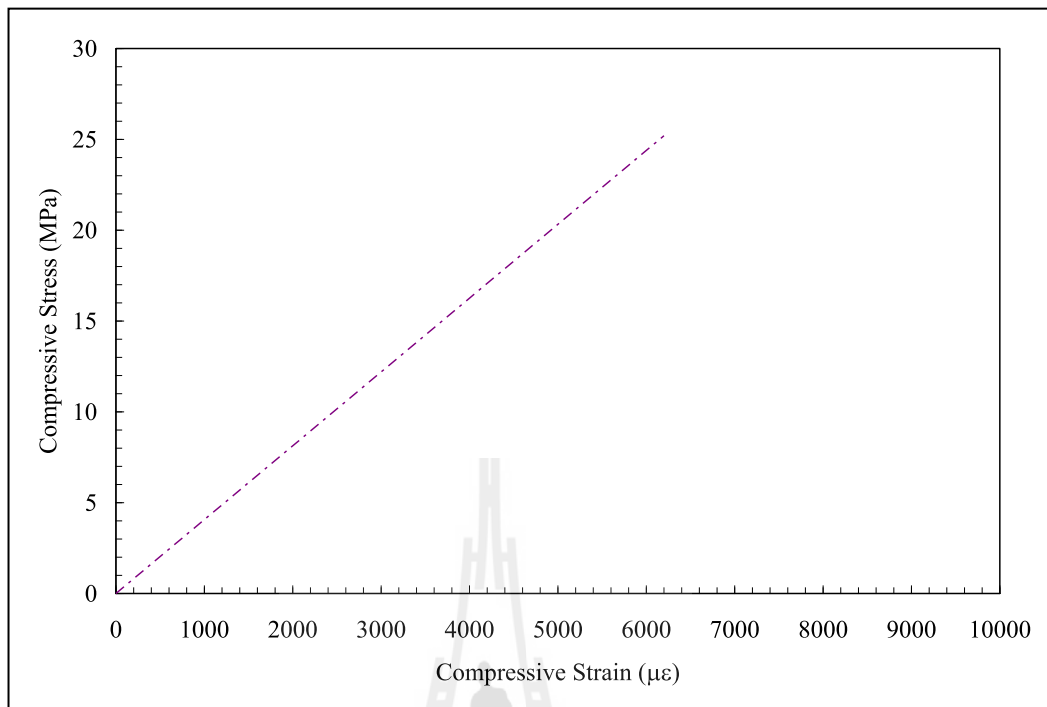
รูปที่ ก.24 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย  
(ASTM D695, 2002)





รูปที่ ก.25 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

รูปที่ ก.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ FRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ ก.27 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย จากรูปพบว่าตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบการแตกหักโดยฉับพลันของเรซินและการเลื่อนของเส้นใย



รูปที่ ก.26 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย



รูปที่ ก.27 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

ตารางที่ ก.14 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าของวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, อยู่ 79.55% และ 2.77 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ CFRP มีหน่วยแรงอัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยต่ำ เนื่องจากภายใต้แรงอัดตั้งฉากเส้นใยเรซินเป็นตัวหลักในการรับแรงกระทำ ส่งผลให้เส้นใยแก้วเกิดการเลื่อนได้ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ตามทิศทางที่รับแรงกระทำ การรับแรงในทิศทางขนานเส้นใยมีกำลังและความแกร่งมากกว่าการรับแรงในทิศทางตั้งฉากเส้นใย แสดงว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเส้นใยแก้วหรือเป็นวัสดุออร์ทोटโรปีค (orthotropic material)

ตารางที่ ก.14 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงอัดประลัยตามแนวขวางของเส้นใยเฉลี่ย	23.19 MPa	113.40 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยเฉลี่ย	2.49 GPa	6.90 GPa

#### ก.4.4 การทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย (longitudinal flexural test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงดัดสูงสุด (ultimate flexural strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (flexural modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกน (longitudinal flexural modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงและความเครียดเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ FRP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D790-03 “Standard Test Method for Flexural of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials” ASTM D790 (2003) ไม่ได้ระบุขนาดของตัวอย่างทดสอบอย่าง ชัดเจน หากแต่กล่าวว่า ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (support span) ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 16 เท่าของความลึก (หนา) ของตัวอย่างทดสอบ อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสเชิงดัด มาตรฐานดังกล่าวได้แนะนำให้ตัวอย่างทดสอบควรมีอัตราส่วนระหว่างจุดรองรับต่อความลึก (span-to-depth ratio) เท่ากับ 60:1 เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงเฉือน (shear effect) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ รูปที่ ก.28 แสดงลักษณะตัวอย่าง สำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่าง จะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ก.15

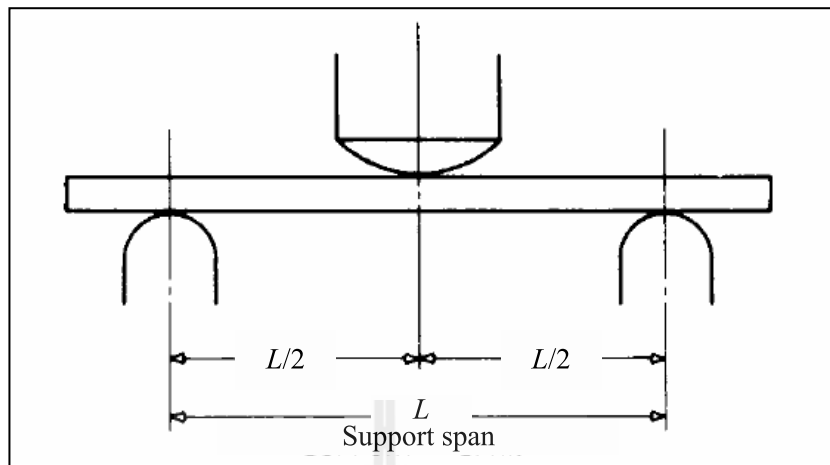


รูปที่ ก.28 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.15 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-FL-W-No.	เอว	10
C76-FL-F-No.	ปีก	10
C102-FL-W-No.	เอว	10
C102-FL-F-No.	ปีก	10
C152-FL-W-No.	เอว	10
C152-FL-F-No.	ปีก	10

สำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยแรงกดอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN การทดสอบเป็นการทดสอบแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) โดยมีแรงกระทำเป็นจุดบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ และมีจุดรองรับแบบง่าย ASTM D790 (2003) ได้ระบุว่า สำหรับการทดสอบแรงดัด จุดรองรับ และ loading nose จำเป็นต้องมีพื้นผิวลักษณะรูปทรงกระบอก (cylindrical surface) เพื่อลดผลกระทบของหน่วยแรงเข้มข้น (stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดรองรับและหัวกด ดังแสดงในรูปที่ ก.29 ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวกดที่มีอัตราความเครียดคงที่ (constant strain rate) เท่ากับ 0.1 mm/mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D790, 2003) รูปที่ ก.30 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

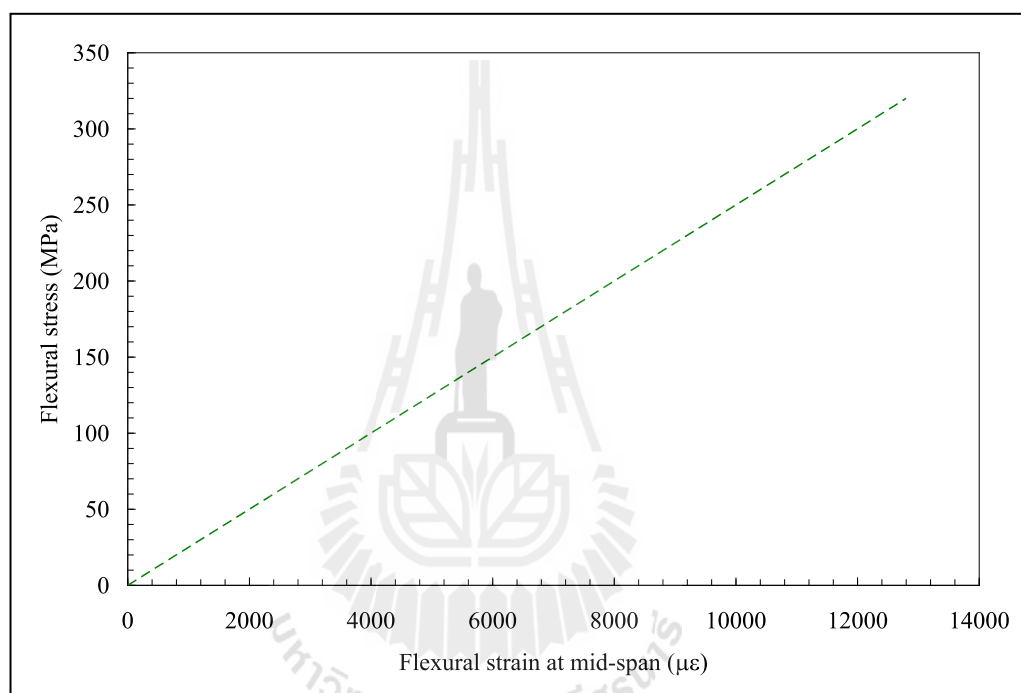


รูปที่ ก.29 ลักษณะจุดรองรับและ Loading nose สำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D790, 2003)

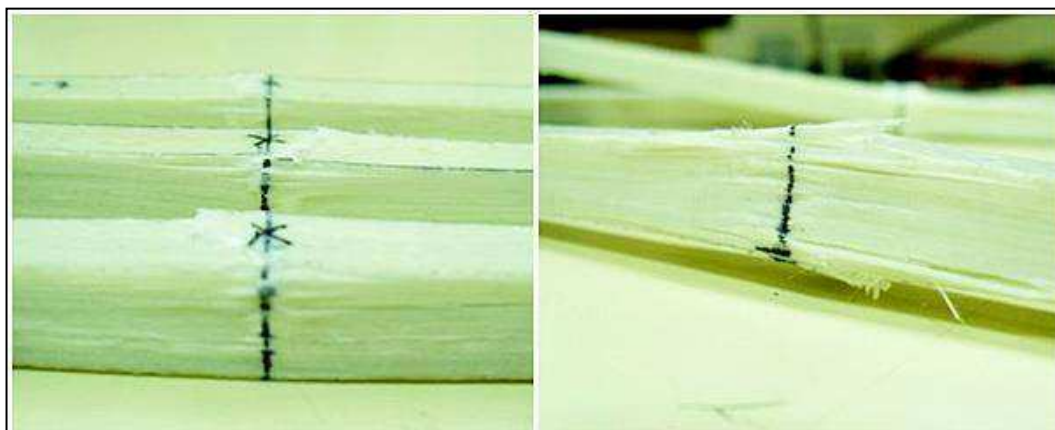


รูปที่ ก.30 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ ก.31 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ ก.32 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างเริ่มต้นจากการวิบัติของเรซิน จากนั้นจึงเกิดการขาดออกของเส้นใยแก้วบริเวณที่รับแรงคดของตัวอย่างทดสอบในทิศทางขนานกับเส้นใยแก้ว การวิบัติเริ่มจากผิวบนอกของตัวอย่างที่มีหน่วยแรงคดสูงสุด



รูปที่ ก.31 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.32 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.16 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงคัตและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงคัตประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตตามแนวแกนของเส้นใยสำหรับวัสดุ CFRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าของวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 104% และ 2.82 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ CFRP มีหน่วยแรงคัตและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตตามแนวแกนของเส้นใยสูง เนื่องจากวัสดุ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัยมีปริมาณเส้นใยแก้วสูง ดังนั้นภายใต้แรงคัตเส้นใยแก้วดังกล่าวทำหน้าที่รับหน่วยแรงคัตและแรงคัตเป็นหลักส่งผลให้กำลังวัสดุที่ทดสอบได้มีค่าสูง

ตารางที่ ก.16 ผลทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย

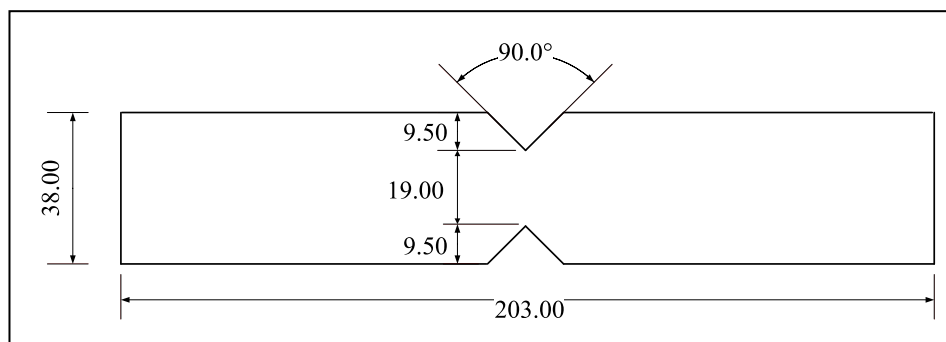
คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงคัตประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	509.73 MPa	226.90 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	31.07 GPa	11.00 GPa



#### ก.4.5 การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนแบบ V-notch (longitudinal V-notch shear test) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Iosipescu (1967) เพื่อใช้ในการทดสอบลักษณะเฉพาะของแรงเฉือนที่กระทำต่อहेลักรูปพรรณ และเนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีลักษณะที่ไม่ซับซ้อน และการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับชุดทดสอบ (test fixture) ทำได้โดยง่าย ตลอดจนผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้องเพียงพอ ต่อมาจึงได้มีนักวิจัยหลายท่าน อาทิเช่น Adam and Walrath (1982); Walrath and Adam (1983); Spigel, Prabhakaran, and Sawyer (1987); Adam and Walrath (1987); Bank (1989b) ได้นำวิธีการทดสอบดังกล่าวมาทำการพัฒนาและประยุกต์ใช้กับวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย พบว่าผลการทดสอบแรงเฉือนแบบ V-notch ที่ได้มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี ต่อมาภายหลัง ASTM ได้นำรูปแบบของการทดสอบดังกล่าวตีพิมพ์เผยแพร่และออกเป็นมาตรฐาน ASTM D5379 (2005)

การทดสอบแรงเฉือนแบบ V-notch มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (ultimate shear strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเฉือน (shear modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเฉือนตามแนวแกน (longitudinal shear modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเฉือน วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D5379-05 “Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method” ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP และบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบทำการตัดแต่ละด้านของขอบโดยทำมุม 90° ดังแสดงรายละเอียดของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ ก.33 จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่าง จะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงดังตารางที่ ก.17

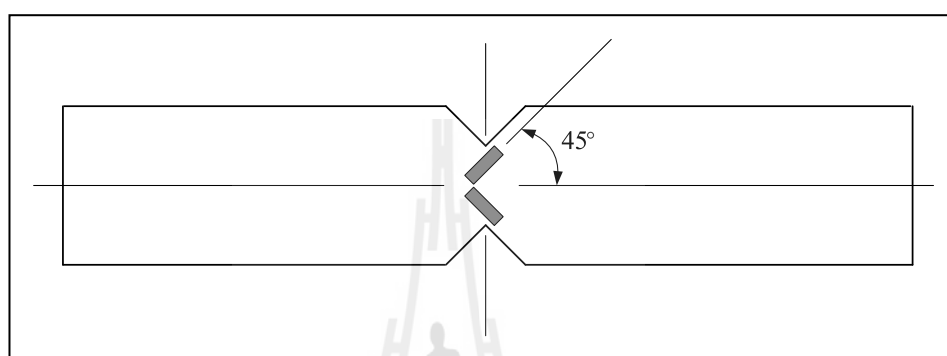


รูปที่ ก.33 รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย  
(ASTM D5379, 2005)

ตารางที่ ก.17 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

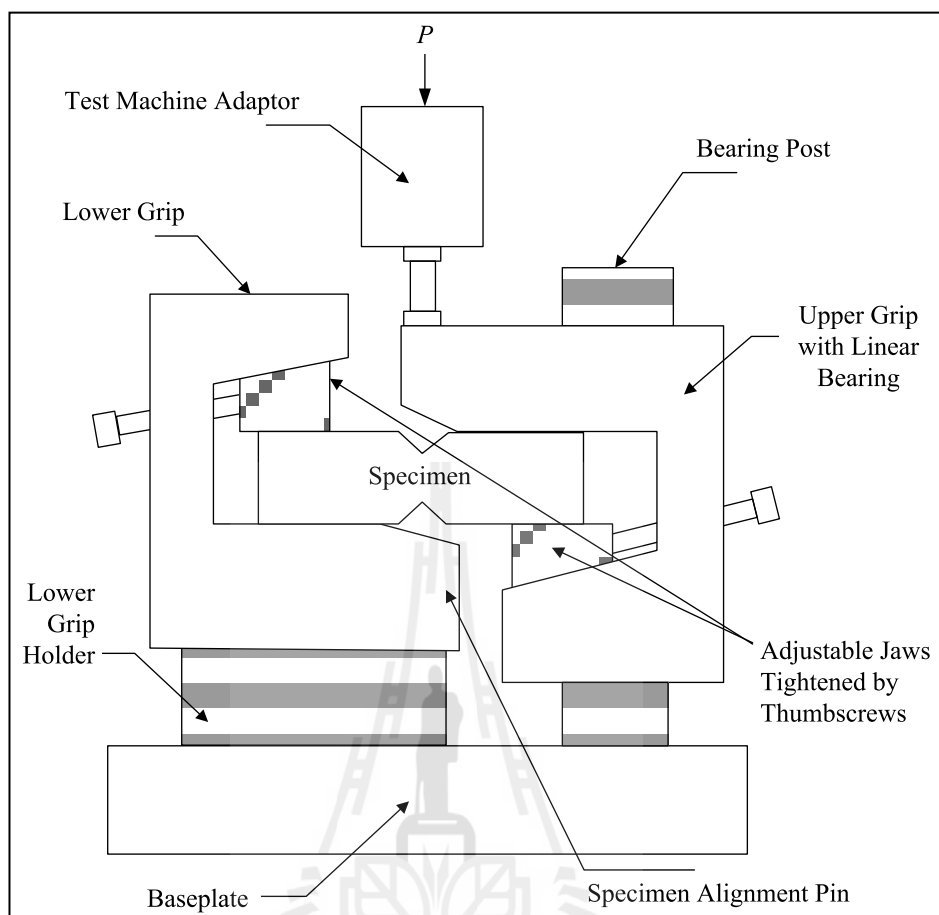
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-SL-W-No	เอว	10
C76-SL-F-No.	ปีก	10
C102-SL-W-No.	เอว	10
C102-SL-F-No.	ปีก	10
C152-SL-W-No.	เอว	10
C152-SL-F-No.	ปีก	10

สำหรับการหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ ได้ทำการติดมาตรวัดความเครียดยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างบริเวณรอยบาก (notch) โดยทำมุมกับแนวแกนของเส้นใยเท่ากับ  $\pm 45^\circ$  (Hodgkinson, 2000) รูปที่ ก.34 แสดงตำแหน่งและทิศทางการติดตั้งมาตรวัดความเครียด และการติดตั้งมาตรวัดความเครียดสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย



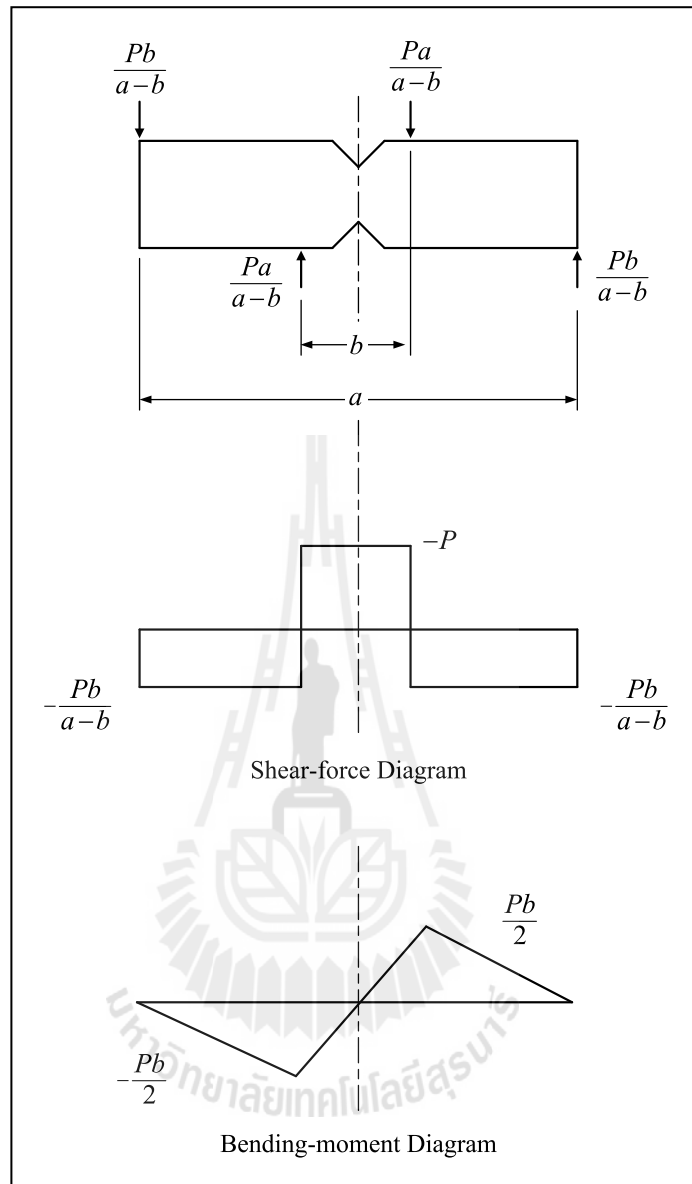
รูปที่ ก.34 ตำแหน่งและทิศทางการติดตั้งมาตรวัดความเครียดสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D5379, 2005)

สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบถูกกระทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 1200 kN ค่าหน่วยแรงและค่าความเครียดเชิงเฉือน ถูกบันทึกโดยใช้อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง Data logger ยี่ห้อ YOKOGAWA-DS600 และ Data acquisition (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนแบบ V-notch (V-notched shear test fixture) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.35 ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.3 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D695, 2002)



รูปที่ ก.35 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D5379, 2005)

รูปที่ ก.36 แสดงแผนผังวัตถุอิสระ (free body diagram) แผนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ (shear-bending moment diagram) สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปเห็นได้ว่าบริเวณกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างจะถูกกระทำโดยแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว (pure shear) ทำให้ในการทดสอบดังกล่าวสามารถหาค่าแรงเฉือนสูงสุดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนได้โดยปราศจากผลกระทบเนื่องจากแรงดัด (bending effect) (Agarwal et al., 2006) รูปที่ ก.37 แสดงการติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

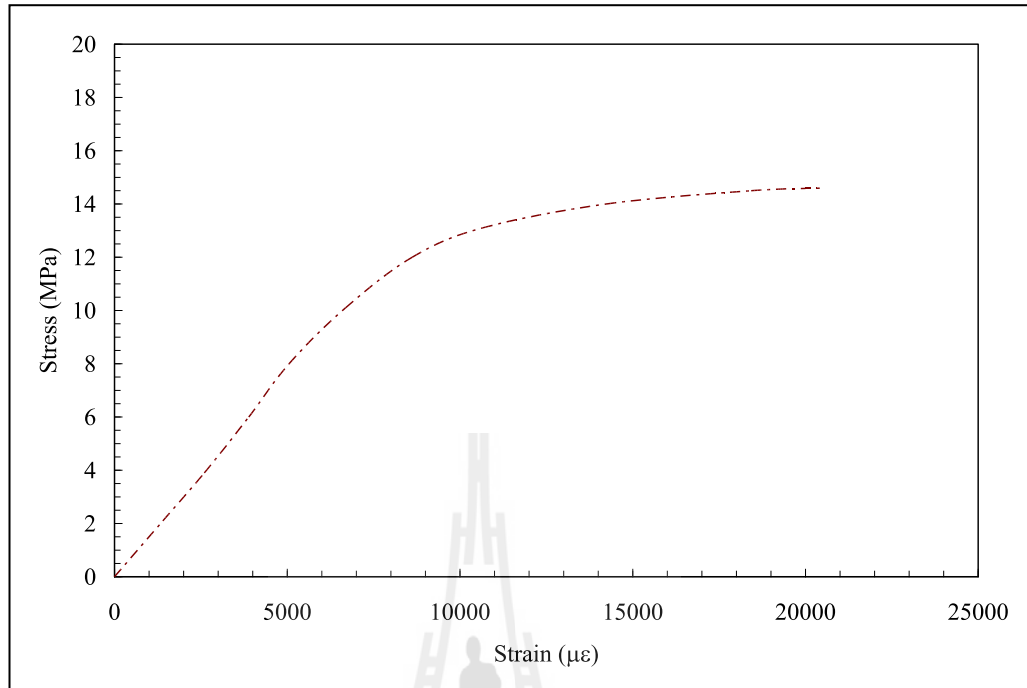


รูปที่ ก.36 แผนผังวัตถุอิสระของแรงเฉือนและ โมเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (Agarwal et al., 2006)

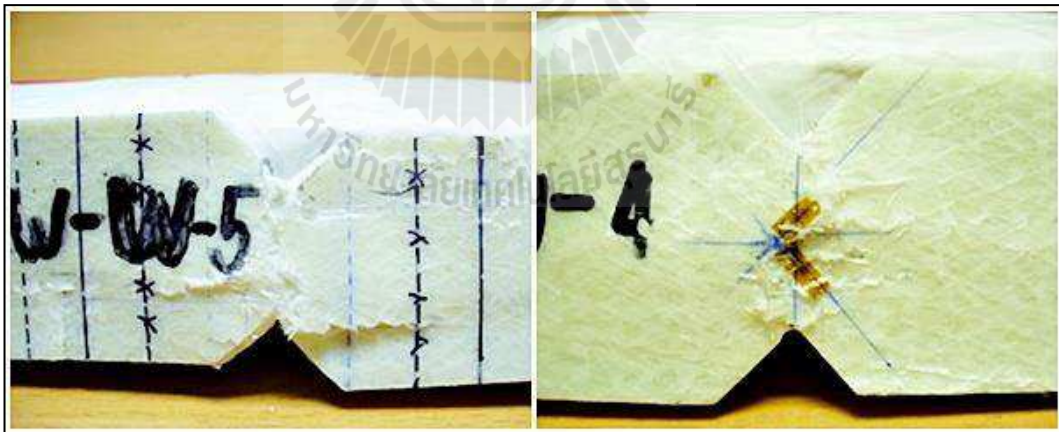


รูปที่ ก.37 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ ก.38 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าในช่วงแรก พฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงจนใกล้ถึงหน่วยแรงเฉือนสูงสุด จากนั้นช่วงที่สอง พฤติกรรมของตัวอย่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ หน่วยแรงเฉือนของวัสดุมีค่าลดลงแต่ตัวอย่างยังสามารถรับแรงต่อไปได้ หรือหน่วยแรงเฉือนของวัสดุมีค่าคงที่ โดยความเครียดที่บันทึกได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมาตรฐานความเครียดเกิดการหลุดร่อน การตรวจสอบลักษณะวิบัติของตัวอย่างใช้การสังเกตขณะทดสอบร่วมกับการเปลี่ยนแปลงโดยฉับพลันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงเฉือน วัสดุเหนียวบางประเภทอาจไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือนเพียงอย่างเดียวแต่อาจเกิดการวิบัติหลายแบบร่วมกัน (ASTM D5379-05, 2005) รูปที่ ก.39 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าการวิบัติเริ่มต้นจากการแตกของเรซินตามทิศทางขนานกับเส้นใยแก้วบริเวณที่บากเป็นรูปตัววี (v-notched) จากนั้นรอยแตกจะเคลื่อนเข้าใกล้กับบริเวณจุดรองรับ ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเลื่อนออกจากกันในแนวตั้งตามแนวบากรูปตัววี



รูปที่ ก.38 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.39 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงเครียดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.18 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและ โมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเคลือบของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่า โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 0.75 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการรับแรงเฉือน โดยวัสดุ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัย มีปริมาณของสัดส่วนเรซินที่ต่ำ (27.8%) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion

ตารางที่ ก.18 ผลทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion (Full section)
หน่วยแรงเฉือนสูงสุดตามแนวแกนของเส้นใยเคลือบ	37.27 MPa	-
โมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเคลือบ	2.18 GPa	2.9 GPa





ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักษดา ชำรงวุฒิ (2556). พฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชั้นหน้าตัดรูปรางน้ำ. วิศวกรรมสาร ม.ข. (Waiting for accepted)

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักษดา ชำรงวุฒิ (2555). AN EXPERIMENTAL STUDY ON PFRP BUILT-UP COLUMNS WITH DOUBLE C-SECTIONS UNDER AXIAL COMPRESSION. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17. โรงแรมเซ็นทาราแอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์, อุตรธานี, 9-11 พฤษภาคม 2555, หน้า STR-034. (CD-Rom Format)

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักษดา ชำรงวุฒิ (2556). การทดสอบชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18. โรงแรมดิเอ็มเพรส, เชียงใหม่, 8-10 พฤษภาคม 2556, รหัสบทความ STR-060. (Waiting for accepted)



KKU Engineering Journal

http://www.en.kku.ac.th/enjournal/ky

พฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชิ้นหน้าตัดรูปรางน้ำ

STRUCTURAL BEHAVIORS OF PFRP COMPRESSION MEMBERS HAVING C-SECTIONS

ชานนท์ ชัตวิวัฒน์<sup>1)</sup> สิทธิชัย แสงอาทิตย์<sup>2)</sup> และ จักษดา อ่างวงวุฒิ<sup>3)</sup>Chanon Chatwiwat,<sup>1)</sup> Sittichai Seangathit,<sup>2)</sup> and Jaksada Thumrongvut<sup>3)</sup><sup>1,2)</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000<sup>3)</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Received November

Accepted August

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชิ้นหน้าตัดรูปรางน้ำคู่รองรับแบบหมุดภายในแนวแกน โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนรับแรงอัด และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบของ ASCE และ AISI-LRFD ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เป็นชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ประกอบขึ้นจากพัลทูดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชิ้นหน้าตัดรูปรางน้ำ โดยมี 3 ขนาดหน้าตัดได้แก่ 76×22×6 mm 102×29×6 mm และ 152×43×10 mm จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 57 ตัวอย่าง โดยมีค่าอัตราส่วนความขะดูตอยู่ในช่วง 21.2 ถึง 187.3 จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบแบบสั้นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงหน่วยแรงอัดประลัย (ultimate compressive stress) ซึ่งแตกต่างกับตัวอย่างทดสอบแบบยาวที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 80-90% ของหน่วยแรงโก่งเคาะวิกฤติ (critical buckling stress) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการทางออกแบบทั้งสอง พบว่า สมการออกแบบทั้งสองทำนายหน่วยแรงโก่งเคาะวิกฤติของชิ้นส่วนรับแรงอัดได้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คำสำคัญ : เตา พัลทูดชิ้น 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 and to compare the

<sup>1)</sup>สิทธิชัย แสงอาทิตย์. Tel.: 0-816-727-050

Email address: sitchai@sut.ac.th.

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 57 specimens with slenderness ratio ranging from 21.2 to 187.3 were tested. For short compression members, the behaviors are linear up to the crushing failure load. For long compression members, the linear elastic responses are in the range of 80-90% of the buckling load. 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, PFRP, Double C-section, Axial compression



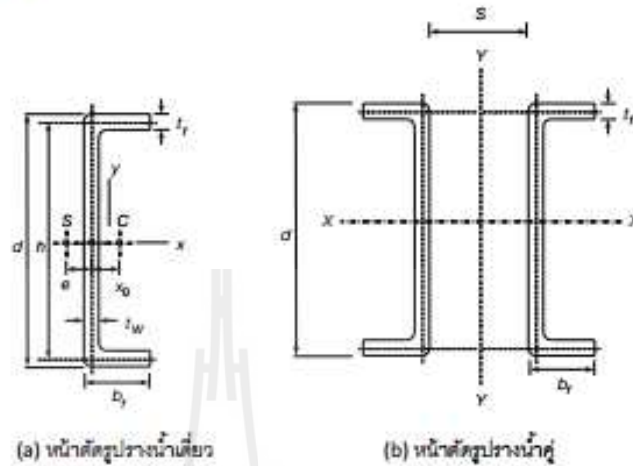
ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1)

## 1. บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบถักทอ (pulltruded fiber-reinforced plastic หรือ PFRP) คือ วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยซึ่งผลิตโดยกระบวนการผลิตแบบ Pulltrusion [1] โดยในช่วงกว่าสามสิบปีที่ผ่านมา วัสดุนี้นี้ถูกนำมาใช้ในต่างประเทศมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา สำหรับในประเทศไทย วัสดุนี้นี้เริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้น โดยมีบริษัทที่ผลิตวัสดุ PFRP รายในเชิงพาณิชย์ เช่น บริษัท นีวีญ เอส เอ็ม จำกัด จังหวัดนครปฐม เป็นต้น วัสดุ PFRP มักถูกผลิตให้มีหน้าตัดและรูปร่าง เช่นเดียวกับเหล็กประเภทอื่น เช่น หน้าตัดรูปตัวไอ (I-shapes) หน้าตัดฉาก (angles) และหน้าตัดรูปร่างน้ำ (channel) เป็นต้น [2-4] เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PFRP กับวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในทางวิศวกรรมโยธา เช่น เหล็กและอลูมิเนียมแล้ว พบว่า วัสดุ PFRP มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง [5] มีความต้านทานการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี [6] และมีกรรมวิธีการผลิตให้เข้ากับงานที่ต้องการและติดตั้งได้ง่าย [7] เป็นต้น จากสมบัติเด่นดังกล่าว วัสดุนี้นี้จึงถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างภายใต้สภาวะแวดล้อมและสารเคมีและมีน้ำหนักเบาเป็นหลัก เช่น โครงสร้างของหอทำความเย็น (cooling tower) สะพานในพื้นที่ทุรกันดาร โครงสร้างทางเดินและบันไดในโรงบำบัดน้ำเสีย (water treatment plant)

เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุ PFRP มีความแตกต่างกันตามผู้ผลิตทำให้วิศวกรผู้ออกแบบยังคงประสบปัญหาการขาดแคลนมาตรฐานการออกแบบ (design code) ที่น่าเชื่อถือ โดยปัจจุบัน พื้นฐานการออกแบบโครงสร้างวัสดุ PFRP ยังคงอ้างอิงมาตรฐานของ ASCE Structural Plastic Design Manual [8] ที่ใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1964 และในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีในการผลิตได้ถูกพัฒนาอย่างมาก ดังนั้น วิศวกรจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมและสมบัติต่างๆ ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุ PFRP ภายใต้แรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยการศึกษาและวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดที่ผลิตจากวัสดุ PFRP (PFRP compression member) และมีความระมัดระวัง (slender) มาก เช่น โครงข้อหมุนของสะพานขนาดเล็กและระบบค้ำยันของโครงเฟรม เป็นต้น โดยมักถูกออกแบบโดยใช้ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำเดี่ยวและคู่ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากหน้าตัดดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ได้ง่ายโดยใช้สลักเกลียว (bolt) ได้ง่าย ในกรณีดังกล่าว ASCE Structural Plastic Design Manual กำหนดให้ใช้สมการสำหรับการหาค่าแรงวิกฤติ (critical load) ของชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดที่มีจุดรองรับแบบหมุนในรูปแบบของสมการของ



รูปที่ 1 ลักษณะหน้าตัดรูปร่างเดี่ยวและรางน้ำคู่

Euler ตามสมการที่ (1) และในการออกแบบกำหนดให้ส่วนความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 3.0 โดยที่  $E_L$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคด (flexural modulus of elasticity) ที่ได้จากการทดสอบแรงคดของหน้าตัด (full-section flexural test) และ  $K$  คือ แฟกเตอร์ความยาวประสิทธิผล (effective length factor) สำหรับจุดรองรับแบบต่าง ๆ ซึ่งใช้ค่าเดียวกับ การออกแบบเหล็กรูปพรรณ

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

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคู่มือออกแบบของ ASCE อยู่ในพื้นฐานของ Working Stress Design (WSD)

ซึ่งค่อนข้างล้าสมัยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นฐานการ ออกแบบ Load Resistant Factor Design (LRFD) ที่ ใช้การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดย มาตรฐานการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณที่ได้รับการยอมรับมากมาตรฐานหนึ่งสำหรับ เหล็กรางน้ำคู่คือ AISC-LRFD section E2 [9] ซึ่ง กำหนดให้สมการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณหน้าตัดรูปร่างคู่ภายใต้แรงอัดอยู่ในรูป

$$P_n = \phi P_n = \phi \sigma_c A_g \quad (2)$$

เมื่อ  $P_n$  คือกำลังรับแรงอัดในแนวแกน (axial compression strength)

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1):

$\sigma_{cr}$  คือ หน่วยแรงยัดวิกฤติ (critical compressive stress)

สำหรับการโก่งคาะแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic buckling)

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

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

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

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

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

เมื่อ  $E$  คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity)

$KL$  คือ ความยาวประสิทธิผล (effective length)

$r$  คือ ค่าน้อยที่สุดของรัศมีจอยซ์ (radius of gyration) ของหน้าตัด

ในส่วนการศึกษาวิจัยพบว่า Lue et al. [10-11] ได้นำเสนอผลการทดสอบและประเมินผลทางทฤษฎี การโก่งคาะของเสาประกอบ (built-up column) เหล็กรูปพรรณ โดยพบว่า เสาเหล็กรูปพรรณหน้าตัด รูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงยัดวิกฤติกรรมแบบคอมโพสิต (composite) หรือแบบประกอบ (built-up) ตามมาตรฐานการออกแบบได้นั้น หน้าตัดทั้งสองต้องได้รับการยึดแน่นหนาเพียงพอ เช่น การเชื่อมไฟฟ้า หรือการใช้สลักเกลียวที่มีระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อที่เพียงพอ เพื่อให้จุดเชื่อมต่อมีความสามารถในการถ่ายเทแรงเชื่อมที่เกิดขึ้นหรือเกิด composite action ระหว่างกันในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปรางหรือเกิดการโก่งคาะ อย่างไรก็ดี หน้าตัดของชิ้นส่วน โครงสร้าง FRFP ในลักษณะดังกล่าวจะไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้ตามข้อกำหนดในมาตรฐานเนื่องจาก ข้อจำกัดในการยึดหน้าตัดเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้วิศวกร ไม่สามารถใช้สมการออกแบบทั้งของ ASCE และ AISC ได้โดยตรง ดังนั้น จากข้อจำกัดของการ ประกอบชิ้นส่วน FRFP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงวัตถุประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบ พฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของ ชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงยัด FRFP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ ภายใต้แรงยัดในแนวแกน และนำผลที่ได้จากการ ทดสอบเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ ASCE และ AISC-LRFD เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของ หน้าตัดของชิ้นส่วน FRFP ที่ใช้ในงานวิจัยกับเหล็ก

ENGINEERING JOURNAL, 2012; 39(1):

รูปพรรณ และเพื่อนำชื่อของดั่งกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างดั่งกล่าว ให้ความความปลอดภัยและทันสมัยต่อไป

## 2. ตัวอย่างทดสอบและการติดตั้ง

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นส่วนหน้าตัดรูปรางน้ำ ซึ่งถูกผลิตโดยกระบวนการผลิตพอลิพรูซ

ชั่น (pultrusion process) จาก E-glass fiber และ polyester resin โดยถูกนำมาประกอบเป็นหน้าตัดรูปรางน้ำคู่โดยใช้เหล็กกล่องเป็นตัวคั่น (spacer) และยึดเข้ากันด้วยสลักเกลียวผ่านจุดศูนย์กลางของเหล็กกล่อง สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกศึกษาโดย หวังแก้ว บุญสวน และคณะ [12] โดยมีค่าเฉลี่ยของ  $\sigma_{uL}$  และ  $E$  เท่ากับ 181.1 MPa และ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

Dimension (mm×mm×mm)	$d$ (mm)	$b_r$ (mm)	$t_f$ (mm)	$r_w$ (mm)	$h$ (mm)	$e$ (mm)	$x_g$ (mm)
$d \times b \times t$							
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)	Single C-section				Double C-section				
	Area (mm <sup>2</sup> )	$I_{y=yz}$ (10 <sup>4</sup> ) (mm <sup>4</sup> )	$I_{x=xy}$ (10 <sup>6</sup> ) (mm <sup>4</sup> )	$r_{mn}$ (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	$I_{x=xx}$ (10 <sup>6</sup> ) (mm <sup>4</sup> )	$I_{y=yy}$ (10 <sup>6</sup> ) (mm <sup>4</sup> )	$r_{mn}$ (mm)	$S$ (mm)
$d \times b \times t$									
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



ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1):

34.2 GPa ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิง  
ตัด  $E_s$  ของหน้าตัดเท่ากับ 25.2 GPa ดังที่แสดง  
รายละเอียดและสมบัติของทั้ง 3 หน้าตัดในตารางที่ 1  
และตารางที่ 2 ตามลำดับ

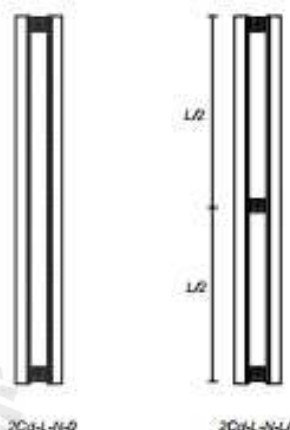
ตัวอย่างทดสอบมีความยาวอยู่ในช่วง 0.25-2.00  
m โดยมีอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio)  
บนพื้นฐานของหน้าตัดรูปร่างเดี่ยวอยู่ในช่วง 21.2  
ถึง 187.3 เนื่องจากลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง  
ทดสอบเหล่านี้ได้จากการทดสอบเป็นแบบอิสระต่อกัน  
โดยตัวอย่างทดสอบเหล่านี้ศึกษาไม่มี composite  
action เกิดขึ้น ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3

ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 57 ตัวอย่าง โดยแบ่ง  
ออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1. ตัวอย่างทดสอบที่ติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง
2. ตัวอย่างทดสอบที่ติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้างและมีจุดเชื่อมต่อที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยชื่อตัวอย่างทดสอบ ความยาว แฟคเตอร์ความยาวประสิทธิผล และอัตราส่วนความชะลูด ชื่อตัวอย่างทดสอบถูกแสดงอยู่ในรูป  $2Cd-L-N-S^*$  เมื่อ  $c$  คือความลึกของหน้าตัดรูปร่างเดี่ยว  $L$  คือความยาวของตัวอย่างทดสอบ  $N$  คือ จำนวนของจุดเชื่อมต่อ และ  $S$  คือระยะที่มี

การติดจุดเชื่อมต่อระหว่างกลาง ตัวอย่างเช่น 2C76-1.0-3-L/2 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดความลึกของหน้าตัดรูปร่างเดี่ยว 76 mm ความยาว 1.0 m ติดตั้งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดโดยจุดเชื่อมต่อระหว่างหัวและท้ายอยู่ที่ระยะ  $L/2$  รูปที่ 2 แสดงแผนภาพตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2



(a) ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 (b) ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

รูปที่ 2 แผนภาพตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2

ก่อนการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดค่า  $e$  หรือ initial out-of straightness โดยเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM D3917 [13] พบว่า ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่า  $e$  ต่ำกว่า  $L/240$  ตาม

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 38(1)

ข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังนั้นจึงไม่พิจารณาของการโก่งตัวเริ่มต้น (initial crookedness) ค่าค่าแรงสูงสุดที่วัดได้

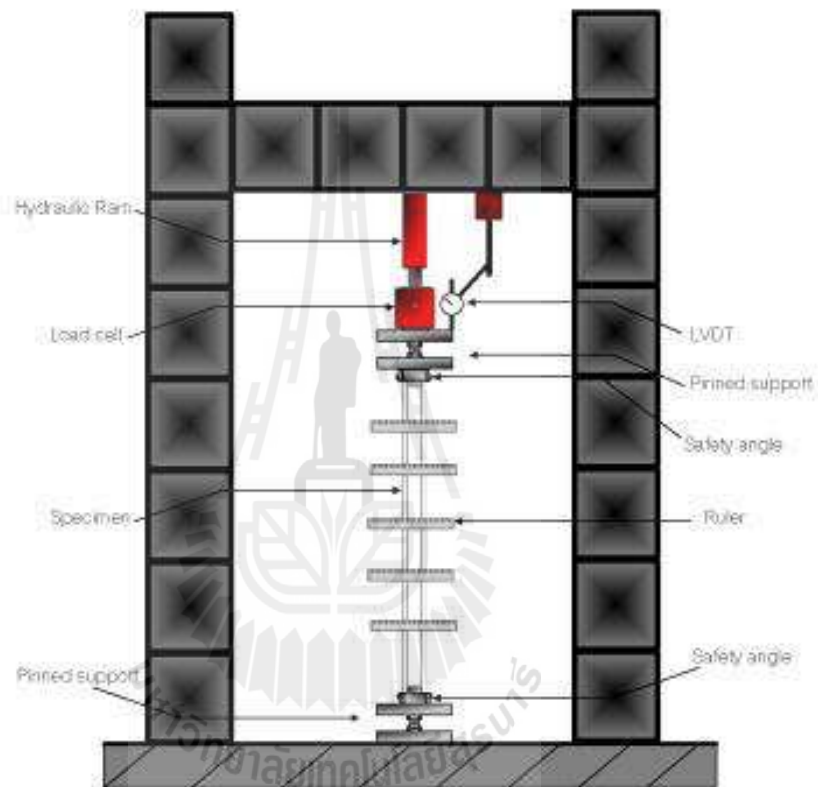
ตารางที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Column number	L (mm)	K Factor	KL/r
2C76-1.0-2-0	1000	0.9	149.5
2C76-1.0-3-L/2	1000	1.0	166.1
2C76-0.7-2-0	700	1.0	93.3
2C76-0.4-2-0	400	1.0	53.1
2C76-0.25-2-0	250	1.0	33.2
2C102-1.5-2-0	1500	0.9	168.5
2C102-1.5-3-L/2	1500	1.0	187.3
2C102-1.0-2-0	1000	0.9	112.4
2C102-1.0-3-L/2	1000	1.0	124.8
2C102-0.7-2-0	700	1.0	87.4
2C102-0.4-2-0	400	1.0	49.9
2C102-0.25-2-0	250	1.0	31.2
2C152-2.0-2-0	2000	0.9	152.8
2C152-2.0-3-L/2	2000	1.0	169.8
2C152-1.5-2-0	1500	0.9	114.6
2C152-1.5-3-L/2	1500	1.0	127.3
2C152-0.7-2-0	700	1.0	59.4
2C152-0.4-2-0	400	1.0	33.9
2C152-0.25-2-0	250	1.0	21.2

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ โดยจุดรองรับที่ปลายทั้งสองข้างเป็นหมุด (pin) ที่หมุนได้ รอบแกนของหน้าตัดวงน้ำคู่ และหลังจากติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับให้ตรงตามแนวตั้ง แล้วปลายตัวอย่างทดสอบจะถูกยึดไว้ด้วยเหล็กฉากทั้งสี่ด้าน เพื่อป้องกันตัวอย่างทดสอบเคลื่อนออกจากจุดรองรับในกรณีของการโก่งคดทางด้านข้าง ในกรณีเลายาว จะทำการติดตั้งไม้บรรทัดจำนวน 5 ชิ้นที่ระยะ  $L/6$  เพื่อบันทึกการโก่งตัวทางด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้น ให้แรงกระทำในแนวแกนกับตัวอย่างทดสอบโดยใช้ระบบไฮดรอลิกที่ติดตั้งไว้ปลายด้านบนของตัวอย่างทดสอบ แรงกระทำ  $P$  ดังกล่าว จะถูกถ่ายผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (bearing plate) กระทำค้ำหน้าตัดรูปวงน้ำคู่เดียวโดยตรงหน้าตัดละ  $P/2$  ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อจำลองลักษณะการใช้งานจริงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัดและมักพบในโครงข้อหมุน และระบบยึดรั้ง จากนั้น ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนถูกวัดจาก Linear Variable Differential Transducer (LVDT) ซึ่งติดตั้งที่ปลายด้านบนของตัวอย่างทดสอบ แรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนถูกบันทึกโดย MW100 YOKOGAWA data acquisition unit สำหรับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างบันทึกจากการอ่านค่าบนไม้บรรทัดที่ติดตั้งไว้บนตัวอย่างทดสอบโดยใช้กล้องวัดมุม Theodolite อย่างไรก็ตาม ก่อนการทดสอบตัวอย่างทดสอบจะถูกให้แรงกระทำก่อนเพื่อเป็นการ

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1)

เตรียมความพร้อมของตัวอย่างทดสอบและชุดรองรับ น้อยมากหรือไม่เพิ่มขึ้นเลย ในขณะที่มีการเปลี่ยน  
สุดท้าย ตัวอย่างทดสอบจะถูกทดสอบอย่างต่อเนื่องจน ตำแหน่งด้านข้างมีค่าหนึ่งซีเมนต์  
ไม่สามารถรับแรงได้ โดยสังเกตจากแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น

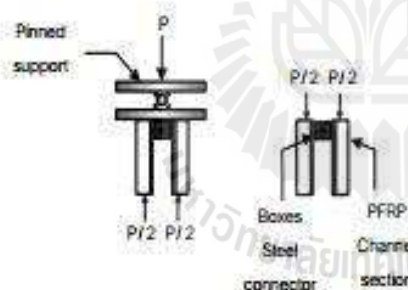


รูปที่ 3 ภาพกราฟิกแสดงรายละเอียดการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปวงรี

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1):



รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูป  
วงรีภายใต้แรงอัดในแนวแกน



รูปที่ 5 แรงกระทำด้ายผ่านแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน  
กระทำต่อหน้าตัดรูปวงรีโดยตรง

### 3. ผลและวิจารณ์การทดสอบ

#### 3.1 พฤติกรรมและลักษณะการวิบัติ

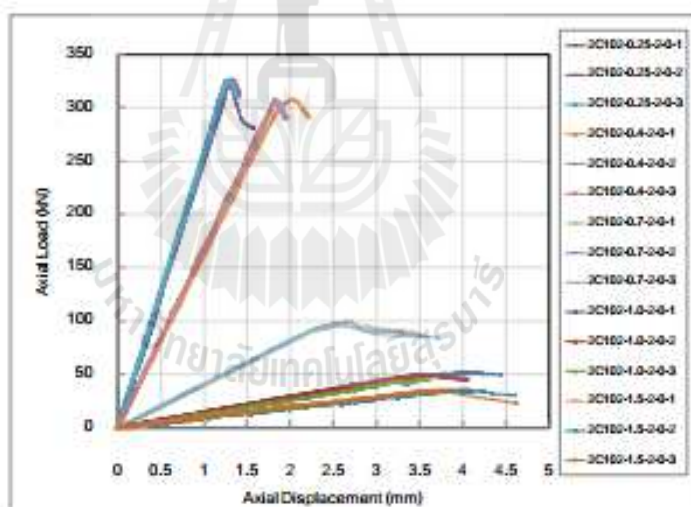
รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่ติดจุดเชื่อมต่อที่ปลายทั้งสองข้าง ดังที่แสดงในรูป 2a โดยพบว่า พฤติกรรมรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ตัวอย่างทดสอบแบบสั้นและแบบยาว โดยตัวอย่างทดสอบแบบสั้นมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดวิบัติ โดยการวิบัติเกิดจากการแตกออกบริเวณแฉก (web crushing) ของหน้าตัดรูปวงรีน้ำเต้าดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเป็นการวิบัติที่เกิดจากการวิบัติของวัสดุ (material failure) จากนั้นความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนตัวอย่างทดสอบแบบยาวมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของแรงโก่งเคาะวิกฤติ (critical buckling load) จากนั้นจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงอย่างรวดเร็วและเป็นศูนย์ที่แรงโก่งเคาะวิกฤติ จากนั้น เมื่อผ่านแรงโก่งเคาะวิกฤติแล้ว แรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบจะมีค่าคงที่ และสุดท้ายความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างทดสอบจะค่อย ๆ ลดลง

รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบแบบยาว จากรูป พบว่า ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ individual

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1):

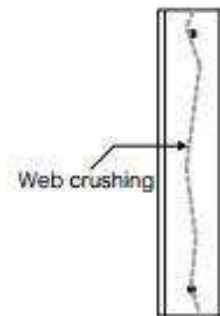
opposite buckling เนื่องจากการขาดการยึดครั้งที่  
เพียงพอ ดังนั้น เพื่อปรับลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง  
ทดสอบแบบยาวให้เป็นแบบ individual parallel  
buckling ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาตัวอย่างทดสอบโดย  
การติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่าง  
ทดสอบยาว ดังที่แสดงในรูป 2b โดยจากการทดสอบ  
พบว่าลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ  
individual parallel buckling ดังแสดงในรูปที่ 9  
อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการรับแรงอัดของตัวอย่าง  
ทดสอบยาวของทั้งสองกลุ่มมีลักษณะที่เหมือนกัน  
โดยแรงโก่งเคาะวิกฤติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 มี  
ค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ดังแสดงใน

ตารางที่ 4 เนื่องจากระยะระหว่างจุดเชื่อมต่อมีค่ามาก  
ทำให้จุดเชื่อมต่อที่ติดตั้งเพิ่มไม่สามารถถ่ายเทแรง  
เชื่อมระหว่างหน้าตัดตรงนำเดี่ยวและก่อให้เกิด  
composite action อย่างสมบูรณ์ได้ นอกจากนี้จาก  
การทบทวนวรรณกรรมของ Lue et al. [3] พบว่า เสา  
เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปวงรีภายใต้แรงอัดมี  
พฤติกรรมแบบคอมโพสิต (composite) ได้นั้น หน้า  
ตัดทั้งสองต้องได้รับการยึดแน่นหนาเพียงพอ เช่น การ  
เชื่อมไฟฟ้าหรือการใช้สลักเกลียวที่มีระยะห่างระหว่าง  
จุดเชื่อมต่อน้อยมาก ซึ่งหน้าตัดของชิ้นส่วน FRP ใน  
ลักษณะนี้จะทำได้ยากและไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ



รูปที่ 6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1)-



รูปที่ 7 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติโดยวัสดุของตัวอย่างทดสอบเสาแบบสั้น

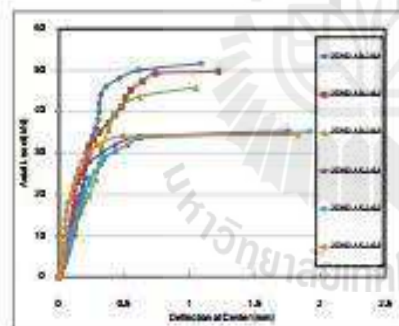


รูปที่ 8 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบยาวแบบ individual opposite buckling

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1):



รูปที่ 9 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบยาวแบบ individual parallel buckling



รูปที่ 10 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของแรงอัดและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งทางด้านข้างที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบแบบยาว

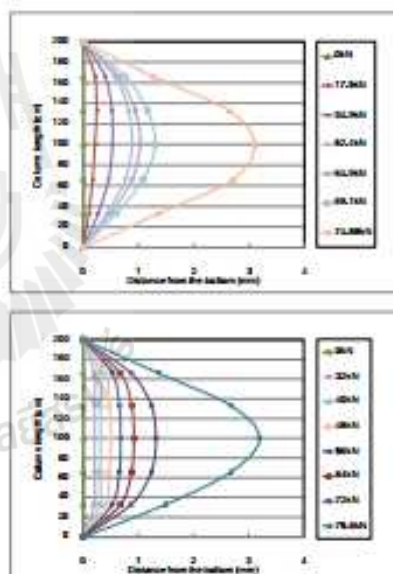
รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบแบบยาว จากรูปพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของแรงโก่งเคาะวิกฤติ จากนั้น ความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบใช้เชิงเส้นในรูป geometrical nonlinear จนกระทั่งมีความชันประมาณศูนย์ ซึ่งแสดงถึงการวิบัติโดยการโก่งเคาะ

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1)

รูปที่ 11 แสดงตัวอย่างแผนภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบแบบยาว ภายใต้แรงอัดในแนวแกนต่าง ๆ ของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 จากรูป พบว่า ลักษณะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 กลุ่มมีลักษณะโค้งเคาะแบบสมมาตรรอบกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบ และเมื่อแรงอัดในแนวแกนที่มีค่าน้อย ค่าการโก่งตัวทางด้านข้างมีค่าน้อยตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อแรงอัดในแนวแกนเพิ่มขึ้นถึงแรงโก่งเคาะวิกฤติ ค่าการโก่งตัวทางด้านข้างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากลักษณะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ซึ่งมีลักษณะการโก่งตัวแบบ individual opposite buckling แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้จุดรองรับแบบยึดแน่นบางส่วน (partially fixed) ดังนั้น ค่า  $K$  สำหรับการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปรางน้ำในกรณีนี้ควรมีค่าน้อยกว่า 1.0 ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการทางทฤษฎี พบว่า จากลักษณะการโก่งตัวและการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบและเพื่อความปลอดภัยต่อการนำค่าดังกล่าวไปใช้คำนวณออกแบบ ค่า  $K$  สำหรับจุดรองรับของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 มีค่าประมาณ 0.9 ซึ่งแตกต่างจากลักษณะการโก่งตัวของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 ที่มีลักษณะการโก่งตัวแบบ individual parallel buckling มีลักษณะการโก่งตัวแบบตัวอย่างทดสอบที่ใช้จุด

รองรับแบบหลุด ดังนั้นค่า  $K$  ของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 ควรมีค่าประมาณ 1.0 จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการทางทฤษฎี พบว่า ค่า  $K$  มีค่าน้อยกว่า 1.0 เนื่องจากการที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบไม่เกิด composite action และการถ่ายเทแรงเฉือนที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ทำให้หน้าตัดดังกล่าวมีค่า moment of inertia ไม่คงที่ตลอดทั้งหน้าตัด อย่างไรก็ตาม จากลักษณะการโก่งตัวและการเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบรวมถึงเพื่อความปลอดภัยต่อการนำค่าดังกล่าวไปใช้คำนวณออกแบบ ค่า  $K$  ของจุดรองรับในตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 ควรมีค่าเท่ากับ 1.0



รูปที่ 11 ตัวอย่างลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างทดสอบแบบยาวในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2

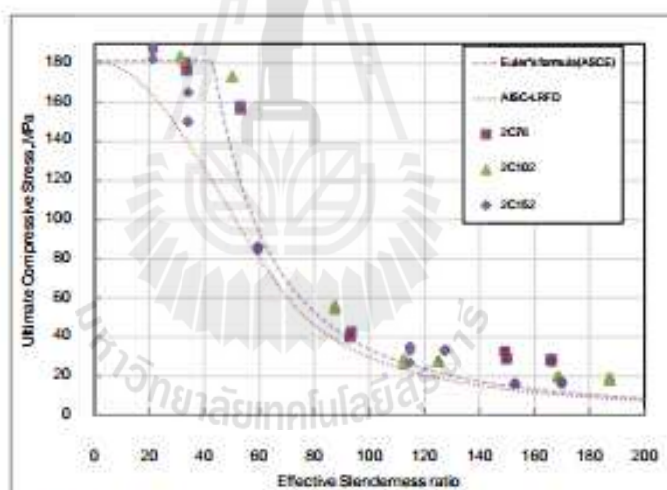


ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1)

### 3.1.2 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD

รูปที่ 12 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดในแนวแกนและอัตราส่วนความระหัดประสิทธิผล ( $KL/r$ ) ของตัวอย่างทดสอบที่พิจารณาจากหน้าตัดรูปร่างนี้เปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ AISC-LRFD และ ASCE ซึ่งสมการออกแบบทั้งสองให้ค่าจุดเปลี่ยนของความระหัดประหัดของตัวอย่างทดสอบแบบสั้นและแบบยาวเท่ากับ 61 และ 42 ตามลำดับ จากรูป พบว่า สำหรับตัวอย่างทดสอบแบบสั้น ( $KL/r \leq 61$ ) เส้นกราฟของสมการออกแบบ

ของ AISC-LRFD จะอยู่ใต้ผลการทดสอบค่อนข้างมากโดยมีสัดส่วนของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตามสมการอยู่ในช่วง 1.04-2.35 ซึ่งแสดงว่าสมการดังกล่าวมีความปลอดภัยในการใช้งานค่อนข้างสูง ในกรณีของตัวอย่างทดสอบแบบยาว ( $KL/r > 61$ ) เส้นกราฟของสมการออกแบบของ AISC-LRFD จะอยู่ใต้ผลการทดสอบโดยมีสัดส่วนของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตามสมการอยู่ในช่วง 1.01-2.62 ซึ่งแสดงว่าสมการดังกล่าวมีความปลอดภัยค่อนข้างสูงต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงโก่งเคาะวิกฤติ



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดประหัดและอัตราส่วนความระหัดประหัด

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1)

ในขณะที่สมการออกแบบของ ASCE พบว่า สำหรับตัวอย่างทดสอบแบบสั้น ( $KL/r \leq 42$ ) มีสัดส่วนของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตามสมการอยู่ในช่วง 0.88-1.03 และตัวอย่างทดสอบแบบยาว ( $KL/r > 42$ ) มีสัดส่วนของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ต่อหน่วยแรงตามสมการอยู่ในช่วง 0.88-2.30 มีผลการทดสอบบางส่วนที่ต่ำกว่าเส้นกราฟ ซึ่งน่าจะเกิดจากการความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ (material variation) และสำหรับตัวอย่างทดสอบแบบสั้นการที่ตัวอย่างทดสอบมีความยาวเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ใช้หาค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุ อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวมีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงโก่งเคาะวิกฤติ แต่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าสมการของ AISC-LRFD

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ โดยแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือ individual opposite buckling (IO), individual parallel buckling (IP), วิบัติโดยการแตกบริเวณเอว และตามด้วย individual opposite buckling (crushing and following with individual opposite buckling) (CIP) และวิบัติโดยการแตกบริเวณเอว (crushing)(C) จากตาราง พบว่า เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดเดียวกัน หน่วยแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความระมัดระวังลดลง นอกจากนี้ การติดตั้งจุดเชื่อมต่อบริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อ

แรงโก่งเคาะวิกฤติเนื่องจากระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อไม่เพียงพอสำหรับการถ่ายเทแรงเฉือนที่เกิดขึ้นส่งผลให้หน้าตัดไม่เกิด composite action ดังนั้น แรงโก่งเคาะวิกฤติที่ได้จากการทดสอบเป็นแรงโก่งเคาะวิกฤติของชิ้นส่วน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำเต๋ว อย่างไรก็ตาม การติดตั้งจุดเชื่อมต่อเพิ่มเติมที่บริเวณกึ่งกลางทำให้ลักษณะการวิบัติเปลี่ยนไปอย่างมาก

#### 4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้าง PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำเต๋วภายใต้แรงอัดในแนวแกนได้ผลสรุปที่สำคัญดังนี้

1. พฤติกรรมการรับแรงในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ ตัวอย่างทดสอบแบบสั้น ซึ่งมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยมีลักษณะการวิบัติเนื่องจากวัสดุ และตัวอย่างทดสอบแบบยาว ซึ่งมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของแรงโก่งเคาะวิกฤติ จากนั้นพฤติกรรมจะคงที่และค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้น ลักษณะการวิบัติเป็นแบบการโก่งเคาะของหน้าตัดรูปร่างน้ำเต๋วในรูปแบบ individual opposite buckling
2. การติดตั้งจุดเชื่อมต่ออย่างง่ายเข้ากับช่วงตัวอย่างทดสอบเพื่อการค้ำยันชิ้นส่วนประกอบของตัวอย่างทดสอบ พบว่าตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติเปลี่ยนไปอย่างมากในรูปแบบ individual parallel

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1):

buckling แต่ไม่ส่งผลให้รับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นความสามารถในการรับแรง  
เนื่องจากระยะระหว่างจุดเชื่อมต้อมีค่ามากจึงทำ จึงขึ้นอยู่กับชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปวงรีนี้ด้วย  
ให้ผลตรงการถ่ายแรงเฉือนและ composite action

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

Column Number	$P_{d,avg}$ (kN)	$\sigma_{d,avg}$ (MPa)	$P_{cr,FRP}$ (kN)	$P_{cr,ASCR}$ (kN)	$\lambda$ factor	$\frac{P_{d,FRP}}{P_{cr,FRP}}$	$\frac{P_{d,FRP}}{P_{cr,ASCR}}$	Mode of failure
2C76-1.0-2-0	39.2	30.24	13.22	15.08	0.64	2.29	2.01	IO
2C76-1.0-3-L/2	36.37	28.06	10.71	12.20	0.66	2.62	2.30	IP
2C76-0.7-2-0	53.37	41.18	21.86	24.92	0.78	1.88	1.65	CIP
2C76-0.4-2-0	204.03	157.43	66.94	76.33	0.70	2.35	2.06	C
2C76-0.25-2-0	231.14	178.35	122.88	181.13	1.05	1.45	0.98	C
2C102-1.5-2-0	34.93	19.67	10.41	11.87	0.70	1.89	1.66	IO
2C102-1.5-3-L/2	32.76	18.45	8.43	9.62	0.72	2.19	1.92	IP
2C102-1.0-2-0	49.01	27.59	23.42	26.71	0.89	1.18	1.03	IO
2C102-1.0-3-L/2	40.13	22.59	18.97	21.63	0.98	1.19	1.04	IP
2C102-0.7-2-0	97.50	54.89	38.72	44.50	0.90	1.42	1.23	CIP
2C102-0.4-2-0	307.25	173.00	103.39	135.21	0.88	1.67	1.28	C
2C102-0.25-2-0	325.68	183.38	145.50	181.13	1.37	1.26	1.01	C
2C152-2.0-2-0	70.40	16.15	12.67	14.45	0.85	1.27	1.12	IO
2C152-2.0-3-L/2	71.92	16.49	10.27	11.71	0.84	1.01	0.88	IP
2C152-1.5-2-0	142.00	32.37	22.53	25.89	0.80	1.44	1.26	IO
2C152-1.5-3-L/2	143.68	32.95	18.25	20.81	0.79	1.14	1.00	IP
2C152-0.7-2-0	373.07	85.57	81.93	95.55	1.06	1.04	0.89	CIP
2C152-0.4-2-0	676.57	155.18	139.80	181.13	1.37	1.11	0.86	C
2C152-0.25-2-0	809.63	185.69	163.70	181.13	2.01	1.13	1.03	C

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1)

3. ลักษณะการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบที่ระยะการโก่งตัวสูงสุดมีลักษณะการโก่งตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า  $K$  ของตัวอย่างทดสอบจึงแปรเปลี่ยนตามลักษณะการวิบัติ โดยค่า  $K$  ของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ควรมีค่าประมาณเท่ากับ 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ

4. จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบของ AISC-LRFD และ ASCE พบว่า สมการของ AISC-LRFD มีผลพลอยข้อจางสูงต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงอัดประลัย ในขณะที่สมการของ ASCE พบว่า สมการมีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้ทำนายหน่วยแรงอัดประลัยแต่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าสมการของ AISC-LRFD อย่างไรก็ตามมีผลการทดสอบบางส่วนที่ต่ำกว่าเส้นกราฟเนื่องจากความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา และสาขาวิศวกรรมโยธาสำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ในการวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Barbero E.J., DeVivo L. 1999. Beam-column design equations for wide-flange

pultruded structural shapes. *Journal of Composites for Construction*. Volume 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*. Volume 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., Bank L.C. 2010. LRFD factors for pultruded wide-flange columns. *Journal of Structural Engineering*. Volume 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., Raftoyiannis I. 1991. Ultimate bending strength of composite beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Volume 3 Number 4: 292-306

ENGINEERING JOURNAL, 2012, 39(1):

- [8] ASCE Structural Plastic Design Manual. Reinforced Plastic Pultruded Shapes. 1984. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No. 63. ASCE. NY. ASTM Standard No. D3917. PA.
- [9] American Institute of Steel Construction, AISC. 2005. Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design. Chicago.
- [10] Lue D.M., Yen T., 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., Liu J.L. 2009. Investigation on slenderness ratios of built-up compression members. Journal of Construction Steel Research. pp. 237-248.
- [12] หวังแก้ว บุญสวน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ ลวงวน วงษ์ชวลิตกุล. (2552). พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูดที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การจัดการเขื่อนและการตัด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา. เล่มที่ 4 หน้า 1626-1632
- [13] American Society for Testing and Materials. 2011. Annual Book of ASTM Standard, Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-

## ประวัติผู้เขียน

นาย ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับประถมศึกษาและมัธยมศึกษา จากโรงเรียนปริญญญาทิพย์และโรงเรียนศรีอยุธยา ตามลำดับ จากนั้น เริ่มศึกษาระดับปริญญาตรี ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2549 หลังจากจบ การศึกษาผู้วิจัยได้เข้าทำงานที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่ง ผู้ช่วยสอนและวิจัยเป็นเวลา 2 ปี ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2552 ขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็น ผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและ วิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี และมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ดังนี้

วารสารระดับชาติ 1 บทความ

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรกมล ชำรงวุฒิ (2556). พฤติกรรมทางโครงสร้าง ของชิ้นส่วนรับแรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชั้นหน้าตัดรูปรางน้ำ. วิศวกรรม สาร ม.ข.

การประชุมวิชาการระดับชาติ 2 บทความ

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรกมล ชำรงวุฒิ (2555). AN EXPERIMENTAL STUDY ON PFRP BUILT-UP COLUMNS WITH DOUBLE C-SECTIONS UNDER AXIAL COMPRESSION. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17. โรงแรมเซ็นทาราแอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์, อุดรธานี, 9-11 พฤษภาคม 2555, หน้า STR-034. (CD-Rom Format)

ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรกมล ชำรงวุฒิ (2556). การทดสอบชิ้นส่วนรับ แรงอัดพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ. การประชุมวิชาการวิศวกรรม โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18. โรงแรมดิเอ็มเพรส, เชียงใหม่, 8-10 พฤษภาคม 2556, รหัส บทความ STR-060.